



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TRABAJO PROFESIONAL

**“INSTRUMENTACION DE UN INVERNADERO VERTICAL PARA EL
CRECIMIENTO ACELERADO DE PLANTULAS DE CAÑA DE
AZÚCAR”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

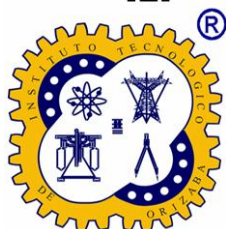
CARREÓN GONZÁLEZ ELIZABETH

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. BLANCA ESTELA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

NOVIEMBRE 2024

Orizaba, Veracruz, 19/noviembre/2024
Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación
Asunto: Autorización de Impresión
OPCION: I

C. ELIZABETH CARREÓN GONZÁLEZ
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

" INSTRUMENTACIÓN DE UN INVERNADERO VERTICAL PARA EL CRECIMIENTO ACELERADO DE PLÁNTULAS DE CAÑA DE AZÚCAR"

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®



DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OG-13-F06



C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

ELIZABETH CARREÓN GONZÁLEZ

La cual lleva el título de:

"INSTRUMENTACIÓN DE UN INVERNADERO VERTICAL PARA EL CRECIMIENTO ACELERADO DE PLÁNTULAS DE CAÑA
DE AZÚCAR"

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DRA. BLANCA ESTELA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

SECRETARIO: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

VOCAL: DR. OSCAR OSVALDO SANDOVAL GONZÁLEZ

VOCAL SUP.: DRA. ARACELI ORTIZ CELISEO



FIRMA



FIRMA



FIRMA



FIRMA

TA-09-18



CONTENIDO

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN GENERAL	9
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
JUSTIFICACIÓN.....	13
HIPOTESIS	14
OBJETIVOS	15
Objetivo General	15
Objetivos específicos.	15
CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO	16
CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE.....	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO	23
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL INVERNADERO VERTICAL	36
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
CONCLUSIONES	82
RECOMMENDATIONS.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de las variables en un invernadero vertical	23
Figura 2.2 Tecnológicas Globales: Cultivando el Futuro Sostenible.....	28
Figura 2.3 Sistema aeropónico	31
Figura 3.1 Diagrama de proceso invernadero vertical.....	38
Figura 3.2 Trazo de corte tresbolillo y plantilla	39
Figura 3.3 Diagrama de insertos	40
Figura 3.4 Realización de insertos e insertos terminados	41
Figura 3.5 Línea de aspersión	42
Figura 3.6 Contenedor de sustancia nutritiva, Perforación para conectar bomba	42
Figura 3.7 Cabezal de instrumentación,.....	43
Figura 3.8 Línea general de distribución de sustancia nutritiva	44
Figura 3.9 Soporte línea de aspersión	44
Figura 3.10 Ensamble bomba, recuperacion sustancia nutritiva,cabezal instrumentació...	45
Figura 3.11 Sustrato.....	46
Figura 3.12 Se muestran las condiciones en las que serán monitoreadas las muestras	47
Figura 3.13 Acondicionamiento de sensor de temperatura y humedad.....	48
Figura 3.14 Lectura de variables, temperatura y humedad relativa	49
Figura 3.15 Limpieza y desinfeccion con Ácido cítrico	50
Figura 3.16 Selección yemas en los nudos. Selección de esquejes	51
Figura 3.17 Clasificación por tamaños de yemas y esquejes	51
Figura 3.18 Selección de esquejes para enraizamiento	52
Figura 4.1 Perforaciones al soporte madre, Soporte madre perforado.....	53

Figura 4.2 Insertos, Colocación de insertos	54
Figura 4.3 Línea de aspercion	55
Figura 4.4 Contenedor de sustancia nutritiva llenado a $\frac{3}{4}$ partes.....	56
Figura 4.5 Contenedor de sustancia nutritiva	56
Figura 4.6 Cabezal de instrumentación	57
Figura 4.7 Línea de asperción	58
Figura 4.8 Ensamble de bomba, recuperacion de sustancias nutritiva y el cabezal de instrumentación.....	59
Figura 4.9 En funcionamiento, prueba de funcionamiento	59
Figura 4.10 Ensamble general de invernadero vertical	60
Figura 4.11 Acondicionamiento de sensor de temperatura y humedad	62
Figura 4.12 Lectura de variables, temperatura y humedad relativa	62
Figura 4.13 Interfaz gráfica en Qt Desinger	63
Figura 4.14 Interfaz gráfica en Python	64
Figura 4.15 Interfaz en Qt Desinger temperatura.....	64
Figura 4.16 Interfaz en Qt Desinger humedad	65
Figura 4.17 Interfaz en Qt Desinger pH	65
Figura 4.18 Código en Python y Qt Desinger	66
Figura 4.19 Diseño de PCB	68
Figura 4.20 Peso del sustrato	69
Figura 4.21 Inserto con sustrato	70
Figura 4.22 Inserto con sustrato y bolsa	72
Figura 4.23 Monitoreo de temperatura y humedad en el contenedor	73

Figura 4.24 Evolución del proceso de enraizamiento inicio, Dos días después	73
Figura 4.25 Muestras de berro y frijol, medición de crecimiento.....	75
Figura 4.26 Hermetización de contenedor. Contenedor cerrado	76
Figura 4.27 Inicio de raíces en yemas y plántulas	77
Figura 4.28 Yemas y plántulas listas para sembrar a luz indirecta	78
Figura 4.29 Yemas contaminadas	78
Figura 4.30 Yemas y plántulas transplantadas.....	79
Figura 4.31 Sensor Flower Care, Monitoreo con sensor Flower Care	79
Figura 4.32 Corte de planta madre de caña de azúcar, Se pone canela en polvo para evitar contaminación.....	80
Figura 4.33 Enraizamiento de planta madre, Raíces en planta madre.....	81
Figura 1 Frente de PCB en 3D. B) Reverso de PCB en 3D.....	85
Figura 2 Báscula de precisión SECA.....	85
Figura 3 Datos recolectados de peso soporte madre.....	86
Figura 4 Peso de sustratos con insertos.....	86
Figura 5 Pesando soporte madre.....	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los invernaderos verticales	27
Tabla 2.2 Ventajas de la aeroponía	29
Tabla 2.3 Desventajas de la aeroponía	30
Tabla 2.4 Requerimientos nutritivos de la caña de azúcar.	33
Tabla 4.1 Datos de variación de sustrato húmedo	69
Tabla 4.2 Datos de variación de sustrato húmedo con inserto	70
Tabla 4.3 Datos de variación de sustrato húmedo con tubo y bolsa.	71
Tabla 4.4 Tabla de crecimiento del frijol	74
Tabla 4.5 Tabla de crecimiento de berro.....	75

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 4.1 Variación peso con sustrato húmedo vs tiempo.....	69
Gráfica 4.2 Variación tiempo-peso con sustrato húmedo con inserto.....	70
Gráfica 4.3 Variación tiempo-peso con sustrato húmedo con inserto y bolsa.....	72

RESUMEN

En la agricultura actual se enfrentan diversos problemas relacionados con el suelo, como el uso excesivo de espacios debido a la sobrepoblación, malas prácticas agrícolas, falta de rotación de cultivos, y el uso intensivo de agua, fertilizantes y plaguicidas, entre otros desafíos. Estas prácticas insostenibles agotan la materia orgánica del suelo comprometiendo su capacidad para degradar contaminantes orgánicos y aumentando la contaminación ambiental. En los últimos años, los sustratos sin suelo y los medios líquidos han ganado popularidad sobre el cultivo tradicional en suelo, debido principalmente al control que ofrecen en la reducción de enfermedades transmitidas por el suelo, gestión precisa de la nutrición mineral y mejor control sobre la calidad de los cultivos. El objetivo de este proyecto es implementar un invernadero vertical como alternativa al cultivo tradicional, utilizando el método aeropónico para acelerar el crecimiento de las plantas y optimizar el uso del espacio y los nutrientes. Este sistema incluirá la automatización de un invernadero vertical diseñado específicamente para el crecimiento rápido de plántulas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

Palabras Clave: Caña de azúcar, esquejes, plántulas.

ABSTRACT

In current agriculture, soil problems are occurring such as the use of planting spaces due to overpopulation, poor agricultural practices, lack of crop rotation, excessive use of water, climatic conditions, and the use of fertilizers and pesticides, to name a few. Unsustainable agricultural practices deplete soil organic matter, compromising its ability to degrade organic pollutants and increasing the risk of pollutants being released into the environment. In recent years, soilless substrates and liquid media have become more popular than soil growing, considered the standard growing method. Because? It comes down to having control: control to reduce soil-borne diseases; control of mineral nutrition, and more control over the quality of the fruits. The realization of this project is to implement a vertical greenhouse as an alternative to cultivation through an aeroponic method that allows to acceleration of the growth of plants, as well as reduces the space it could occupy in the soil and makes the most of the nutrients. This system would have the automation of a vertical greenhouse for the accelerated growth of sugarcane seedlings (*Saccharum officinarum*).

Keywords: sugar cane, cuttings, seedlings.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una gramínea de gran importancia, utilizada principalmente en la producción de caña de azúcar, bioetanol y otros productos derivados [1]. El cultivo de la caña de azúcar involucra varias etapas, siendo el amacollamiento o ahijamiento la más crítica. Esta fase comienza entre los 35 y 40 días después de la plantación y se caracteriza por la aparición de múltiples tallos a partir de las articulaciones nodales en la base de los tallos primarios, denominados plántulas. El proceso de enraizamiento de estas plántulas puede ser lento y está influenciado por diversas condiciones ambientales que afectan su crecimiento y desarrollo [2]. Una alternativa en esta etapa son los invernaderos verticales que ofrecen un entorno controlado que puede facilitar el enraizamiento de las plántulas, permitiendo un control más óptimo de las condiciones ambientales [3]. La instrumentación electrónica en estos invernaderos, que incluye sensores para monitorear y ajustar variables como temperatura, humedad, luz y nutrientes, presenta una oportunidad significativa para acelerar el crecimiento de las plántulas de caña de azúcar [4]. La capacidad de ajustar y mantener condiciones ambientales óptimas es crucial para el desarrollo saludable y rápido de las plantas. Una adecuada instrumentación en los invernaderos verticales no solo permite un monitoreo continuo, sino que también facilita la automatización de tareas críticas, como el riego y la fertilización, lo que mejora la eficiencia y reduce los costos de producción [5]. Un invernadero equipado con instrumentación electrónica, diseñado específicamente para esta etapa de cultivo. En función del objetivo, se ha empleado una estrategia de trabajo que integra la electrónica necesaria para monitorear las variables clave del proceso, tales como temperatura, humedad y pH. El trabajo se organiza en cuatro capítulos. El primer capítulo proporciona una revisión de la literatura sobre los avances recientes en la agricultura vertical y las tecnologías de instrumentación para invernaderos. El segundo capítulo detalla los materiales y métodos utilizados, incluyendo el diseño del sistema de instrumentación y las técnicas aeropónicas aplicadas. El tercer capítulo se enfoca en la implementación del sistema y los experimentos realizados para su evaluación. Finalmente, el cuarto capítulo discute los resultados obtenidos y ofrece conclusiones sobre la viabilidad y eficiencia del sistema propuesto. El objetivo es desarrollar una solución para el enraizamiento de plántulas de caña de azúcar mediante la integración de tecnología electrónica en un entorno de

invernadero vertical, esperando que los hallazgos contribuyan a optimizar la eficiencia en la producción de caña de azúcar.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La necesidad de instrumentar un invernadero vertical para acelerar el crecimiento de plántulas de caña de azúcar es un aspecto determinante en la agricultura moderna. La industria azucarera enfrenta el desafío de optimizar sus procesos de producción para satisfacer la creciente demanda de este cultivo [6]. Sin embargo, hay una notable falta de sistemas eficientes que permitan el cultivo acelerado de plántulas de caña de azúcar en un entorno controlado y vertical [7]. Esta carencia de tecnologías especializadas limita la capacidad de los productores para obtener cosechas de alta calidad en tiempos reducidos, afectando directamente la rentabilidad y competitividad del sector [8]. Además, las condiciones climáticas cambiantes y la presencia de plagas representan desafíos adicionales que dificultan el cultivo óptimo de la caña de azúcar [9]. Estas adversidades incrementan la vulnerabilidad de las plántulas a factores externos que pueden comprometer su desarrollo y rendimiento [10]. La implementación de un invernadero vertical adecuadamente instrumentado podría ofrecer una solución viable a estos problemas. Al proporcionar un entorno controlado y optimizado, se pueden regular variables críticas como la temperatura, la humedad, el pH, y la luz, favoreciendo un crecimiento más rápido y saludable de las plántulas [11]. El control de estas variables también permitiría una reducción en el uso de recursos como agua y fertilizantes, contribuyendo así a una agricultura más sostenible y rentable [12]. A pesar de los avances en la instrumentación de invernaderos verticales, aún se necesita investigación específica que aborde el crecimiento acelerado de plántulas de caña de azúcar en estos sistemas. La optimización de la tecnología y el diseño de invernaderos verticales para este cultivo en particular puede ofrecer beneficios significativos en términos de aumento de la producción, reducción de los tiempos de crecimiento y mejora de calidad del producto final [13]. Investigaciones previas han explorado el uso de técnicas como el cultivo aeropónico y la instrumentación, pero aún queda mucho por descubrir en este campo [14]. Esta tesis se centra en abordar estas brechas de conocimiento mediante el diseño y la evaluación de un invernadero vertical específicamente orientado al enraizamiento acelerado de plántulas de caña de azúcar, con el objetivo de mejorar la eficiencia y productividad del proceso de cultivo. Para lograr esto, se diseñará e implementará un sistema electrónico y se evaluará la germinación de plántulas en un entorno aeropónico. Además, se profundizará en

el conocimiento de la dinámica de producción, se manufacturará una base de soporte, y se realizarán ensayos experimentales para validar el funcionamiento del sistema.

JUSTIFICACIÓN

En el actual panorama agrícola y de seguridad alimentaria, es fundamental desarrollar métodos sostenibles y eficientes para el cultivo de las plantas. Los invernaderos verticales ofrecen importantes ventajas, como el control riguroso de las condiciones ambientales y la optimización del crecimiento vegetal. No obstante, para maximizar estos beneficios, es esencial implementar sistemas de instrumentación que permitan un monitoreo y regulación precisa de los factores clave. Este proyecto se enfocó en el diseño e implementación de un sistema de instrumentación en un invernadero vertical, específicamente orientado al enraizamiento acelerado de plántulas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). A través de la integración de sensores, el proyecto buscó monitorizar y ajustar variables críticas como la temperatura, la humedad y el pH, facilitando así un desarrollo rápido y saludable de las plántulas. La elección de un invernadero vertical se justifica por su eficiencia en el uso del espacio y su capacidad para aprovechar la luz solar de manera óptima. Esta estructura permitió integrar la electrónica necesaria para el monitoreo y el sistema de aeroponía, mientras que su disposición vertical maximizó el uso del espacio disponible. Este enfoque permitió la implementación efectiva de un sistema de instrumentación electrónica, alineado con los objetivos de diseñar, desarrollar y evaluar el sistema para el cultivo acelerado de plántulas de caña de azúcar. El proyecto no solo buscó mejorar la eficiencia y la productividad en la producción agrícola, sino también contribuir al avance científico y a la seguridad alimentaria mediante una agricultura más sostenible y rentable.

HIPOTESIS

Mediante la integración de un grupo de unidades funcionales, es posible obtener un invernadero vertical que cuente con los sistemas electrónicos necesarios para monitorear sus variables básicas (temperatura, humedad y pH) tomando en cuenta las necesidades ambientales de crecimiento acelerado para plántulas de caña de azúcar.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar un invernadero vertical y los sistemas electrónicos necesarios que permitan monitorear el comportamiento de las variables ambientales del sistema, tomando en cuenta las necesidades propias para el enraizamiento de plántulas de caña de azúcar.

Objetivos específicos.

1. Diseñar, manufacturar e integrar las unidades de proceso necesarias para obtener un invernadero vertical que funcione con base a la técnica de aeroponía y con la capacidad para enraizar hasta 270 especímenes por lote.
2. Desarrollar un conjunto de experimentos de enraizamiento con al menos tres especies vegetales diferentes para establecer experimentalmente los rangos de monitoreo de las variables del proceso y otras restricciones mecánicas que permitan instrumentar electrónicamente el invernadero.
3. Desarrollar los sistemas electrónicos necesarios para monitorear las variables de temperatura, pH y humedad tomando en cuenta las necesidades que aplican para el enraizamiento de plántulas de caña de azúcar.

CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO

La incorporación de un invernadero vertical con una propuesta de instrumentación electrónica para el monitoreo del crecimiento acelerado de plántulas de caña de azúcar, aporta de manera significativa al avance de la ciencia agrícola. Entre sus principales beneficios se encuentran la maximización del uso del espacio, la optimización de recursos, la promoción de un crecimiento más rápido y una mayor producción, la integración de tecnologías, la resiliencia frente a las condiciones ambientales cambiantes, el impulso a la investigación en agricultura sostenible, y el potencial para la diversificación de cultivos en entornos verticales. Este enfoque innovador no solo mejora la eficiencia en la agricultura, sino que también abre nuevas oportunidades de investigación en la intersección entre la tecnología y la ciencia agrícola. Además, al proporcionar soluciones sostenibles y adaptables, el invernadero vertical para la caña de azúcar se presenta como un modelo con el potencial de influir positivamente en la evolución de sistemas agrícolas más eficientes y resilientes.

CAPITULO 1. ESTADO DEL ARTE

La instrumentación en invernaderos verticales desempeña un papel crucial en la maximización del crecimiento de las plantas y en la mejora de la eficiencia en el uso de recursos. Estas tecnologías integran sistemas de monitoreo avanzados que permiten gestionar de manera eficiente diversas variables ambientales, optimizando los procesos de producción. Según un estudio de Agricultura Global (2021), el rápido avance de la ciencia y la tecnología ha brindado nuevas oportunidades para mejorar las prácticas agrícolas [15]. Otro estudio del Blog de Agricultura menciona que la agricultura vertical ha ganado gran relevancia en el mundo actual debido a su capacidad para enfrentar los desafíos de la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. Esta práctica aprovecha tecnologías avanzadas para producir cultivos en capas verticales, esto maximiza el uso del espacio y reduce la huella de carbono. Los invernaderos verticales, en particular, representan un ejemplo claro de esta tendencia, ya que combinan el uso eficiente del espacio con la implementación de sistemas tecnológicos que permiten el monitoreo constante de variables clave tales como: la temperatura, la humedad y el pH, esenciales para mantener un entorno óptimo para el cultivo [16]. La pandemia de COVID-19 evidenció la necesidad de reducir la dependencia de productos importados, dado que solo el 1% de la superficie terrestre está destinado a la producción de alimentos. Para mitigar esta vulnerabilidad, es esencial apostar por la agricultura vertical urbana. Un estudio en 2017 del Instituto de Tecnología de Massachusetts, MIT Technology Review destaca el potencial de los contenedores apilados, como los observados en un barrio de Singapur [17]. En una visita al lugar, el investigador Ankesh Shahra constató el gran potencial en esta forma de cultivo. En el interior de estos contenedores, diferentes bandejas de plástico estaban dispuestas en estantes industriales de metal, que se elevaban desde el suelo de hormigón hasta el techo de acero corrugado. En cada bandeja, pequeñas plantas verdes tenían sus raíces sumergidas en una solución acuosa, mientras sus hojas se orientaban hacia el resplandor rosado de las luces LED. Este enfoque de cultivo vertical no solo optimiza el espacio urbano, sino que también permite un uso eficiente de los recursos, al incorporar sistemas de monitoreo para variables críticas como la temperatura y la humedad, manteniendo un ambiente controlado y eficiente [18]. Para el diseño del invernadero de este proyecto, se seleccionó una estructura cilíndrica que permita el enraizamiento de 270 plantas

dispuestas en un arreglo tipo tresbolillo. Esta configuración optimiza el uso del espacio vertical, asegurando que cada planta reciba las condiciones adecuadas para su crecimiento. El diseño incluye un sistema de monitoreo que recoge datos en tiempo real sobre variables clave como la humedad, la temperatura y el pH. Estos datos se utilizan para ajustar automáticamente el sistema de aspersión, garantizando una distribución uniforme de los nutrientes y minimizando el riesgo de encharcamiento. La construcción en PVC garantiza durabilidad y resistencia, especialmente en ambientes húmedos. Este material fue seleccionado por su capacidad aislante y ensamblado fácil, lo que facilita la personalización del diseño cilíndrico y permite su adaptación a las necesidades del cultivo. En este sentido, el estudio de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2018), titulado *El futuro de la alimentación y la agricultura: vías alternativas hacia el 2050*, subraya la efectividad de la agricultura vertical en entornos urbanos, donde el espacio es limitado, destacando la necesidad de soluciones innovadoras como el diseño propuesto [19]. En cuanto al diseño de invernaderos verticales, existen diversas tipologías, como los invernaderos tipo túnel, capilla (a dos aguas), diente de sierra, y otras variantes. Los materiales de construcción más comunes incluyen madera, PVC y acero galvanizado, mientras que las cubiertas suelen ser de polietileno, policarbonato o vidrio [20]. Los materiales seleccionados, como el PVC en este proyecto, no solo aseguran la durabilidad de la estructura, sino que también permiten una integración eficiente con los sistemas de instrumentación electrónica, esenciales para el monitoreo de las condiciones del invernadero. Estos materiales y estructuras, junto con sistema de control climático, permiten optimizar las condiciones ambientales como temperatura, humedad y pH, favoreciendo un crecimiento rápido y saludable de las plantas. Finalmente, en cuanto a las estructuras de los invernaderos verticales, su diseño y construcción dependen en gran medida del propósito para el que han sido diseñados. Un artículo de UpKeep (2020) analizó los diversos métodos de agricultura urbana, que incluyen la agricultura apoyada por la comunidad, los mercados de agricultores en las ciudades, la agricultura de interior y la agricultura vertical. Estas alternativas permiten la producción y distribución de alimentos en entornos urbanos de manera eficiente, abordando la creciente demanda de sostenibilidad alimentaria [21]. El papel de la electrónica en la agricultura vertical es fundamental, ya que a través de ella se pueden monitorear variables clave mediante sensores, como la temperatura, la humedad y el pH en un

invernadero vertical. Los sensores agrícolas han impulsado la digitalización de las explotaciones, permitiendo la detección de datos esenciales para evaluar la salud de los cultivos. Esto brinda la posibilidad de planificar intervenciones específicas y optimizar las actividades de monitoreo. El uso de sensores, como los agrometeorológicos, permite registrar una amplia gama de información relacionada con los cultivos (por ejemplo, la humedad de las hojas) y el entorno (como la humedad del aire, la temperatura y la velocidad del viento). En el ámbito agrícola, la implementación de sistemas de sensores no solo facilita y mejora los cultivos, tanto en campo abierto como en invernadero, sino que también simplifica procesos como el almacenamiento y el transporte [22]. La electrónica desempeña un papel fundamental en la agricultura vertical, ya que su implementación permite el monitoreo de variables clave como la temperatura, la humedad y el pH a través de sensores. Estos dispositivos han facilitado la digitalización de las explotaciones agrícolas, permitiendo la recopilación de datos esenciales que ayudan a evaluar el estado de salud de los cultivos. Esto, a su vez, posibilita la planificación de intervenciones específicas y mejora las actividades de monitoreo. Un estudio de Plantagon (2020), que propone una torre de oficinas que también funcionaría como granja e invernadero vertical. Este edificio de 60 metros de altura destinaría la mitad de su espacio a oficinas y la otra mitad a un invernadero urbano. En estos espacios de cultivo se utilizaría la técnica de cultivo hidropónico, que implica el crecimiento de plantas en soluciones acuosas enriquecidas con nutrientes. Esta técnica ha ganado popularidad en la agricultura urbana, ya que no requiere grandes extensiones de tierra para lograr una producción eficiente de alimentos a nivel industrial. Al combinar agricultura, tecnología y arquitectura, Plantagon demuestra cómo la agricultura urbana puede integrarse en la vida cotidiana y en nuestras ciudades de maneras inesperadas. Además, el uso de sensores agrometeorológicos permite registrar una amplia gama de información relacionada con los cultivos, como la humedad de las hojas, así como datos del entorno, como la humedad del aire, la temperatura y la velocidad del viento [23]. En el ámbito agrícola, la implementación de sistemas de sensores no solo mejora los cultivos, tanto en campo abierto como en invernadero, sino que también simplifica procesos como el almacenamiento y el transporte [24]. La implementación de sensores en este proyecto fue esencial para monitorear las condiciones del invernadero. Se utilizaron sensores de temperatura, humedad y pH para recopilar datos durante las pruebas iniciales con especies de rápido enraizamiento como el

berro (*Nasturtium officinale*) y el frijol (*Phaseolus vulgaris*). Proporcionaron una base para establecer parámetros que posteriormente servirían en el monitoreo de las condiciones óptimas para el cultivo de caña de azúcar, cuyos requerimientos incluyen un pH 5.5 y 7.5 y temperaturas controladas entre 24 °C y 28 °C [25]. Los sensores utilizados en este proyecto incluyen el de temperatura, humedad y pH. La función principal de un sensor de temperatura es detectar variaciones en la temperatura del aire o del agua, transformando estas variaciones en una señal eléctrica que se envía a un sistema electrónico. Existen diferentes tipos de sensores de temperatura, clasificados según su funcionamiento y el método de conversión de la señal. Las principales categorías son los sensores de resistencia de temperatura (RTD), como el PT100 y el PT1000, termistores, termopares e infrarrojos [26]. Los sensores de humedad son dispositivos diseñados para medir y regular el porcentaje de agua presente en el aire, así como en diversos materiales o superficies. Estos instrumentos son esenciales para el adecuado funcionamiento del invernadero, ya que sus registros permiten identificar déficits en la presión de vapor. Esto proporciona a los agricultores información valiosa para prevenir enfermedades, así como para gestionar la transpiración, la absorción de nutrientes por parte de las plantas y el proceso de fotosíntesis [27]. Los invernaderos verticales permiten el cultivo de una amplia variedad de plantas, desde hortalizas hasta especies ornamentales, maximizando el uso del espacio disponible y facilitando el acceso a las plantas. Estos sistemas son particularmente adecuados para la producción de especies vegetales con enraizamiento superficial, como repollo, espinacas y lechugas, entre otras. Además, hortalizas de tallo largo, como espárragos y apio, así como hierbas aromáticas, son ideales para este tipo de invernaderos debido a sus cortos tiempos de crecimiento y su capacidad de adaptación a este entorno agrícola [28]. La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es habitualmente cultivada en grandes extensiones de terreno debido a su naturaleza como gramínea tropical perenne. El tallo de la caña, rico en azúcar, es considerado un fruto agrícola de gran valor en la producción de azúcar y bioenergía. Sin embargo, su adaptación a invernaderos verticales ofrece oportunidades innovadoras para optimizar su producción, permitiendo un mayor control sobre las variables que afectan su crecimiento [29]. En el contexto de los invernaderos verticales, la caña de azúcar podría beneficiarse de un entorno donde se monitorean de manera precisa parámetros como la temperatura, la humedad y el pH, esenciales para su enraizamiento acelerado. Estos sistemas no solo proporcionan

condiciones controladas para el desarrollo de la planta, sino que también permiten maximizar el uso del espacio vertical, haciendo más eficiente la producción en áreas reducidas [30]. Para el desarrollo del proyecto, fue necesario contar con plántulas de caña de azúcar, que se germinaron desde su inicio. A diferencia de otros cultivos, la caña de azúcar no se siembra utilizando semillas convencionales; su método de distribución consiste en emplear trozos de tallo que contienen entre tres y seis yemas, conocidas como nudos. La germinación de estos segmentos comienza entre los 7 y 10 días, y el crecimiento de las plántulas se inicia alrededor de los 35 días. Durante este período, se observará el desarrollo de las plántulas para establecer un referente para su cultivo. Uno de los grandes desafíos actuales es la capacidad de ahorrar agua y reducir la contaminación mientras se incrementa la producción de alimentos, una meta que puede alcanzarse mediante la agricultura vertical. La demanda de agua crece al doble de la tasa de aumento de la población, y se estima que para el año 2030, la necesidad global de agua podría aumentar hasta en un 50%. Una porción significativa del agua que se consume diariamente se destina al sector agrícola, lo que ha llevado a que hoy en día, la agricultura y la escasez de agua sean conceptos casi sinónimos; Aproximadamente el 70% del agua utilizada se extrae para fines agrícolas. Los sistemas de riego y la producción alimentaria consumen grandes cantidades de agua, lo que contribuye a la salinización del suelo y deteriora las cosechas. Los beneficios de la agricultura vertical son significativos. Por ejemplo, su implementación puede reducir el uso de agua hasta en un 98% y el requerimiento de tierra en un 99%. Además, la productividad puede multiplicarse hasta 240 veces en comparación con las prácticas agrícolas tradicionales. Estos sistemas también requieren hasta un 95% menos de agua en comparación con los métodos de cultivo convencionales. [31]. Dentro del marco de este proyecto, se optó por implementar un sistema aeropónico para el enraizamiento de plántulas de caña de azúcar. Esta elección se justifica por la capacidad del método aeropónico de maximizar el uso del espacio y su alta eficiencia en el consumo de agua y nutrientes. Con la adopción de este enfoque, se busca reducir el consumo de agua en un 95 %, promoviendo así un modelo de producción agrícola sostenible que disminuye la dependencia del suelo y otros recursos. Además, este método se alinea con la necesidad de monitorear y ajustar continuamente las condiciones ambientales del invernadero para optimizar el rendimiento de las plantas y asegurar su desarrollo en un entorno controlado. Según el blog de Hidro Environment, la aeroponía es un sistema de cultivo en el que las

raíces de las plantas se encuentran suspendidas en el aire dentro de un contenedor, siendo rociadas constantemente con una nube de solución nutritiva a través de aspersores. Los tubos de PVC son el principal soporte utilizado para el desarrollo de las plantas en este tipo de cultivo. Existen diversas modalidades de cultivos aeropónicos, destacando el cultivo por esquejes, así como los sistemas de recirculación de baja y alta presión, y los que utilizan goteros de alta presión. La aeroponía, como forma de cultivo hidropónico, se caracteriza por la ausencia de sustrato y opera en un sistema de circuito cerrado, lo que permite un considerable ahorro de agua y fertilizantes, convirtiéndola en una opción respetuosa con el medio ambiente [32].

CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

2.1 Introducción

Este capítulo establece la base teórica necesaria para comprender los métodos de monitoreo implementados en el invernadero vertical, centrándose en los aspectos físicos y químicos fundamentales. El diseño del sistema de monitoreo se basa en las condiciones derivadas de los conceptos analizados en esta sección. Se ha elaborado un esquema funcional para cada una de las variables monitoreadas, proporcionando una visión clara y estructurada de cómo interactúan y afectan el crecimiento de las plantas dentro del contexto del invernadero, tal como se ilustra en la Figura 2.1. La instrumentación electrónica y los sensores juegan un rol fundamental en este sistema, permitiendo un control preciso de variables críticas como la temperatura, la humedad relativa y el pH, las cuales son monitoreadas mediante sensores específicos. En particular, se ha implementado un sensor combinado para la medición de temperatura y humedad, así como un sensor para el monitoreo del pH. Estos sensores, conectados a un microcontrolador, proporcionan datos en tiempo real, lo que permite ajustar las condiciones ambientales de manera oportuna, garantizando un entorno óptimo para el enraizamiento de las plantas. El diseño del sistema de monitoreo ha sido desarrollado con el objetivo de integrar eficientemente estos sensores, asegurando que las condiciones ambientales sean mantenidas bajo control de manera constante.

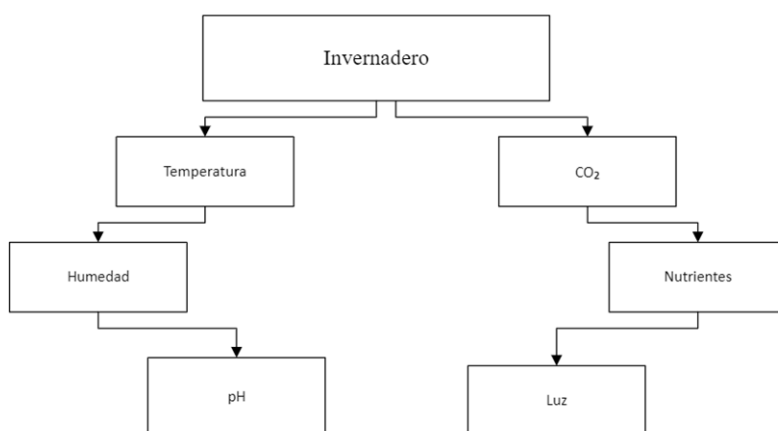


Figura 2.1 Esquema de las variables clave a monitorear en un invernadero vertical.

2.1.2 Invernadero vertical: Concepto y Aplicación

El invernadero vertical se presentó como una innovación clave en el campo de la agricultura moderna, cuyo principal objetivo es la optimización del espacio disponible y el control preciso de las condiciones ambientales necesarias para el cultivo. Esta tecnología resulta particularmente relevante en entornos urbanos, donde los recursos como el terreno y el agua son limitados [33]. A través de la disposición en capas, los invernaderos verticales permiten maximizar la producción en superficies reducidas, promoviendo al mismo tiempo prácticas sostenibles que responden a la creciente demanda de métodos agrícolas más eficientes [34]. De acuerdo con estudios recientes, los invernaderos verticales no solo mejoran la eficiencia en el uso de recursos como el agua y la energía, sino que también contribuyen significativamente a la producción intensiva de plántulas, ofreciendo una alternativa viable para enfrentar los desafíos de la seguridad alimentaria en un contexto de cambio climático y urbanización acelerada.

2.1.3 Instrumentación en invernaderos verticales

La instrumentación y la electrónica en un invernadero vertical desempeñan un papel esencial en el control eficiente de las condiciones ambientales, lo que facilita el crecimiento óptimo de las plantas. Estos sistemas integran diversos sensores que monitorean variables críticas como la temperatura, la humedad y el pH [35]. La implementación de sensores de alta precisión permite la recolección de datos en tiempo real, los cuales son procesados mediante sistemas de control automatizados [36]. Este proceso asegura que las condiciones se mantengan dentro de los parámetros adecuados para maximizar la eficiencia del crecimiento de las plantas. Además, los sistemas de riego y ventilación pueden automatizarse a partir de la información obtenida, permitiendo ajustes precisos en el suministro de agua, nutrientes y circulación de aire [37]. La electrónica, a través del uso de microcontroladores, posibilita la interconexión de todos estos sistemas, proporcionando un manejo más eficaz y reduciendo la intervención humana. De este modo, el invernadero opera con mayor autonomía, optimizando tanto el uso de recursos como la producción, lo cual es clave para una agricultura más sostenible y eficiente. Este enfoque no solo facilita la supervisión de las condiciones internas del invernadero, sino que también permite una respuesta rápida ante cambios inesperados en el entorno, creando un sistema adaptable y robusto [38]. A medida que la

tecnología avanza, la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático promete mejorar aún más la eficiencia y la capacidad predictiva de estos sistemas, haciendo que la agricultura vertical sea una solución viable para enfrentar los desafíos agrícolas del futuro [39]. Para optimizar el enraizamiento en un invernadero vertical, es esencial cumplir con varias condiciones clave que garanticen un entorno controlado y eficiente para el desarrollo saludable de las raíces. Entre los elementos esenciales para este proceso se destacan:

Control Preciso de la Temperatura: La temperatura es un factor determinante en el enraizamiento de las plantas. Un rango óptimo de entre 20 y 35 °C es adecuado para la mayoría de las especies, ya que tanto temperaturas demasiado bajas como elevadas pueden afectar negativamente el desarrollo radicular. Los sistemas automatizados de regulación de temperatura permiten mantener un ambiente interior constante, ajustándose de manera precisa a las necesidades del cultivo [40].

Niveles Controlados de Humedad: Mantener una humedad relativa elevada, entre el 70% y el 85%, es crucial para evitar la desecación prematura de las raíces y asegurar un entorno propicio para su desarrollo. La incorporación de sensores de humedad integrados permite un monitoreo continuo y ajustes en tiempo real, garantizando un nivel óptimo de humedad durante la fase crítica de enraizamiento [41].

Irrigación Eficiente: Un sistema automatizado de riego, como los utilizados en técnicas aeropónicas o hidropónicas, asegura que las raíces reciban agua y nutrientes de manera uniforme y constante. Estos sistemas optimizan el uso de agua y proporcionan una cantidad precisa de nutrientes, favoreciendo el enraizamiento sin desperdicios [42].

Iluminación Ajustable: La luz es esencial para el crecimiento de las plántulas y el desarrollo de las raíces. La utilización de sistemas de iluminación LED ajustables, que emiten espectros específicos como el azul y el rojo, facilita el crecimiento radicular. Estos sistemas permiten regular tanto la intensidad como la duración de la luz, simulando condiciones diurnas óptimas para el desarrollo vegetal [43].

Suministro Adecuado de Oxígeno y Nutrientes: Para que las raíces crezcan de manera eficiente, es necesario garantizar un suministro adecuado de oxígeno. Los sistemas de ventilación y aireación evitan la saturación de agua en las raíces, asegurando el acceso

constante a oxígeno. Además, se proporciona un flujo continuo de nutrientes equilibrados para evitar deficiencias o excesos que puedan comprometer el crecimiento [44].

Monitoreo del pH y la Conductividad: El control del pH y la conductividad eléctrica del agua es fundamental para un enraizamiento óptimo. La instrumentación avanzada permite medir de forma constante estos parámetros, asegurando que se mantengan en los niveles adecuados según las necesidades de cada especie [45].

Control de CO₂ y Sistemas de Ventilación: El dióxido de carbono es indispensable para la fotosíntesis, y su control, combinado con sistemas de ventilación, optimiza el crecimiento de las plantas sin comprometer la calidad del aire en el espacio cerrado. Cumpliendo con estos requisitos, el enraizamiento en un invernadero vertical se lleva a cabo de manera eficiente y sostenible, garantizando el desarrollo de sistemas radiculares robustos y preparados para un crecimiento vigoroso y productivo [46].

2.1.4 Ventajas de los invernaderos verticales en comparación con Invernaderos Horizontales

Una de las principales ventajas de los invernaderos verticales radica en su capacidad para utilizar el espacio de manera más eficiente, permitiendo el cultivo de una mayor cantidad de plantas en áreas reducidas [47]. Esto resulta especialmente beneficioso en entornos urbanos o en lugares con limitaciones de espacio. Además, estos sistemas optimizan el uso de recursos como el agua y los fertilizantes, reduciendo su consumo mediante técnicas precisas de riego y fertilización [48]. El control ambiental mejorado dentro de los invernaderos verticales también conduce a cosechas más uniformes y de mayor calidad en comparación con los métodos tradicionales [49]. Ejemplos notables de estos invernaderos incluyen Sky Greens en Singapur, que utiliza un sistema de rotación hidropónica para maximizar la exposición a la luz solar mientras reduce el consumo de energía [50]. Asimismo, Plantagon en Suecia es conocido por su enfoque en la sostenibilidad, combinando técnicas de agricultura vertical con el uso de energías renovables y reciclaje de agua [51]. Otro ejemplo destacado es Vertical Harvest en Wyoming, EE.UU., diseñado para operar en climas extremos, lo que le permite producir alimentos frescos en condiciones difíciles, ofreciendo una solución innovadora para las comunidades locales, ventajas y desventajas de los invernaderos verticales como se muestra en la Tabla 2.1[52].

Tabla 2. 1 Ventajas y desventajas de los invernaderos verticales.

Tabla de ventajas y desventajas de invernaderos verticales	
Ventajas	Desventajas
Optimización del uso del espacio: Permite cultivar en múltiples niveles, aprovechando al máximo el espacio disponible, ideal para zonas urbanas	Altos costos iniciales: La construcción y automatización de estos sistemas requiere una inversión elevada.
Mayor control ambiental: Factores como temperatura, luz, humedad y CO2 son controlados de manera precisa para optimizar el crecimiento de las plantas.	Dependencia tecnológica: Fallas en el sistema automatizado o los sensores pueden afectar severamente la producción.
Reducción del uso de recursos: Sistemas como la hidroponía y aeroponía ahorran agua y optimizan el uso de nutrientes, minimizando el desperdicio.	Elevados costos operativos: El mantenimiento de los sistemas y el consumo de energía pueden ser costosos a largo plazo.
Cosechas continuas y predecibles: Se puede cultivar durante todo el año sin depender de las estaciones climáticas, lo que asegura una producción constante.	Falta de diversidad en los cultivos: Los invernaderos verticales son más adecuados para plantas de rápido crecimiento, lo que limita la variedad de especies que pueden cultivarse.
Reducción de la huella de carbono: Al ubicarse en áreas urbanas, cerca de los consumidores, se disminuyen los costos de transporte y la emisión de gases.	Requerimiento de conocimientos técnicos: Se necesita personal especializado para operar y mantener los sistemas tecnológicos.
Menor uso de pesticidas: El ambiente controlado reduce la necesidad de pesticidas y productos químicos, promoviendo cultivos más limpios y saludables.	Posibles problemas de sostenibilidad energética: La iluminación y ventilación intensivas pueden generar un alto consumo energético, especialmente si no se utiliza energía renovable.
Menor impacto ambiental: Al utilizar menos tierra y recursos naturales, reduce el impacto negativo sobre el medio ambiente.	Limitaciones en cultivos de gran tamaño: No es adecuado para cultivos que requieran mucho espacio o largos ciclos de crecimiento, como árboles frutales.

2.1.5 Funcionamiento

La integración de tecnologías de instrumentación en los invernaderos verticales ha transformado el control y monitoreo de las condiciones de crecimiento, el inicio de las primeras digitalizaciones en un invernadero denominado Tecnológicas Globales en Invernaderos Agrícolas: Cultivando el Futuro Sostenible (Figura 2.2) [53]. Los sensores utilizados para medir variables como temperatura, humedad, luminosidad, y niveles de nutrientes, junto con los actuadores responsables de la automatización del riego, iluminación y ventilación, crean un entorno óptimo para el desarrollo de las plántulas [54]. La literatura

especializada destaca que la implementación de sistemas de control automatizados, basados en microcontroladores y software especializado, ha mejorado de manera notable la eficiencia operativa de los invernaderos, incrementando la producción y reduciendo los costos asociados.



Figura 2.2 Tecnológicas Globales en Invernaderos Agrícolas: Cultivando el Futuro Sostenible.

2.1.6 Optimización

La optimización del espacio en un invernadero vertical destinado al crecimiento acelerado de plántulas de caña de azúcar, requiere una planificación cuidadosa que maximice el uso de la superficie disponible. Esta estrategia es esencial para mejorar la eficiencia productiva, especialmente en regiones donde el terreno es limitado [55]. El diseño vertical permite apilar múltiples niveles de cultivos en un área reducida. Este enfoque no solo maximiza la superficie cultivable, sino que también optimiza el control de las condiciones ambientales, como luz, la temperatura y la humedad, factores críticos para el desarrollo rápido y saludable de las plántulas [56]. Al gestionar estas variables de manera precisa en un entorno vertical, se promueve un crecimiento más uniforme y acelerado, lo que reduce el tiempo necesario para que las plántulas alcancen la madurez requerida para el trasplante. Además, la estructura vertical facilita el acceso a cada nivel de cultivo simplificando las tareas de mantenimiento, como el riego y la aplicación de nutrientes, lo que a su vez disminuye la mano de obra necesaria y optimiza el uso de recursos, haciéndolo más sostenible y rentable. En conjunto, la optimización del espacio en un invernadero vertical se traduce en una mayor productividad

por metro cuadrado, un aspecto fundamental para satisfacer la demanda en el cultivo intensivo de caña de azúcar [57].

2.1.7 Aeroponía

La aeroponía es una técnica innovadora de cultivo que prescinde del uso de suelo, utilizando exclusivamente agua y nutrientes para el desarrollo de las plantas. El término, que proviene de las palabras griegas “*aero*” (aire) y “*ponos*” (trabajo), fue introducido por primera vez por el Dr. Franco Massanti en el año 1920, quien implementó columnas de cultivo dentro de este sistema [58]. Una de las características más notables de la aeroponía es su capacidad para reducir drásticamente el consumo de agua, utilizando hasta un 95% menos en comparación con la agricultura convencional, gracias a su eficiente sistema de reciclaje hídrico [59]. Además, la aeroponía promueve un crecimiento más rápido de las plantas, ya que estas tienen acceso continuo a los nutrientes, agua y oxígeno necesarios para su desarrollo [60]. Otro beneficio crucial de este método es la virtual ausencia de enfermedades en los cultivos, ya que el entorno controlado y el contacto limitado entre las plantas minimizan la propagación de patógenos [61]. La versatilidad de la aeroponía también permite su implementación en áreas donde el suelo es árido o el espacio es limitado, como en entornos urbanos [62]. Adicionalmente, este sistema ofrece una forma no invasiva de observar las raíces y estudiar diversos aspectos fisiológicos de las plantas, permitiendo una comprensión más profunda de los procesos de crecimiento sin alterar su entorno natural. En la Tabla 2.2 se presentan las ventajas y en la Tabla 2.3 se presentan las desventajas de la aeroponía [63].

Tabla 2.2 Ventajas de la aeroponía.

Ventajas de la aeroponía	
Aspecto	Ventajas
Eficiencia en el uso del agua.	Utiliza hasta un 90% menos de agua que la agricultura tradicional.
Crecimiento acelerado.	Las plantas crecen más rápido debido a la constante disponibilidad de oxígeno y nutrientes
Mayor rendimiento.	Menor riesgo de enfermedades transmitidas por el suelo
Reducción de enfermedades.	Menor riesgo de enfermedades transmitidas por el suelo
Optimización del espacio.	Ideal para entornos urbanos y verticales, maximiza el uso del espacio
Control preciso del entorno.	Permite un control exacto de las condiciones ambientales

Tabla 2.3 Desventajas de la aeroponía.

Desventajas de la aeroponía	
Aspecto	Desventaja
Costo inicial.	Implementación costosa debido a equipos especializados
Complejidad técnica.	Requiere conocimientos técnicos avanzados para su operación y mantenimiento
Dependencia de la tecnología.	Alta dependencia de equipos tecnológicos; fallas pueden impactar gravemente el cultivo
Riesgo de acumulación de sales.	Evaporación constante puede llevar a la acumulación de sales en las raíces
Requiere energía.	Necesita una fuente de energía constante, problemático en áreas con suministro eléctrico inestable
Limitaciones en algunos cultivos.	No todos los tipos de plantas son adecuadas para la aeroponía

Estas ventajas hacen de la aeroponía una alternativa sumamente atractiva no solo para cultivos convencionales, sino también para aquellos que requieren un uso intensivo de espacio y recursos, como es el caso la caña de azúcar. Este cultivo tiene una gran relevancia económica en numerosos países debido a su papel en la producción de azúcar, biocomestibles y otros subproductos industriales [64]. Sin embargo, el cultivo de caña de azúcar enfrenta desafíos significativos, entre los que incluyen la necesidad de grandes extensiones de tierra y una gestión más eficiente de los recursos [65]. La implementación de un sistema de cultivo aeropónico para la producción de plántulas de caña de azúcar ofrece una solución innovadora para superar estos retos. Este método no solo optimiza el uso del espacio y del agua, sino que también favorece un crecimiento más rápido y homogéneo de las plántulas, facilitando su trasplante y mejorando la eficiencia del cultivo [66]. En la Figura 2.3 se muestra un sistema aeropónico compuesto por varios componentes esenciales. El contenedor (T) almacena la solución nutritiva necesaria para las plantas, la cual se recircula para conservar agua. Una bomba (P), que puede estar ubicada externamente o sumergida, es la encargada de enviar esta solución a través de la tubería y hacia las plantas, para luego regresar al contenedor. El sistema también incluye una línea de aspersores, que proporciona una fina niebla de nutrientes a las raíces a través de boquillas conectadas a la bomba. Además, el sistema cuenta con un timer (TM) que permite programar el encendido y apagado de diferentes dispositivos de forma sencilla [67]. En este proyecto se ha realizado una investigación exhaustiva sobre los distintos tipos de invernaderos disponibles, con el fin de determinar cuál sería el más

adecuado para el enraizamiento de las plantas. Asimismo, se ha analizado la problemática actual en la reproducción de la caña de azúcar, con el propósito de proponer soluciones que mejoren su cultivo y sostenibilidad.

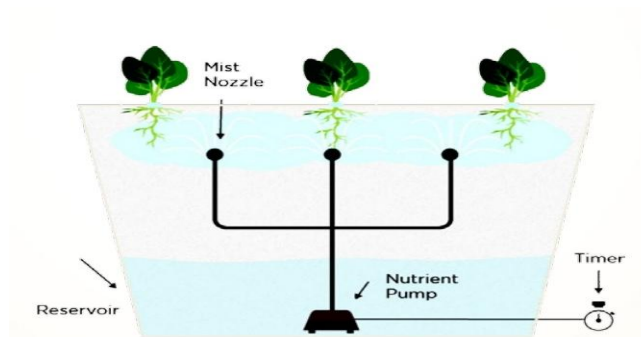


Figura 2.3 Sistema aeropónico

2.2 La caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta que requiere una nutrición adecuada para alcanzar su crecimiento y desarrollo óptimos. Para asegurar esta planta reciba los nutrientes necesarios, es esencial proporcionar un fertilizante balanceado que contenga nitrógeno, fósforo, potasio, así como otros micronutrientes esenciales [68]. El nitrógeno es crucial para el crecimiento de la caña, dado que es un componente fundamental en la formación de proteínas y enzimas. Por otro lado, el fósforo es indispensable para el desarrollo de raíces fuertes y un sistema radicular saludable. El potasio, además, mejora la resistencia de la planta frente a enfermedades y al estrés hídrico. Además de estos macronutrientes, la caña de azúcar también requiere de micronutrientes como el hierro, manganeso, zinc y boro para mantener un crecimiento equilibrado. Estos nutrientes son esenciales para diversas funciones metabólicas, como la fotosíntesis y la división celular [69]. Para determinar las necesidades específicas de nutrientes en cada etapa del su ciclo de crecimiento de la caña de azúcar, es importante realizar un análisis de suelo. De modo, se puede ajustar la fertilización de manera precisa y eficiente, evitando problemas de deficiencia o excesos de nutrientes que podrían afectar el rendimiento y la calidad de la cosecha. Además de la fertilización química, es recomendable complementar con prácticas agronómicas sostenibles, como la rotación de cultivos, el uso de abonos orgánicos y la aplicación de enmiendas al suelo. Estas prácticas ayudan a mejorar la estructura del suelo, incrementar su fertilidad y promover un equilibrio en el ecosistema

agrícola. Proporcionar una fertilización balanceada es fundamental para garantizar el crecimiento y desarrollo adecuado de la caña de azúcar. La tabla 2.4 muestra los requerimientos nutritivos de la caña de azúcar [70].

Tabla 2.4 Requerimientos nutritivos de la caña de azúcar.

Nutriente	Símbolo químico	Función principal	Cantidad requerida (kg/ha)
Nitrógeno	N	Esencial para el crecimiento de la planta, promueve el desarrollo de hojas y tallos.	150-250
Fósforo	P	Importante para la formación de raíces, mejora la resistencia de enfermedades y la maduración de la planta.	30-50
Potasio	K	Ayuda en la fotosíntesis, regulación del agua y resistencia al estrés.	100-200
Calcio	Ca	Fortalece la estructura celular, mejora la calidad de la planta y resistencia a enfermedades.	40-80
Magnesio	Mg	Componente de la clorofila, esencial para la fotosíntesis y la formación de proteínas.	20-40
Azufre	S	Importante para la formación de aminoácidos y proteínas, mejora la eficiencia del nitrógeno.	15-30
Hierro	Fe	Necesario para la síntesis de clorofila y diversas funciones enzimáticas.	2-10
Manganeso	Mn	Participa en la fotosíntesis y en la formación de clorofila,	1-5
Zinc	Zn	Importante para la síntesis de hormonas de crecimiento y la formación de clorofila.	0.5-1.5
Cobre	Cu	Participa en varias reacciones enzimáticas y en la fotosíntesis.	0.2-1.0
Boro	B	Esencial para el desarrollo y crecimiento de la planta, ayuda en la formación de paredes celulares.	0.5-2.0
Molibdeno	Mo	Necesario para la fijación de nitrógeno y la síntesis de proteínas.	0.05-0.1

2.3 Crecimiento acelerado de plántulas de caña de azúcar

El crecimiento acelerado de las plántulas se presenta como una estrategia clave para incrementar la productividad en la agricultura. En este sentido, técnicas como la aeroponía y

la hidroponía han demostrado ser superiores al cultivo tradicional en el suelo, dado que proporcionan nutrientes directamente a las raíces y optimizan las condiciones de crecimiento [71]. Investigaciones han demostrado que, en particular, la aeroponía, permite un desarrollo más rápido y uniforme de las plántulas, acortando el tiempo necesario para que estén listas para el trasplante [72]. El cultivo de caña de azúcar, particularmente de la especie *Saccharum officinarum*, desempeña un papel crucial en la economía y sociedad de las regiones tropicales y subtropicales. La creciente demanda mundial de productos derivados de la caña, como el azúcar y el etanol, ha llevado al desarrollo prácticas agrícolas más eficientes. En este contexto, la producción de plántulas fuertes y de rápido crecimiento se ha convertido en un elemento esencial para mantener la sostenibilidad y competitividad de la industria [73].

2.3.1 Temperatura

La temperatura, una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, se refiere a la cantidad de energía en forma de calor presente en el aire y en los objetos circundantes. En el contexto agrícola, particularmente en los invernaderos, mantener una temperatura adecuada es esencial para garantizar el crecimiento saludable y vigoroso de las plantas. El control de la temperatura en un invernadero se logra mediante sistemas de calefacción y ventilación, que permiten crear un entorno óptico para las plantas en cualquier época del año. Este control es crucial para evitar que las plantas experimenten estrés térmico, lo que podría comprometer su desarrollo y productividad. La tecnología moderna ha facilitado el uso de sistemas automatizados para monitorear y ajustar la temperatura dentro del invernadero. Estos sistemas, que operan mediante sensores electrónicos, aseguran que las condiciones ambientales sean siempre las más favorables para el cultivo, ajustando automáticamente la calefacción o ventilación según sea necesario. Este enfoque no optimiza el manejo del invernadero, sino que también mejora la eficiencia y sostenibilidad del proceso de cultivo [74]. Dentro de la automatización de los invernaderos, está el control de la temperatura, el cual puede ser gestionado por medio de sensores que censan la temperatura interna o externa del invernadero. Los sensores son componentes eléctricos y electrónicos que, en calidad de sensores, permiten medir la temperatura mediante una señal eléctrica determinada. Estos sensores son particularmente útiles en invernaderos verticales donde se necesita monitorear la temperatura de las plantas y el ambiente sin

interferir físicamente con ellas [75], dentro de la rama de sensores tenemos algunos tipos de sensores de temperatura, los termopares son sensores de temperatura robustos y versátiles que se utilizan comúnmente en diversas aplicaciones industriales y agrícolas, consisten en dos conductores metálicos diferentes que están unidos en un extremo [76]. Cuando hay una diferencia de temperatura entre los extremos unidos y los extremos libres, se genera una tensión que se puede medir y convertir en una lectura de temperatura. Los termopares son apreciados por su amplio rango de medición y su capacidad para responder rápidamente a los cambios de temperatura, lo cual es útil en entornos de cultivo vertical [77]. Los sensores infrarrojos miden la temperatura sin contacto directo con el objetivo o el entorno que están monitoreando, funcionan detectando la radiación infrarroja emitida por los objetos calientes. Los termómetros se emplean para medir la temperatura del aire, siendo los más comunes aquellos que consisten en tubos de vidrio huecos. En el interior de estos tubos se encuentra una ampollita que contiene un líquido, como alcohol o mercurio, que se expande o contrae con los cambios de temperatura, proporcionando una lectura visual directa [78]. Por otro lado, los diodos de silicio, que suelen ser de tamaño milimétrico, se utilizan como detectores multicanal alineados, lo que les permite obtener espectros de temperatura en cuestión de milisegundos. Además, los detectores de temperatura de resistencia (RTD, por sus siglas en inglés), son ampliamente reconocidos en aplicaciones agrícolas debido a su alta precisión y estabilidad a largo plazo. Estos RTD funcionan basándose en el principio de que la resistencia eléctrica de ciertos metales, como el platino, varía en respuesta a los cambios de temperatura, lo que permite un control térmico preciso y confiable en diversos entornos agrícolas [79].

2.3.2 Humedad Relativa

La humedad relativa hace referencia a la proporción de vapor de agua en el aire en comparación con la cantidad máxima que el aire puede retener a una temperatura y presión específicas. Este factor es crucial en el cultivo dentro de invernaderos verticales, donde los niveles óptimos de humedad relativa suelen oscilar entre 50% y el 75% . Un exceso de humedad relativa puede hacer que el aire se perciba más denso y húmedo favorece la proliferación de plaga y enfermedades. Por el contrario, niveles insuficientes de humedad relativa pueden obligar a las plantas a esforzarse más para mantener los estomas abiertos, lo que puede resultar en marchitez por deshidratación. Esta situación también afecta la

producción, reduciendo la calidad de los frutos y el cuaje . Para mantener la humedad relativa en el rango ideal, los invernaderos verticales deben estar equipados con controles climáticos apropiados, como deshumidificadores, sistemas de ventilación y humidificación. El flujo de aire tanto horizontal como vertical contribuyen a una distribución uniforme de la humedad. La medición de la humedad relativa se realiza mediante higrómetros, dispositivos que pueden variar desde modelos mecánicos y eléctricos, hasta sensores digitales avanzados que se integran con sistemas de monitoreo ambiental en los invernaderos [80].

2.3.3 pH

El pH es una medida que determina el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia, expresada en una escala que va de 0 a 14. En esta escala, un valor de 0 representa una alta acidez, 7 indica neutralidad, y 14 corresponde a una alta alcalinidad. El pH se calcula en función de la concentración de iones de hidrógeno presentes en una solución [81]. Existen dos métodos principales para medir el pH, usando un potenciómetro que mide el pH a través de dos electrodos, uno de referencia (generalmente de plata o cloruro de plata) y otro que es sensible a los iones hidrógeno (normalmente de vidrio). El segundo método consiste en el uso de reactivos o tiras indicadoras de pH, que cambian de color en función del nivel de acidez de la solución. El color resultante se compara con una escala de referencia para determinar el valor de pH aproximado. El pH es un factor crucial en diversos procesos industriales, en el procesamiento de alimentos, en la agricultura, en la acuicultura para garantizar un funcionamiento óptimo [82]. En síntesis, el marco teórico desarrollado ha abordado los conceptos esenciales más relevantes en la instrumentación de invernaderos verticales, además de resaltar la importancia de factores ambientales críticos, como la humedad relativa la temperatura, y el pH, en el cultivo de plántulas de caña de azúcar. La integración de sistemas de control climático y el manejo adecuado de las condiciones de cultivo resultan vitales para maximizar el crecimiento y mejorar la calidad de las plántulas en entornos controlados. Este marco teórico establece una base firme para el diseño y la implementación del sistema de instrumentación propuesto, garantizando que los objetivos de la investigación, como la optimización del enraizamiento y la eficiencia en la producción, se alcancen de manera efectiva.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL INVERNADERO VERTICAL

El presente capítulo aborda la metodología empleada para el diseño del invernadero vertical que servirá para gestionar el crecimiento acelerado de plántulas de caña de azúcar *Saccharum officinarum* L. Así mismo se describen las pruebas de crecimiento que se realizaron en otras especies vegetales (frijol-*Phaseolus vulgaris*, berro-*Nasturtium officinale*) en donde se puso especial atención en determinar el comportamiento de su crecimiento y las variables ambientales tales como humedad y temperatura. Estas pruebas permitieron establecer un criterio de referencia sobre el crecimiento de las especies para futuras comparaciones respecto de la eficiencia lograda mediante el invernadero vertical.

3.1 Proceso de un invernadero vertical

En el proceso de diseño del invernadero vertical para el crecimiento acelerado de plántulas de caña de azúcar, se ha considerado la implementación de un sistema que permita el enraizamiento de los esquejes de caña en insertos especiales. Estos insertos se diseñaron de manera que puedan contener los esquejes de caña con sus raíces expuestas al aire, facilitando así el proceso de enraizamiento. Además, se planificó proporcionar a las plantas una solución rica en nutrientes esenciales para su desarrollo óptimo. Inicialmente, se contempló la construcción de un único invernadero. Sin embargo, durante la investigación sobre el crecimiento de la caña de azúcar, se identificaron varios aspectos adversos que afectan su etapa inicial de crecimiento. Como resultado, se decidió construir nueve invernaderos, cada uno con la capacidad de albergar hasta 260 plántulas para el enraizamiento. Esto significa que, en total, se podrá enraizar un total de 2340 plántulas en los nueve invernaderos. Estas plántulas enraizadas estarán libres de enfermedades y estarán lista para su siembra en condiciones óptimas, lo que contribuirá a maximizar el rendimiento y la calidad del cultivo de caña de azúcar en el proyecto. En el siguiente punto se observa la estructuración en la cual estarán distribuidos los componentes que lo conforman.

3.2 Descripción de diagrama de proceso

En el diagrama de proceso (Figura 3.1), se observa el contenedor inicial de la sustancia nutritiva, destinado a albergar el suministro de nutrientes para las plantas. A continuación, se

encuentra la bomba, que actuó como el motor principal para la circulación de la sustancia a lo largo del sistema. Esta sustancia fue suministrada a través de aspersores ubicados estratégicamente en la línea de distribución. Previo a ingresar a la línea de distribución, la sustancia pasa por un filtro diseñado para captar partículas de gran tamaño que podrían obstruir la línea de aspersión. Posteriormente, se encuentra una válvula que regula el flujo de líquido, permitiendo un control preciso del suministro de nutrientes. El sistema cuenta además con un transmisor de presión y un indicador de la misma, que garantizaron un monitoreo constante de las condiciones del flujo de líquido, la sustancia nutritiva circula a través de los conductos, los cuales distribuyen uniformemente el líquido sobre el soporte madre. Una vez que la planta ha sido alimentada, el exceso de líquido fue drenado del soporte madre y capturado por la línea de recuperación. Esta línea se encargó de recircular el exceso de líquido de vuelta al contenedor de sustancia nutritiva, completando así el ciclo de alimentación de las plantas. Este proceso aseguró una alimentación adecuada y eficiente de las plantas, favoreciendo su crecimiento y desarrollo.

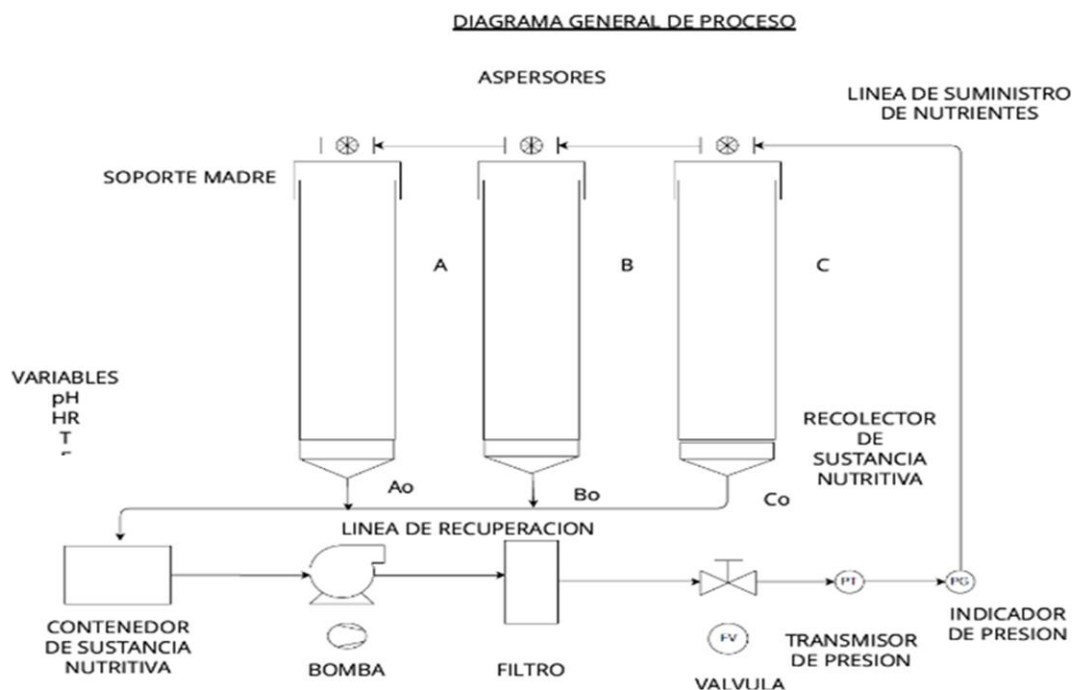
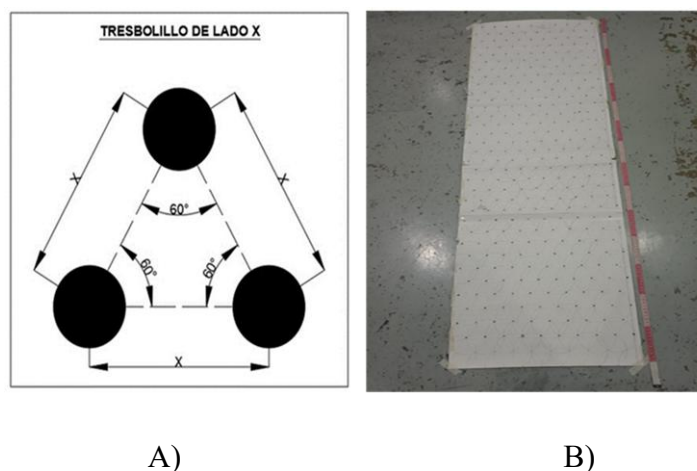


Figura 3.1 Diagrama de proceso invernadero vertical.

3.3 Manufactura de plantilla tresbolillo para el soporte madre

Para iniciar la construcción del soporte madre, se creó una plantilla para ubicar cada uno de los puntos a perforar en un patrón de tresbolillo. Este patrón se caracteriza por colocar las plantas en filas de manera que las de cada fila correspondan al centro de los huecos de la fila inmediata, formando triángulos equiláteros. La plantilla, con dimensiones de 1.55 metros (Figura 3.2), permitió marcar un total de 260 perforaciones, las cuales contendrán los soportes de los sustratos. Cada soporte de sustrato tiene un diámetro de 3.4 centímetros y una longitud de 7 centímetros. Se diseñaron con un ángulo de corte para que, al insertarlos en el soporte madre, adopten la inclinación necesaria para un óptimo crecimiento de las plántulas.



Figuras 3.2 A) Trazo de corte tresbolillo, B) plantilla.

Una vez trasados los puntos en el soporte madre, se procedió a realizar las perforaciones utilizando un taladro y un sacabocado de 3.4 centímetros. Este procedimiento se llevó a cabo en cuatro soportes en los cuales a futuro se pretende un ensamble de 9 soportes madre, para facilitar el ensamble de la línea de nebulizadores en la parte superior, así como para la recolección de la sustancia nutritiva en la parte inferior. Se pretende a futuro que el diseño del invernadero en un metro cuadrado se instalen 9 invernaderos para una mayor capacidad de enraizamiento.

3.4 Descripción de insertos de soporte madre

Los insertos diseñados para albergar el sustrato que contendrá las plántulas se han construido cuidadosamente utilizando tubos de PVC de 1 pulgada de diámetro. Cada inserto ha sido

cortado a una altura de 7 cm y cuenta con un diámetro de 3.4 cm. Se les ha aplicado un corte transversal con un ángulo de inclinación de 43 grados para facilitar su colocación en el soporte madre y promover un adecuado drenaje del sustrato. Estos insertos representan una solución práctica y eficiente para sostener el sustrato de cultivo y crear un ambiente favorable para el desarrollo de las plántulas de caña de azúcar. Gracias a su diseño inclinado, permitió una distribución uniforme de la solución nutritiva y una adecuada circulación del aire, lo que contribuye al crecimiento saludable de las plantas. Una vez instalados en el soporte madre, estos insertos garantizaron una sujeción firme y estable del sustrato, asegurando un crecimiento óptimo de las plántulas. Además, su construcción con materiales duraderos como el PVC asegura su resistencia y durabilidad en el sistema de cultivo (Figura 3.3).

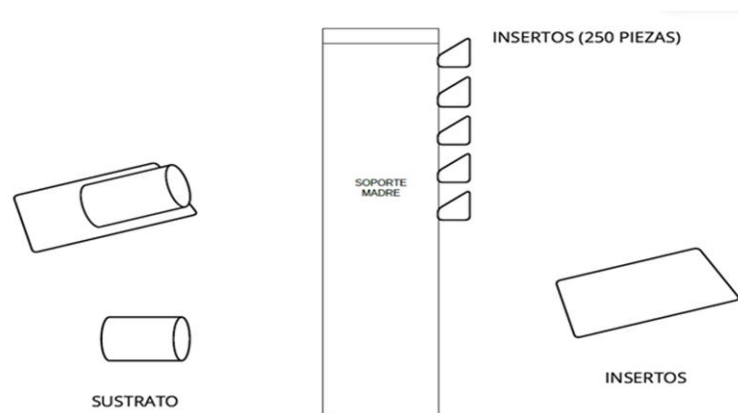


Figura 3.3 Diagrama de insertos.

3.5 Realización de insertos de sustrato del soporte madre

En la fabricación de los soportes de sustrato para el invernadero, se emplearon tubos de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada (19 mm) con las especificaciones mencionadas. Además de la sierra para metales, se utilizaron herramientas como lápiz marcador, un transportador y una escuadra para medir y marcar los ángulos necesarios. Asimismo, se contó con papel de lija para suavizar los bordes de los tubos. Se marcaron a una longitud de 7 centímetros en cada tubo para que cuando se inserte el sustrato tuviera espacio necesario para el desarrollo de la planta. Utilizando la sierra se procedió a cortar los tubos siguiendo las marcas realizadas de PVC con el lápiz, y posteriormente se utilizó el transportador para marcar un ángulo de 43 grados en uno de los extremos de cada tubo. Utilizando la sierra se procedió a cortar los tubos

siguiendo las marcas realizadas, asegurándose de obtener bordes limpios y rectos. Una vez cortados, nuevamente se empleó papel de lija para suavizar los bordes de los tubos evitando posibles irregularidades que pudieran dañar las raíces de las plantas, Figura 3.4. Estos se insertan en el soporte madre del invernadero vertical de forma que el lado angular quede en el soporte madre y el circular para la entrada del sustrato, se sellaron con pegamento de PVC y una silicona F121 especial para el mismo material, asegurándose de colocarlos de manera que el extremo cortado este orientado hacia arriba para facilitar el drenaje del sustrato y promover un crecimiento saludable de las plantas.

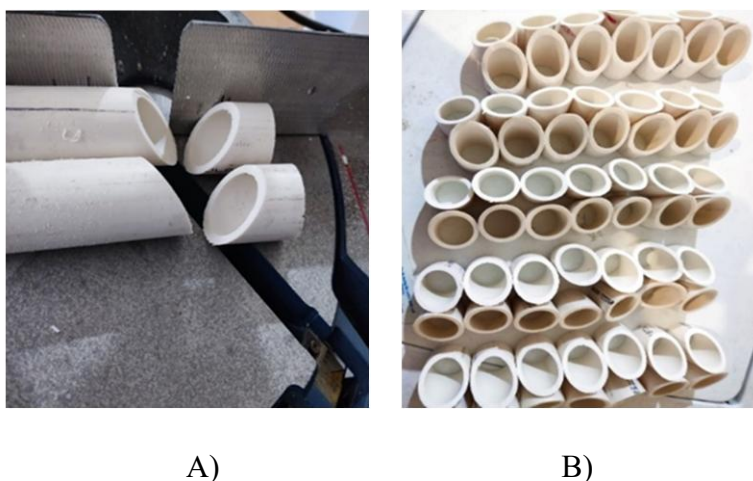


Figura 3.4 A) Realización de insertos, B) Insertos terminados

3.6 Realización de línea de aspersión

Para la realización de la línea de aspersión, se empleó tubería de CPVC de $\frac{1}{2}$ pulgada (cpvc-cts sdr 13.5 de $\frac{1}{2}$), con una capacidad de presión de trabajo de 28 kg/cm² a 23 grados centígrados y 7 kg/cm² a 82 grados centígrados. La dimensión de la tubería es de 25 $\frac{1}{2}$ pulgadas de ancho por 41 $\frac{1}{2}$ pulgadas de largo, con una línea central de 13 pulgadas destinada a albergar la línea de aspersión central. Para su ensamblaje, se utilizó pegamento específico para CPVC. Los aspersores tipo niebla de 0.2 micras, roscada de 5 mm y están diseñados para emitir una fina niebla que beneficia el crecimiento de las plantas. La línea de aspersión fue estratégicamente dimensionada para alimentar a 9 invernaderos, previendo la futura instalación de 9 soportes madre diseñados para cubrir 1 metro cuadrado cada uno. En este trabajo solo se utilizó uno de los soportes madre para la construcción inicial del invernadero vertical (Figura 3.5).

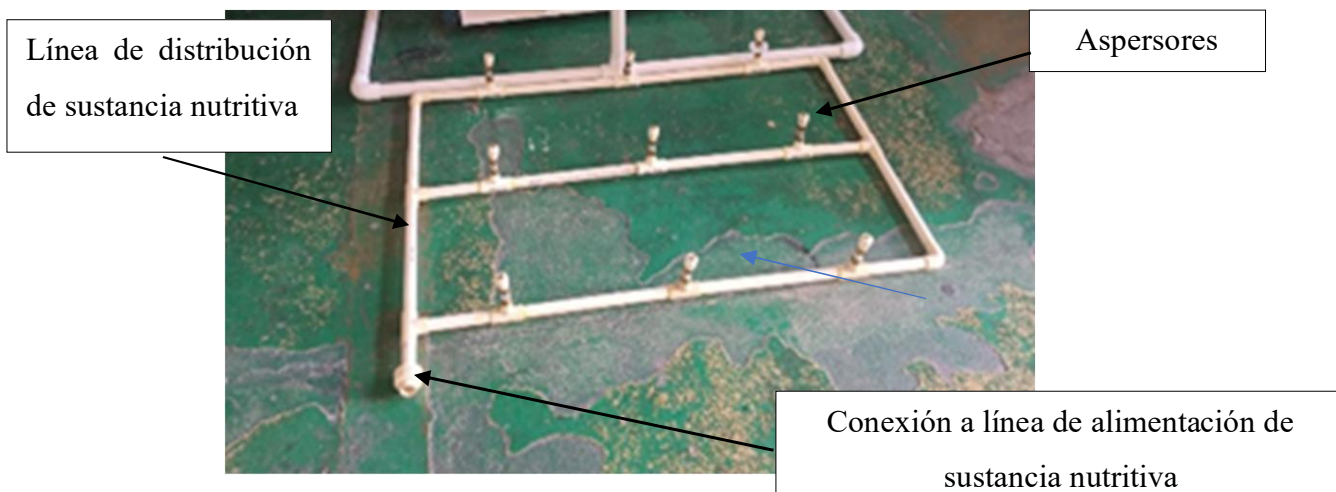


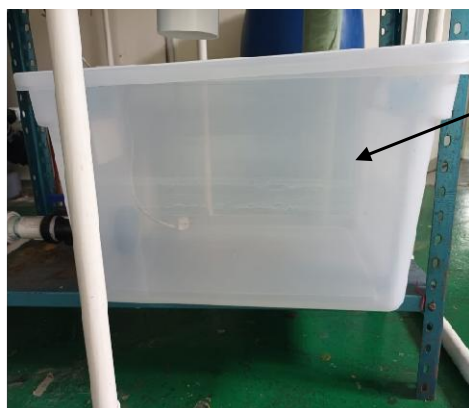
Figura 3.5 Línea de aspersión.

3.7 Realización del contenedor de sustancia nutritiva

Para asegurar la compatibilidad con el sistema, se seleccionó un contenedor que cumpliera con las características necesarias para almacenar la sustancia nutritiva. El contenedor elegido es de forma rectangular, de plástico, y tiene una capacidad de 53 litros cuando se llena a tres cuartas partes, alcanzando una altura de 22.5 centímetros de largo, 36 centímetros de ancho y 30 centímetros de alto Figura 3.6. En uno de sus costados, se realizó una perforación de 5 centímetros para instalar la tubería, la cual está conectada a una llave de paso. Esa configuración permite seccionar la línea para facilitar posibles ajustes, y a su vez, la llave está conectada a una bomba periférica autocebante de $\frac{1}{2}$ HP.



A)



Llenado a $\frac{3}{4}$
partes para
evitar derrames.

B)

Figura 3.6 A) Contenedor de sustancia nutritiva, B) Perforación de costado para conectar bomba.

3.8 Realización del cabezal de instrumentación

Para la construcción del cabezal de instrumentación, se requirieron diversos componentes clave. Entre ellos, se incluyó un manómetro indicador de presión con un rango de 0 a 100 psi, una tuerca universal de $\frac{3}{4}$ " de CPVC, codos de PVC de 1", adaptadores hembra roscados de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ ", un conector macho cementable de 1" de PVC, y un filtro de agua Rotoplas con disco de malla # 120. Además, se instaló una llave de paso de PVC cementable de 1", la cual se conectó al filtro y funciona como purgante. Para el ensamblaje del sistema, se utilizó tubería de CPVC de $\frac{3}{4}$ " de 6 metros de longitud, un reductor bushing de 1" a $\frac{3}{4}$ " de CPVC y pegamento especial para CPVC, asegurando así la correcta unión de las piezas y el funcionamiento óptimo del cabezal (Figura 3.7).

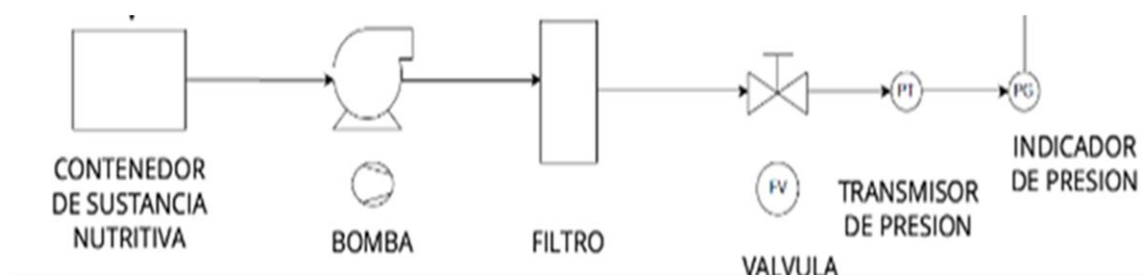


Figura 3.7 Cabezal de instrumentación.

3.9 Realización de línea general de distribución de sustancia nutritiva

Se llevó a cabo la instalación de la línea general de distribución de la sustancia nutritiva, utilizando tubería hidráulica de PVC cédula 40, cementada, junto con conectores de 1 pulgada a $\frac{3}{4}$ de pulgada, codos y conexiones tipo T. Estos componentes fueron ensamblados para integrar tanto la línea de los aspersores como la línea de distribución de la solución nutritiva (Figura 3.8).

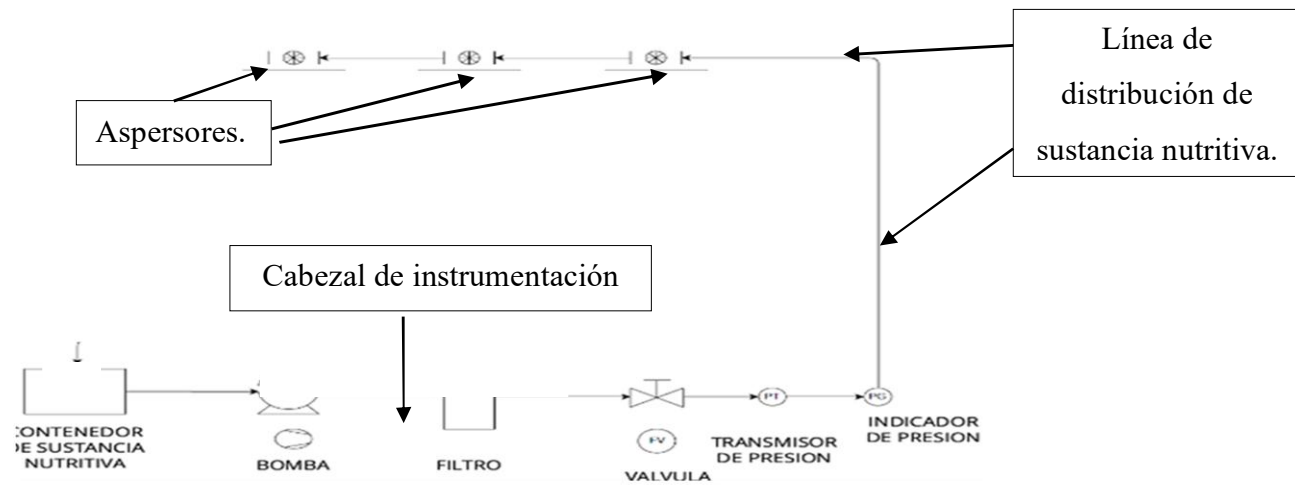


Figura 3.8 Línea general de distribución de sustancia nutritiva

3.10 Realización de ensamble de soporte para línea aspersión

Se llevó a cabo el ensamblaje del soporte para la línea de aspersión en el invernadero vertical, utilizando tubería de PVC de 1 pulgada, codos de 1 pulgada y conexiones tipo T del mismo tamaño. La estructura final cuenta con dimensiones de 92 centímetros de ancho, 1.23 metros de largo y 2.30 metros de alto. Todo el sistema fue ensamblado en forma rectangular, con el fin de garantizar que la línea de aspersión se integre sin interferencias en la red de distribución de la solución nutritiva (Figura 3.9).

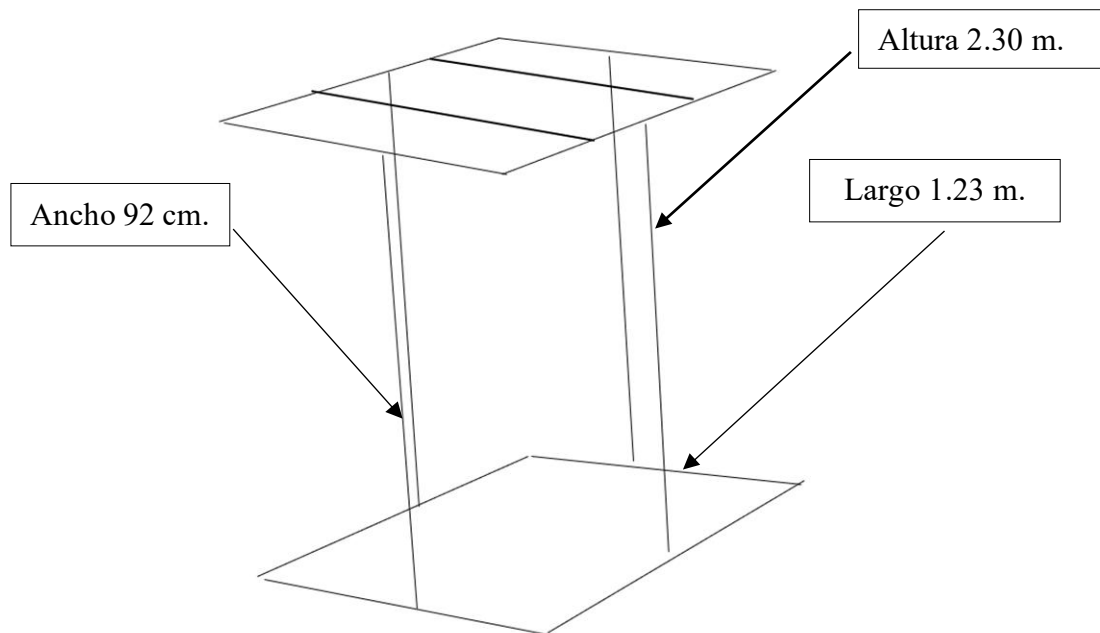


Figura 3.9 Soporte línea de aspersión.

3.11 Ensamblaje de la línea general de invernadero vertical

Se llevó a cabo el ensamblaje de la bomba, el sistema de recuperación de la solución nutritiva y el cabezal de instrumentación, con el objetivo de integrar cada componente de manera eficiente y coordinada. La bomba fue conectada al sistema de recuperación para garantizar un suministro constante de nutrientes a las plantas. Además, se instaló el cabezal de instrumentación, que tiene la función de monitorear y controlar parámetros como la presión y el flujo del líquido. Este ensamblaje se realizó a detalle, buscando asegurar la funcionalidad del sistema. Se realizaron pruebas de operación para detectar posibles fugas, ya que el enfoque estuvo en la construcción e instalación del sistema del invernadero (Figura 3.10).

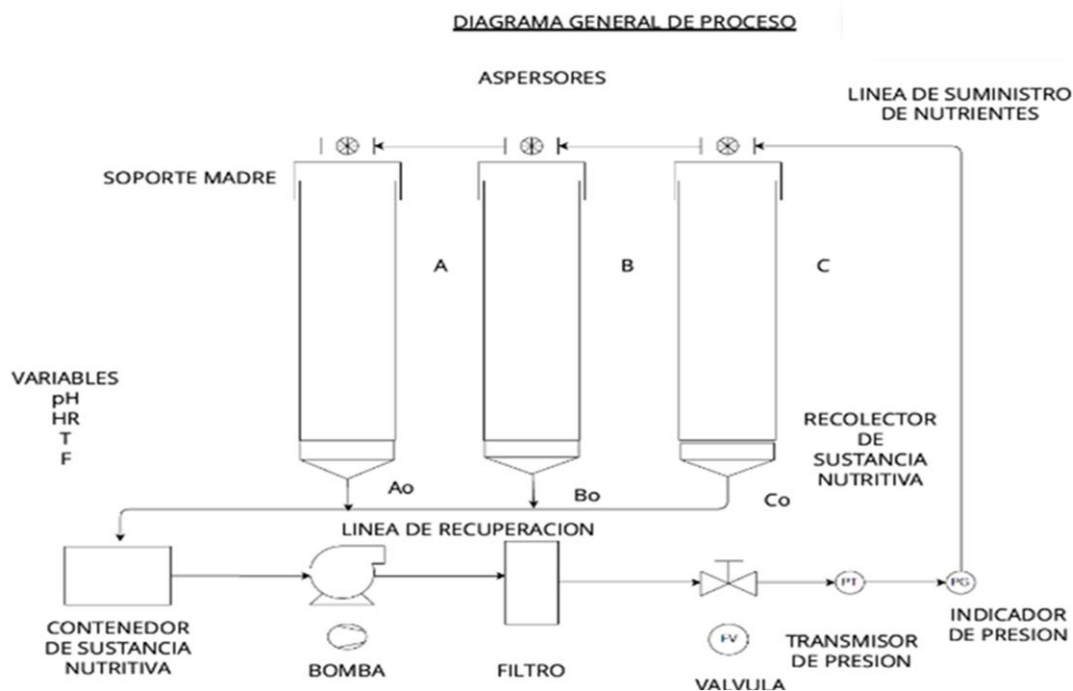


Figura 3.10 Ensamble de bomba, recuperación de sustancias nutritiva y el cabezal de instrumentación,

3.12 Sustrato

Los sustratos o soportes de crecimiento empleados en el invernadero son de germinación de plantas hidropónicas, utilizados tanto en máquinas de clonación como en proyectos de

Bricolaje (Figura 3.11). Estos sustratos están fabricados con espuma de esponja de poliéster con dimensiones aproximadas de 2 pulgadas de altura y 1.26 pulgadas de ancho, de forma cilíndrica. Conocidos comúnmente como esponjas de guardería estas esponjas proporcionan una hidratación duradera, lo que permite regar regularmente con solución nutritiva sin necesidad de agregar tierra. Las ventajas de utilizar este sistema incluyen la ausencia de suelo y suciedad, lo que garantiza su entorno limpio e higiénico para el fuerte crecimiento y mayor producción de plantas. Además, este método de cultivo ahorra espacio y es ampliamente utilizado en invernaderos, agricultura moderna, reproducción artificial, y en la base de plantación de hortalizas. El sustrato se sometió a un protocolo de prueba que incluía la medición de variables como la capacidad de retención de agua, la aireación y la disponibilidad de nutrientes (en este caso el H₂O).



Figura 3.11 Sustrato.

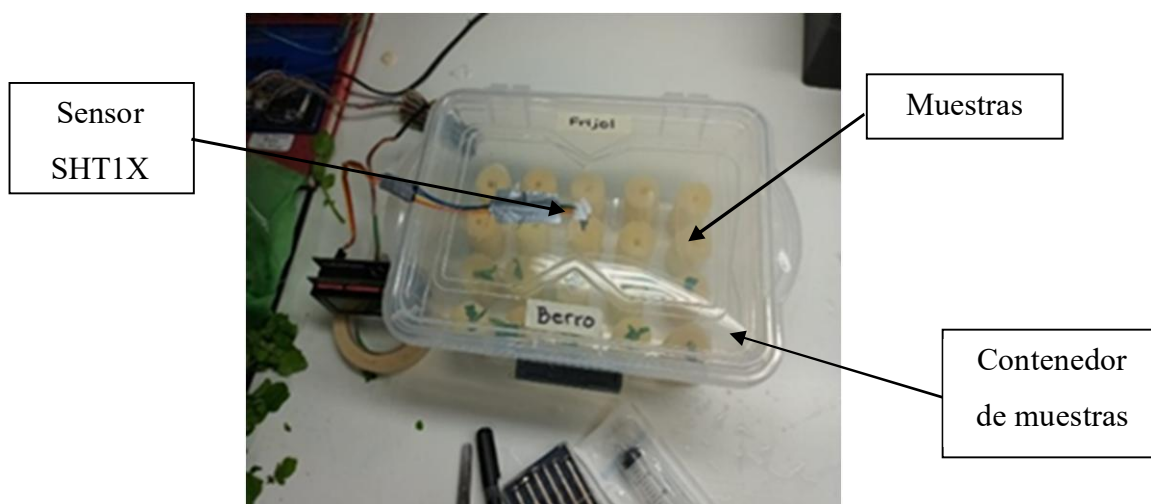
3.13 Pruebas del comportamiento del berro y frijol

a) Frijol (*Phaseolus vulgaris*)

El frijol (*Phaseolus vulgaris*), es una especie autógama, lo que significa que tiende a auto fecundarse y que cada genotipo tiende a aislarse de otros. En esta etapa de manera visual se evaluó la coloración, tamaño de cada grano de frijol para determinar la idoneidad para la germinación.

b) Berro (*Nasturtium officinale*)

los berros (*Nasturtium officinale*) son los brotes tiernos y las hojas de la planta del berro, y se caracterizan por crecer espontáneamente en ambientes acuáticos. En esta fase, se verificaron las condiciones óptimas de temperatura, humedad para la siembra, incluyendo la presencia de yemas en los tallos para garantizar su viabilidad. Una vez establecidas las condiciones necesarias, se procede a la preparación de las semillas de frijol (M) y berro (E), clasificadas respectivamente como muestra y especie. Se humedecen las almohadillas de sustrato con el fin de estimular la germinación de las semillas, las cuales se colocan en el sustrato humedecido y se introducen en un contenedor. Las almohadillas humedecidas se cargan con 15 ml de agua de acuerdo con las pruebas anteriores de sustrato que se realizaron, siendo este volumen inferior a los 25 ml recomendados, ya que un exceso de humedad podría provocar el ahogamiento de las semillas. Este ajuste se realizó para garantizar condiciones óptimas para la germinación. Además, se aseguró de distribuir las semillas de manera uniforme para permitir un crecimiento saludable. Se realizó la siembra, se inició el monitoreo de temperatura y humedad cada tercer día para observar su evolución. En cuanto a la humedad y temperatura, se mantiene el sustrato constantemente húmedo para proporcionar condiciones óptimas de germinación, evitando el encharcamiento que podría ahogar a las semillas. Además, se controló la temperatura de manera constante y moderada con un sensor STH1X para favorecer el proceso de germinación, como se muestra en la Figura 3.12.



Figuras 3.12 Se muestran las condiciones en las que serán monitoreadas las muestras.

3.14 Prueba de funcionamiento de sensores en Berro y frijol

A continuación, se describe el proceso de prueba de los sensores, su conexión y el funcionamiento de la interfaz, así como el despliegue de las pestañas correspondientes. Las pruebas iniciales de temperatura, humedad y pH se realizaron a temperatura ambiente y se llevaron a cabo en un entorno controlado utilizando un recipiente transparente con sellado hermético. Este recipiente fue empleado para realizar ensayos de enraizamiento con berro y frijol, con el propósito de evaluar el comportamiento del enraizamiento se verificó la operatividad de los sensores antes de proceder con pruebas en plántulas de caña de azúcar. Este enfoque preliminar garantizó la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos. En la Figura 3.13, se observa el contenedor de plástico con perforaciones realizadas en la parte central superior de la tapa, las cuales permitieron la inserción del sensor de temperatura y humedad. En esta fase, se ha decidido omitir la prueba de pH, dado que dicho parámetro fue monitoreado de manera independiente utilizando soluciones buffer durante el proceso de enraizamiento de las plántulas de caña de azúcar, asegurando que los sensores funcionen en condiciones óptimas. Durante las primeras 2 semanas de crecimiento, se colocó el contenedor de semillas en un lugar con luz directa. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el berro no necesita luz directa intensa al principio.

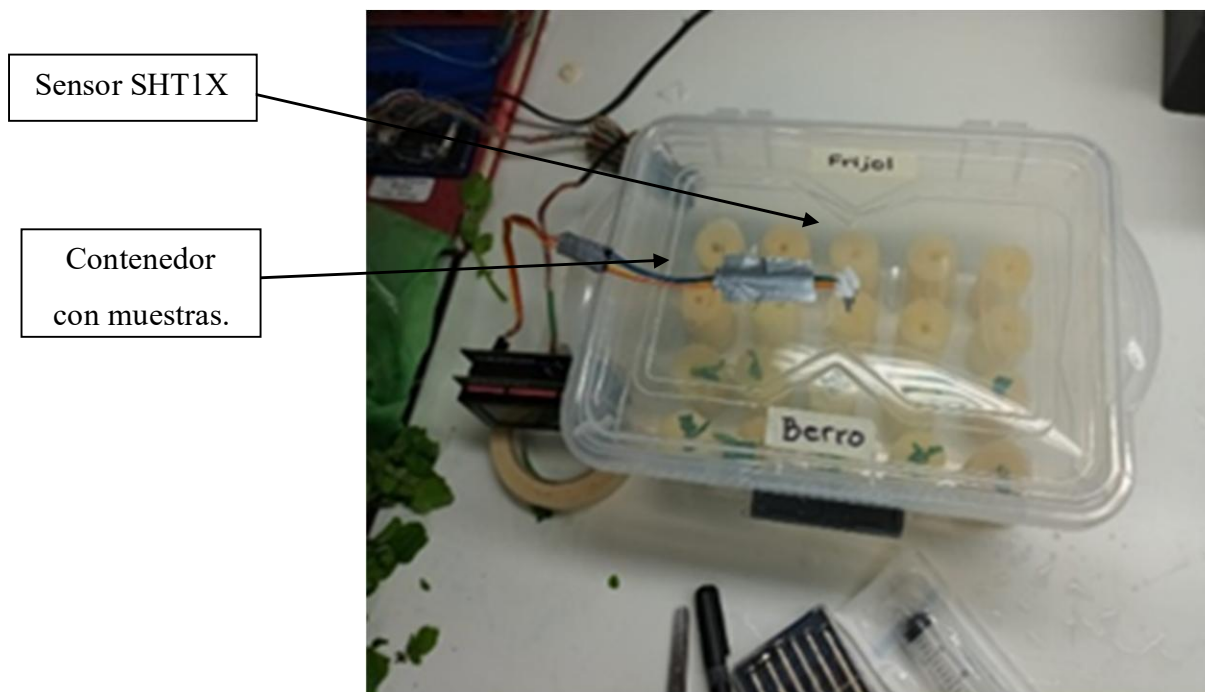


Figura 3.13 Acondicionamiento de sensor de temperatura y humedad.

Una vez activados los sensores en el contenedor, se cargó el código correspondiente, como se muestra en la Figura 3.14, lo que permitió obtener lecturas de nuestras variables. Sin embargo, aún era necesario integrar todos los elementos en nuestra interfaz para garantizar un funcionamiento óptimo y una visualización clara de los datos.

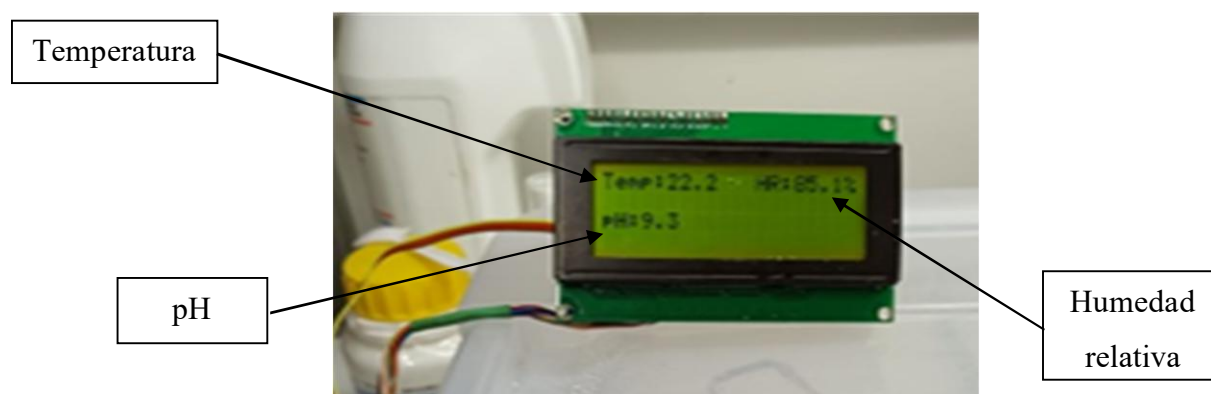


Figura 3.14 Lectura de variables, temperatura y humedad relativa.

3.15 Crecimiento de plántulas de caña de azúcar

La especie *Saccharum officinarum* L., comúnmente conocida como caña de azúcar, presenta un sistema radicular que desempeña dos funciones principales, la de anclar la planta y absorber agua y nutrientes del suelo. Este sistema está compuesto por dos tipos de raíces. Las raíces primordiales, que emergen de la estaca, son delgadas, altamente ramificadas y tienen un ciclo de vida limitado, generalmente hasta los tres meses, cuando se desarrollan nuevos brotes radicales. Por otro lado, las raíces permanentes, que surgen de los anillos de crecimiento de los brotes, son más gruesas, numerosas y de crecimiento rápido. Su proliferación está directamente relacionada con el desarrollo general de la planta. La cantidad, longitud y longevidad de las raíces varía según la variedad de caña de azúcar y las condiciones del suelo y humedad. El sistema radicular de la caña se clasifica como fasciculado y puede ser amplio, mediano o pequeño, dependiendo de estos factores.

3.15.1 Selección de germinación de caña de azúcar

El proceso de selección de caña de azúcar para el proyecto de invernadero vertical comenzó con la elección cuidadosa de la plántula madre, de la cual se obtuvieron los nudos y las plántulas pequeñas para su posterior enraizamiento. Se procedió con la limpieza de la caña,

eliminando las hojas para exponer los nudos y yemas. Se seleccionaron los nudos más saludables, libres de anomalías físicas o mecánicas, y se les realizó un corte dejando un margen de un centímetro alrededor de la yema, totalizando 3 cm. Los nudos se clasificaron según su diámetro y tamaño, y se desinfectaron para evitar enfermedades o daños internos causados por insectos. Posteriormente, se llevó cabo una limpieza física con agua y jabón, seguida de un enjuague con abundante agua y una desinfección con una solución de agua y Lysol (que está compuesto de cloruro de benzalconio < 2%, Alcohol etílico < 1%, tensoactivo no iónico, fragancia, EDTA, colorantes). Esta solución se preparó diluyendo 10 ml de desinfectante en un litro de agua, dejando actuar durante 5 min y luego enjuagando con agua limpia. Se aplicó una solución para reducir la oxidación de los cortes, consistente en 1 g de $C_6H_8O_7$ (ácido cítrico) disuelto en 1 litro de agua, Figura 3.15. Una vez preparados, los nudos se colocaron en un área acondicionada para su desarrollo, donde se monitorearon cada 7 días en condiciones de total oscuridad para observar su crecimiento radicular. Durante este proceso, se registraron las condiciones ambientales, con una temperatura inicial de 23.2°C y una humedad relativa del 84.6 %. Se estableció que la temperatura y humedad óptimas para el desarrollo de las plántulas son de 25.0 a 32°C y del 15 al 60% de humedad relativa, respectivamente. Estas condiciones se mantuvieron constantemente monitorizadas para asegurar un ambiente propicio para el crecimiento de las plántulas de caña de azúcar.



(A)



(B)

Figura 3.15 A) Limpieza y desinfección con B) Ácido cítrico

3.15.2 Yemas

Las yemas fueron categorizadas en función de su tamaño, asegurando una selección adecuada para su posterior siembra. Se identificaron y separaron las yemas de mayor tamaño

de aquellas más pequeñas, con el objetivo de garantizar un desarrollo equilibrado de las plantas (Figura 3.16).

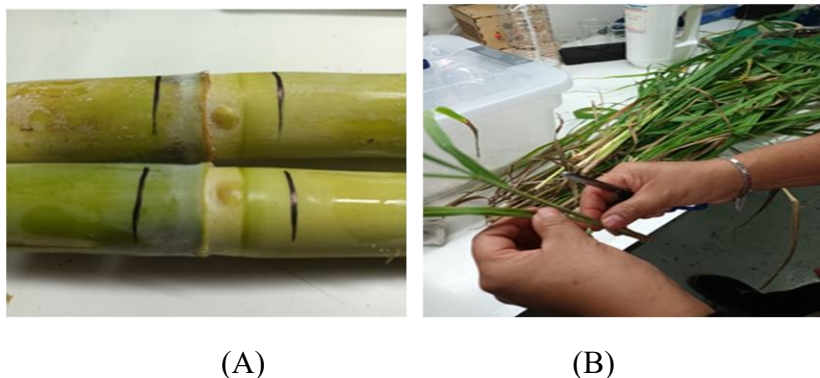


Figura 3.16 A) Selección yemas en los nudos. B) Selección de esquejes

3.15.3 Clasificación por tamaños

Se llevó a cabo la clasificación por tamaños de las yemas y esquejes de caña de azúcar como parte del proceso de preparación para la siembra. Este procedimiento se realizó meticulosamente para garantizar un crecimiento uniforme y óptimo de las plantas (Figura 3.17).

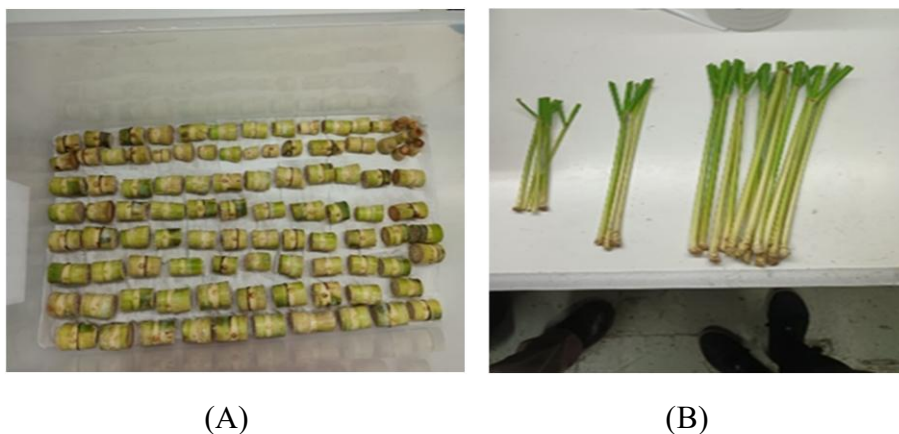


Figura 3.17 Clasificación por tamaños de A) yemas B) esquejes.

3.15.4 Esquejes

De manera similar, los esquejes también fueron clasificados según su tamaño. Se llevó a cabo una cuidadosa evaluación para determinar las dimensiones de cada esqueje, asegurando que aquellos con características similares fueran agrupados juntos. Esta clasificación por tamaños

permitió optimizar el proceso de siembra, asegurando que cada yema y esqueje fuera colocado en condiciones adecuadas para su crecimiento. Además, facilitó el seguimiento y manejo individualizado de las plantas durante todo el proceso de cultivo.

3.15.5 Limpieza y selección de esquejes para enraizamiento

Se llevó a cabo el mismo procedimiento anterior, asegurando que las hojas no presentaran signos de enfermedad. Los esquejes fueron clasificados según sus altura, luego se recortaron en manojos de 25 unidades (Figura 3.18), se procedió a la desinfección física de los esquejes, utilizando agua y jabón, seguido de un enjuague con abundante agua. Posteriormente, se aplicó el mismo apartado anterior que el de las yemas. Se aplicó una solución de ácido cítrico para reducir la oxidación de los cortes. Los esquejes fueron colocados en sustratos de 3 x 5 cm, compuestos por Disocianato de tolueno (TDI) al 30% y Polioliol (Polioxipropilenglicol) al 70 % humedecidos con 25 ml de agua para garantizar una adecuada absorción sin saturar la esponja.



(A)



(A)

Figura 3.18 A) Selección de esquejes para enraizamiento.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Soporte Madre

Para la fabricación del soporte madre, se utilizó un tubo de PVC de 1,55 metros de longitud, sobre el cual se colocó una plantilla diseñada con una disposición en tres bolillos. Este patrón de corte, también conocido como triangulación, facilitó la siembra de las plantas en las esquinas de un triángulo equilátero, maximizando el uso del espacio. Una vez trazados los puntos en el soporte, se procedió a perforar el tubo. Las perforaciones, de 3,4 cm de diámetro y 7 cm de longitud, se distribuyeron estratégicamente para permitir la colocación eficiente de los insertos, garantizando una separación adecuada para favorecer el crecimiento de las plantas (Figura 4.1). Los cortes entre los puntos se realizaron con un sacabocado de 3.5 cm de diámetro y una separación de 7 cm, asegurando un espacio entre perforaciones de 3.4 cm. Esto permitió insertar adecuadamente los insertos donde se colocó el sustrato de cada plántula. Al finalizar el proceso de perforación, se obtuvo un total de 260 perforaciones, las cuales podrían alojar 260 plántulas para su enraizamiento.



A)

B)

Figura 4.1 A) Perforaciones al soporte madre, B) Soporte madre perforado.

4.2 Realización de insertos

La fabricación de los insertos, que contienen el sustrato donde se colocaron las plántulas para su enraizamiento, se realizó utilizando tubos de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Cada soporte de sustrato fue diseñado con un diámetro de 3,4 centímetros y una longitud de 7 centímetros, y se fabricó con un ángulo de corte de 43 grados para facilitar su inserción en el soporte madre. Estos insertos se colocaron cuidadosamente en las perforaciones del soporte madre del invernadero vertical, asegurando que el extremo cortado quede orientado hacia abajo. Esta orientación no solo garantizó un drenaje adecuado del sustrato, sino que también evitó la acumulación de agua, lo que podría provocar problemas de encharcamiento y afectar el crecimiento de las plántulas. Para asegurar su fijación, se empleó un sellado doble utilizando tanto pegamento especial para PVC como silicona F121. Este sellador es un adhesivo monocomponente 100% de silicona, formulado para sellar juntas de materiales utilizados, como policarbonato, PVC, madera, acero, aluminio y ciertos plásticos, tanto en interiores como en exteriores (Figura 4.2). Esta combinación de materiales garantizó una unión hermética y duradera entre el inserto y el soporte madre, lo que es fundamental para mantener la estabilidad y la integridad del sistema de enraizamiento. El uso de insertos de PVC en el soporte madre no solo contribuyó a un ambiente óptimo para el enraizamiento, sino que también permitió un manejo eficiente del sustrato, lo que facilitó la monitorización de las condiciones del medio de cultivo. Además, esta metodología promovió un crecimiento saludable y uniforme de las plantas, maximizando el rendimiento del invernadero vertical y asegurando un sistema de producción sostenible y eficaz.



A)



B)

Figura 4.2 A) Insertos, B) Colocación de insertos.

4.3 Línea de aspersión

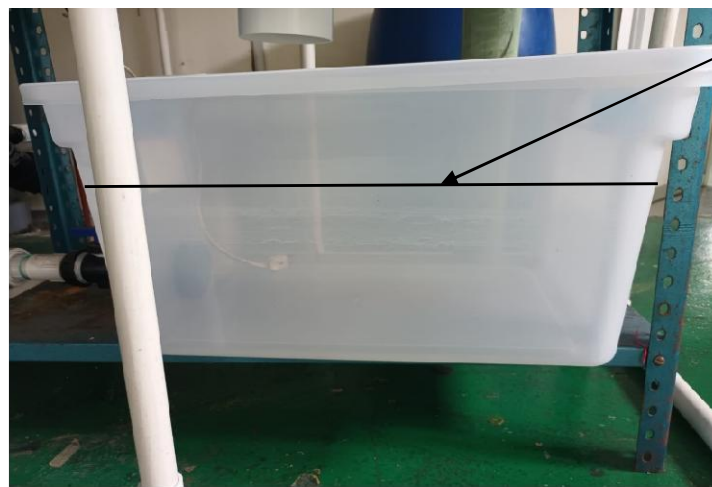
Durante el conjunto de la línea de aspersión, se procedió a unir cada uno de los componentes que la integran, incluyendo piezas en forma de T, codos y aspersores de 2 micras. Se utilizó tubo de CPVC, que tiene una capacidad de presión de 28 kg/cm² a 23°C y de 7 kg/cm² a 82°C. Las dimensiones de la tubería son de 25 ½ pulgadas de ancho por 41 ½ pulgadas de largo, con una línea central de 13 pulgadas destinada a albergar la línea de aspersión central. Los aspersores, de tipo niebla y con un diámetro roscado de 5 micras, están diseñados para emitir una fina niebla que favorece el crecimiento de las plantas al proporcionar una humedad adecuada. La línea de aspersión fue estratégicamente dimensionada para alimentar a nueve invernaderos, previendo la futura instalación de nueve soportes madre, cada uno diseñado para cubrir un metro cuadrado. Sin embargo, en la fase inicial de construcción del invernadero vertical, solo se utilizará uno de los soportes madre. En el futuro, se tiene la intención de implementar la instalación de los nueve soportes madre en un área de un metro cuadrado. Este diseño integral de la línea de aspersión no solo busca optimizar la irrigación de los cultivos, sino que también está orientado a garantizar un ambiente que favorezca el desarrollo saludable de las plántulas. La implementación de esta tecnología representa un paso clave hacia la eficiencia en la producción dentro del invernadero vertical (Figura 4.3).



Figura 4.3 Línea de aspersión.

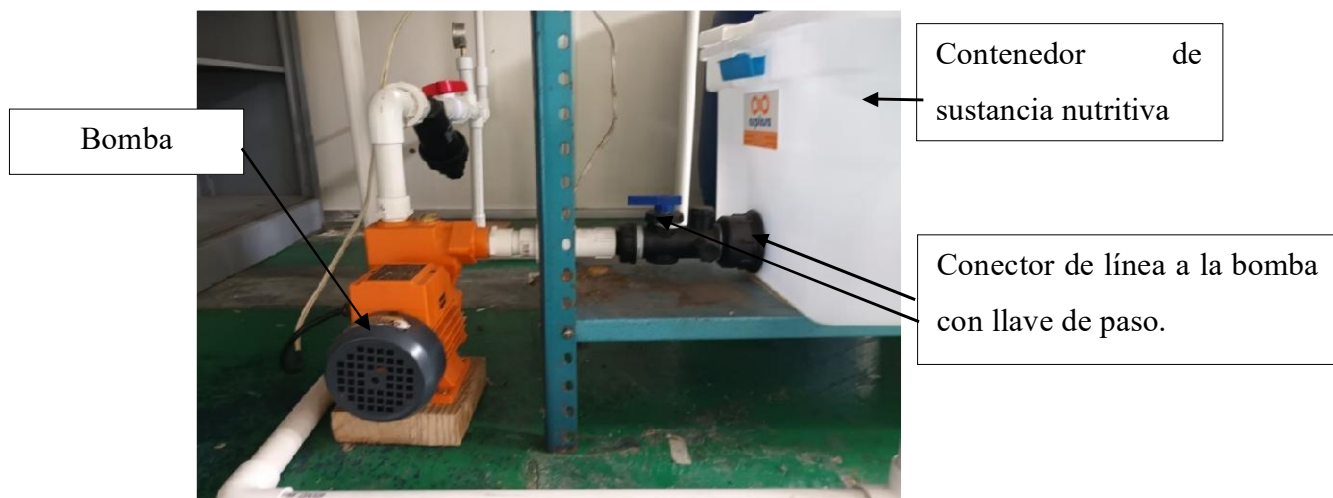
4.4 Contenedor de sustancia nutritiva

El contenedor de sustancia nutritiva puede contener 70.66 litros, pero no es llenado en su totalidad ya que solo ocuparemos tres cuartas partes de contenedor como se muestra en la Figura 4.4, es decir 53 litros con una altura de 22.5 cm, tiene una perforación en su costado de 5 cm, esto para empatar la línea que va a la bomba, la cual contiene una llave de paso la cual es para posibles ajustes, y a su vez está conectada a la bomba periférica autocebante de $\frac{1}{2}$ HP. Como se muestra en la Figura 4.5.



Llenado a tres cuartas partes para evitar derrames.

Figura 4.4 Contenedor de sustancia nutritiva llenado a $\frac{3}{4}$ partes.



Bomba

Contenedor de sustancia nutritiva

Conector de línea a la bomba con llave de paso.

Figura 4.5 Contenedor de sustancia nutritiva.

4.5 Cabezal de instrumentación

El cabezal de instrumentación está compuesto por una bomba, conectores, un filtro, una llave de paso y un manómetro para medir la presión de la solución nutritiva, la cual debe ser de 60 psi para asegurar un funcionamiento óptimo. Este sistema es esencial para el riego eficiente en el invernadero vertical, ya que permite controlar de manera precisa la aplicación de nutrientes a las plántulas. Se realizaron pruebas temporales utilizando agua para verificar el desempeño del cabezal, Figura 4.6. Los resultados fueron satisfactorios, ya que se logró presurizar a 60 psi, generando un rocío de tipo niebla en los aspersores. Este tipo de aplicación es fundamental para garantizar una distribución uniforme de la humedad, lo que contribuye al crecimiento saludable de las plantas. Además, el cabezal está diseñado para facilitar el mantenimiento y la adaptación a diferentes condiciones de cultivo, permitiendo ajustes rápidos en la presión y el flujo de la solución nutritiva según las necesidades específicas de las plántulas en crecimiento. La integración de estos componentes asegura un ambiente y óptimo para el desarrollo de las plantas.



Figura 4.6 Cabezal de instrumentación.

4.6 Línea general de distribución de aspersión

La línea general de distribución de la solución nutritiva se conectó entre el cabezal de instrumentación y la línea de aspersión, permitiendo que el líquido fluyera eficientemente a través del sistema. La tubería, fabricada en PVC, está diseñada para soportar altas presiones, con una capacidad de 28 kg/cm² a 23°C y de 7 kg/cm² a 82°C (Figura 4.7). Estas especificaciones garantizan que el sistema pueda resistir la presión generada por la bomba y producir una aspersión en forma de niebla, necesaria para optimizar la distribución de nutrientes y asegurar un riego uniforme en el invernadero vertical.

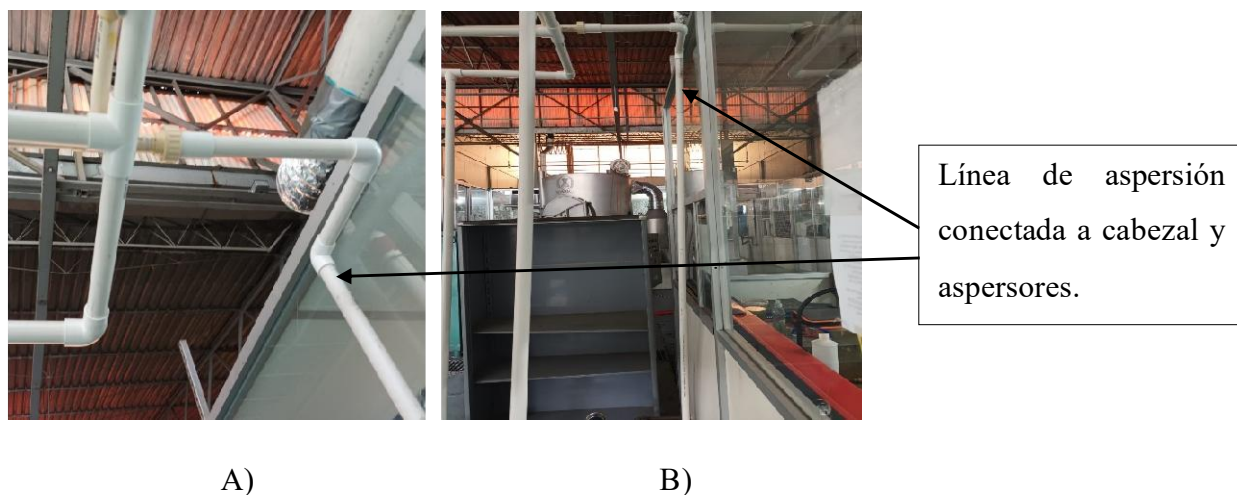


Figura 4.7 A, B) Línea de aspersión.

4.7 Ensamble total

Tras completar el ensamblaje de todos los componentes que conforman el invernadero, se llevaron a cabo pruebas de funcionalidad para asegurar que no existieran fugas de líquido ni de presión. Se purgó la línea y la bomba con el fin de eliminar cualquier acumulación de aire en el sistema. Además, se inspeccionó minuciosamente cada centímetro del ensamblaje, verificando que no hubiera fugas de líquido en ninguna de las conexiones. También se purgó el filtro y se revisaron todas las llaves de paso para garantizar un cierre adecuado y evitar fugas. Aunque la línea de aspersión está preparada para alimentar nueve soportes madre distribuidos en un metro cuadrado, en esta fase inicial solo se activó un aspersor para las pruebas preliminares (Figura 4.8).

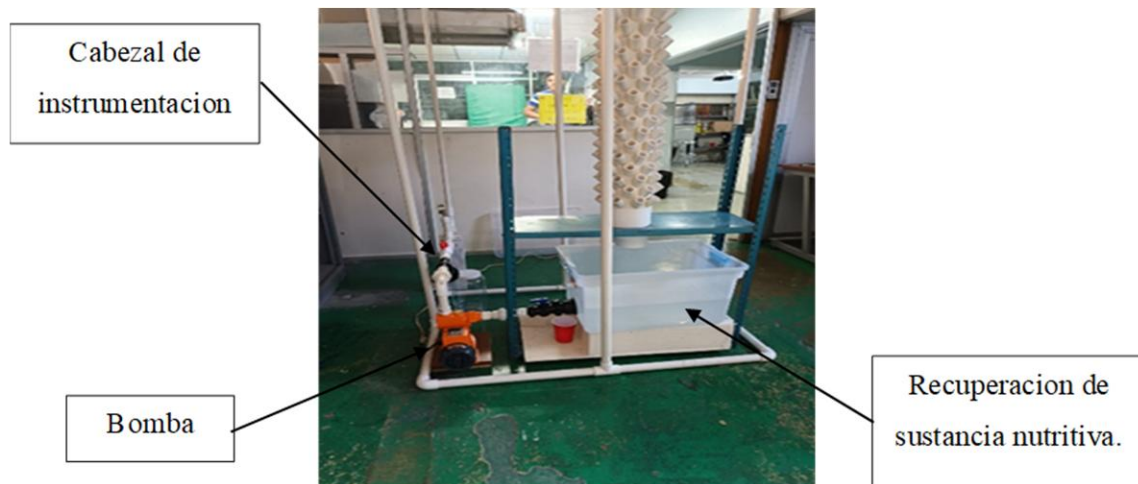


Figura 4.8 Ensamble de bomba, recuperación de sustancias nutritiva y el cabezal de instrumentación.

4.8 Pruebas de funcionamiento

Se realizaron pruebas de funcionamiento e irrigación de agua en los aspersores para verificar su capacidad de generar neblina, utilizando una presión de 60 psi. Después de realizar las pruebas de funcionamiento, se ajustaron los parámetros de presión según sean necesarios para garantizar un rendimiento óptimo de los aspersores y su capacidad para generar la neblina deseada (Figura 4.9).

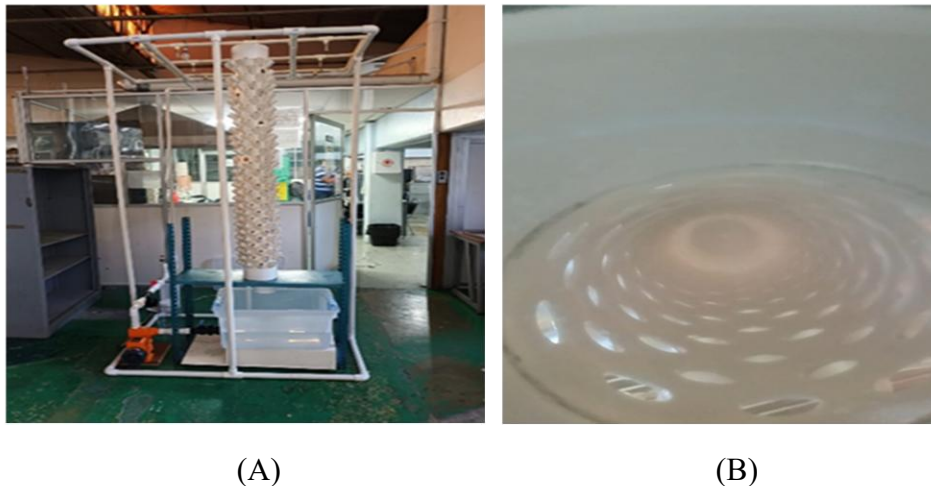


Figura 4.9 A) En funcionamiento, B) prueba de funcionamiento.

4.9 Ensamble Total del Invernadero

Durante el proceso de montaje del invernadero vertical, se llevó a cabo una prueba integral que evaluó tanto la estructura como su funcionalidad. Este procedimiento fue fundamental para garantizar la ausencia de fugas y prevenir cualquier desensamble del sistema. Se revisaron minuciosamente varios componentes, incluyendo el cabezal de instrumentación, la línea de aspersión y el contenedor de la solución nutritiva, así como el ensamblaje de la línea general de aspersión y la línea de la bomba. En esta fase, se utilizó temporalmente un anaquel como soporte para la estructura principal (Figura 4.10). No obstante, se tiene la intención de desarrollar una estructura más robusta que sea capaz de albergar hasta nueve soportes principales en un área de un metro cuadrado. Esta optimización del espacio es crucial para maximizar la eficiencia del invernadero vertical.



Figura 4.10 Ensamble general de invernadero vertical.

4.10 Evaluación de los resultados

Tras completar las pruebas de funcionamiento, el enfoque se centra nuevamente en las plantas de caña de azúcar, que han alcanzado un nivel de desarrollo adecuado para la obtención de esquejes destinados al proceso de enraizamiento en el invernadero. Se marcó el inicio de la extracción de las plantas madre de caña para desarrollar los esquejes. En esta

etapa, se observó que la planta madre, al comenzar a producir hijuelos, consume una cantidad considerable de nutrientes para su propio crecimiento. Por esta razón, resulta fundamental retirarla para que los hijuelos puedan aprovechar al máximo los recursos disponibles y asegurar su óptimo desarrollo. Para llevar a cabo este proceso, se empleó un cúter previamente desinfectado, con el objetivo de evitar cualquier tipo de contaminación en las plantas. Tras retirar la planta madre, se aplicó polvo de canela para cicatrizar el corte, favoreciendo así el potencial de crecimiento de las plántulas. Además, se realizó un registro detallado de las plantas, enumerándolas para llevar un control preciso sobre cuántas plántulas crecerán en cada maceta, lo que facilita el seguimiento del proceso de cultivo. Este cuidadoso procedimiento establece una base sólida para el desarrollo exitoso de los esquejes de caña de azúcar, asegurando el uso eficiente de los recursos y promoviendo un crecimiento saludable de las nuevas plantas.

4.11 Resultado de funcionamiento de sensores en Berro y frijol

A continuación, se describen los resultados de los sensores, su conexión y el funcionamiento de la interfaz, así como el despliegue de las pestañas correspondientes. Las pruebas iniciales de temperatura, humedad y pH se realizaron a temperatura ambiente y se llevaron a cabo en un entorno controlado utilizando un recipiente transparente con sellado hermético. Este recipiente fue empleado para realizar ensayos de enraizamiento con berro y frijol, con el propósito de evaluar el comportamiento del enraizamiento y verificó la operatividad de los sensores antes de proceder con pruebas en plántulas de caña de azúcar. Este enfoque preliminar garantizó la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos. En la Figura 4.11, se observa el contenedor de plástico con perforaciones realizadas en la parte central superior de la tapa, las cuales permitieron la inserción del sensor de temperatura y humedad. En esta fase, se ha decidido omitir la prueba de pH, dado que dicho parámetro fue monitoreado de manera independiente utilizando soluciones buffer durante el proceso de enraizamiento de las plántulas de caña de azúcar, asegurando que los sensores funcionen en condiciones óptimas.

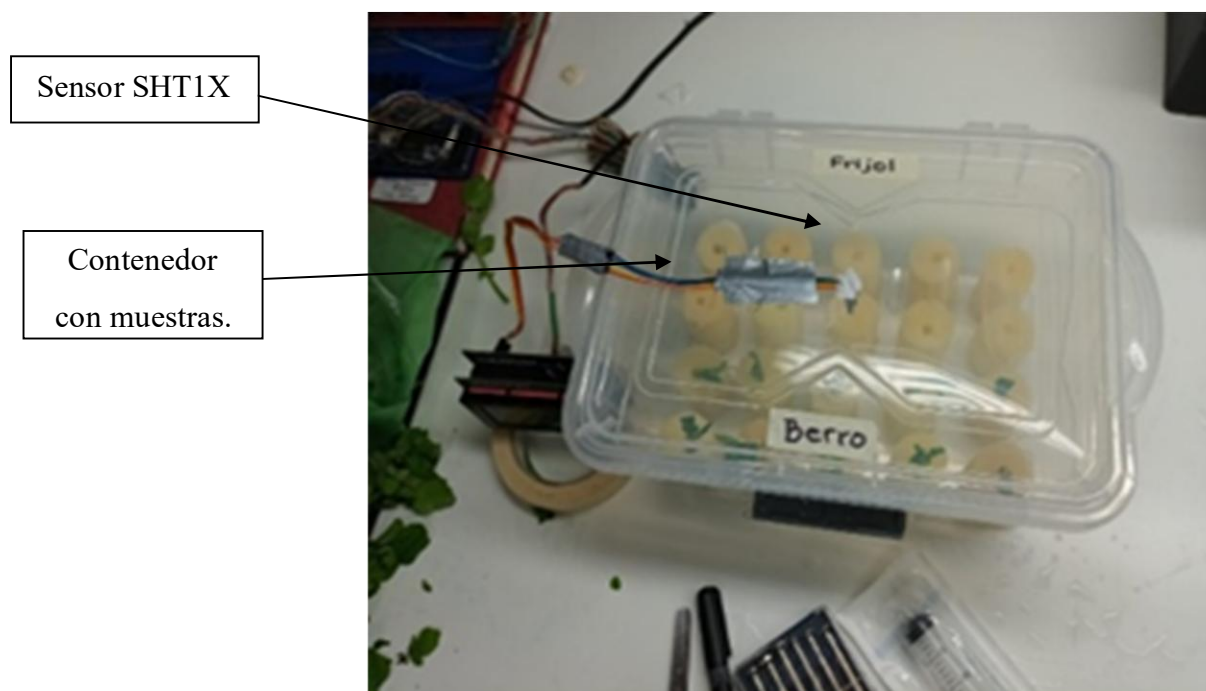


Figura 4.11 Acondicionamiento de sensor de temperatura y humedad.

Una vez activados los sensores en el contenedor, se cargó el código correspondiente, como se muestra en la Figura 4.12, lo que permitió obtener lecturas de nuestras variables. Sin embargo, aún era necesario integrar todos los elementos en nuestra interfaz para garantizar un funcionamiento óptimo y una visualización clara de los datos.

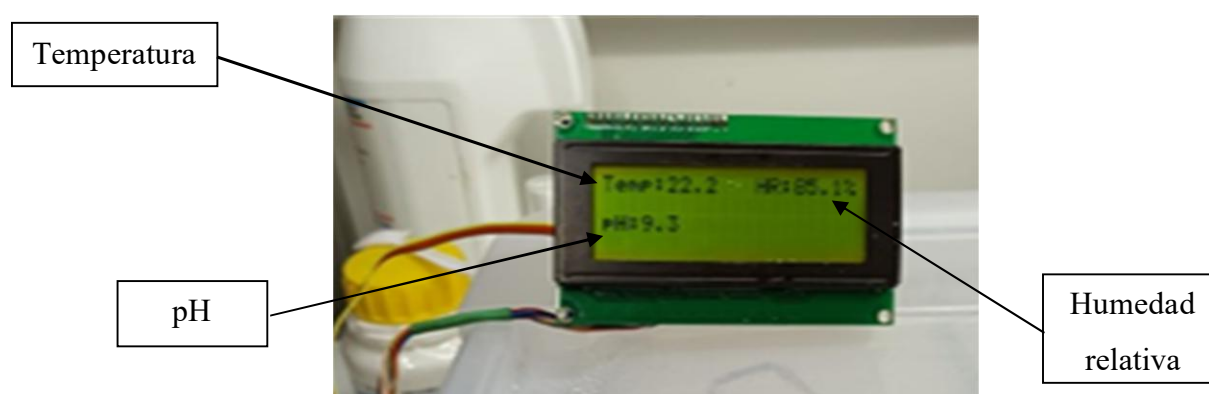


Figura 4.12 Lectura de variables, temperatura y humedad relativa.

4.12 Diseño interfaz gráfica Python Qt Desinger

Se diseñó una interfaz gráfica utilizando Python y Qt Designer. Como se muestra en la Figura 4.13, se abrió una ventana en la que se añadieron los correspondientes tab widgets. Estos elementos permiten la creación de múltiples ventanas dentro de la misma interfaz, facilitando

así el monitoreo de las variables seleccionadas: temperatura, humedad y pH. Tras definir las variables a monitorear, se procedió a programar en Python los códigos necesarios necesarios para generar las gráficas en la interfaz desarrollada con Qt. Se asignaron las bibliotecas requeridas para configurar las gráficas, incluidas aquellas relacionadas con la comunicación serial, que permiten visualizar los datos desde el IDE de Arduino a través del ESP32. Este proceso es fundamental para la interacción efectiva con los datos monitoreados.

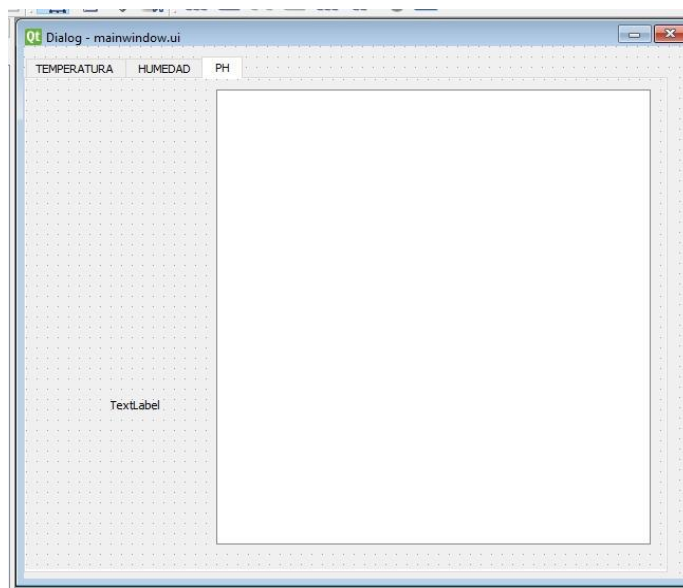


Figura 4.13 Interfaz gráfica en Qt Designer.

4.13 Diseño de la Interfaz Gráfica en Python

Se llevó a cabo el diseño de una interfaz gráfica utilizando Python y Qt Designer. En primer lugar, se abrió una ventana, tal como se muestra en la Figura 4.14, en la cual se añadieron los correspondientes tab widgets. Estos elementos permiten la creación de múltiples ventanas dentro de la misma interfaz, facilitando así el monitoreo de las variables seleccionadas: temperatura, humedad y pH. Tras definir las variables a supervisar, se programaron en Python las instrucciones necesarias para generar las gráficas en la interfaz desarrollada con Qt. Se asignaron las bibliotecas requeridas para configurar las gráficas, incluidas las relacionadas con la comunicación serial, lo que permite visualizar los datos desde el IDE de Arduino a través del ESP32. Este aspecto es fundamental para la interacción con los datos monitoreados.

```

1 # Librería para funcionalidades de Interprete ventana
2 import sys
3
4 # Librerías ambiente QT
5 import PyQt5
6 from PyQt5.QtWidgets import *
7 from PyQt5 import QtCore
8 import pyqtgraph
9 from PyQt5.QtGui import QIcon, QPixmap, QMovie
10 from collections import deque
11 import serial
12
13 # Variables de grafica
14 Y = deque([0], maxlen=100)
15 Y2 = deque([0], maxlen=100)
16 Y3 = deque([0], maxlen=100)
17
18 pyqtgraph.setConfigOption('background', 'w') # color
19 pyqtgraph.setConfigOption('foreground', 'k')
20
21 # Importar la Interfaz gráfica de QT
22 import mainwindow_auto
23

```

Figura 4.14 Interfaz gráfica en Python

La primera gráfica, Figura 4.15 corresponde a la temperatura, para la cual se estableció un rango de 0 a 100 grados Celsius, con un espaciado de 0.5 entre puntos, asignando los ejes de tiempo y voltaje

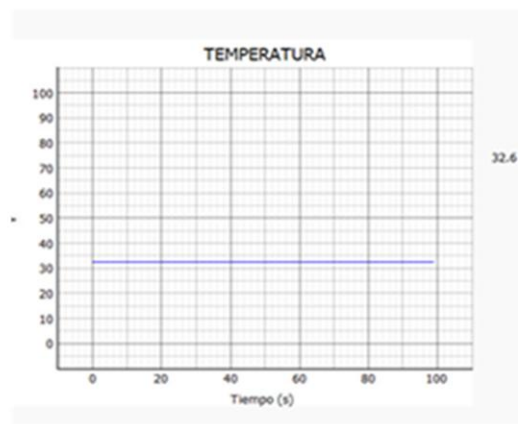


Figura 4.15 Interfaz en Qt Designer temperatura.

La segunda gráfica (Figura 4.16), que monitorea la humedad, se configuró con un rango similar de 0 a 100, utilizando las mismas etiquetas de tiempo y voltaje. Posteriormente, se añadieron las variables que serían graficadas y se importaron a la interfaz gráfica de Qt. Las variables a graficar fueron denominadas Y1, Y2 y Y3. Se generó la ventana principal, lo que permitió convertir el código de C++ a Python, facilitando así la visualización de la interfaz. Luego, se definió la función de inicio y se configuraron las gráficas para cada variable.

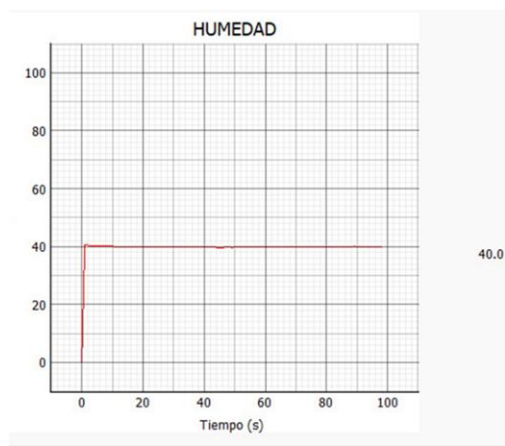


Figura 4.16 Interfaz en Qt Desinger humedad

En cuanto a la tercera gráfica (Figura 4.17), correspondiente al pH, se amplió el rango de visualización de 0 a 14, lo que permitió observar claramente los valores graficados.

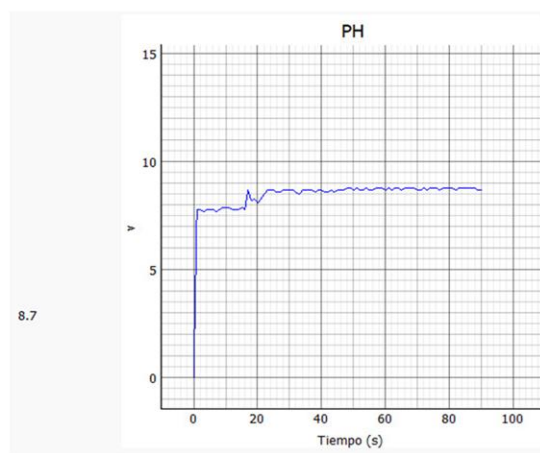


Figura 4.17 Interfaz en Qt Desinger pH

Se definieron las lecturas y la impresión de datos en las respectivas etiquetas, convirtiendo los datos de tipo cadena (STR) a flotante (FLOAT), dado que algunas de las variables, como el pH, pueden contener números decimales. Posteriormente, se procedió a graficar los datos. Finalmente, se ejecutó la función principal (def main), que inicia la ventana y se agregó un temporizador con un intervalo de 100 milisegundos. Esto asegura que las gráficas se actualicen en tiempo real cada 100 milisegundos, Figura 4.18

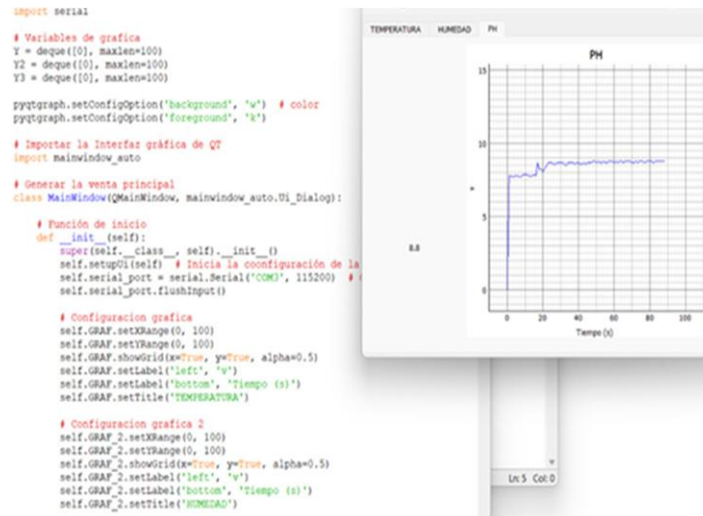


Figura 4.18 Código en Python y Qt Desinger.

4.14 Software

Proteus es un software especializado que ofrece una solución integral para el diseño y desarrollo de proyectos electrónicos. Este programa permite realizar desde el diseño esquemático del circuito, pasando por la programación del software de control, hasta la construcción y diseño de la placa de circuito impreso (PCB). Una de sus características más destacadas es la capacidad de simular el funcionamiento de los componentes electrónicos en tiempo real, lo que facilita la verificación del diseño antes de su fabricación física. Asimismo, Proteus ofrece herramientas para la depuración de errores, la generación automática de la documentación necesaria para la producción y la implementación final del proyecto. Gracias a su capacidad de simular microcontroladores y otros componentes programables, permite probar el código directamente sobre el circuito simulado, lo que lo convierte en una herramienta esencial en el proceso de desarrollo de sistemas electrónicos complejos.

4.15 Diseño electrónico

En el esquemático, Figura 4.19, muestra la etapa inicial que está compuesta por varios amplificadores operacionales (opamps). El conector identificado como J1 representa la entrada de la sonda de pH, la cual opera en el rango de milivoltios. Dado que la sonda de pH es un transductor que genera señales muy bajas, estas se envían primero a un filtro RC, cuyo propósito es eliminar el ruido no deseado. A continuación, la señal se dirige al primer amplificador operacional, que actúa como un seguidor de voltaje. Este seguidor tiene la función de preservar el voltaje original mientras suprime el ruido. Después de esta etapa de

filtrado inicial, la señal es sometida a un proceso de amplificación con una ganancia de 6.8, lo que incrementa su nivel. Posteriormente, la señal es filtrada nuevamente, pasando a través de un integrador que compensa cualquier desviación en la señal. En esta etapa, las resistencias desempeñan un papel fundamental. La etapa final consiste en un amplificador adicional que aplica una ganancia mínima, pero cuyo objetivo principal es invertir la polaridad de la señal. El propósito de estas etapas es realizar la conversión y el escalado de la señal, eliminando el ruido y garantizando que la señal esté dentro de un rango adecuado para su lectura. Para este proceso, se utilizó una fuente de alimentación bipolar de ± 12 V y tierra. La elección de amplificadores operacionales en configuración inversora facilita los cálculos involucrados en el diseño del circuito. La señal resultante de este proceso se envía a la entrada A0 del ESP32, específicamente al pin GPIO34, que ha sido configurado como el pin 4. Esto significa que la señal detectada por la sonda de pH en J1, después de ser amplificada, filtrada y compensada, es procesada por el ADC del ESP32. Además, se incluyen cuatro conexiones adicionales denominadas "sensor", diseñadas para proporcionar una solución modular. Dado que el sensor no puede estar directamente integrado en la placa, estas conexiones permiten que se posicione en diferentes partes del sistema. Los pines del sensor incluyen VIN, que se conecta al pin de 3.3 V; GND, que corresponde a la tierra; SDA, que controla los datos; y SCL, que maneja el reloj, ambos en una configuración I2C (Figura 4.19).

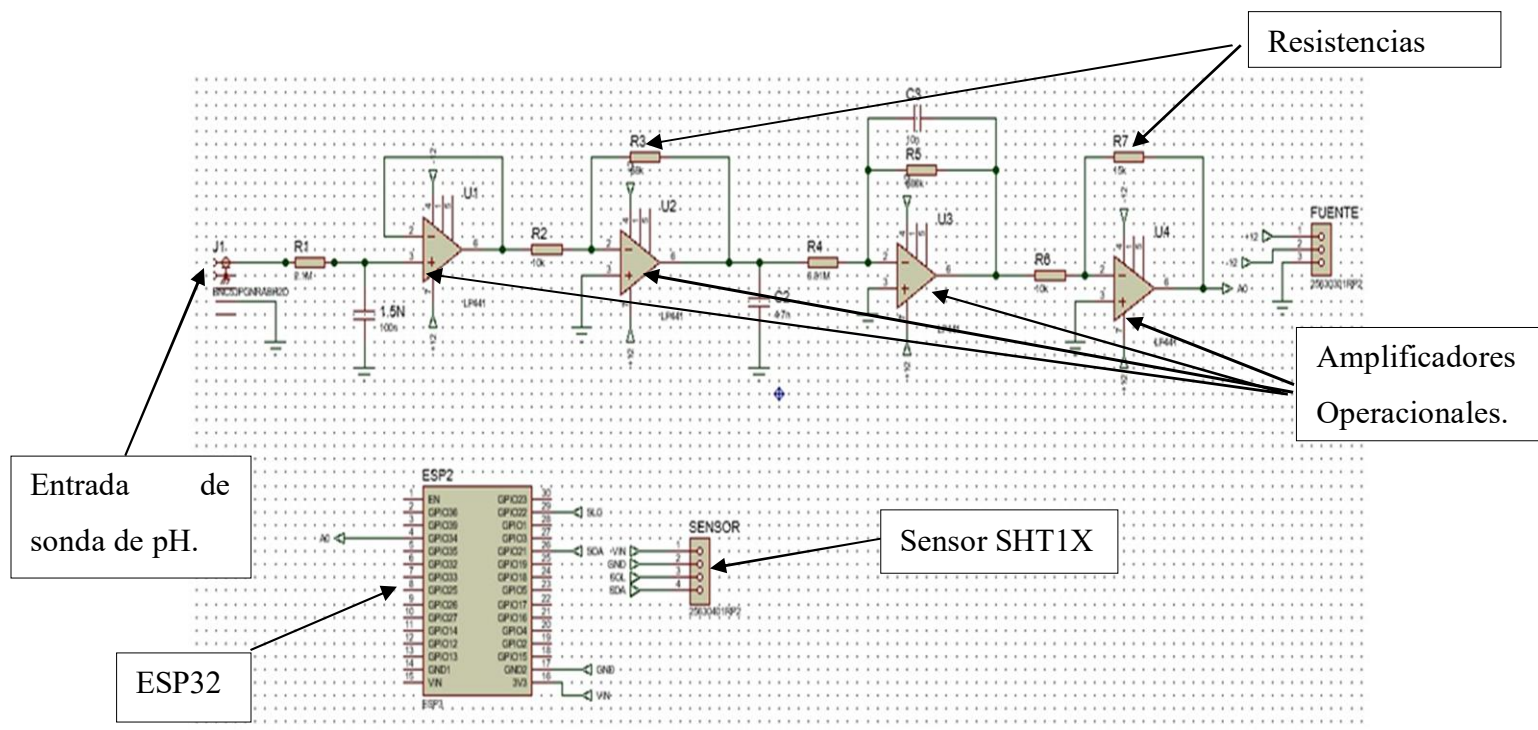


Figura 4.19 Diseño de PCB.

4.16 Pruebas de sustrato

En el proceso de realización de las pruebas de sustrato, se llevaron a cabo tres tipos de pruebas diferentes: sustrato húmedo sin inserto, sustrato húmedo con inserto y sustrato húmedo con inserto y bolsa. Se elaboró una gráfica que muestra los días de realización de las pruebas proporcionando información sobre la hora, día, fecha, humedad relativa temperatura, con el objetivo de analizar el comportamiento de cada muestra a lo largo del tiempo. Estos datos se recopilaban y analizaban para identificar las ventajas y desventajas del sustrato. Los resultados mostraron una hidratación duradera y una excelente aireación para las raíces de las plantas.

4.16.1 Sustrato húmedo

Peso inicial del sustrato 0.6 gramos (Figura 4.20). Se observó una variación en el peso inicial del sustrato como se muestra en la Tabla 4.1 el cual fue de 0.6 gramos desde el primer día hasta el día ocho, evidenciando cambios en la retención de humedad y en temperatura mostrando una media de humedad relativa de 59.75 % y una temperatura media de 16.05°C (Gráfica 4.1).

Tabla 4.1 Datos de variación de sustrato húmedo

DÍAS	SUSTRATO					HORA	FECHA	TEMPERTURA	HUMEDAD
	1	2	3	4	5				
1	31.6	32.7	33.6	33.3	32.1	12:45	01/02/2023	21.5	65
2	24.9	25.8	27.2	26.5	25.3	01:00	02/02/2023	22.4	69
3	20.9	21.5	23	22.3	21	12:15	03/02/2023	20.8	74
4	8.1	8.3	10	8.8	8.2	01:00	07/02/2023	20.8	67
5	5.8	6	7.4	6.4	5.5	11:50	08/02/2023	20.4	64
6						12:50	09/02/2023	22.5	71
8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	14:50	13/02/2023	20.8	68

Gráfica 4.1 Variación peso con sustrato húmedo vs tiempo.

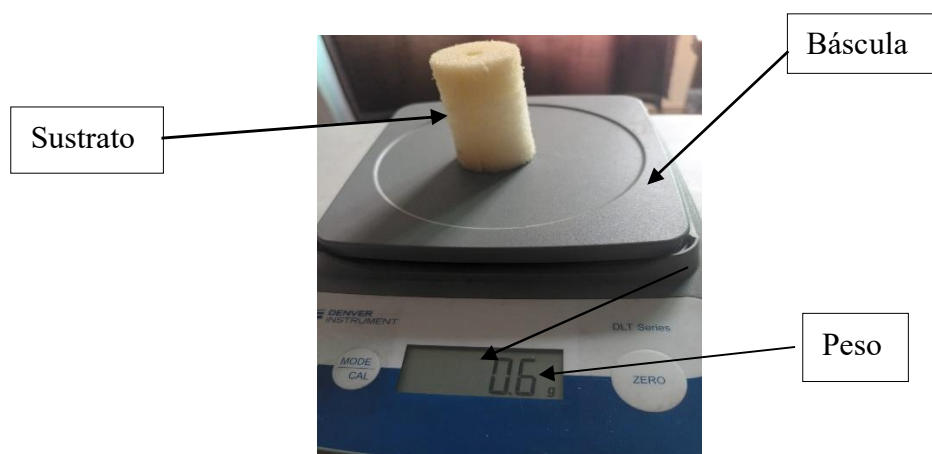
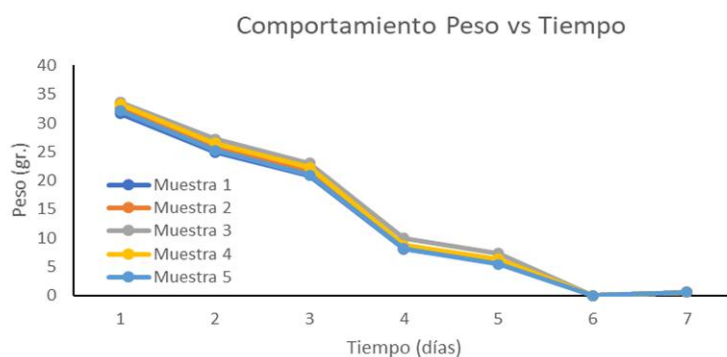


Figura 4.20 Peso del sustrato.

4.16.2 Sustrato húmedo con inserto

Peso inicial del sustrato fue de 0.6 gramos, el peso de la bolsa fue de 1.2 gramos. Se observó una variación en el peso inicial del sustrato, el cual ahora está contenido dentro del inserto (Figura 4.21). La temperatura inicial fue de 20.35°C y una humedad relativa media del 62.5 %. Cada muestra mostró una variación en peso con respecto a su peso inicial, como se puede

observar en la Tabla 4.2, teniendo en cuenta el peso del inserto con el sustrato húmedo (Gráfica 4.2)

Tabla 4.2 Datos de variación de sustrato húmedo con inserto

Con tubo									
0	18	20.1	16.2	16.2	24.4	HORA	FECHA	TEMPERATURA	HUMEDAD
1	41	45.4	41.2	40.3	47.6	03:00	13/02/2023	20.8	68
2	37.1	42	37.5	36.9	45.1	01:00	14/02/2023	20.6	67
3	34	39.5	34.8	34.1	42.9	01:00	15/02/2023	22.9	65
4	30.5	36.6	31.7	30.9	40.3	12:30	16/02/2023	23.5	61
5	28	34.5	29.5	28.6	38.5	10:00	17/02/2023	21.9	70
6	21.6	28.3	23.2	22	32.5	12:15	20/02/2023	20.1	64
7	19.8	26.3	21.1	19.8	30.4	01:00	21/02/2023	21.5	63
8	18.9	24.6	19.3	18.2	28.6	10:30	22/02/2023	21.2	57
9	18.1	22.3	17.9	16.9	26.4	11:30	23/02/2023	23.9	53
10	18	20.1	16.2	16.2	24.4	12:30	27/02/2023	23.5	63
11	18	19.9	16.2	16.2	24.4	13:30	28/02/2023	24.2	56

Gráfica 4.2 Variación tiempo-peso con sustrato húmedo con inserto.

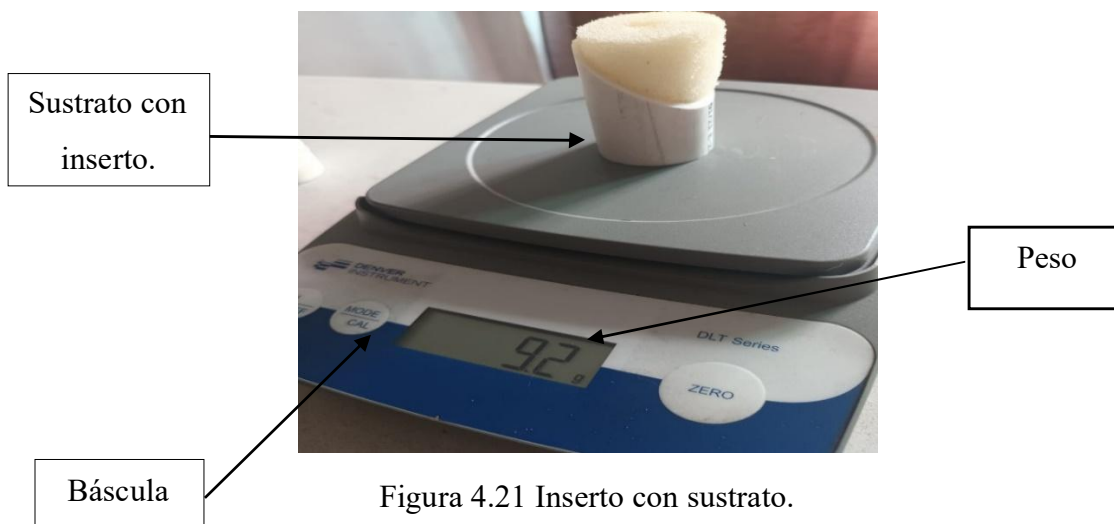
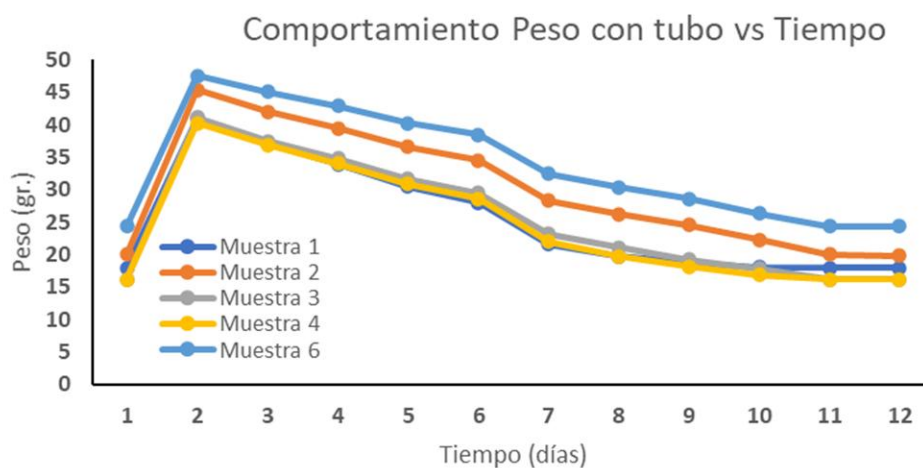


Figura 4.21 Inserto con sustrato.

4.16.3 Sustrato húmedo con inserto y bolsa

El peso inicial del sustrato fue de 0.6 gramos y el peso de la bolsa fue de 1.2 g. En la Tabla 4.3 muestra la variación del peso del sustrato húmedo con inserto y bolsa a lo largo de un periodo de observación de 14 días. Cada punto en la gráfica 4.3 presenta el peso del sustrato en gramos registrado en un día específico. Durante el periodo de observación, se observa una disminución gradual en el peso del sustrato (Figura 4.22). El día cero, se registró un peso inicial del sustrato de 16.3 g, y experimentó un incremento a 41.4 g en el día dos. A partir del día tres, se observó una tendencia decreciente en el peso del sustrato, alcanzando su punto más bajo de 17.8 g en los días trece y catorce. Se registraron datos adicionales relacionados con la temperatura media osciló entre 20.1°C y 25.2 °C, mientras que la humedad relativa promedio vario de 50% a 70 %. La gráfica proporciona una representación visual clara de la variación del peso del sustrato húmedo con inserto y bolsa a lo largo del tiempo, lo que permitió una mejor comprensión de su comportamiento en este contexto. Una vez obtenida esta prueba, de acuerdo con los resultados obtenidos, se debe discutir cual es el mejor para utilizar en la germinación, si es sustrato seco o húmedo para iniciar la redacción de ensayos para determinar el comportamiento de las especies a plantar.

Tabla 4.3 Datos de variación de sustrato húmedo con tubo y bolsa.

Con tubo y bolsa						HORA	FECHA	TEMPERTURA	HUMEDAD
0	16.3	16.3	18.9	15.4	17.4				
1	41.4	42.5	44.7	41.7	41.5	01:00	15/02/2023	22.9	65
2	40.2	35.7	38.2	40.1	40.3	12:30	16/02/2023	23.5	61
3	38.6	34.4	36.7	38.6	38.4	10:00	17/02/2023	21.9	70
4	34.2	30.5	32.7	33.6	33.4	12:15	20/02/2023	20.1	64
5	32.5	29.1	31.4	31.9	31.6	01:00	21/02/2023	21.5	63
6	31.1	27.9	30.2	30.5	30	10:30	22/02/2023	21.2	57
7	28.8	25.9	28.4	28.2	27.6	11:30	23/02/2023	23.9	53
8	22.7	20.8	23.3	22.6	21.8	12:30	27/02/2023	23.5	63
9	21.3	20.1	22.4	21.3	20.8	13:30	28/02/2023	24.2	56
10	20	19.5	21.7	19.8	20	14:30	01/03/2023	25.2	50
11	19.4	19	21.2	18.8	19.5	12:00	02/03/2023	24.5	50
12	17.8	17.7	20.4	16.9	19	01:00	06/03/2023	24.4	54
13	17.8	17.7	20.4	16.9	19	01:30	07/03/2023	24.5	57
14	17.8	17.7	20.4	16.9	19	02:30	13/03/2023	25	57

Gráfica 4.3 Variación tiempo-peso con sustrato húmedo con inserto y bolsa

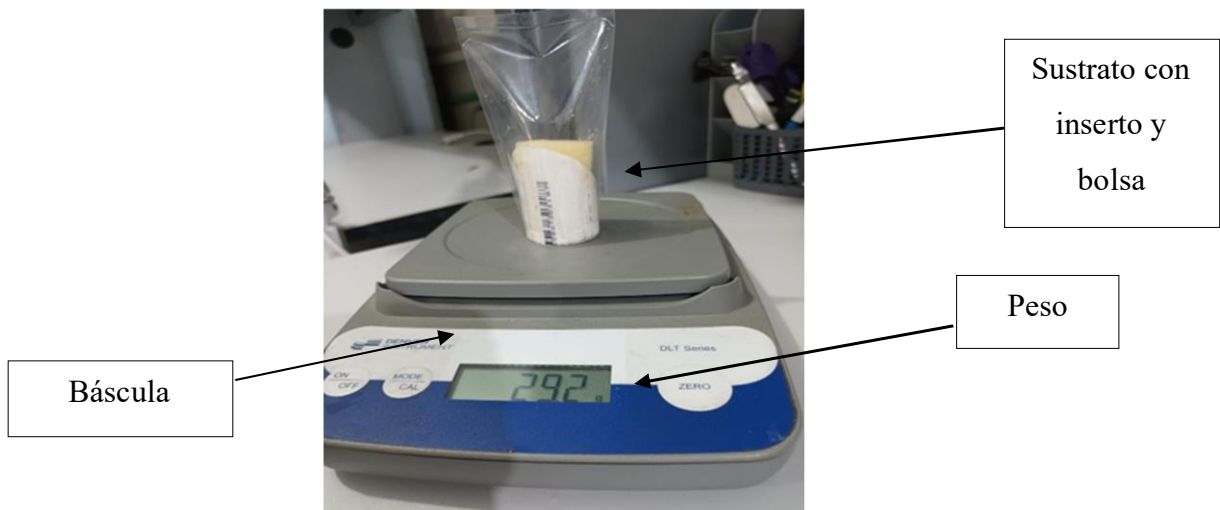
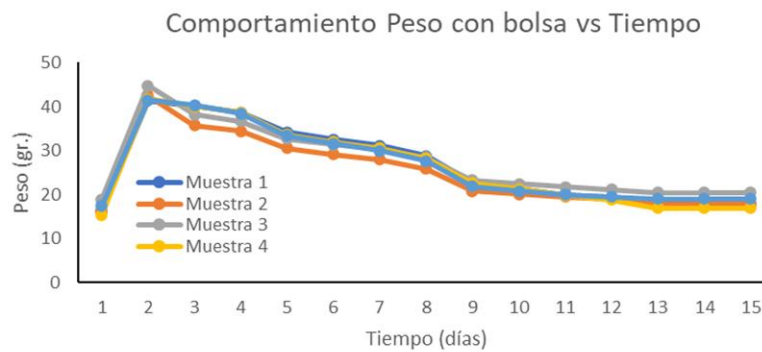


Figura 4.22 Inserto con sustrato y bolsa.

4.17 Cuidados iniciales

Se realizó un monitoreo cuidadoso de la aparición de plántulas en la primera semana y se aseguró que reciban el agua adecuada, poniéndose a una distancia de 3 cm evitando la competencia entre ellas. Después de completar tres días de monitoreo, se empezó a observar raíces en los berros, y los frijoles que germinaron. En el siguiente control, programado para el 27 de noviembre, pasaron 7 días, las plántulas ya habían desarrollado raíces más de 3 cm lo suficientemente grandes como para ser trasplantadas (Figura 4.23).



Figura 4.23 Monitoreo de temperatura y humedad en el contenedor.

Durante el periodo comprendido se puede apreciar un notable crecimiento en el tamaño de las raíces tanto del berro como el frijol (Se midieron las raíces con un vernier) que ha germinado satisfactoriamente, con respecto a otras investigaciones. Sin embargo, es importante destacar que aún no se ha implementado la instalación del sensor de temperatura y pH, lo cual es un aspecto pendiente en el monitoreo y control del entorno de crecimiento de las plantas (Figura 4.24).

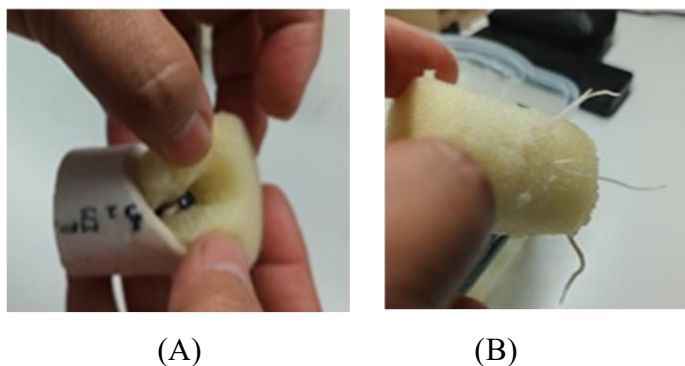


Figura 4.24 Evolución del proceso de enraizamiento A) inicio, B) Dos días después.

Se registraron las primeras raíces de las muestras, asignandoles etiquetas individuales para los frijoles como M1,M2,M3, y así sucesivamente, mientras que para los berros se han designado las etiquetas de E1,E2,E3, y así sucesivamente. Después de seis días, se instaló el sensor de temperatura y humedad, registró lecturas promedio de 22.5°C para la temperatura, y 88.3% de humedad relativa. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4, donde la temperatura de 24.7 °C y HR: 73.6 %, fueron las mejores condiciones.

La Tabla 4.4 presenta el crecimiento de las raíces y el tallo de diez muestras de frijol (denominadas M1 al M10) a lo largo del tiempo. Se registraron las mediciones de longitud de las raíces y el tallo en diferentes fechas, como se detalla a continuación:

Raíz (mm): Se registró la longitud de la raíz mediante un vernier de cada muestra de frijol en milímetros en las fechas especificadas.

Tallo (mm): Se midió la longitud del tallo mediante un vernier de cada muestra de frijol en milímetros en las fechas especificadas.

Por ejemplo, en la muestra M1, se observó sin una longitud de raíz “S/T” (Sin tallo) en el transcurso de 7 días. Estos datos proporcionan información sobre el crecimiento y desarrollo de las muestras de frijol a lo largo del tiempo, lo que resulta fundamental para comprender su evolución y tomar decisiones informadas en el contexto del estudio. Las mejores muestras fueron las del frijol, que presentaron un crecimiento rápido.

Tabla 4.4 Tabla de crecimiento del frijol.

	Raíz	Raíz	Tallo
Frijol	29/11/2023	01/12/2023	01/12/2023
M1	S/R	G	S/T
M2	42.83 mm	102.14 mm	116. 64 mm
M3	29.80 mm	41.15 mm	
M4	S/R	18.99 mm	69.55 mm
M5	23.64 mm	79.18 mm	102.07 mm
M6	S/R	S/R	
M7	35.85 mm	71.02 mm	76.65 mm
M8	41.69 mm	79.68 mm	68.24 mm
M9	42.55 mm	100.65 mm	83, 96 mm
M10	54.59 mm	70.87 mm	73.77 mm

S/R: Sin raíz. G: Germinó, S/T: Sin tallo.

La Tabla 4.5 se muestra el crecimiento del berro (*Nasturtium officinale*) durante un periodo específico, registrando la longitud de las raíces en tres días y del tallo en diferentes fechas.

Tabla 4.5 Tabla de crecimiento de berro.

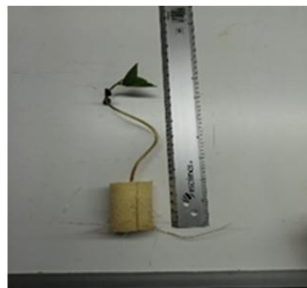
	Raiz	Raiz	Tallo
Berro	29/11/2023	01/12/2023	01/12/2023
E1	S/R	S/R	43.73 mm
E2	S/R	6.39 mm	55.58 mm
E3	S/R	S/R	59.76 mm
E4	S/R	S/R	51.52 mm
E5	S/R	S/R	40.40 mm
E6	S/R	6.51 mm	63.36 mm
E7	S/R	S/R	58.93 mm
E8	S/R	S/R	54.36 mm
E9	S/R	5.57 mm	56.95 mm
E10	S/R	S/R	72.91 mm

S/R: Sin raíz.

Cada muestra del berro se identificó con una etiqueta “E” seguida de un número correlativo. En la columna correspondiente a la fecha 1/12/23 se muestran las mediciones posteriores. Para algunas muestras de berro, se observó un crecimiento significativo del tallo entre las dos fechas registradas, indicando por valores de longitud del tallo mayores en los siguientes 3 días en comparación con la primera. En cuanto a las raíces, se registraron valores de longitud o se indica S/R (sin raíces) si no se observaron raíces en esa fecha específicas. Esto proporciona una visión detallada del crecimiento del berro durante el periodo de estudio (Figura 4.25).



(A)



(B)

Figura 4.25 A) Muestras de berro y frijol, B) medición de crecimiento.

4.18 Preparación del área de enraizamiento

Se preparó el área de enraizamiento, utilizando un contenedor de plástico forrado con papel de servitoalla en el fondo para retenerla humedad, los esquejes fueron colocados en total

oscuridad durante una semana, esperando que desarrollaran raíces de al menos 3 cm de longitud antes de ser trasladados a campo. Se procedió a la hermetización del contenedor de enraizamiento mediante el uso de una bolsa plástica oscura y cinta adhesiva para sellar las juntas y aberturas del recipiente (Figura 4.26). Esto se realizó con el fin de garantizar que no haya fugas de aire ni entrada de luz al interior del contenedor, creando un ambiente óptimo para el desarrollo de las raíces de los esquejes y las yemas. Además, se instaló un sensor de humedad y temperatura dentro del contenedor para monitorear constantemente las condiciones ambientales. Una vez que se selló completamente el contenedor y se verificó las condiciones ideales, se inició el proceso de enraizamiento en total oscuridad. De esta manera, se aseguró que los esquejes y las yemas enraicen en condiciones óptimas, promoviendo un crecimiento saludable y uniforme de las raíces antes de ser trasladadas a campo. El inicio de monitoreo de germinación de caña de azúcar, yemas, esquejes fue a una temperatura: 25°, y a una humedad relativa HR: 80.95%. Después de un periodo de monitoreo de cuatro semanas, las plantas muestran un desarrollo significativo en sus sistemas radiculares, con raíces que han alcanzado longitudes que oscilan entre 8 y 10 cm. Este crecimiento radicular indica que las plantas han alcanzado un estado óptimo para ser transplantadas y establecidas en su lugar final de crecimiento. Las condiciones ambientales controladas y el seguimiento cercano durante este periodo han contribuido al desarrollo saludable de las raíces, lo que prepara a las plantas para continuar su crecimiento de manera robusta y vigorosa.



Figura 4.26 A) Hermetización de contenedor. B) Contenedor cerrado.

Se llevó a cabo un monitoreo detallado de las condiciones de temperatura y humedad en el invernadero. Se registró una temperatura y humedad en el contenedor. Se registró una temperatura de 25°C y una humedad relativa del 80.95 %. Antes de abrir el contenedor, se

observó que la temperatura interna fue de 20.8°C con una humedad relativa del 83%. Durante la inspección, se observó un desarrollo inesperadamente rápido en los nudos de la caña de azúcar. Aunque se esperaba un proceso de enraizamiento de 15 a 20 días, se encontró que los nudos ya presentaban raíces de aproximadamente 1 cm de longitud en tan solo una semana. Se notó que la servilleta colocada en el fondo del contenedor estaba ligeramente fresca, lo que indicaba una necesidad de mayor humedad (agua). Tras cerrar el contenedor, la temperatura interna aumentó ligeramente a 21.5°C, mientras que la humedad relativa se mantuvo en un 84%. En cuanto a los esquejes, se clasificaron según su tamaño en chico mediano y grande. Los esquejes de tamaño chico aun no mostraban signos de enraizamiento, mientras que los de tamaño mediano y grande sí mostraban crecimiento, especialmente considerado que no se les proporcionó un enraizador en el proceso (Figura 4.27).

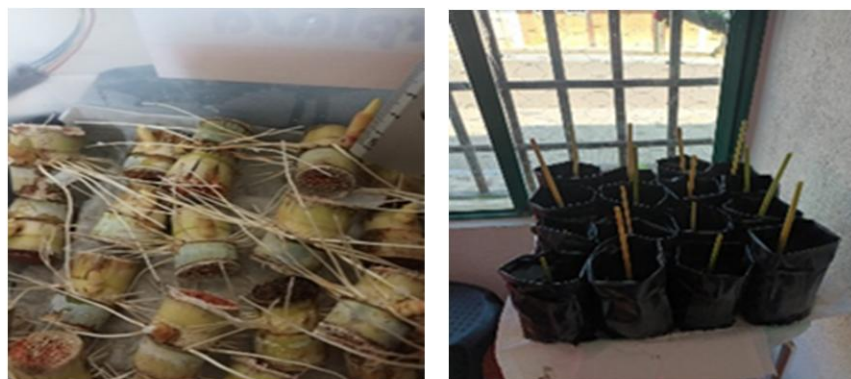


(A)

(B)

Figura 4.27 A) Inicio de raíces en yemas y B) plántulas.

El 21 de diciembre se realizó la revisión de los esquejes y las yemas, con una temperatura inicial de 18.5°C y una humedad relativa del 88.7%. Se determinó que tanto los esquejes como las yemas estaban listos para ser sembrados. En este caso las yemas, se colocó una capa de tierra de 2 cm en la que se introdujo la yema, cubriéndola luego con otros 2 cm de tierra. Se dispusieron en una charola especial para siembra y se les proporcionó luz indirecta, ubicándolas estratégicamente en un lugar donde reciben este tipo de iluminación (Figura 4.28).



(A)

(B)

Figura 4.28 A) Yemas y B) plántulas listas para sembrar a luz indirecta.

Respecto a las yemas, se observó que las raíces tenían una longitud de entre 8 cm y 13 cm, indicando que estaban preparadas para la siembra. Sin embargo, se identificaron algunas yemas contaminadas con hongo, las cuales fueron retiradas para evitar que afectaran a las demás. En total, se eliminaron 6 yemas contaminadas (Figura 4.29).

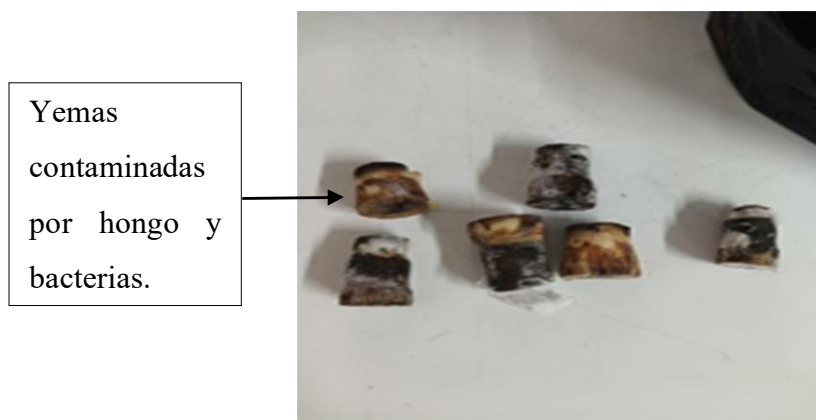


Figura 4.29 Yemas contaminadas.

Al igual que con las yemas, se procedió a sembrar los esquejes con el mismo proceso de capas de tierra y riego, ubicandolas también en un lugar con luz indirecta (Figura 4.30). Respecto a los esquejes o plántulas, se encontró que presentaban raíces de entre 8 cm y 12 cm, indicando su adecuado enraizamiento y su disposición para la siembra. Se clasificaron según su tamaño y se observó que aquellos que no lograron enraizar no presentaban raíces.



(A)

(B)

Figura 4.30 A) Yemas y B) plántulas transplantadas.

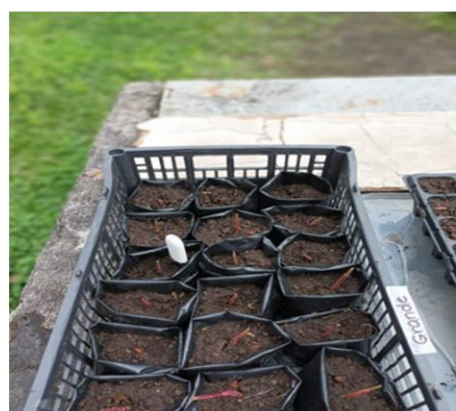
4.19 Monitoreo de humedad y temperatura con un sensor Flower Care

El sistema de monitoreo Flower Care Smart es una herramienta innovadora diseñada para supervisar el estado de las plantas a través de la conexión Bluetooth y una aplicación móvil, (Figura 4.31). Este dispositivo es capaz de medir parametros clave como la humedad, temperatura, luz y fertilidad del suelo. Una vez colocado en el sustrato de cultivo, el gadget activa automaticamente la aplicación móvil y sincroniza los datos recopilados a través de la conexión Bluetooth. Además, cuenta con una extensa biblioteca que ofrece información y consejos específicos para miles de plantas, lo que permite un seguimiento detallado del proceso de crecimiento y desarrollo de las plantas.

Sensor Flower
Care.



(A)



(B)

Figura 4.31 A) Sensor Flower Care, B) Monitoreo con sensor Flower Care.

Después de retirar la planta madre, esta se colocó cuidadosamente en un contenedor diseñado para el enraizamiento por el método hidropónico. En este proceso, se buscó facilitar el desarrollo de raíces saludables que permitan que la planta se establezca adecuadamente una vez replantada. El contenedor se preparó con un sustrato adecuado (tierra, gravilla y samago) y se proporcionó la cantidad óptima de nutrientes y agua para favorecer el proceso de enraizamiento. Una vez que las raíces han crecido lo suficiente, las plántulas fueron transplantadas nuevamente al entorno de cultivo principal, donde continuaron su crecimiento y desarrollo, este método garantizó una alta tasa de supervivencia y un crecimiento vigoroso de las plantas, contribuyendo así al éxito del proyecto de cultivo de caña de azúcar (Figura 4.32).



Figura 4.32 A) Corte de planta madre de caña de azúcar, B) Se pone canela en polvo para evitar contaminación.

4.20 Enraizamiento de planta madre

El enraizamiento de la planta madre se llevó a cabo mediante el método hidropónico, donde se colocó en recipientes enumerados con agua (Figura 4.33). En este sistema de cultivo, las plantas prescinden del suelo como medio de sujeción y obtención de nutrientes. En su lugar, las raíces se sumergen en una solución acuosa que contiene todos los nutrientes esenciales para su crecimiento. Esta técnica se basa en la circulación constante de agua y nutrientes

alrededor de las raíces, lo que permite a las plantas acceder de manera directa y eficiente a los elementos necesarios para su desarrollo. El método hidropónico se puede implementar en una variedad de configuraciones, desde sistemas simples de flotación hasta sistemas más complejos de recirculación. Es comúnmente utilizado en la producción comercial de vegetales, hierbas y plantas ornamentales debido a su eficiencia y versatilidad.



(A)

(B)

Figura 4.33 A) Enraizamiento de planta madre, B) Raíces en planta madre.

Después de que las plantas han enraizado y sus raíces han crecido lo suficiente, se procede a transplantarlas a su ubicación final para su desarrollo y crecimiento óptimo. Este proceso garantizó que las plantas tengan suficiente espacio para expandir sus raíces y acceder a los nutrientes necesarios en el sustrato. Además, el transplante les proporcionó un entorno adecuado para su desarrollo, lo que les permitió alcanzar su máximo potencial de crecimiento. Una vez plantadas, las plantas se cuidan y monitorean de cerca para asegurar que continúen su crecimiento de manera saludable y vigorosa. Después de retirar la planta madre, se procedió a contar cada una de las plantas para determinar cuál de ellas produjo más hijuelos. Esta evaluación es crucial para identificar la opción más adecuada para el proceso de enraizamiento. Con la integración de los sensores seleccionados, el uso de programas específicos para la gestión de datos y la construcción de la estructura del invernadero, se logró establecer un sistema funcional capaz de monitorear de manera precisa las variables ambientales críticas para el crecimiento acelerado de las plántulas de caña de azúcar. Cada decisión tomada en el proceso de desarrollo, desde la elección de las herramientas

tecnológicas hasta el diseño del invernadero, respondió a la necesidad de garantizar un entorno controlado y óptimo para el crecimiento vegetal. El enfoque integral de esta metodología permitió crear un sistema eficiente y adaptable, capaz de ajustarse a las demandas de los cultivos específicos. Además, la utilización de sensores aseguran que este modelo pueda replicarse y ajustarse para otras aplicaciones en la agricultura. En resumen, la combinación de factores electrónicos y estructurales fue clave para lograr un sistema que no solo facilite el monitoreo, sino que también promueva un desarrollo sostenible y eficiente del cultivo.

CONCLUSIONES

El estudio realizado para implementar sensores en un invernadero vertical ha demostrado ventajas significativas en comparación con los métodos convencionales de agricultura, particularmente en el ahorro de espacio y en el desarrollo eficiente de las plantas. Al diseñar un entorno adaptable para el cultivo, se ha sentado la base para un crecimiento optimizado sin el uso de insecticidas o pesticidas, lo que asegura condiciones libres de plagas. Este diseño puede ser replicado a mayor escala, utilizando técnicas como la aeroponía, que permiten una óptima utilización de agua y nutrientes, suministrados a través de una fina niebla. Aunque el desarrollo de las tarjetas electrónicas está previsto para el futuro, en esta etapa inicial del proyecto se activaron los sensores para monitorear las condiciones ambientales del entorno controlado. El monitoreo de variables clave como temperatura, humedad y pH ha demostrado ser una herramienta efectiva para analizar el entorno y asegurar la estabilidad de las condiciones necesarias para el desarrollo de plantas desde cero. Esta monitorización no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también aporta datos valiosos para futuras implementaciones. Este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones en el ámbito de la agricultura y la electrónica aplicada al control de cultivos. Además, subraya la importancia de seguir explorando nuevas formas de optimizar los procesos agrícolas para satisfacer las demandas crecientes del mercado, garantizando a su vez la sostenibilidad en el sector. Esta propuesta marca un hito en la integración de tecnología electrónica en el desarrollo de soluciones agrícolas, abriendo nuevas posibilidades para la optimización del tiempo de crecimiento y de los recursos utilizados.

RECOMMENDATIONS

Desarrollo de la placa

La propuesta para el desarrollo de la placa está concebida para su implementación en proyectos futuros. El diseño de la PCB se planteó de manera compacta, evitando dimensiones excesivas para facilitar su integración en desarrollos posteriores. Se ha diseñado con doble cara, lo que permite reducir el uso de puentes innecesarios. En uno de sus extremos, se ha dispuesto un conector VNC, que funcionará como la entrada principal. Asimismo, se han incorporado perforaciones de mayor tamaño en la placa, con el fin de que pueda instalarse en una base impresa en 3D en versiones futuras, lo que facilitará la colocación de postes y tornillos de fijación. En el extremo opuesto, se encuentran las conexiones para la fuente de alimentación, incluyendo el punto de tierra para el GND y las alimentaciones de +12 y -12 voltios. Además, el diseño contempla la integración de cuatro amplificadores operacionales, responsables de gestionar tanto el filtrado como la compensación de la sonda de pH. Cada uno de estos amplificadores está acompañado por sus respectivas resistencias, cuyo diseño ha sido cuidadosamente planificado para evitar ángulos de 45 grados, lo que reduce las interferencias y el ruido en las señales. En la parte superior de la placa se encuentra la conexión directa al pin analógico, que permitirá la lectura de los datos obtenidos. En la parte inferior, donde se ubican los pines etiquetados como "sensor", se visualizan claramente las conexiones del sensor. La muesca señalada por un punto azul claro indica la conexión al GND del sensor, mientras que los pines destinados a la alimentación, el reloj (SCL) y los datos (SDA) están correctamente identificados para facilitar su integración con otros componentes. Este diseño proporciona una estructura eficiente y funcional, garantizando una conexión estable entre los sensores y el microcontrolador, lo que asegura la confiabilidad del sistema en condiciones operativas, como se muestra en la Figura 1.

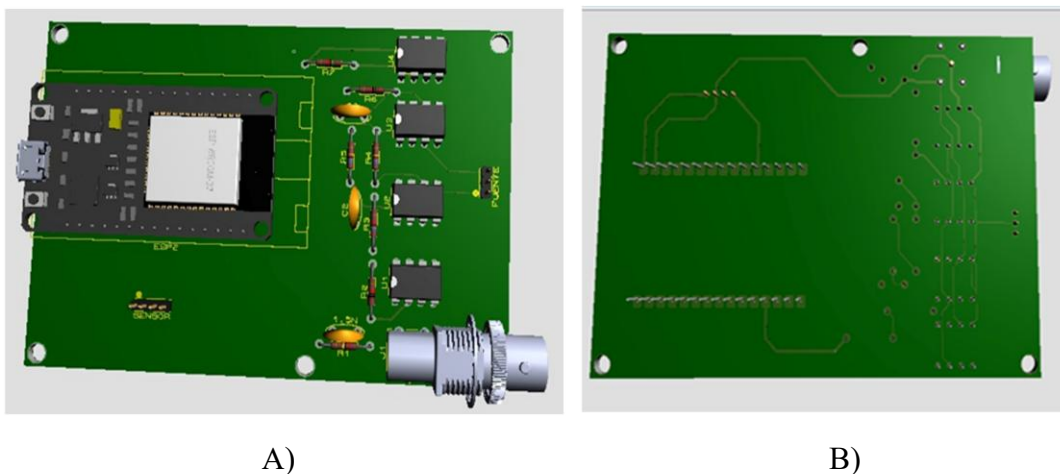


Figura 1. A) Frente de PCB en 3D. B) Reverso de PCB en 3D.

Peso del Soporte Madre

Se llevó a cabo la medición del peso del soporte madre bajo distintas condiciones de humedad de los sustratos. Conocer el peso total del soporte cuando contiene los sustratos humedecidos es crucial, ya que permite calcular el peso total que incluiría tanto los sustratos húmedos como las plantas, facilitando así futuras adecuaciones del sistema. Esta información resulta particularmente valiosa para la implementación y optimización del diseño del invernadero. Para llevar a cabo este procedimiento, se utilizó el soporte madre, diferentes sustratos y una balanza de precisión modelo SECA 2 en 1 (Figura 2).



Figura 2. Báscula de precisión SECA.

Procedimiento

Se colocó la balanza de precisión en una superficie nivelada y estable para garantizar mediciones exactas. Inicialmente, se registró el peso de la báscula en vacío, utilizándose como valor de referencia. Posteriormente, se colocó el soporte madre sin sustratos sobre la balanza, y su peso se anotó en la tabla de datos como “Soporte madre sin sustratos”. A continuación, se llenó el soporte madre con sustratos secos hasta su capacidad máxima, registrándose este nuevo valor como “Soporte madre con sustratos secos”. Después, los sustratos fueron completamente humedecidos, y se permitió un tiempo de absorción del agua antes de registrar el nuevo peso bajo la entrada “Soporte madre con sustratos húmedos” (Figura 3). Este proceso es clave para obtener información que será esencial en futuras modificaciones y ajustes del sistema, optimizando su desempeño.

Datos registrados:

Condición	Peso en (Kg)
Soporte madre sin sustratos	7.6
Soporte madre con sustratos con sustratos secos.	7.7
Soporte madre con sustratos húmedos	8.537



Figura 3. Peso de sustratos con insertos

Conclusiones

El soporte madre, inicialmente, presentó un peso de 7.600 kg sin los sustratos. Al incorporar los sustratos secos, su peso aumenta a 7.700 kg. Tras la humectación completa de los sustratos, el peso final registrado es de 8.537 kg (Figura 4). Estos datos reflejan la influencia de la cantidad y humedad de los sustratos en la variación del peso del soporte madre. Esta información resulta crucial para determinar la carga máxima que el soporte puede soportar durante su operación, proporcionando así una base sólida para futuras mejoras y ajustes en el sistema.



Figura 4. Pesado soporte madre.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FAO, "FAOSTAT," 2021. [Online]. Available: <https://www.fao.org/faostat>
- [2] C. Zhao, "Reducing agricultural water and nutrient use through vertical farming: A global assessment," *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 10, p. 104067, 2020
- [3] C. S. D. Castro, "Agricultura vertical para aumentar la producción de alimentos en áreas urbanas," Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela de Agricultura, Silvicultura Pesca y Veterinaria, Babahoyo, Los Ríos, Ecuador, 2023
- [4] T. Bruce and K. Benke, "Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture," *Sustainability: Science, Practice and Policy*, vol. 13, no. 1, pp. 13-26, 2017. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>
- [5] F. Kalantari, M. Tahir, A. R. Joni, and E. Fatemi, "Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review," Faculty of Design and Architecture, University Putra Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia, 2017. [Online]. Available: Fatimah.Kalantari@gmail.com
- [6] FAO. (2023). "The state of food security and nutrition in the world". The state of agricultural of commodity markets 2023. Retrived from FAO. Org, Food and Agriculture Organization of the United Nation. Rome 2022. Casa del libro Gandhi. LibreriaNorma.com https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=Uyh_EAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR6&dq=The+state+of+agricultural+commodity+markets+2023.+Retrieved+from+FAO.org.&ots=uDJ73r6Quo&sig=g7dcJs qmg3C_QbWPmU2bMN-zF5c#v=onepage&q&f=false
- [7] R. González and P. Martínez, "Vertical farming: Innovation in urban agriculture," *Journal of Urban Agriculture*, 2023
- [8] T. Lee and S. Parks, "Enhancing crop production with advanced greenhouse technologies," *Agriculture Engineering Today*, 2022. [Online]. Available: <https://www.haifa-group.com/haifa-blog/enhancing-crop-production-modern-greenhouses-through-specialized-fertilizers-and-improved>

- [9] H. Brown and D. Johnson, "The impact of climate change on sugarcane cultivation," *Climate and Agriculture. International Journal of Agronomy*, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2015/547386>
- [10] G. P. Allsopp, "Manejo integrado de la mosca blanca de la caña de azúcar en Australia: un éxito en evolución," *Annual Review of Entomology*, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-112408-085406>
- [11] P. W. M. Maduranga and R. Abeysekera, "Machine learning application in IoT-based agriculture and smart farming: a review," *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 4, no. 12, pp. 24-27, 2020. [Online]. Available: <http://www.ijeast.com>
- [12] L. Crotti, A. Pistillo, I. Zauli, D. Meneghello, M. Martin, G. Pennisi, G. Gianquito, and F. Orsini, "Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing system, far-red radiation, and planting density on lettuce cultivation," *Science Direct*, 2023. [Online]. Available: <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108365>
- [13] M. Yuvaraj and K. S. Subramanian, "Prospects of aeroponics in agriculture," *Advances in Life Sciences, Department of Nano Science and Technology, Coimbatore - 641 003*, 2023.
- [14]] G. S. J. Santos, S. V. Ferreira, C. A. G. Moraes, F. V. J. Magalhães, P. A. Garcia, and K. C. Umezu, "Technological advancements in mechanized sugarcane cultivation applicable to family farming: influences on SDG. A review," *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.1-018>
- [15] H. Sheykin, "Aumentar la ganancia de la granja urbana," *Urban Vertical Farming Service*. [Online]. Available: <https://finmodelslab.com/es/blogs/profitability/urban-vertical-farming-services-profitability>. [Accessed: 2023]
- [16] "¿Qué es la agricultura vertical y cuál es su importancia?" *Blog Agricultura*, 2023
- [17] M. Tuam, "La gran apuesta de Singapur por la agricultura urbana," *MIT Technology Review*. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.es/s/12719/la-gran-apuesta-de-singapur-por-la-agricultura-urbana-vertical>. [Accessed: 2020]

- [18] FAO, "El futuro de la alimentación y la agricultura: Vías alternativas hacia 2050. Versión corta," Rome, 2018. [Online]. Available: <https://www.fao.org/3/ca3471es/CA3471ES.pdf>. [Accessed: 25-Sep-2024]
- [19] P. A. Reyes, C. A. Aguilera, D. M. López, y J. O. Rubio, Construcción de invernaderos de madera tipo capilla. Invernaderos de plástico polietileno y de plástico polietileno con techo de policarbonato, cap. 8, INIA.
- [20] UpKeep, "Cuáles son los diferentes métodos de agricultura urbana?," UpKeep. [Online]. Available: https://upkeep.com/es/learning/methods_urban_farming/. [Accessed: 2023].
- [21] Y. A. Casadiego Sepulveda, "Vertical agriculture and controlled production environments: An activity that optimizes the use of natural, economic and human resources," [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/332462285_Vertical_Agriculture_and_Controlled_Production_Environments_An_activity_that_optimizes_the_use_of_natural_economic_and_human_resources_La_Agricultura_Vertical_y_los_Ambientes_Controlados_de_Produccion. [Accessed: 2019]
- [22] M. J. Sanz Bohigues, "World Food Building. Arquitectura Urbana de Plantagon Architecture," Arquitectura y Empresa. [Online]. Available: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/world-food-building-agritectura-urbana-de-plantagon-architecture>. [Accessed: 2018].
- [23] A. Perdigones, I. Peralta, J. Muñoz, y V. Pascual, "Tecnología de producción: Sensores para el control climático en invernadero", Depto. Ingeniería Rural y Departamento. Producción Vegetal Fitotecnia, UPM, septiembre de 2004.
- [24] OJ Duarte Álvarez y JD González Villalba, Guía Técnica: Cultivo de Caña de Azúcar , JICA, San Lorenzo, Paraguay, 2019.
- [25] SRC Especialistas en Regulación y Control de Temperatura, "Tipos de Sensores de Temperatura", [En línea]. Disponible: <https://sr.com//consejo-sen-temperatura/> .

[26] SensorGO MKT, "Utilidad del Sensor de Humedad para el Cultivo de Plantas en Invernaderos", Sensor Go, 30 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://s.metro/s-de-humedad/>.

[27] Y. A. Casadiego Sepulveda, "Vertical agriculture and controlled production environments: An activity that optimizes the use of natural, economic and human resources," [Online].Available:

https://www.researchgate.net/publication/332462285_Vertical_Agriculture_and_Controlled_Production_Environments_An_activity_that_optimizes_the_use_of_natural_economic_and_human_resources_La_Agricultura_Vertical_y_los_Ambientes_Controlados_de_Produccion. [Accessed: 2019]

[28] SAGARPA Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar, "Ficha Técnica del Cultivo de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.)", [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/cms/uploads/adjunto/archivo/1418/Ficha_Tecnica_Ca_a_de_Azucar.pdf

[29] Dirección de Comunicación de la Ciencia, "La caña de azúcar, tan importante como el petróleo", Universidad Veracruzana, <https://www.uv.mx/cientifico/no/a-importancia-petroleo/>.

[30] M. Picazo, "La agricultura vertical ahorra agua y asegura los alimentos", El Tiempo, 30 de junio de 2023.<https://www.e.es/no/la-agricola-ver-ahorra--agu-y-como-los-alimentos>.

[31] Hidroponia, "AEROPONÍA: UNA TÉCNICA DE OTRO NIVEL", [En línea]. Disponible : <https://hidroponia.mx/aeroponia-una-tecnica-de-otro-nivel/>. 2024.

[32] B. Author, C. Researcher, and C. Scientist, "Vertical farming: Skyscraper sustainability," Technol. Soc. Mag., vol. 32, no. 4, pp. 48-55, Dec. 2013

[33] D. Innovator and E. Engineer, "Vertical greenhouse design for urban agriculture," Trans. Sustain. Agric., vol. 5, no. 2, pp. 112-119, Jun. 2017.

[34] A. Martínez-Sibaja, "DISEÑO DE UN INVERNADERO VERTICAL E INTEGRACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA SU INSTRUMENTACIÓN

ELECTRÓNICA," Agro Productividad, vol. 10, no. 10, 2018. [En línea]. Disponible: <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/87>.

[35] B. Sharma, R. Raffik, and R. Sathyamurthy, "Designing and implementing a smart transplanting framework using programmable logic controller and photoelectric sensor," Energy Reports, vol. 8, pp. 430-444, 2022.

[36] G. A. Carvajal Ruiz and E. F. Camelo Quintero, "Diseño e implementación de un sistema de control de riego para prototipo automatizado de cultivos aeropónicos de cilantro," Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), 2019. [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/28089>.

[37] Z. Zamudio Beltrán, D. López Gutiérrez, R. Molina Pérez, D. E. Morales Palma, y F. J. Osorio Oliveros, "La importancia y aplicaciones de los microcontroladores en la Electrónica," Universidad La Salle México, 2020. [En línea]. Disponible: <https://ingenieria.lasalle.mx/la-importancia-y-aplicaciones-de-los-microcontroladores-en-la-electronica/>.

[38] J. Pelegrí, "Robots para agricultura: hacia un mayor aprovechamiento de los recursos," Universal Robots, 16 mayo 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.universal-robots.com>.

[39] Novagric, "Control de la Temperatura en un Invernadero," Novagric - Soluciones y servicios especializados en riego, invernaderos y tecnología agrícola. [En línea]. Disponible: <https://novagric.com/control-de-la-temperatura-en-un-invernadero/>.

[40] Novagric, "Control de la Humedad Relativa en los cultivos en Invernadero," Novagric - Soluciones y servicios especializados en riego, invernaderos y tecnología agrícola. [En línea]. Disponible: <https://novagric.com/control-de-la-humedad-relativa-en-los-cultivos-en-invernadero/>.

[41] Agrosolmen, "Irrigación Eficiente. AGROSOLMEN S.L. EXPERTOS EN RIEGO," Agrosolmen - Más de 25 años de experiencia en ingeniería y tecnología del agua. [En línea]. Disponible: <https://agrosolmensl.es/eficiencia-del-riego-en-invernaderos-mejores-practicas/>.

- [42] V. González, "La luz adecuada para agricultura vertical," Iluminet, 22 de junio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://iluminet.com/la-luz-adecuada-para-agricultura-vertical/>.
- [43] H. Méndez-Guzmán, J. Padilla-Medina, et al., "IoT-Based Monitoring System Applied to Aeroponics Greenhouse," *Sensors*, vol. 22, no. 15, 2022.
- [44] All About Circuits, "Medición de pH," *Direct Current (CC) Vol. 9: Señales de instrumentación eléctrica*, [En línea]. Disponible: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-9/ph-measurement/>.
- [45] E. A. Monje, J. M. Gutiérrez Arias e I. López Cruz, "Diseño de un control óptimo para regular la concentración de CO₂ al interior de un invernadero," *Pistas Educativas*, no. 130, pp. 1-10, Nov. 2018. [En línea]. Disponible: Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- [46] F. Specialist and G. Expert, "LED lighting systems for vertical farming," *J. Agric. Food Syst. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 23-31, Mar. 2019.
- [47] K. Designer and L. Developer, "Efficiency analysis of vertical farming systems," *Trans. Ind. Appl.*, vol. 15, no. 4, pp. 231-238, Nov. 2020
- [48] J. Pimentel, L. Baláz, and F. Friedler, "Optimization of vertical farms energy efficiency via multiperiodic graph theoretical approach," *ScienceDirect*, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jelepro.2023.137938>
- [49] K. Benke and B. Tomkins, "Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture," *Sustainability: Science, Practice and Policy*, vol. 13, no. 1, pp. 13-26, 2017. DOI: 10.1080/15487733.2017.1394054
- [50] K. AI-Kodmany, "The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City," *ResearchGate*, 2018. DOI: 10.3390/buildings8020024
- [51] Indoor Ag-Con Designer, "Cultivating Change: Vertical Harvest CEO Talks Urban Farming, Local Impact, and Sustainable Futures," November 2023. [Online]. Available: <https://indoor.ag/cultivating-change-vertical-harvest-ceo-talks-urban-farming-local-impact-and-sustainable-futures/>.

- [52] C. Najera, G. V. M. Cedillo, M. Ros, y J. A. Pascual, "Led lighting in Vertical Farming System Enhances Bioactive Compounds and Productivity of Vegetables Crops," Biology and Life Sciences Forum, Department of Agronomical Engineering, Technical University of Cartagena, 30203 Murcia, Spain. Available: <https://iecho2022.sciforum.net/>.
- [53] M. N. Halgamuge, A. Bojovschi, M. J. P. Fisher, S. Adeloju, y S. Murphy, "Internet of Things and autonomous control for vertical cultivation walls towards smart food growing: A review," Urban Forestry & Urban Greening, vol. 61, Jun. 2021. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127094
- [54] K. C. Shasteen y M. Kacira, "Predictive Modeling and Computer Vision-Based Decision Support to Optimize Resource Use in Vertical Farms," Biosystems Engineering Department, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA. Available: <https://doi.org/10.3390/su15107812>
- [55] K. Al-Kodmany, "The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City," Department of Urban Planning and Policy, College of Urban Planning and Public Affairs, University of Illinois at Chicago, Chicago, IL 60607, USA, Buildings, vol. 8, no. 2, p. 24, 2018. DOI: 10.3390/buildings8020024
- [56] J.E. Bayley, M. Frediani, y K. Yu, "Sustainable Food Production Using HIGH Density Vertical Growing (V)," Acta Hortic., vol. 921, DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.921.11
- [57] PROMUEVEHIDROPONIA, "Aeroponía: Una técnica de otro nivel," marzo 2024. [Online]. Available: <https://hidroponia.mx/aeroponia-una-tecnica-de-otro-nivel/#:~:text=El%20t%C3%A9rmino%20Aeropon%C3%ADa%20proviene%20del,vez%20las%20columnas%20de%20cultivo>
- [58] C. C. Mundt, "Sustainable food production: Constraints, challenges and opportunities," Food Security, vol. 13, no. 3, pp. 585-590, 2021
- [59] INCyTU, "Agricultura de precisión," Oficina de Información Científica y Tecnológica Para el Congreso de la Unión, FCCyT, 2018. Available: www.foroconsultivo.org.mx.
- [60] G. A. J. Osorio, "Diseño y manufactura de un sistema aeropónico," Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Bogotá D.C., Cód. 201414085, 2018.

- [61] A. AISHrout, "Hydroponics, Aeroponic and Aquaponic as Compared with Conventional Farming," American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS), vol. 2313-4410, no. 2313-4402, 2017
- [62] I. Ali-Lakhia, J. Gao, T. N. Syed, F. A. Chandio, y B. A. Buttar, "Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics," Taylor & Francis Online, 2018. DOI: 10.1080/17429145.2018.1472308
- [63] SAGARPA, "Caña de azúcar mexicana", Secretaría de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural Pesca y Alimentación, [En línea]. Disponible: https://www.gob.mx/cms/cargas/archivo_adjunto/256427/B_sico-Ca.pag.
- [64] Boletín Situacional Caña de Azúcar, Sistema de Información Pública Agropecuaria, 2018. [En línea]. Disponible: <https://f.com/ijia/hsv/básico>.
- [65] GroHo Blog, "Crecer en el aire: cómo la aeroponía convierte menos en más", [En línea]. Disponible: <https://www.groho.es/post/crecer-en-el-aire-como-la-aeroponia>
- [66] GroHo Blog, "¿Qué es la aeroponía?" [En línea]. Disponible: <https://www.groho.es/post/aeroponia-como-funciona>
- [67] J. Larrahondo, "Calidad de la Caña de Azúcar: Introducción, Principales Constituyentes Químicos de la Caña de Azúcar y su Relación con el Proceso Industrial",
- [68] D. Palma-López, "Evaluación de sustratos orgánicos para la producción de plántulas de caña de azúcar", Agro Productividad, vol. 11, núm. 12, 2018.
- [69] SAGARPA, "Nutrición del cultivo de caña de azúcar y uso eficiente de fertilizantes," Boletín Técnico Informativo del Sector de la Caña de Azúcar. Disponible en línea: <https://www.gob.mx/conadesuca/>, 2024
- [70] "Temperature Requirements for Seed Germination and Plant Growth," PlantPropagation.org, 2023. [Online]. Available: <https://plantpropagation.org/temperature-requirements/>.
- [71] M. N. Halgamuge, A. Bojovschi, M. J. P. Fisher, S. Adeloju, and S. Murphy, "Internet of Things and autonomous control for vertical cultivation walls towards smart food growing:

A review," *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 61, pp. 1-13, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ufug.2021.127094

[72] J. E. Bayley, M. Frediani, and K. Yu, "Sustainable Food Production Using HIGH Density Vertical Growing (V)," *Acta Horticulturae*, doi: 10.17660/ActaHortic.2011.921.11.

[73] "Temperature Requirements For Seed Germination And Plant Growth," *PlantPropagation.org*, 2023. [Online]. Available: <https://plantpropagation.org/temperature-requirements/>.

[74] F. J. Ramírez, "Sistemas automatizados de control de humedad en invernaderos verticales," *Innovación en Agricultura Sustentable*, vol. 21, no. 1, pp. 15-23, Jan. 2024.

[75] M. Mansoor, I. Haneef, S. Akhtar, A. De Luca, and F. Udrea, "Silicon diode temperature sensors – A review of applications," Institute of Avionics and Aeronautics, Air University, Islamabad, Pakistan, National University of Sciences & Technology (NUST), Islamabad, Pakistan, and Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge, UK, *Cambridge CMOS Sensors*

[76] I. Ali Lakhari, J. Gao, T. N. Syed, F. A. Chandio, and B. A. Buttar, "Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: a review on aeroponics," *Taylor & Francis Online*, DOI: 10.1080/17429145.2018.1472308

[77] Nutricolo, "La humedad relativa en invernadero," *Nutricontrol*, 2020. [Online]. Available: <https://nutricontrol.com/es/la-humedad-relativa-en-invernadero/>. [Accessed: Jun. 25, 2024].

[78] Inveuro, "Cómo controlar la humedad en un invernadero," 2020. [Online]. Available: <https://inveurop.com/es/controlar-humedad-invernadero/>. [Accessed: Jun. 25, 2024]

[79] NOVAGRIC, "Control de humedad relativa en los cultivos en invernaderos," 2023. [Online]. Available: <https://www.novagric.com/es/blog/articulos/control-de-la-humedad-relativa-en-los-cultivos-en-invernadero>

[80] M. Farzad and S. K. Khorram, "pH Measurement," in *Encyclopedia of Analytical Science*, 3rd ed. Elsevier, 2019, pp. 115-120

[81] Hanna Instruments Colombia, "¿Qué es el pH?," [Online]. Available: <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>. [Accessed: 2024].

[82] Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado, "El equilibrio del pH en el organismo," Gobierno, gob.mx, 2018. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/issste/articulos/el-equilibrio-del-ph-en-el-organismo>