

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



**Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido
por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho,**

2022

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGRÓNOMO**

PRESENTADO POR:

Bach. Julio Herbher Chillcce Prado

ASESOR:

Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla

Ayacucho-Perú

2023

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, a la Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Agronomía por haberme acogido en sus aulas y darme la oportunidad de formarme como profesional.

Al Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla, asesor, por su orientación y apoyo constante en logro de este trabajo de investigación.

Al M.Sc. Yuri Gálvez Gastelú, por su contribución en la elaboración del proyecto de tesis.

A los docentes de la Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Agronomía, quienes me brindaron una formación integral.

Del mismo modo, expreso mi agradecimiento a todas las personas que me brindaron su colaboración en la ejecución y el desarrollo de este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
INDICE DE ANEXOS	viii
TABLA DE ACRONIMOS	ix
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I	13
1.1. La Aeroponía	13
1.2. Ventajas de la Aeroponía	14
1.3. Desventajas de la Aeroponía	15
1.4. Tipos de Aeroponía	16
1.5. Modelos de un Sistema Aeropónico	17
1.6. Componentes de un Sistema Aeropónico	20
1.7. La Solución Nutritiva	21
1.8. Generalidades del Cultivo de Lechuga	24
1.9. Tecnología Arduino	27
1.10. Característica de una Placa Arduino	29
1.11. Lenguaje De Programación Libre	30
1.12. Sensores	31
CAPITULO II	32

2.1.	Lugar de Ejecución del Experimento	32
2.2.	Características Climáticas de la Zona	32
2.3.	Materiales y Equipos	32
2.3.1	<i>Materiales</i>	33
2.3.2	<i>Equipos</i>	34
2.4.	Material Genético	34
2.5.	Solución Nutritiva	35
2.6.	Metodología	35
2.6.1	<i>Construcción del sistema aeropónico</i>	35
2.6.2	<i>Construcción del sistema de riego</i>	36
2.6.3	<i>Implementación de la plataforma electrónica Arduino</i>	36
2.6.4	<i>Conducción del ensayo</i>	37
2.7.	Evaluaciones Realizadas	39
2.7.1	<i>Evaluación de la construcción del sistema aeropónico vertical en la producción de lechuga</i>	39
2.7.2	<i>Evaluación del diseño e implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico vertical</i>	39
2.7.3	<i>Evaluación de la rentabilidad económica de la producción del cultivo de lechuga bajo el sistema propuesto</i>	40
CAPITULO III		41
3.1	Construcción del Sistema Aeropónico Vertical en la Producción de Lechuga	41
3.2	Diseño e Implementación de la Plataforma Electrónica de Código Abierto Arduino al Sistema Aeropónico Vertical	42

3.3	Análisis económico de costos de inversión y producción	43
3.4	Rentabilidad económica y financiera	46
	CONCLUSIONES	48
	RECOMENDACIONES	50
	REFERENCIAS	52
	ANEXOS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. <i>Materiales del sistema aeropónico vertical</i>	33
Tabla 2.2. <i>Materiales del sistema de riego</i>	33
Tabla 2.3. <i>Materiales de la plataforma electrónica Arduino</i>	34
Tabla 3.1. <i>Costos del Sistema Aeropónico Vertical de 12 m² para el cultivo de lechuga, costos expresados en S/. Nuevos soles a noviembre del 2022</i>	43
Tabla 3.2. <i>Costos del Sistema de Riego, costos expresados en S/. Nuevos soles a noviembre del 2022</i>	44
Tabla 3.3. <i>Costos de la Plataforma Electrónica Arduino y componentes, costos expresados en S/. Nuevos soles a noviembre del 2022</i>	44
Tabla 3.4. <i>Costos fijos para la producción de 450 plantas de lechugas, expresados en S/. Nuevos soles a noviembre del 2022</i>	45
Tabla 3.5. <i>Flujo de Caja durante 5 años de la producción de 450 lechuga cada 40 días en el sistema propuesto</i>	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. <i>Sistema aeropónico vertical hueca</i>	17
Figura 1.2. <i>Sistema aeropónico en superficies inclinadas</i>	18
Figura 1.3. <i>Sistema aeropónico en paneles verticales</i>	19
Figura 1.4. <i>Sistema aeropónico en panel horizontal</i>	20
Figura 1.5. <i>Placa Arduino Nano</i>	30
Figura 2.1. <i>Flujograma de programación para la plataforma electrónica Arduino</i>	39

INDICE DE ANEXOS

Anexo 01: Lenguaje de programación C++ utilizados para la integración de Arduino al sistema aeropónico, elaborado en Arduino IDE 2.2.1	56
Anexo 02: Panel fotográfico	61

TABLA DE ACRONIMOS

Abreviaturas	Palabra
SN	Solución nutritiva
CE	Conductividad eléctrica
VAN	Valor actual neto
TIR	Tasa interna de retorno
B/C	Beneficio - Costo

RESUMEN

El trabajo de investigación se realizó entre junio de 2022 y abril de 2023 en una vivienda ubicada a -13.184722° de latitud y -74.214352° de longitud, a una altitud de 2871 m.s.n.m., en el distrito de Carmen Alto, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho. El objetivo general fue evaluar la construcción del sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma electrónica Arduino en la producción de lechuga. El sistema aeropónico vertical consiste en 12 m^2 con 12 columnas de PVC de 6" de diámetro y 2 m. de altura. Cada columna contiene 40 plantas de lechuga apoyadas por un codo hidropónico, sumando un total de 480 plantas, se riega con la impulsión de una bomba periférica de 0.5 HP que utiliza mangueras de HDPE y 24 nebulizadores. Arduino permite el control en tiempo real del pH, la conductividad eléctrica de la solución nutritiva, y los sensores de lluvia, que a través de estos activa o desactiva el riego según la disponibilidad de agua presente en las raíces, generando así un ahorro de agua significativo. La integración de Arduino le permitió tener autonomía al sistema aeropónico vertical que ofrece cultivar en el espacio horizontal y sobre todo el vertical, aumentando así la rentabilidad económica por unidad de área. La rentabilidad económica se comprobó con el flujo de caja proyectado para 5 años, cosechando 450 lechugas en 40 días, el VAN fue de 6,503.05, la TIR del 111% y la relación Beneficio – Costo de 3.8, indicando que el proyecto es rentable y genera más ingresos que egresos.

Palabras Clave: Arduino, Aeroponía, Solución Nutritiva, Sensores.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de las problemáticas que afrontan distintos países en el mundo es la insuficiencia de alimentos por el incremento de la población y con esto la competencia por las tierras y el agua, como consecuencia se da un incremento de la pobreza, el hambre y la sobre explotación de las tierras cultivables.

En un estudio del año 2009 realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO, estimó que la producción global de alimentos para el año 2050 debe aumentar un 70%, por sobre la producción de dicho año, para así poder afrontar el hambre mediante una mejor gestión de recursos como el agua y tierras fértiles.

La agricultura ha sido y será uno de los pilares importantes en la economía de los países en desarrollo y el Perú es uno de ellos, esto crea la necesidad de mejorar e impulsar nuevas técnicas de agricultura e ir de lado con la tecnología adecuada para alcanzar la máxima productividad.

La aeroponía se presenta como una alternativa e innovadora forma de agricultura moderna que tiene grandes ventajas frente a otros cultivos tradicionales como el alto rendimientos por unidad de superficie con crecimientos más rápidos y un buen desarrollo de plantas debido a que, en este sistema los nutrientes están más disponibles y mucho más fáciles de ser absorbidos por la planta, los nutrientes son suministrados juntamente con el agua en forma pulverizada o micro gotas que son emitidas por nebulizadores u otro emisor de riego; características por el cual este sistema

está exonerado del uso de tierra ya que las raíces de las plantas están suspendidas en el aire suministrándoles adecuados niveles de humedad.

Los avances de la tecnología en la agricultura han permitido el desarrollo de la automatización en las diferentes formas de agricultura, y la aeroponía no es ajena a estos avances, y se deben de aprovechar adecuadamente para alcanzar óptimos resultados.

En este proyecto se presenta la construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical inteligente asistido por el hardware Arduino, este software libre con un buen diseño y una adecuada sincronización con la parte hidráulica del sistema aeropónico nos permitirá controlar: humedad en la raíz de las plantas, la frecuencia e intervalos de riego de acuerdo con la necesidad del cultivo, pH y conductividad eléctrica de la solución de riego. Todo eso para alcanzar una buena automatización de este sistema y por consiguiente incrementar la productividad.

Por las consideraciones mencionadas, se llevó a cabo la ejecución del presente experimento teniendo como finalidad los siguientes objetivos:

Objetivo general

Evaluar la construcción del sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma electrónica Arduino en la producción de lechuga.

Objetivos específicos

1. Evaluar la contribución de la construcción del sistema aeropónico vertical en la producción de lechuga.
2. Evaluar la asistencia del diseño y la implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico vertical.
3. Evaluar la rentabilidad económica de la producción del cultivo de lechuga bajo el sistema propuesto.

CAPÍTULO I

Marco Teórico

1.1. La Aeroponía

Según la International Society for Soil-less Culture, la aeroponía es un sistema en el cual las raíces se encuentran en contacto constante o intermitente con un entorno saturado de gotas finas de una solución nutritiva.

Dicho de otro modo, la aeroponía se presenta como una variante de la hidroponía, donde las raíces de las plantas se suspenden en el aire, y su nutrición se proporciona mediante una niebla de solución nutritiva. Estas plantas crecen en recipientes que carecen de sustrato y se mantienen en un entorno sin luz.

Dr. Franco Massantini en la Universidad de Pia en Italia, fue pionero en el desarrollo del primer sistema aeropónico, conocido como las “columnas de cultivo”. Estas columnas son cilindros verticales hechos de PVC u otros materiales, con aberturas en sus paredes laterales para insertar las plantas durante el trasplante. Las raíces de las plantas crecen en la oscuridad y pasan la mayoría del tiempo expuestas al aire, lo que da origen al término aeroponía. En el interior de estos cilindros, una tubería distribuye una solución nutritiva mediante una pulverización a baja o media presión (según Durán et al., 2000, p. 43).

La aeroponía maximiza la utilización del espacio vertical en un invernadero. La expansión

del sistema de raíces se potencia gracias a la generosa área disponible y al entorno favorable para su crecimiento, que incluye un equilibrio adecuado de aire y humedad. Esto conduce a un aumento significativo en el crecimiento del follaje. (Martínez, 1993).

1.2. Ventajas de la Aeroponía

Cultivo sin Suelo

La aeroponía posibilita la producción de plantas prescindiendo del uso de suelo y sustratos, lo que elimina la posibilidad de enfermedades que provienen del suelo, contribuyendo así a mejorar la salud de las plantas. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Menor Consumo de Fertilizantes

El uso de soluciones nutritivas en la aeroponía, las plantas adquieren de manera inmediata los nutrientes a través de la absorción por las raíces. Esto contrasta con el sistema convencional, en el que los nutrientes deben ser asimilados gradualmente durante el periodo de cultivo y, en ocasiones, no son completamente aprovechados por la planta debido a diversos factores. Este no es el caso en el sistema aeropónico. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Mejor Sanidad

En un entorno de cultivo bajo invernadero, se mantiene un estricto control de la asepsia, lo que impide que plagas o enfermedades ingresen al recinto. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Menor Consumo de Agua

Dado que se trata de un sistema de recirculación, el agua con la solución nutritiva se emplea de manera constante. La planta absorbe los nutrientes requeridos y luego se renueva periódicamente. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Mayor Número de Plantas en Menor Área

La aeroponía posibilita la producción de un mayor número de plantas por unidad de superficie gracias a la utilización eficiente del espacio vertical. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Mayor Desarrollo del Cultivo en Corto Tiempo

La aplicación constante de pulverizaciones permite a la planta optimizar la absorción de nutrientes, lo que resulta en una asimilación rápida de estos compuestos. Esto tiene un impacto directo tanto en el crecimiento de las hojas como en el desarrollo de las raíces de la planta. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Reduce el Trabajo Agronómico

Se produce una disminución en el uso de energía requerida para llevar a cabo las tareas relacionadas con la preparación del suelo, el control de malezas y la siembra. (Salazar, 1992).

Excelente Aireación

La principal ventaja que ofrece la aeroponía radica en la excepcional oxigenación que proporciona al sistema de raíces, un aspecto que a menudo limita la hidroponía. Es importante tener en cuenta que la concentración de oxígeno disuelto en el agua se mide en miligramos por litro (mg/L), o partes por millón (ppm), y típicamente oscila entre 5 y 10 mg/L a 20° C. En contraste, la concentración de oxígeno disuelto en el aire se mide en porcentaje (21%), lo que significa que la concentración de oxígeno en el aire es aproximadamente 20,000 veces mayor que la concentración del mismo gas disuelto en el agua. (Server, Ellis, Daneel, 2002).

1.3. Desventajas de la Aeroponía

Electricidad Constante

La aeroponía depende de una fuente continua de electricidad para el funcionamiento del temporizador y la bomba eléctrica, esenciales para el correcto funcionamiento del sistema. En su

ausencia, sistema no sería viable. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Costo Inicial Elevado

El elevado gasto asociado a la construcción y montaje se debe en gran parte a los materiales empleados en la edificación del invernadero, así como al sistema hidráulico. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

Calidad del Agua

El agua debe poseer ciertas propiedades que faciliten una mayor absorción de nutrientes por parte de la planta, y se aconseja el uso de agua potable en este sistema. (Durán et al., 2000, como se citó en Mateus, 2010).

1.4. Tipos de Aeroponía

Unidades a baja presión

Para este sistema las raíces de las plantas están suspendidas en el aire como todo sistema aeropónico dentro de un sistema horizontal, vertical o inclinadas, en el cual los nutrientes juntamente con el agua son suministrados en forma de chorros y teniendo un contacto directo con las raíces. Esta forma de baja presión por lo general es utilizada para demostrar los principios del funcionamiento de la aeroponía. Su instalación es de bajos costos ya que se usan bombas de baja presión o simplemente la pendiente de un área.

Unidades de Alta Presión

De este sistema aeropónico su principal característica es que los nutrientes juntamente con el agua son suministrados a través de nebulizadores que generan una nube o niebla de riego, debido a la utilización de bombas de alta presión. Este sistema se usa para generar cultivos a gran escala.

En su artículo titulado “*A High Performance, Gravity Insensitive, Enclosed Aeroponic System for Food Production in Space*” (Un sistema aeropónico cerrado de alto rendimiento e

insensible a la gravedad para la producción de alimentos en el espacio), los científicos de la NASA Stoner y Clawson (1997-1998) destacan la importancia del tamaño de las gotas o nieblas de riego en el crecimiento óptimo de las plantas. Según su investigación, las gotas grandes proporcionan menos oxígeno al sistema de raíces, mientras que las gotas extremadamente pequeñas causan el desarrollo de pelusa en e sistema radicular, lo que impide el crecimiento adecuado de las raíces. El tamaño ideal de las gotas para el riego a alta presión debe oscilar entre 5 y 50 micras.

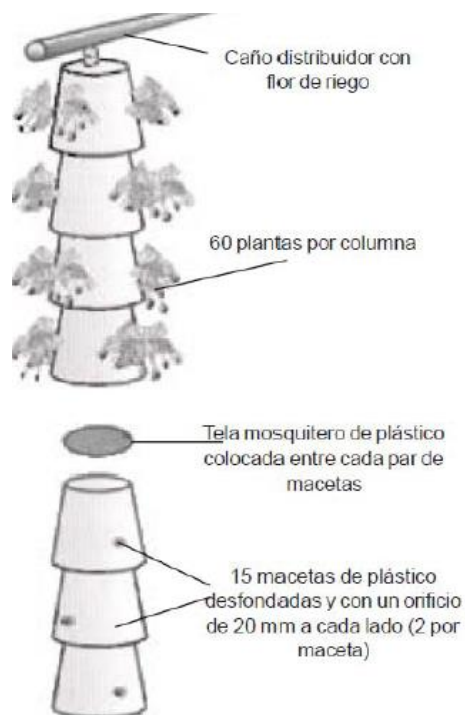
1.5. Modelos de un Sistema Aeropónico

Sistema de Columnas Huecas

Este sistema involucra el uso de columna compuesta por 15 unidades de PVC que están configuradas en forma de macetas cónicas con dos proyecciones y sus correspondientes orificios, que están espaciados a intervalos de 180°.

Figura 1.1.

Sistema aeropónico vertical en columna hueca



Nota. Adaptado de *Sistema aeropónico vertical en columna hueca*, de Arano, 1990, La gaceta del cultivo sin tierra. Dominio público.

La solución nutritiva se distribuye como una ducha desde la parte superior de cada columna. Esta solución fluye a través de las mallas dispuestas entre cada maceta cónica donde descansan las raíces produciendo un riego constante y parejo. (Arano, 1990).

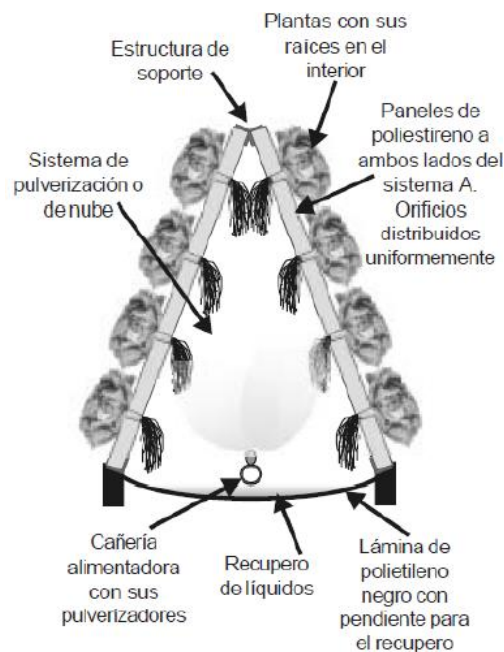
Sistema de Superficies Planas Inclinadas

En este sistema la estructura está compuesta por marcos metálicos o madera contruidos a manera de prisma triangular, la altura depende del diseño requerido, el cual puede ser un triángulo frontal equilátero, isósceles, o de dimensiones requeridas de acuerdo a la necesidad.

Los lados rectangulares del prisma están compuestos por paneles planos de poliestireno (Tecnopor) con espesor de 25 a 35 mm. Ambos frentes triangulares, así como también la base del sistema debe de estar cubiertos por plástico negro para evitar el ingreso de la luz solar y así evitar el desarrollo de algas. El riego se da a través de caños alimentadores o nebulizadores, y un tanque de solución nutritivas. (Arano,1990).

Figura 1.2.

Sistema aeropónico en superficies planas inclinadas



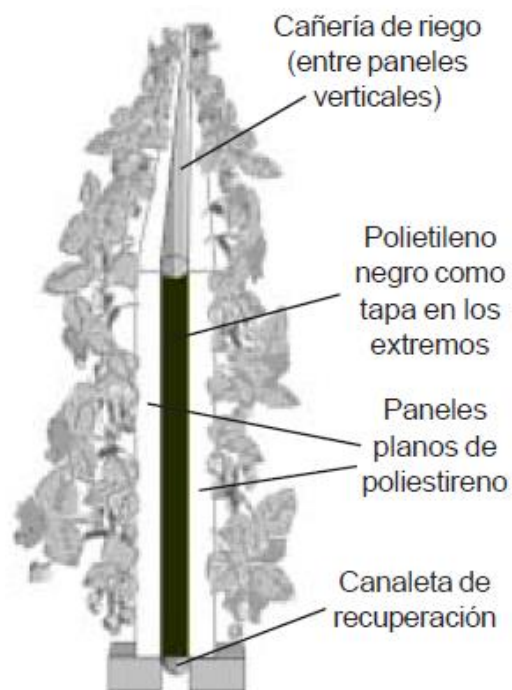
Nota. Adaptado de *Sistema aeropónico en superficies planas inclinadas*, de Arano, 1990, La gaceta del cultivo sin tierra. Dominio público.

Sistema en paneles verticales

Este sistema comprende paneles planos de 1 m² cada uno, fabricados en poliestireno con un grosor de 3 cm. Estos paneles se disponen de manera opuesta en pares, con una separación de 10 cm. entre ellos. Están organizados en cuatro filas, con una distancia de 80 cm. entre cada fila, cada fila tiene una longitud de 10 metros y está compuesta por 10 paneles cada lado. (Arano, 1990).

Figura 1.3.

Sistema aerónico en paneles verticales



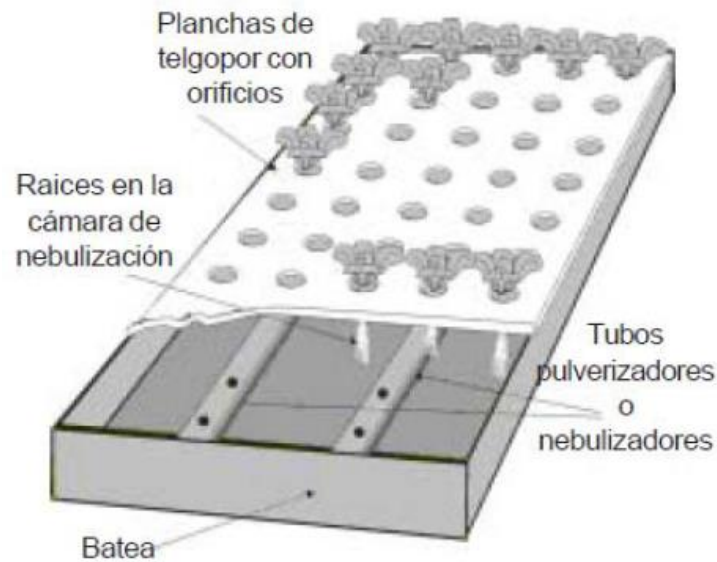
Nota. Adaptado de *Sistema aerónico en paneles verticales*, de Arano, 1990, La gaceta del cultivo sin tierra. Dominio público.

Sistema en Paneles Horizontales

Sistema en el que se usan marcos de aluminio o de madera contruidos a manera de prisma con las dimensiones requeridas para cada cultivo, estas estructuras son colocados horizontalmente aproximadamente a 60 cm. del piso, el cual da el soporte a las plantas, todos los lados de la estructura a excepción del lado superior deben de estar cubierto con plástico para impedir la entrada de luz. (Arano, 1990).

Figura 1.4.

Sistema aeropónico en panel horizontal



Nota. Adaptado de *Sistema aeropónico en panel horizontal*, de Arano, 1990, La gaceta del cultivo sin tierra. Dominio público.

1.6. Componentes de un Sistema Aeropónico

Pérez (2012) señala que los componentes que conforman el sistema aeropónico son los siguientes elementos:

Tanque

Se utiliza para almacenar las soluciones nutritivas y la concentración de esta dependerá de la cantidad de plantas que se deseen cultivar y del tamaño del tanque.

Electrobomba

Tiene la tarea de propulsar la solución nutritiva que empieza en el tanque, fluye a través de la tubería de distribución, pasa por los nebulizadores y, finalmente, se lleva a cabo el riego. La capacidad de la bomba de determina en función del área de cultivo.

Tubería de Distribución

A través de estas tuberías se establece un proceso de recirculación de la SN, que se atomiza para humedecer las raíces.

Tubería de Recolección o Drenaje

Recoge la solución nutritiva que no es absorbida por las plantas desde la base del sistema contenedor y la dirige nuevamente hacia el depósito de SN para su almacenamiento.

Reloj Programador o Timer

Su tarea consiste en regular el encendido y apagado de la bomba eléctrica en intervalos programados de acuerdo con la programación y a las necesidades de riego.

Filtro

Retiene partículas que pudiesen obstruir los nebulizadores. El filtro bien puede ser de mallas o de anillos.

Emisor o Nebulizador

Tiene la función de dispersar la SN en forma de niebla, manteniéndose así suspendidas en el aire.

1.7. La Solución Nutritiva

La SN es el agua con los nutrientes minerales, que se añaden a través de fertilizantes químicos en cantidades y proporciones adecuadas de manera que cubran las necesidades de la planta para un adecuado crecimiento y desarrollo. Existen muchas soluciones nutritivas que cumple el requerimiento nutricional para cada cultivo determinado. La calidad del agua es determinante para la formulación de la solución nutritiva, ya que, este influye mucho en la eficiencia de las mismas. La SN consta de dos soluciones concentradas que no se deben de aplicar directamente a las plantas, se debe realiza un proceso de dilución previa, estas soluciones concentradas son denominadas A y B. La solución concentrada A contiene N, P, K, y Ca; y la solución concentrada Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo y Cl. (Rodríguez, 2002).

El pH de la Solución Nutritiva

El pH de la SN se determina en función de la concentración de ácidos y bases presentes en ella. Para el desarrollo óptimo de las plantas, el pH adecuado de la SN debe estar en el rango de 5.5 a 6.5. Sin embargo, el pH de la SN no es constante y depende de varios factores, como las concentraciones de CO₂ en el ambiente, la velocidad de absorción de nutrientes por parte de las plantas y el tipo de fuente de nitrógeno utilizada, entre otros (Rijck & Schrevens, 1998).

A medida que el pH aumenta, la solubilidad de los iones en la SN, lo que afecta a nutrientes como el calcio (Ca), el fósforo (P) y el hierro (Fe). Por lo tanto, es recomendable acidificar el agua utilizada para preparar la SN para evitar la posible precipitación de nutrientes. Para mantener una buena solubilidad, el pH debe mantenerse en el rango de 5.0 a 6.0; si el pH supera 6.5, se producirán pérdidas de estos nutrientes debido a la precipitación (Rijck & Schrevens, 1998).

Por lo general, las correcciones de pH se realizan para acidificar la SN y ajustarla al rango óptimo. Para reducir el pH a un valor mínimo de 5.5, se agrega una solución ácida compuesta por una mezcla de ácido nítrico (HNO₃) y ácido ortofosfórico (H₃PO₄) en una proporción de 3:1, preparada al 5% (Izquierdo & Carrasco, 1996).

Para aumentar el pH y llevarlo al rango óptimo, se debe preparar una solución básica utilizando hidróxido de potasio (KOH) al 10%. Luego, se añade un pequeño volumen de esta solución a la solución nutritiva. Para hacerlo, los gránulos de este fertilizante se mezclan con 500 ml de agua y se agitan hasta que se disuelvan, después se agrega más agua hasta alcanzar un litro de solución (Izquierdo & Carrasco, 1996)."

La Conductividad Eléctrica (CE) de la Solución Nutritiva

La CE es una medida del contenido total de sales disueltas en el agua o la SN, donde una mayor concentración de sales resulta en una CE más elevada, y viceversa. La CE se expresa en miliSiemens (mS/cm) o en deciSiemens (dS/m) (Richards, 1985).

Cada sal añadida a la SN contribuye al valor de CE de esta, y algunas sales, como el nitrato de potasio, tienen un mayor impacto en el aumento de la CE en comparación con otras sales, como el nitrato de calcio o el sulfato de magnesio.

Para la preparación de una SN, se recomienda utilizar aguas con baja salinidad (menos de 1.0 mS/cm) o, en ciertos casos, aguas ligeramente salinas (de 1.0 a 1.5 mS/cm). El uso de aguas altamente salinas (más de 1.5 mS/cm) debe reservarse únicamente para cultivos resistentes a las sales (Richards, 1985).

Al agregar fertilizantes o soluciones concentradas para la preparación de la SN, se debe asegurar que la CE de la solución no exceda los 2.0 mS/cm, ya que un exceso de sales podría afectar el crecimiento de los cultivos, especialmente aquellos sensibles a las sales (Richards, 1985).

Una menor conductividad permite que la planta absorba el agua con mayor facilidad, ya que la salinidad crea una resistencia al paso del agua hacia la planta debido al mayor potencial osmótico. En algunas etapas del cultivo, puede ser beneficioso mantener una CE diferente de la óptima para el crecimiento vegetativo (Ríos & Santos, 2012).

En sistemas de recirculación, la concentración de la SN depende de la cantidad de sales en la solución de entrada o SN nueva. Si la concentración de nutrientes en la solución de entrada es mayor que la concentración que la planta está absorbiendo, se incrementará la concentración de sales en la solución del sistema. En tales casos, puede ser necesario agregar más agua a la SN para evitar un aumento excesivo de la CE. Si la concentración de sales en la SN de entrada es menor que la que la planta está absorbiendo, la concentración de sales en la SN del sistema disminuirá. Se recomienda que la CE no supere los 2.0 mS/cm y, durante el verano, no sea superior a 1.5 mS/cm (Richards, 1985)."

Temperatura de la Solución Nutritiva

La temperatura de la SN tiene un impacto significativo en la absorción de agua y nutrientes. Para la mayoría de las plantas, la temperatura ideal de la SN se sitúa alrededor de los 22° C. A medida que la temperatura disminuye, también lo hace la capacidad de las plantas para absorber y asimilar los nutrientes. Las bajas temperaturas afectan más la absorción de fósforo que la de nitrógeno y agua. Cuando la temperatura desciende por debajo de los 15° C, suelen surgir deficiencias, especialmente en calcio, fósforo e hierro. La baja temperatura propicia la deficiencia de calcio y aumenta la probabilidad de la pudrición apical en los frutos. Una de las razones por las que la absorción de ciertos nutrientes disminuye a bajas temperaturas se debe a que, en esas condiciones, la endodermis de las raíces se suberiza, lo que reduce su permeabilidad y, en consecuencia, disminuye la absorción de agua y nutrientes. (Graves, 1983).

1.8. Generalidades del Cultivo de Lechuga

Hasta la fecha, el origen de la lechuga (*Lactuca sativa L.*) sigue siendo un tema de debate, pero se cree que, como cultivo domesticado por el ser humano, se originó probablemente en la costa sur y sureste del Mar Mediterráneo, desde Egipto hasta Asia Menor. Esta teoría se basa en la existencia en esta región de una planta de lechuga primitiva. Otra evidencia proviene de pinturas encontradas en tumbas egipcias que datan de alrededor del 4,500 A.C., donde se pueden observar plantas de lechuga similares a las que se cultivan en Egipto en la actualidad (Davis et al., 2002).

La lechuga es una planta que ha evolucionado desde su domesticación a partir de especies silvestres y se ha convertido en un ingrediente fundamental de ensaladas y en una decoración culinaria en todo el mundo. Las primeras referencias escritas sobre esta planta se encuentran en los escritos de Heródoto, quien menciona que la lechuga se servía en las mesas reales persas alrededor del 550 A.C. Muchos otros autores, como Hipócrates, Galileo y Aristóteles, también atribuyeron propiedades medicinales a esta planta (Davis et al., 2002).

La lechuga es una planta anual con una raíz principal que puede alcanzar hasta 30 cm de longitud, de la que brotan numerosas raíces secundarias (Enciclopedia Práctica de la Agricultura y la Ganadería, 2000).

Según Infoagro (2010), la lechuga es una planta herbácea que pertenece a la familia Asteraceae, con un ciclo vegetativo de 3 a 4 meses y una altura que oscila entre 10 y 20 centímetros.

La fenología de la lechuga, según la Universidad de Valladolid (2012), se divide en 4 fases:

Fase de plántula: comienza con la aparición de la radícula y la emergencia de los cotiledones, seguida del crecimiento radicular en profundidad y, finalmente, la aparición de 3 a 4 hojas verdaderas. Esta fase dura de 3 a 4 semanas.

Fase de roseta: se caracteriza por la aparición de nuevas hojas y una disminución en la relación largo/ancho de las hojas. Los peciolos se acortan, y se forma una roseta con 12 a 14 hojas en un período de 3 a 4 semanas.

Fase de formación de la cabeza: las hojas se ensanchan más que alargarse y toman una curvatura a lo largo de la nervadura central. Las nuevas hojas quedan envueltas por las formadas anteriormente, y esta fase dura de 2 a 3 semanas.

Fase de floración: en esta etapa, la calidad de la cabeza disminuye, las hojas se alargan y el tallo comienza a estirarse, lo que eventualmente lleva a la emisión de inflorescencias.

Infoagro (2010), señala que las flores de la lechuga son amarillas y que sus semillas son alargadas y presentan una fisura longitudinal que puede ser blanca, negra o rojiza. El tallo culmina en numerosos capítulos con 5 a 7 flores liguladas de color amarillo, y el conjunto de capítulos forma una inflorescencia en panícula corimbosa.

Suquilanda (2003), indica que las lechugas de cabeza no producen brotes, tienen hojas inferiores grandes y alargadas que se compactan para formar una cabeza. Estas lechugas suelen

ser verdes, con bordes no muy ondulados, nervaduras ligeramente marcadas y cabezas de gran tamaño, pero no muy resistentes al frío.

Infoagro (2010) sugiere que el cultivo de lechuga se adapta a altitudes que van desde 1,800 hasta 2,800 msnm., preferiblemente en climas templados y fríos. Se requiere una precipitación de 1,200 a 1,500 mm. y temperaturas óptimas de 15°C a 18°C, con mínimas de 13°C y máximas de 27°C. Durante la noche, se deben mantener temperaturas entre 3°C y 8°C, y se necesitan al menos 12 horas de luz solar al día en un cielo despejado.

Según Suquilanda (2003), es recomendable rotar los cultivos de lechuga con leguminosas y gramíneas. La siembra y cosecha de lechuga puede llevarse a cabo en cualquier época del año. Para cultivar una hectárea de lechugas, se necesitan alrededor de 280 g. de semillas en un área de 70 metros cuadrados de semillero, considerando que, en promedio, un gramo de semilla contiene unas 750 semillas.

Rolleri (2005), se sugiere iniciar con riego por aspersión en los primeros días después de trasplantar las plántulas de lechuga, lo que favorecerá un buen enraizamiento. Luego, se recomienda implementar un sistema de riego por goteo. Es fundamental proporcionar riego de forma regular y con cantidades moderadas de agua, asegurándose de que la capa superficial del suelo se seque aparentemente entre riegos. Esto ayudará a prevenir la aparición de pudriciones en la base de las plantas y en las partes que entran en contacto con el suelo.

En cuanto a la fertilización de la lechuga, se sugiere aplicar entre 60 y 120 Kg. de nitrógeno por hectárea, de 30 a 50 Kg. de pentóxido de fósforo por hectárea y de 100 a 150 Kg. de óxido de potasio por hectárea. Además, se aconseja incorporar materia orgánica descompuesta con una cantidad de 2.5 Tm/ha. Guamán (2004).

Para determinar el momento adecuado de la cosecha de la lechuga, se utilizan varios

indicadores de madurez. Estos incluyen el tamaño del producto, el grado de compactación de la cabeza o "arrepollamiento", y el tiempo transcurrido desde el trasplante. La fuerza necesaria para comprimir la cabeza con la mano se utiliza como indicador de compactación adecuada. Cuando se necesita una fuerza moderada para comprimir la cabeza, se considera que la lechuga está lista para ser cosechada. Durante la cosecha, es recomendable cortar la lechuga al ras del suelo con un cuchillo afilado, si es posible desinfectado y eliminar las hojas sucias, dañadas por el sol o enfermas (Cerdeja y Montero, 2004).

En general, se establece un período de cosecha que puede variar, pero se encuentra en el rango de 90 a 100 días después del trasplante. Sin embargo, es importante considerar que este período puede ser influenciado por la variedad de lechuga, las condiciones climáticas y la región de producción. Se debe tener en cuenta que prolongar la cosecha más allá de los 2 meses podría resultar en la aparición de flores y en la producción de látex, lo que afectaría negativamente la calidad de la lechuga (Torres, 2002, citado en Cali, 2011).

Macas (1993) menciona que las variedades de lechuga con una mayor productividad pueden alcanzar rendimientos de hasta 30 Tm/ha, con un peso promedio de las cabezas que oscila entre 0.5 y 1 Kg., e incluso superiores en algunas ocasiones. En contraste, las variedades con menor productividad suelen obtener rendimientos de 15 a 20 toneladas por hectárea, con pesos de cabeza que van desde 0.1 hasta 0.5 kilogramos.

1.9. Tecnología Arduino

Software

El software o soporte lógico se refiere al conjunto de programas asociados a un computador o dispositivo tecnológico que desempeñan funciones específicas, los cuales pueden abarcar diversos tipos de programación y control de procesos, entre otros usos. (Campderrich, 2005).

Hardware

Los componentes físicos de los equipos tecnológicos e industriales son todos aquellos elementos que pueden ser tocados o manipulados directamente con las manos. (Díaz, 2012).

Arduino

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto que se caracteriza por su facilidad de uso y consta de placas capaces de recibir entradas, como señales de sensores, botones o mensajes de redes sociales, para luego convertirlas en salidas, como activar motores, encender LEDs o publicar contenido en línea. Para programar Arduino, se utiliza el lenguaje de programación homónimo y el software Arduino IDE. (Arduino, 2020).

Arduino es una placa de hardware de código abierto que integra un microcontrolador reprogramable y una serie de conectores hembra que facilitan la conexión de diversos sensores, actuadores y módulos, como Bluetooth. Además, dispone de un software gratuito, de código abierto y compatible con múltiples sistemas operativos (Linux, MacOS y Windows) que se instala en la computadora y permite escribir, verificar y cargar en la memoria del microcontrolador de la placa las instrucciones que se desean ejecutar. (Torrente, 2013).

Los proyectos basados en Arduino pueden operar de manera autónoma o requerir una conexión constante a una computadora. En el primer caso, una vez que el microcontrolador de la placa ha sido programado, esta puede funcionar de manera independiente, siempre que disponga de una fuente de alimentación adecuada. En el segundo caso, la placa debe mantener una conexión permanente con una computadora, ya sea mediante un cable USB, un cable Ethernet u otros medios. (Torrente, 2013).

Actualmente, hay una amplia variedad de modelos de placas Arduino, cada uno con características únicas en términos de tamaño, forma, funcionalidades, complejidad y precio.

Algunos ejemplos incluyen Arduino Leonardo, Micro, 101 y Nano, que son ideales para proyectos básicos. Por otro lado, Arduino Mega 2560, Zero, M0 Pro, MKR Zero y USB Host Shield ofrecen características avanzadas para proyectos más complejos. Además, placas como Arduino Yún, Ethernet, Industrial 101, MKR Wifi 1010, Uno Wifi Rev2 y Escudo Arduino Yún brindan opciones de conectividad a Internet. (Arduino, 2019).

1.10. Característica de una Placa Arduino

Voltaje de funcionamiento y entrada

La tensión eléctrica que Arduino utiliza es el voltaje entre dos puntos dentro de un circuito eléctrico. En la mayoría de las placas Arduino, el voltaje de salida es de 5 voltios, y se recomienda un voltaje de alimentación que oscile entre 7 y 12 voltios.

Velocidad de la Unidad Central de Proceso (CPU)

La unidad de procesamiento de datos en el microcontrolador es donde se encuentran los componentes que procesan la información. Por lo general, las placas Arduino operan a una velocidad de 16 megahercios.

Memoria SRAM

La memoria volátil es donde se almacenan los datos que el programa necesita en ese momento para funcionar correctamente.

Memoria EEPROM

Es aquella que retiene la información incluso cuando la placa Arduino no está en funcionamiento o ha perdido la alimentación eléctrica.

Memoria Flash

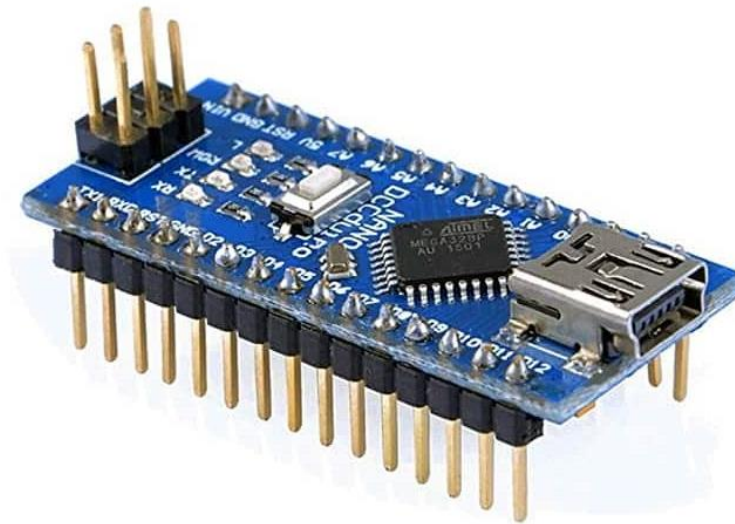
Es la parte de almacenamiento permanente donde se guarda el programa que ejecuta el microcontrolador de forma constante.

Comunicación Serial

El microcontrolador cuenta con un receptor o transmisor que posibilita la comunicación entre la placa Arduino y otros dispositivos, permitiendo la transferencia de datos entre ellos." (Patra, 2017).

Figura 1.5.

Placa Arduino Nano



Nota. Adaptado de *Placa Arduino Nano* [Fotografía], por Hardwarelibre, 2021, hwlibre (<https://www.hwlibre.com/arduino-nano/>)

1.11. Lenguaje De Programación Libre

El término lenguaje de programación se refiere a cualquier idioma artificial diseñado para expresar instrucciones que las máquinas pueden ejecutar. En el caso del lenguaje Arduino, contiene elementos similares a otros lenguajes de programación y una serie de comandos (también llamados órdenes o funciones) que permiten definir de manera coherente y precisa las instrucciones que deseamos programar en el microcontrolador de la placa. Estos comandos se escriben utilizando el entorno de desarrollo de Arduino. (Torrente, 2013)

El software de Arduino cuenta con una licencia de código abierto que puede ser ampliada por programadores experimentados. El lenguaje se puede extender mediante el uso de bibliotecas

de C++. Para aquellos interesados en explorar aspectos técnicos más profundos, también es posible adentrarse en la programación en el lenguaje AVR C, en el que se basa Arduino. (Arduino, 2012).

1.12. Sensores

Los sensores son dispositivos electrónicos que permiten la interacción con el entorno al proporcionarnos información sobre diversas variables presentes en nuestro entorno. Esta información se puede procesar para generar órdenes o activar procesos. Las variables que pueden medir dependen del tipo de sensor utilizado, como la temperatura, intensidad de luz, distancia, aceleración, humedad, presión, pH, entre otros. Los sensores tienen aplicaciones en diversos campos, como el hogar, la telefonía móvil, la medicina, la industria automotriz y la automatización industrial. (Serna, 2010).

Los sensores se pueden clasificar en dos categorías: activos y pasivos. Los sensores activos necesitan una fuente de energía externa para funcionar, mientras que los sensores pasivos operan utilizando las condiciones ambientales sin necesidad de alimentación externa. (Serna, 2010).

Existen numerosos modelos de sensores y módulos electrónicos que se pueden conectar a Arduino para lograr resultados profesionales. Aunque estos dispositivos pueden no ser tan robustos como otros utilizados en sistemas automatizados, la tecnología Arduino ha sido probada y validada en proyectos reales, demostrando un funcionamiento satisfactorio a largo plazo, incluso en condiciones ambientales adversas. (Acosta & Aguilar, 2015).

CAPITULO II

Metodología

2.1. Lugar de Ejecución del Experimento

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la azotea de una vivienda ubicada en la Asociación Señor de los Milagros N° A-14 Vista Alegre, perteneciente al distrito de Carmen Alto, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho a una altitud de 2871 m.s.n.m. cuyas coordenadas geográficas son: -13.184722° de latitud y -74.214352° de longitud, ubicada en una región natural quechua.

2.2. Características Climáticas de la Zona

La ciudad de Ayacucho posee la caracteriza de tener cambios de temperatura inesperado entre el día y la noche, donde la temperatura media va de entre los 14°C y 18°C ; los meses de enero, febrero y marzo son los que tienen mayor precipitación y mayor temperatura, donde la temperatura superan los 24°C y la mínima entre los 9°C y 10°C ; en los meses de mayo, junio y julio presentan estiajes con temperaturas más bajas que oscilan entre 2°C y 5°C con algunas heladas en horas de la madrugada.

2.3. Materiales y Equipos

Los materiales y equipos con las que se llevó con éxito este trabajo experimental se detallan en las tablas presentes.

2.3.1 Materiales

Tabla 2.1.

Materiales del sistema aeropónico vertical

Materiales	Descripción	Cantidad
Tubo de PVC	6" x 6 m	4 unidades
Tubo de PVC	4" x 3 m	4 unidades
Tapa PVC	6"	12 unidades
Reducción PVC	6" * 4"	12 unidades
T de PVC	4"	10 unidades
Codo de PVC	4"	5 unidades
Codos hidropónicos	34 mm	450 unidades
Esmalte blanco	1 gal.	1 unidades
Cemento para PVC	1/64 gal.	1 unidad
Malla raschel	65%	20 metros ²

Nota: Elaboración propia.

Tabla 2.2.

Materiales del sistema de riego

Materiales	Descripción	Cantidad
Tanque de agua	122.5 litros	1 unidad
Bomba periférica	0.5 HP	1 unidad
Nebulizadores	7 L/hora	24 unidades
Filtro de anillos	120 mech 1"	1 unidad
Manguera HDPE	16 mm.	20 metros
Niples	1"	4 unidades
Válvula tipo bola	1"	2 unidad
Manguera HDPE	1"	5 metros
Conector Inicial	16 mm	3 unidades
Microtubos	4.2 mm.	3 metros

Nota: Elaboración propia.

Tabla 2.3.

Materiales de la plataforma electrónica Arduino

Materiales	Descripción	Cantidad
Placa Arduino	Mega Nano	1 unidad
Pantalla LCD	Compatible con Arduino	1 unidad
Cables de puente	Compatible con Arduino	50 unidades
Relé	Compatible con Arduino	1 unidad
Sensor de lluvia	Compatible con Arduino	4 unidades
Conductímetro	Compatible con Arduino	1 unidades
pH	Compatible con Arduino	1 unidas
Cable	ethernet	20 m.
Protoboard	Compatible con Arduino	1 und.

Nota: Elaboración propia.

2.3.2 Equipos

Los equipos que se usaron durante la realización de este proyecto de investigación son:

- Taladro
- Compresora para pintar
- Balanza
- Cámara fotográfica
- Sierra
- Broca de 4 cm.

2.4. Material Genético

El material genético estuvo constituido por plántulas de lechuga de un mes de edad de la variedad visir, que fueron adquiridas de los invernaderos de la empresa hidropónica Allin Kausay dedicadas a la producción de lechugas hidropónicas. Estos almácigos son cultivados en bandejas de germinación con un adecuado manejo agronómico por la empresa.

2.5. Solución Nutritiva

Para nutrir las lechugas en este proyecto de investigación, se utilizó una solución nutritiva adquirida de la empresa ayacuchana Allin Kausay. Esta solución se compone de dos concentrados, A y B, elaborados especialmente para el cultivo de lechugas al cual la empresa se dedica. Estas soluciones formuladas cuidadosamente para garantizar que los macronutrientes y micronutrientes cumplan con precisión los requerimientos nutricionales óptimos del cultivo de lechugas.

2.6. Metodología

2.6.1 Construcción del sistema aeropónico

Se construyeron doce columnas de cultivo, cada columna con 40 codos hidropónicos para ubicar las plantas de lechuga. Para llevar a cabo esta construcción, con el uso del arco y sierra se cortaron cuatro tubos de PVC (6" x 6 m.) en segmentos de 2 metros de largo obteniendo así 12 segmentos de tubos en total. Luego, se utilizó un taladro con una broca de 4 cm de diámetro para hacer 40 orificios separados verticalmente por 18 cm. y en distancias equitativas horizontalmente en cada segmento de tubo. Los codos hidropónicos se colocan en estos orificios, ajustándolos a presión y sumando un total de 480 codos.

Para el sistema de drenaje se cortaron 2 tubos de PVC (4" x 6 m.) en segmentos de un metro, que se conectaron a las T de 4" y nueve unidades de estas fueron unidas a las columnas mediante reducciones de 6" x 4". La distancia entre columna fue de un 1 m. x 1 m., con el fin de no afectar la luminosidad del sol a las plantas. La base de las columnas o el sistema de drenaje se le atribuyó una pendiente de 1.5% con el fin de recolectar la solución nutritiva no absorbida por las plantas, que se almacena en un contenedor para ser reutilizada.

Las tapas de PVC de 6" se ajustaron a presión en la parte superior de las columnas, y se perforó el centro de cada tapa con una broca de 4,2 mm para permitir el paso de los microtubos y

los nebulizadores.

Finalmente se pintaron todos los materiales de PVC con pintura blanca a fin de reflejar los rayos solares y así prolongar su vida útil. Todas las uniones que se realizó entre los materiales de PVC, fueron unidas con pegamento de PVC.

Se procedió también a la instalación del tinglado con malla raschel de 65%. Dado que el experimento se llevó a cabo en la azotea de una vivienda, se apoyó la malla en las varillas de acero (columnas de acero) de las columnas, cubriendo una superficie total de 20 metros cuadrados y demandó sombra a las plantas durante el desarrollo del estudio; en otro caso en las cuales no hubieran estado las varillas de acero se hubieran construido los soportes o columnas a base de palos o rollizos.

2.6.2 Construcción del sistema de riego

El sistema de riego fue construido de la siguiente manera: se usaron 24 nebulizadores en total, dos nebulizadores por cada columna de cultivo, uno en la parte superior y otro en la parte inferior a fin de generar un traslape vertical de riego. Cada nebulizador fue conectados al microtubo de 10 cm. x 4,2 mm. e insertados por los orificios de 4,2 mm. que se les realizaron a las tapas de PVC de 6", para así los microtubos conectarse a las maguera de 16 mm. y este fue insertado en la manguera de 1" a través de los conectores iniciales. La maguera de 1" (manguera de impulsión) fue conectada al sistema de bombeo.

El sistema de bombeo se obtuvo, una bomba periférica de 0.5 HP, el filtro de anillos de 1", 4 niples de 1" y 2 válvulas tipo bola. Para la succión de la solución nutritiva se usó un metro de maguera, mientras que para la impulsión se usaron 4 metros de manguera de HDPE.

2.6.3 Implementación de la plataforma electrónica Arduino

La implementación de la plataforma Arduino al módulo hidropónico se implicó en primer

lugar la construcción de un tablero de control en el que se ubicaron la placa Arduino, la pantalla LCD, el relé y el protoboard. Este último como nexo de la conexión entre la placa Arduino, la pantalla LCD, los botones, el relé y los sensores, todos estos conectados gracias a los cables puente.

Los sensores de humedad se ubicaron en 4 de las 12 columnas de cultivo seleccionadas al azar y se instalaron en las raíces de las lechugas. Cada sensor de humedad se conectó a 4 metros de cable ethernet y en conjunto a su vez a la placa Arduino mediante el protoboard.

Los sensores de CE y de pH se sumergieron dentro del tanque que contenía la solución nutritiva que se mantuvieron siempre por debajo del nivel de la solución nutritiva para garantizar una mejor lectura de estos parámetros. Estos sensores también se conectaron a la placa Arduino mediante el protoboard.

El relé depende como nexo de conexión entre la placa Arduino y la bomba periférica. El tablero de control y la bomba se ubicaron cerca o al lado del tanque que contenía la solución nutritiva para permitir un mejor control y manejo del cabezal de riego.

Para el funcionamiento de la Placa Arduino y sus componentes se usó energía eléctrica, este fue conectado a un toma corriente por medio de un cargador y un cable tipo A, de esta manera brindar la energía eléctrica suficiente.

2.6.4 *Conducción del ensayo*

Las plántulas de lechuga de la variedad visir fueron adquiridas de la empresa hidropónica ayacuchana “Allin Kausay”. Estas fueron extraídas de las bandejas de germinación y trasplantadas al sistema aeropónico vertical cuando tenían de 3 a 4 hojas verdaderas y un desarrollo de 4 semanas.

El trasplante se realizó el día 01/03/2023, las plántulas se colocaron en los codos hidropónicos de las columnas de cultivo, cuidando que las raíces quedaran suspendidas al interior

de las columnas sostenidas con un pedazo de esponja envuelta alrededor del tallo para evitar que las plántulas de lechuga cayeran al vacío de las columnas de cultivo.

En la fertilización se empleó la Solución Nutritiva adquirida de la empresa Allin Kausay compuesta por la Solución A y la Solución B.

El pH y la Conductividad Eléctrica de la Solución Nutritiva fueron monitoreados por Arduino a través de pHmetro y el conductímetro, de la misma manera se observaron los valores de estos a través de la pantalla LCD.

El pH se mantuvo entre 5.6 – 6.5, si se observaba un incremento del pH que sobrepasaba los parámetros adecuados y alertados por el tablero de control (Arduino), a la solución nutritiva se le añadía ácido fosfórico de manera gradual hasta llegar al parámetro establecido (5.6 - 6.5).

La Conductividad Eléctrica se manejó de la siguiente manera: la primer y segunda semana fue de 1.8 mS/cm; la tercera, cuarta y quinta semana fue de 2.2 mS/cm; y la última semana 3 mS/cm; cuando se observaba la disminución en los parámetros de la CE establecida se le añadía las soluciones nutritivas A y B equitativamente y gradualmente, y al observar un incremento en la CE se le añadía agua gradualmente hasta establecer los parámetros de CE adecuados.

Para el riego se empleó agua potable junto a las soluciones A y B con una concentración de 6 L. de solución A/1000 L. de agua y 6 L. de solución B/1000 L preparados en el tanque de 122.5 L. Los riegos fueron a través de nebulizadores impulsados por una electrobomba de 0.5 HP, controlados por el relé junto al Arduino y el sensor de lluvia, este último colocado en las raíces de las lechugas y controlando su humedad en ellas.

Se realizó el control fitosanitario preventivo, para el control de hongos se usó Bacterin Triple Acción, para el control de plagas se empleó Camnin Triple Acción.

La cosecha de lechuga se realizó el 09/04/2023 a los 40 días después del trasplante.

2.7. Evaluaciones Realizadas

2.7.1 Evaluación de la construcción del sistema aeropónico vertical en la producción de lechuga

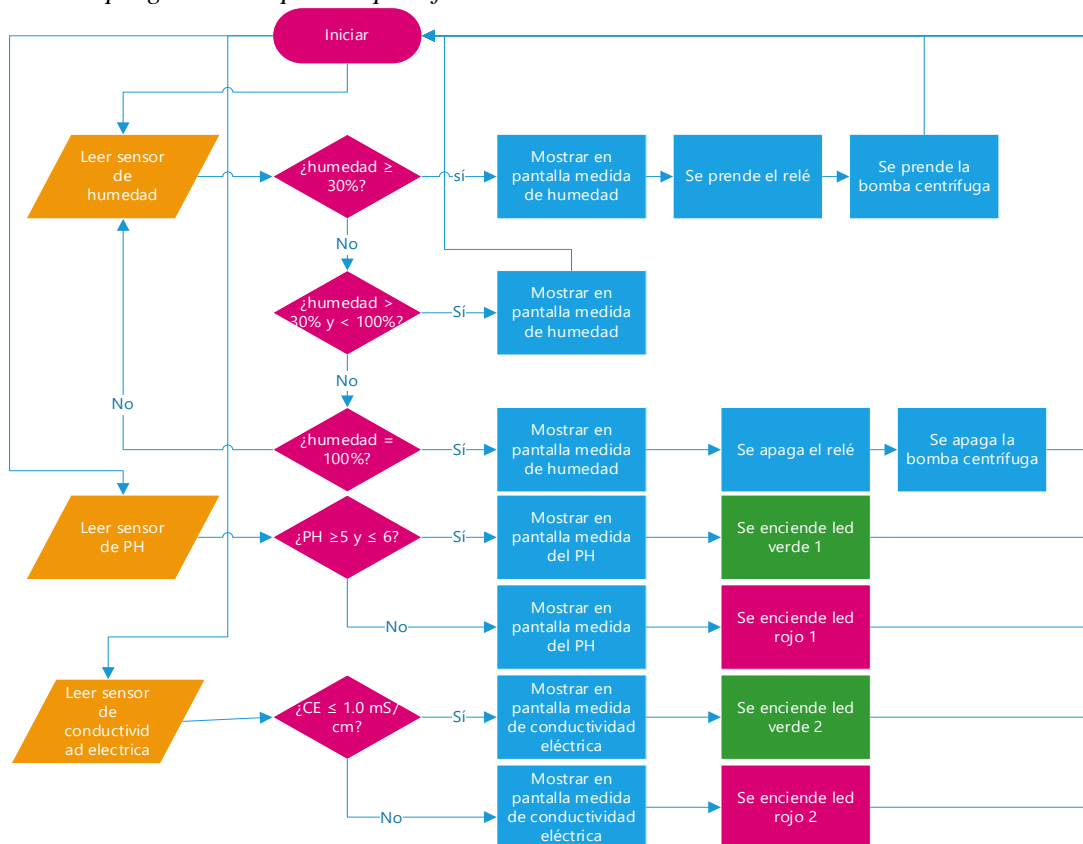
Se monitoreó el adecuado funcionamiento del sistema aeropónico vertical, tomando en cuenta su adecuada construcción, el buen funcionamiento del sistema de riego, y cantidad de lechugas que se lograron producir en el sistema propuesto.

2.7.2 Evaluación del diseño e implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico vertical

Se monitoreo el buen funcionamiento del diseño mostrado en el grafico (2.1), así como la implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico.

Figura 2.1.

Flujograma de programación para la plataforma electrónica Arduino



Nota: Elaboración propia.

2.7.3 Evaluación de la rentabilidad económica de la producción del cultivo de lechuga bajo el sistema propuesto

Para realizar la evaluación de rentabilidad económica en la producción de lechuga mediante el sistema propuesto, se tuvo en cuenta los costos de inversión de los materiales necesarios para la construcción del sistema aeropónico vertical y el sistema de riego, así como los costos de inversión para la seguridad del proyecto con la plataforma electrónica Arduino y sus dispositivos complementarios.

Se llevó a cabo evaluaciones en la producción de lechuga, considerando en primer lugar el tiempo o día en que se cosechó (desde el trasplante al sistema aeropónico hasta el día de la cosecha).

CAPITULO III

Resultados y Discusión

3.1 Construcción del Sistema Aeropónico Vertical en la Producción de Lechuga

La construcción del sistema aeropónico vertical para este trabajo de investigación se realizó tomando en cuenta la base propuesta por Arano (1990), en su libro “La Gaseta del Cultivo sin Tierra”

Los materiales empleados a base de PVC del sistema aeropónico fueron de buena calidad y cumplieron su objetivo, así como la utilización de la pintura blanca para pintar todo el sistema a fin de reflejar los rayos solares, permitiendo prolongar la vida útil del sistema.

La distribución de los codos hidropónicos (10 cm. horizontal y 18 cm. vertical) fue adecuada, lo que permitió el crecimiento y desarrollo de las lechugas. Además, estos codos resultaron ser lo suficientemente resistentes como para soportar el peso de las plantas.

La distancia entre las columnas de cultivo (1 m. x 1 m.) aseguró que las plantas recibieran suficiente luz solar y una buena ventilación, lo que les permitió crecer en condiciones óptimas.

El sistema de riego funcionó de manera óptima, ya que no hubo ningún problema ni fuga en el sistema, lo que permitió ahorrar agua. La solución nutritiva recirculó debido a la pendiente del 1.5% que se le dio al sistema de drenaje, lo que impidió el desperdicio y redujo el consumo de este recurso. El agua de riego y los nutrientes se utilizó únicamente en los procesos fisiológicos de

la lechuga y el único desperdicio fue en la evapotranspiración.

3.2 Diseño e Implementación de la Plataforma Electrónica de Código Abierto Arduino al Sistema Aeropónico Vertical

El diseño e implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino se llevó a cabo utilizando datos y conceptos presentes en la página web <http://www.arduino.cc/es>, así como en la Guía Básica de Arduino disponible en la página web <http://www.maristashuelva.es> (Maristas Huelva, sf) con resultados satisfactorios.

Durante el desarrollo del trabajo de investigación. Se comprobó que la placa Arduino Nano cumplió con todas las expectativas y requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de control. Su versatilidad y capacidad para manejar múltiples entradas y salidas permitieron una programación precisa y eficiente.

Durante el proceso de investigación, se observó que la pantalla resultó ser una herramienta muy efectiva para facilitar la visualización de los datos en tiempo real, lo que permitió un monitoreo más eficiente y preciso de los valores de la solución nutritiva.

Se pudo observar que el relé cumplió adecuadamente la función para la que había sido asignada, en efecto, se demostró el dispositivo de prender y apagar la unidad de bombeo en función del nivel de humedad por el sensor de humedad conectado al Arduino.

El sensor de humedad detectó con satisfactoriamente el aumento o disminución de la humedad en las raíces de las lechugas, lo cual pudo encender o apagar la unidad de bombeo para efectuar el riego. La programación del sensor de estableció entre el 100% y el 30% de humedad. Cuando la humedad disminuía hasta el 30%, el sensor lo detectaba y llevaba la información hacia Arduino para ser procesada y, con ello, encender la bomba mediante el relé. Una vez que el sensor detectó que la humedad de las raíces había llegado al 100% se detenía el riego.

El sensor de Conductividad Eléctrica permitió monitorear la cantidad de sales disueltas que existían en la solución nutritiva durante el estudio. Se observó que la solución nutritiva se mantuvo dentro de los valores de 1.8 a 3.0 dS/m, recomendables para el cultivo de lechuga.

El sensor de pH, nos permitió monitorear el pH de la SN el cual se mantuvo dentro de los valores de 5.6 a 6.5, que son los adecuados para la lechuga, cuando se daba una variación del pH de la SN el Arduino emitía la señal de alerta por medio de un led rojo para de esta manera, se pudo actuar de manera oportuna en la calibración del pH.

3.3 Análisis económico de costos de inversión y producción

Tabla 3.1.

Costos del Sistema Aeropónico Vertical de 12 m² para el cultivo de lechuga, costos expresados en nuevos soles a noviembre del 2022

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario S/.	Precio de referencia S/.
Materiales del sistema aeropónico				1617
Tuvo PVC de 6" x 6 m.	Unidad	4	85	340
Tuvo PVC de 4" x 3 m.	Unidad	4	13	52
Tapa PVC de 6"	Unidad	12	3	36
Reducción PVC de 6" x 4"	Unidad	12	8	96
T PVC de 4"	Unidad	10	8	80
Codo PVC 4"	Unidad	5	6	30
Codo hidropónico de 34 mm.	Unidad	450	2	900
Esmalte Blanco	Galón	1	35	35
Pegamento de PVC 1/64 gal.	Unidad	1	8	8
Malla raschel 65%	Metros ²	20	2	40

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 3.1**, se muestra los costos de inversión en la construcción del Sistema Aeropónico Vertical con las características descritas, el cual asciende a S/. 1617.00 no incluyendo dentro del monto la mano de obra, pues fue realizado en su totalidad por los investigadores.

Tabla 3.2.

Costos del Sistema de Riego, costos expresados en nuevos soles a noviembre del 2022

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario S/.	Precio de referencia S/.
Materiales del sistema de riego				547.5
Tanque de agua de 122.5 L	Unidad	1	150	150
Bomba periférica de 0.5 HP	Unidad	1	120	120
Nebulizadores de 10L/hora	Unidad	24	8	192
Filtro de anillos 120 mech de 1"	Unidad	1	25	25
Manguera HDPE de 16 mm.	Metros	20	1	20
Niples de 1"	Unidad	4	2.5	10
Válvula tipo bola de 1"	Unidad	2	6	12
Manguera HDPE de 1"	Metros	5	2	10
Conector Inicial de 16 mm.	Unidad	3	1.5	4.5
Microtubos de 4.2 mm.	Metros	3	1	3
Teflón	Unidad	1	1	1

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 3.2**, se muestra los costos de inversión en la construcción del Sistema de Riego que fue instalado al Sistema Aeropónico Vertical, el cual asciende a S/. 547.40 no incluyendo dentro del monto la mano de obra, pues fue realizado por el investigador.

Tabla 3.3.

Costos de la Plataforma Electrónica Arduino y componentes, costos expresados en nuevos soles a noviembre del 2022

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario S/.	Precio de referencia S/.
Materiales de la plataforma electrónica Arduino				157
Placa Arduino Nano	Unidad	1	45	45
Pantalla LCD	Unidad	1	18	18
Cable de puente	Unidad	20	0.25	5
Relé	Unidad	1	3	3
Sensor de lluvia	Unidad	4	2	8
Sensor de EC	Unidad	1	16	16
Sensor de pH	Unidad	1	40	40
Cable ethernet	Metros	20	1	20
Protoboard	Unidad	1	2	2

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 3.3**, se muestra los costos de inversión de la Plataforma Electrónica Arduino el cual fue implementado al Sistema Aeropónico Vertical, el costo asciende a S/157.00, estos materiales fueron adquiridos e importados de la tienda virtual Aliexpress, los costos incluyen el envío hasta la ciudad de Ayacucho.

Tabla 3.4.

Costos fijos para la producción de 450 plantas de lechugas, expresados en nuevos soles a noviembre del 2022

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitarios S/.	Precio de referencia S/.
Costos fijos				157.5
Solución Nutritiva A	Litros	12	5	60
Solución Nutritiva B	Litros	12	5	60
Plántulas de lechuga	Unidad	450	0.05	22.5
Fluido eléctrico				10
Agua				5

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 3.4**, se muestra los costos fijos para la producción de 450 plantas de lechugas, el costo asciende a S/.157.00, presupuesto con el cual se logró producir 450 plantas de lechuga en 40 días, los costos de agua y luz provienen del incremento en el recibo.

3.4 Rentabilidad económica y financiera

El precio de venta por unidad de lechuga fue de 1 nuevo sol y pérdida de cultivo del 6%.

Tabla 3.5.

Flujo de Caja durante 5 años de la producción de 450 lechuga cada 40 días en el sistema propuesto

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
INGRESOS						
Ventas de lechugas		4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00
Total, de Ingresos	0	4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00
EGRESOS						
Inversión	2,321.50					
Gastos fijos		1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50
Total, de egresos	2,321.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50
Flujo de caja económico	-S/. 2,321.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50
VAN = S/. 6,503.05						
TIR = 111%						
B/C = 3.8						

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 3.5**, se reporta el flujo de caja durante 5 años para conocer la rentabilidad de la producción de lechuga bajo el sistema propuesto, habiéndose evaluado la rentabilidad económica con la tasa de descuento de 15% anual.

Según el estudio realizado por Portilla (2016) acerca de un sistema automatizado para huertos en casa basado en aeroponía, se logró un rápido crecimiento de las plantas sin enfrentar problemas de plagas. El autor también destaca que este sistema cumple con las necesidades de luz, riego y nutrientes necesarios para el óptimo desarrollo de las plantas, además de resaltar un significativo ahorro de agua. Estos resultados coinciden con las conclusiones de Choez (2019) y con la presente investigación, que también obtuvo una respuesta satisfactoria en el cultivo en un corto período de tiempo y un notorio ahorro en el consumo de agua en comparación con otros métodos de cultivo.

Rocha (2017) llevó a cabo un experimento en cultivos aeropónicos de lechuga, observando un desarrollo óptimo de las plantas, un notorio ahorro de recursos naturales y un aumento en la producción. Por otro lado, Jesica (2013) señala que la aeroponía ha mejorado la calidad de la producción de hortalizas y destaca su capacidad para ahorrar espacio y aprovechar dimensiones que, de otro modo, no se utilizarían, así como para controlar problemas fitosanitarios en las plantas. Estos hallazgos se asemejan a los resultados obtenidos en este estudio, donde se lograron resultados satisfactorios en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en un espacio limitado.

En esta investigación se demostró que el sistema aeropónico permite una reducción en el espacio de producción y, al mismo tiempo, logra un rendimiento satisfactorio. Esto concuerda con el trabajo de Hernández (2013), quien diseñó un prototipo de huertos aeropónicos y comprobó que dicho modelo alcanza niveles elevados de rendimiento. Además, se constató que este enfoque aeropónico disminuye la dependencia del espacio y del suelo, además de requerir un bajo consumo de agua y nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, y considerando las condiciones en las que se llevó a cabo, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

1. La construcción del sistema aeropónico vertical, siguiendo los principios propuestos por Arano (1990), demostró ser altamente efectiva en el crecimiento y desarrollo de las lechugas. Las lechugas alcanzaron su madurez y fueron cosechadas a los 40 días después de ser trasplantadas, con un peso fresco promedio de 280 gramos por planta, se obtuvo una densidad de plantación de 40 lechugas por metro cuadrados, para lo cual los materiales utilizados cumplieron con su función. Asimismo, el sistema de riego operó de manera fluida promoviendo el cuidado del agua. Estos resultados validan la efectividad de nuestro enfoque basado en los principios de Arano y subrayan su aplicabilidad en el cultivo de lechugas en sistema aeropónico vertical asistido por Arduino.
2. El diseño e implementación de la plataforma electrónica Arduino resultó satisfactorio, utilizando la placa Arduino Nano junto a otros componentes como la pantalla, relé, los sensores, etc., lo que permitió un control preciso del sistema aeropónico. Esta plataforma demostró ser esencial al facilitar el monitoreo en tiempo real de datos críticos. En cuanto a la humedad de las raíces, si esta disminuía al 30%, Arduino activaba automáticamente el sistema de riego hasta alcanzar el 100% de humedad, momento en el cual el sistema se apagaba de manera eficiente.

Además, los parámetros de conductividad eléctrica se establecieron en 1.8 mS/cm, 2.2 mS/cm y 3.0 mS/cm. Cualquier variación en estos parámetros, ya sea un aumento o una disminución, era detectada por Arduino, que generaba notificaciones para tomar las acciones adecuadas. Lo mismo sucedía con los valores de pH, que se mantuvieron entre 5.6 y 6.5. cualquier desviación en el pH generaba una señal de alerta por parte Arduino. Lo que permitía realizar ajustes inmediatos. Esta meticulosa atención a mantener el pH y la conductividad eléctrica dentro de los valores adecuados de la solución nutritiva fue fundamental para el éxito de nuestra investigación.

3. El análisis económico reveló que la producción de lechuga bajo el sistema aeropónico vertical resulta rentable. El cálculo del Valor Actual Neto (VAN) arrojó un valor positivo, indicando que los beneficios superan los costos de inversión y producción. Además, la Tasa interna de Retorno (TIR) fue del 111%, demostrando la viabilidad financiera del proyecto. La relación Beneficio – Costo (B/C) de 3.8, lo que significa que, por cada unidad monetaria invertida en el proyecto, se espera obtener 3.8 unidades monetarias de beneficio. Esto indica que el proyecto es considerado rentable, ya que genera más ingresos que egresos.

RECOMENDACIONES

De acuerdo a las circunstancias en las que se realizó este estudio de investigación, se recomienda:

1. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad y eficiencia del sistema aeropónico vertical con Arduino en la producción de lechuga. Se recomienda considerar la implementación de este sistema en escala comercial, en una agricultura urbana, en espacios limitados o áreas con condiciones desfavorables para el cultivo tradicional en suelo; aprovechando los beneficios de ahorro de agua, control preciso y alta productividad que ofrece.
2. Para llevar adelante este proyecto a nivel comercial más alto, es recomendable realizar un análisis de mercado más detallado para evaluar la demanda de lechugas cultivadas en sistemas aeropónicos o hidropónicos. También es importante realizar un estudio de viabilidad comercial que tome en cuenta los costos de producción a gran escala, la competencia existente y las estrategias de comercialización necesarias para alcanzar el éxito en el mercado.
3. Como consecuencia de los resultados positivos, se sugiere realizar proyectos adicionales para evaluar la aplicabilidad del sistema aeropónico vertical en otros cultivos y expandir la gama de productos. Estos proyectos podrían investigar la adaptabilidad del sistema a diferentes condiciones climáticas, mejorar aún más la eficiencia y la rentabilidad mediante la optimización de la automatización y la incorporación de tecnologías avanzadas.

Es importante abordar las fuentes de error no controladas que podrían influir en los resultados. Se recomienda realizar estudios adicionales para identificar y minimizar dichas fuentes de error, como la variabilidad en la calidad de los materiales empleados, la posible influencia de factores ambientales no considerados y la calibración precisa de los sensores utilizados. Estas mejoras contribuirán a fortalecer la fiabilidad y la precisión de los resultados que se logren.

REFERENCIAS

- Acosta, A.; Aguilar, A. (2015). Automatización de bajo costo utilizada en la producción agrícola en invernaderos y huertos caseros. Universidad Tecnológica de Panamá. Santo Domingo – Republica Dominicana.
- Aeroponic. New Release [página web]. Consultado 18 de junio de 2021, [http: https://www.aeroponics.com/aero121.htm](http://https://www.aeroponics.com/aero121.htm).
- Aeroponic. Developing a Sterile Environment for Aeroponic Plant Growth [página web]. Consultado 18 de junio de 2021, [http: https://www.aeroponics.com/aero43.htm](http://https://www.aeroponics.com/aero43.htm).
- Arano, C.R. (1990). La gaceta del cultivo sin tierra. Buenos Aires – Argentina.
- Arduino. (2011). Básicos-Arduino Formato PDF. Disponible en: <http://www.arduino.cc/es>.
- Cali, C.V. 2011. Efecto del estiércol de lombriz (*Eisenia foetidia L*) en la producción de cuatro cultivares de lechuga (*Lactuca sativa L.*). Documento de tesis. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Escuela de Ingeniería en agronomía. Riomba-Ecuador.
- Cerda, M. y Montero, M. 2004. Guías técnicas del manejo postcosecha de apio y lechuga para el mercado fresco. San José - Costa Rica.
- Choez. M. V. (2019). Cultivando lechugas (*Lactuca sativa L.*) bajo condiciones de hidroponía con concentraciones crecientes de una solución nutritiva a nivel de invernadero. Quevedo: Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/jspui/bitstream/43000/3682/1/T-UTEQ-0173.pdf>
- Davis, R.M.; Subbarao, K.V.; Raid, R.R. y Kurtz E.A. 2002. Plagas y enfermedades de la lechuga. Edición en español. Editorial: Mundi Prensa. Madrid, España.
- Diaz, A. (2012). Hardware definición. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

- Durán, J., Martínez, E., & Navas, L. (2000). Los cultivos sin suelo: de la hidroponía a la aeroponía (I). Vida Rural.
- Graves, C.J. (1983). La técnica de película de nutrientes. Hort.
- Guamán, M. (2004). Evaluación Bioagronómica de cinco Cultivares de Lechuga y Cuatro Densidades de Siembra. (Tesis de grado. Ingeniero Agrónomo), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba – Ecuador.
- Hernández, S. C., y Sebastián, P. M. (2013). Diseño de un prototipo de un sistema de producción tipo Aeropónico. Bogota D. C: Universidad EAN.
- Infoagro. (2010). Cultivo de lechuga. Disponible en: www.infoagro.com/hortalizas/lactusativa.htm. Consultado el 05 de setiembre del 2021.
- Izquierdo; Carrasco. (1996). La empresa hidropónica de mediana escala: La Técnica de Solución Nutritiva Recirculante (“NFT”). Talca - Chile.
- Jesica, R. A. (2013). Sistema Aeropónico en la agricultura protegida/Caso estudio Saltillo Coahuila: Centro de estudios en química Aplicada.
- Macas, J. (1993). Estudio comparativo de trasplante entre el método manual y semi mecanizado en el cultivo de lechuga. (Tesis de grado Ingeniero Agrónomo). Facultad de agronomía, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo Riobamba – Ecuador.
- Martínez, E. (1993). Cultivos sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo. Ediciones de Horticultura. Barcelona.
- Mateus, J. (2010). Efecto del ambiente sobre la producción de mini tubérculos de 10 genotipos de papa cultivados bajo un sistema aeropónico. Tesis Mg.Sc. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima – Perú.

- Nasa Gob. New Progressive Plant Growing is a Blooming Business [página web]. Consultado 19 de junio de 2021, https://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/aeroponic_plants.html.
- Patra, S. 2017. Serial Communication between Arduino and Bluetooth Module (Hc05) via Android Device. Grenze Scientific Society.
- Pérez, R. (2012). Aeroponía. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Caracas – Venezuela.
- Portilla, G. P. (2016). Diseño y construcción de un sistema de automatización para huertos domésticos con tecnología aeropónica. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Rocha, C. J., y David, S. C. (2017). Desarrollo de cultivo aeropónico vertical usando sistemas electrónicos. Bogotá.
- Rodríguez, C. E. (2002). El cultivo del Pepino (*Cucumis sativus*, L.) bajo el sistema de grava con subirrigación. Chapingo – México.
- Rolleri, J. (2005). Importancia del riego en el cultivo de lechuga. Disponible en: www.infoagro.com Consultado el 07 de setiembre del 2021.
- Rijck; Scherevens. (1998). Comparación de la composición mineral de doce soluciones de nutrientes estándar.
- Salazar, G. (1992). Guía Práctica de Cultivos hidropónicos. Santo Domingo.
- Server; Ellis; Daneel. (2008). Respuesta de raíces de banano a la infección con *Fusarium* del banano en Aeroponía. Tesis de Grado. Panamá.
- Stoner; Clawson. (1998). A High Performance, Gravity Insensitive, Enclosed Aeroponic System for Food Production in Space. USA.
- Suquilanda, M. (1995). Nuestro pequeño huerto, con método orgánico intensivo – porque, como, cuando y donde. Editorial Abaya Ayala. Coedición FUNDAGRO. Quito, Ecuador.

Universidad de Valladolid (UVA). 2013. El cultivo de la lechuga (en línea). Disponible en:

https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/446/42109/1/Documento2.pdf.

Consultado el 07 de setiembre del 2021.

ANEXOS

Anexo 01. Lenguaje de programación C++ utilizados para la integración de Arduino al sistema aeropónico, elaborado en Arduino IDE 2.2.1

```
// Incluyendo las librerías necesarias
#include <Arduino.h>
#include <U8g2lib.h>
#ifdef U8X8_HAVE_HW_SPI
#include <SPI.h>
#endif
#ifdef U8X8_HAVE_HW_I2C
#include <Wire.h>
#endif

// Configuración del LCD
U8G2_ST7565_ERC12864_ALT_F_4W_SW_SPI u8g2(U8G2_R0, /* clock=*/ 12, /* data=*/ 11,
/* cs=*/ 10, /* dc=*/ 9, /* reset=*/ 8);

// Librería para el sensor de carga eléctrica
#include <EEPROM.h>
#include "GravityTDS.h"

#define TdsSensorPin A1
GravityTDS gravityTds;
float temperature = 25, tdsValue = 0;

// LED rojo de advertencia y buzzer
const int ledPIN = 3;

// Sensor de pH
float calibration_value = 21.34;
int phval = 0;
unsigned long int avgval;
int buffer_arr[10], temp;

// Sensores de humedad
const int capteur_D1 = 4;
const int capteur_A1 = A0;
int val_analogique1;
int porcenthumedad1;
```



```

const int capteur_D2 = 2;
const int capteur_A2 = A2;
int val_analogique2;
int porcenthumedad2;

const int capteur_D3 = 7;
const int capteur_A3 = A3;
int val_analogique3;
int porcenthumedad3;

const int capteur_D4 = 6;
const int capteur_A4 = A4;
int val_analogique4;
int porcenthumedad4;

// Variables para el promedio de la humedad
int sumhumedad;
int promhumedad;

// Relé
int relay = 5;

void setup() {
  // Configurar el pin del relé como salida
  pinMode(relay, OUTPUT);

  // Configurar el LED rojo
  pinMode(ledPIN , OUTPUT);

  // Inicializar el LCD
  u8g2.begin();
  u8g2.setContrast(50);

  // Configurar sensores de lluvia
  pinMode(capteur_D1, INPUT);
  pinMode(capteur_A1, INPUT);
  pinMode(capteur_D2, INPUT);
  pinMode(capteur_A2, INPUT);
  pinMode(capteur_D3, INPUT);
  pinMode(capteur_A3, INPUT);
  pinMode(capteur_D4, INPUT);
  pinMode(capteur_A4, INPUT);

  // Inicializar la comunicación serial
  Serial.begin(9600);

```

```

// Inicializar el sensor de carga eléctrica
gravityTds.setPin(TdsSensorPin);
gravityTds.setAref(5.0);
gravityTds.setAdcRange(1024);
gravityTds.begin();
}

void loop() {
// Medir el pH
for (int i = 0; i < 10; i++) {
    buffer_arr[i] = analogRead(A6);
    delay(30);
}
for (int i = 0; i < 9; i++) {
    for (int j = i + 1; j < 10; j++) {
        if (buffer_arr[i] > buffer_arr[j]) {
            temp = buffer_arr[i];
            buffer_arr[i] = buffer_arr[j];
            buffer_arr[j] = temp;
        }
    }
}
avgval = 0;
for (int i = 2; i < 8; i++)
    avgval += buffer_arr[i];
float volt = (float)avgval * 5.0 / 1024 / 6;
float ph_act = -5.70 * volt + calibration_value;

// Medir la humedad de 4 sensores y calcular el promedio
val_analogique1 = analogRead(capteur_A1);
porcenthumedad1 = map(val_analogique1, 0, 1020, 100, 0);

val_analogique2 = analogRead(capteur_A2);
porcenthumedad2 = map(val_analogique2, 0, 1020, 100, 0);

val_analogique3 = analogRead(capteur_A3);
porcenthumedad3 = map(val_analogique3, 0, 1020, 100, 0);

val_analogique4 = analogRead(capteur_A4);
porcenthumedad4 = map(val_analogique4, 0, 1020, 100, 0);

sumhumedad = (porcenthumedad1 + porcenthumedad2 + porcenthumedad3 +
porcenthumedad4);
promhumedad = (sumhumedad / 4);

```

```

// Medir la carga eléctrica
gravityTds.setTemperature(temperature);
gravityTds.update();
tdsValue = gravityTds.getTdsValue();

// Controlar el LED rojo en función de la humedad
if (promhumedad < 30) {
    digitalWrite(ledPIN , HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(ledPIN , LOW);
    delay(500);
} else {
    digitalWrite(ledPIN , LOW);
}

// Controlar el relé en función de la humedad
if (porcenthumedad1 < 30 || porcenthumedad2 < 30 || porcenthumedad3 < 30 ||
porcenthumedad4 < 30 ) {
    digitalWrite(relay, HIGH);
} else if (porcenthumedad1 == 100 || porcenthumedad2 == 100 || porcenthumedad3
== 100 || porcenthumedad4 == 100 ) {
    digitalWrite(relay, LOW);
} else {
    digitalWrite(relay, LOW);
}

// Mostrar datos en el LCD
u8g2.clearBuffer();
u8g2.enableUTF8Print();
u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);

u8g2.setCursor(0, 10);
u8g2.print("prom Humedad: ");
u8g2.print(promhumedad);
u8g2.print(" %");

u8g2.setCursor(0, 20);
u8g2.print("C. electrica: ");
u8g2.print(tdsValue, 0);
u8g2.print(" ppm");

u8g2.setCursor(0, 30);
u8g2.print("pH valor : ");
u8g2.print(ph_act);

```

```

u8g2.print(" ");

u8g2.setCursor(0, 50);
u8g2.print("H.s1: ");
u8g2.print(porcenthumedad1);
u8g2.print(" %");

u8g2.setCursor(70, 50);
u8g2.print("H.s2: ");
u8g2.print(porcenthumedad2);
u8g2.print(" %");

u8g2.setCursor(0, 60);
u8g2.print("H.s3: ");
u8g2.print(porcenthumedad3);
u8g2.print(" %");

u8g2.setCursor(70, 60);
u8g2.print("H.s4: ");
u8g2.print(porcenthumedad4);
u8g2.print(" %");

// Transferir la memoria interna al display LCD
u8g2.sendBuffer();

// Esperar antes de repetir el bucle
delay(2000);
}

```

Anexo 02. Panel fotográfico

1. Corte de los tubos de PVC de 6" x 6 metros a segmentos de 2 metros para las columnas de cultivo.



2. Tubos de PVC de 4" x 3 metros cortados a segmentos de 1 metro para la base de las columnas de cultivo, drenaje y recolección de la solución nutritiva no tomada por las plantas.



3. Reducciones de PVC de 6" a 4" usadas para la conexión entre las columnas de cultivo y el sistema de drenaje y recolección.



4. T's de PVC de 4" usadas para la unión de las reducciones (6" x 4") y los segmentos de los tubos cortados a 4" x 1m (sistema de drenaje y recolección).



5. Torres de cultivo pintados con esmalte de color blanco y con agujeros echos con broca de 4cm.



6. Codos Hidropónico usados para el sostén de las lechugas en las columnas de cultivo.



7. Proceso constructivo de las columnas de cultivo y el sistema de recolección.



8. Columnas de cultivo ensambladas al sistema de drenaje y soporte.



9. Nebulizadores usados para el riego de las plantas de lechuga.



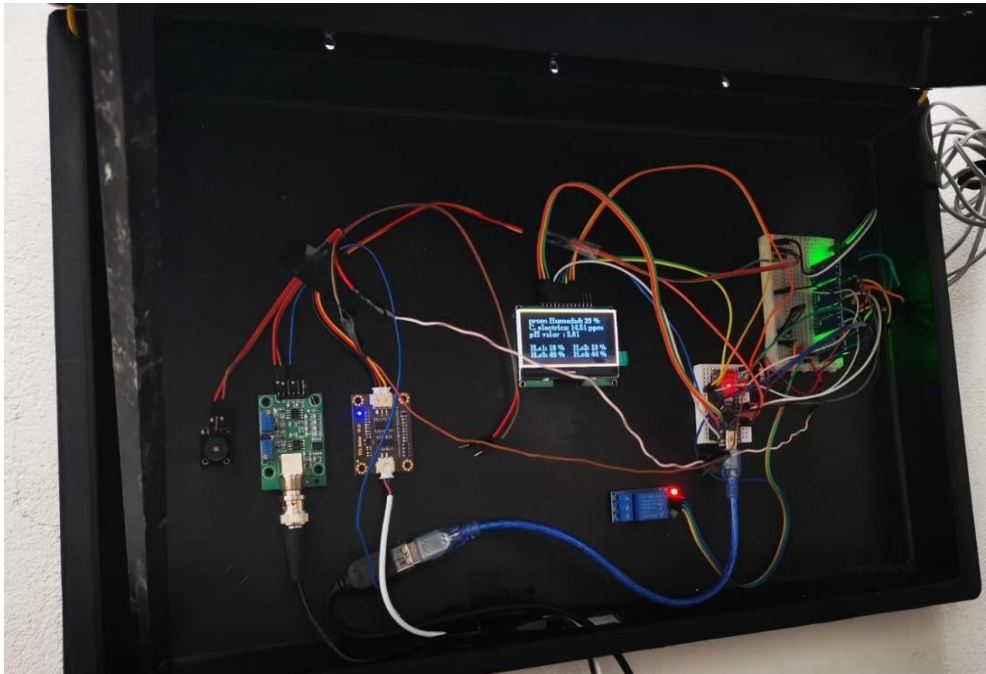
10. Nebulizador de riego instalado en la tapa de PVC.



11. Bomba centrífuga y accesorios usados para la impulsión de la Solución Nutrida filtrada hacia el sistema aeropónico vertical.



12. Tablero de control compuesta por Arduino y accesorios.



13. Integración de Arduino (tablero de control) al sistema de bombeo y al tanque de la Solución Nutritiva.



14. Instalación del sensor de lluvia a las columnas de cultivo.



15. Monitoreo del estado y ubicación de los sensores de lluvia.



16. Plantas de lechugas trasplantadas a las columnas de cultivo.



17. Plantas de lechuga en pleno desarrollo cultivadas en el Sistema Aeropónico Vertical.



18. Monitoreo de los cultivos.



19. Cosecha de las plantas de lechuga





ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. JULIO HERBHER CHILLCCE PRADO
R.D. N° 466-2023-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho a los veinticinco días del mes de setiembre del año dos mil veintitrés, siendo las diecisiete horas con cinco minutos, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del señor Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias Dr. Felipe Escobar Ramírez, los miembros del jurado conformado por el M.Sc. Juan Charapaqui Anccasi, Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla como asesor, Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, M.Sc. Alejandro Camasca Vargas; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulada: **Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho, 2022.** para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo presentado por la Bachiller **JULIO HERBHER CHILLCCE PRADO.** El señor Decano, previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
M.Sc. Juan Charapaqui Anccasi	17	16	17	17
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla	16	15	16	16
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza	15	16	16	16
M.Sc. Alejandro Camasca Vargas	15	14	16	15
PROMEDIO GENERAL				16

Acto seguido se invita al sustentante y publico en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

M.Sc. Juan Charapaqui Anccasi
Presidente

Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla
Asesor

Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Jurado

M.Sc. Alejandro Camasca Vargas
Jurado

Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, presidente de la comisión de docentes instructores responsables de operativisar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por RR N° 294-2022-UNSCH-R; hace constar que el trabajo titulado;

Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho, 2022.

Autor : Julio Herbher Chillcce Prado

Asesor : Orlando Fidel Sulca Castilla

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de investigación, aprobado mediante la RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de **quince por ciento (15 %)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2201068658

Ayacucho, 20 de octubre de 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias
Walter A. Mateo
M. Sc. Walter A. Mateo Mateo
Pdr. Comisión Turnitin - FCA

Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho, 2022

por Julio Hebher Chillcce Prado

Fecha de entrega: 19-oct-2023 03:04p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2201068658

Nombre del archivo: TESIS_FINAL_JULIO_CHILLCCE_PRADO.pdf (2.29M)

Total de palabras: 12826

Total de caracteres: 64923

Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho, 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%

INDICE DE SIMILITUD

16%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.untels.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	1%
5	docplayer.es Fuente de Internet	1%
6	cia.uagraria.edu.ec Fuente de Internet	1%
7	dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%

9	bibliodigital.tec.ac.cr Fuente de Internet	1 %
10	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	1 %
11	riaa.uaem.mx Fuente de Internet	1 %
12	repositorio.undac.edu.pe Fuente de Internet	1 %
13	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1 %
14	repositorio.unicauca.edu.co:8080 Fuente de Internet	<1 %
15	vdocuments.mx Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Nacional San Agustin Trabajo del estudiante	<1 %
17	dspace.esPOCH.edu.ec Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma Arduino en la producción de lechuga, Ayacucho, 2022

Chillece Prado, Julio Herbher; Sulca Castilla Orlando Fidel
Área de Construcciones Rurales y Tecnología de Materiales
julio.chillece.01@unsch.edu.pe, orlando.sulca@unsch.edu.pe

RESUMEN

El trabajo de investigación se realizó entre junio de 2022 y abril de 2023 en una vivienda ubicada a -13.184722° de latitud y -74.214352° de longitud, a una altitud de 2871 m.s.n.m., en el distrito de Carmen Alto, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho. El objetivo general fue evaluar la construcción del sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma electrónica Arduino en la producción de lechuga. El sistema aeropónico vertical se instaló en un área de 12 m², con 12 columnas de PVC de 6" de diámetro y 2 m. de altura. Cada columna contenía 40 plantas de lechuga apoyadas por un codo hidropónico, sumando un total de 480 plantas, se regó con la impulsión de una bomba periférica de 0.5 HP que utiliza mangueras de HDPE y 24 nebulizadores. La plataforma electrónica Arduino permite el control en tiempo real del pH, la conductividad eléctrica de la solución nutritiva y los sensores de lluvia, que a través de estos activa o desactiva el riego según la disponibilidad de agua presente en las raíces, generando así un ahorro de agua significativo. La integración de Arduino le permitió tener autonomía al sistema aeropónico vertical que ofrece cultivar en el espacio horizontal y sobre todo el vertical, aumentando así la rentabilidad económica por unidad de área. La rentabilidad económica se comprobó con el flujo de caja proyectado para 5 años, cosechando 450 lechugas en 40 días, el VAN fue de 6,503.05, la TIR del 111% y la relación Beneficio – Costo de 3.8, indicando que esta nueva forma de cultivo es rentable y genera más ingresos que egresos.

Palabras Clave: Arduino, Aeroponía, Solución Nutritiva, Sensores.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la escasez de alimentos se ha convertido en una preocupación global debido al constante incremento de la población, lo que intensifica la competencia por recursos vitales como la tierra y el agua, como consecuencia se da un incremento de la pobreza, el hambre y la sobreexplotación de las áreas de cultivo.

En un estudio del año 2009 realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO, estimó que la producción global de alimentos para el año 2050 debe aumentar un 70%, por sobre la producción de dicho año, para así poder afrontar el hambre mediante una mejor gestión de recursos como el agua y tierras fértiles.

La agricultura ha sido y será uno de los pilares importantes en la economía de los países en desarrollo y el Perú es uno de ellos, esto crea la necesidad de mejorar e impulsar nuevas técnicas de agricultura e ir de lado con la tecnología adecuada para alcanzar la máxima productividad.

La aeroponía se presenta como una alternativa e innovadora forma de agricultura moderna que tiene grandes ventajas frente a otras formas de cultivos tradicionales. Entre estas ventajas se incluyen mayores rendimientos por unidad de superficie, crecimientos más rápidos y un desarrollo óptimo gracias a la disponibilidad y absorción eficiente de nutrientes, suministrados en forma de finas pulverizaciones o microgotas mediante nebulizadores u otro emisor de riego; características por el cual este sistema está exonerado del uso de tierra ya que las raíces de las plantas están suspendidas en el aire suministrándoles adecuados niveles de humedad.

Los avances de la tecnología en la agricultura han permitido el desarrollo de la automatización en las diferentes formas de agricultura, y la aeroponía no es ajena a estos avances, y se deben de aprovechar adecuadamente para alcanzar óptimos resultados.

En esta investigación se presenta la construcción y evaluación de un sistema aeropónico vertical inteligente asistido por el hardware Arduino, este software libre con un buen diseño y una adecuada sincronización con la parte hidráulica del sistema aeropónico nos permitirá controlar: humedad en la raíz de las plantas, la frecuencia e intervalos de riego de acuerdo con la necesidad del cultivo, pH y conductividad eléctrica de la solución de riego. Todo eso para alcanzar una buena automatización de este sistema y por consiguiente incrementar la productividad.

Por las consideraciones mencionadas, se llevó a cabo la ejecución del presente experimento teniendo como finalidad alcanzar los siguientes objetivos:

Objetivo general

Evaluar la construcción del sistema aeropónico vertical asistido por la plataforma electrónica Arduino en la producción de lechuga.

Objetivos específicos

1. Evaluar la contribución de la construcción del sistema aeropónico vertical en la producción de lechuga.
2. Evaluar la asistencia del diseño y la implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico vertical.
3. Evaluar la rentabilidad económica de la producción del cultivo de lechuga bajo el sistema propuesto.

METODOLOGIA

Lugar de Ejecución del Experimento

El presente trabajo de investigación se desarrolló en la azotea de una vivienda ubicada en la Asociación Señor de los Milagros N° A-14 Vista Alegre, perteneciente al distrito de Carmen Alto, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho a una altitud de 2871 m.s.n.m. cuyas coordenadas geográficas son: -13.184722° de latitud y -74.214352° de longitud.

Materiales y Equipos

Tabla 1

Materiales del sistema aeropónico vertical.

Materiales	Descripción	Cantidad
Tubo de PVC	6" x 6 m	4 unidades
Tubo de PVC	4" x 3 m	4 unidades
Tapa PVC	6"	12 unidades
Reducción PVC	6" * 4"	12 unidades
T de PVC	4"	10 unidades
Codo de PVC	4"	5 unidades
Codos hidropónicos	34 mm	450 unidades
Esmalte blanco	1 gal.	1 unidades
Cemento para PVC	1/64 gal.	1 unidad
Malla raschel	65%	20 metros ²

Nota: Elaboración propia.

Tabla 2*Materiales del sistema de riego.*

Materiales	Descripción	Cantidad
Tanque de agua	122.5 litros	1 unidad
Bomba periférica	0.5 HP	1 unidad
Nebulizadores	7 L/hora	24 unidades
Filtro de anillos	120 mech 1"	1 unidad
Manguera HDPE	16 mm.	20 metros
Niples	1"	4 unidades
Válvula tipo bola	1"	2 unidad
Manguera HDPE	1"	5 metros
Conector Inicial	16 mm	3 unidades
Microtubos	4.2 mm.	3 metros

Nota: Elaboración propia.**Tabla 3***Materiales de la plataforma electrónica Arduino.*

Materiales	Descripción	Cantidad
Placa Arduino	Mega Nano	1 unidad
Pantalla LCD	Compatible con Arduino	1 unidad
Cables de puente	Compatible con Arduino	50 unidades
Relé	Compatible con Arduino	1 unidad
Sensor de lluvia	Compatible con Arduino	4 unidades
Conductímetro	Compatible con Arduino	1 unidades
pH	Compatible con Arduino	1 unidas
Cable	ethernet	20 m.
Protoboard	Compatible con Arduino	1 und.

Nota: Elaboración propia.**Equipos**

Los equipos que se usaron durante la realización de este trabajo de investigación son: taladro, Comprensora para pintar, balanza, cámara fotográfica, sierra, broca de 4 cm.

Material Genético

El material genético estuvo constituido por plántulas de lechuga de un mes de edad de la variedad visir, que fueron adquiridas de los invernaderos de la empresa hidropónica Allin Kausay dedicadas a la producción de lechugas hidropónicas.

Solución Nutritiva

Para nutrir las lechugas se utilizó la solución nutritiva adquirida de la empresa ayacuchana Allin Kausay. Esta solución se compone de dos concentrados, A y B, elaborados especialmente para el cultivo de lechugas al cual la empresa se dedica. Estas soluciones están formuladas cuidadosamente para garantizar que los macronutrientes y micronutrientes cumplan con precisión los requerimientos nutricionales óptimos del cultivo de lechugas.

Construcción del Sistema Aeropónico

Se construyeron doce columnas de cultivo, cada columna con 40 codos hidropónicos para ubicar las plantas de lechuga. Para llevar a cabo esta construcción, con el uso del arco y sierra se cortaron cuatro tubos de PVC (6" x 6 m.) en segmentos de 2 metros de largo obteniendo así 12 segmentos de tubos en total. Luego, se utilizó un taladro con una broca de 4 cm de diámetro para hacer 40 orificios separados verticalmente por 18 cm. y en distancias equitativas horizontalmente en cada segmento de tubo. Los codos hidropónicos se colocan en estos orificios, ajustándolos a presión y sumando un total de 480 codos.

Para el sistema de drenaje se cortaron 2 tubos de PVC (4" x 6 m.) en segmentos de un metro, que se conectaron a las T de 4" y nueve unidades de estas fueron unidas a las columnas mediante reducciones de 6" x 4". La distancia entre columna fue de un 1 m. x 1 m., con el fin de no afectar la luminosidad del sol a las plantas. La base de las columnas o el sistema de drenaje se le atribuyó una pendiente de 1.5% con el fin de recolectar la solución nutritiva no absorbida por las plantas, que se almacena en un contenedor para ser reutilizada.

Las tapas de PVC de 6" se ajustaron a presión en la parte superior de las columnas, y se perforó el centro de cada tapa con una broca de 4,2 mm para permitir el paso de los microtubos y los nebulizadores.

Finalmente se pintaron todos los materiales de PVC con pintura blanca a fin de reflejar los rayos solares y así prolongar su vida útil. Todas las uniones que se realizó entre los materiales de PVC, fueron unidas con pegamento de PVC.

Se procedió también a la instalación del tinglado con malla raschel de 65%. Dado que el experimento se llevó a cabo en la azotea de una vivienda, se apoyó la malla en las varillas de acero (columnas de acero) de las columnas, cubriendo una superficie total de 20 metros

cuadrados y demandó sombra a las plantas durante el desarrollo del estudio; en otro caso en las cuales no hubieran estado las varillas de acero se hubieran construido los soportes o columnas a base de palos o rollizos.

Construcción del sistema de riego

El sistema de riego fue construido de la siguiente manera: se usaron 24 nebulizadores en total, dos nebulizadores por cada columna de cultivo, uno en la parte superior y otro en la parte inferior a fin de generar un traslape vertical de riego. Cada nebulizador fue conectado al microtubo de 10 cm. x 4,2 mm. e insertados por los orificios de 4,2 mm. que se les realizaron a las tapas de PVC de 6", para así los microtubos conectarse a las manguera de 16 mm. y este fue insertado en la manguera de 1" a través de los conectores iniciales. La manguera de 1" (manguera de impulsión) fue conectada al sistema de bombeo.

El sistema de bombeo se obtuvo, una bomba periférica de 0.5 HP, el filtro de anillos de 1", 4 niples de 1" y 2 válvulas tipo bola. Para la succión de la solución nutritiva se usó un metro de manguera, mientras que para la impulsión se usaron 4 metros de manguera de HDPE.

Implementación de plataforma electrónica Arduino

La implementación de la plataforma Arduino al módulo hidropónico se implicó en primer lugar la construcción de un tablero de control en el que se ubicaron la placa Arduino, la pantalla LCD, el relé y el protoboard. Este último como nexo de la conexión entre la placa Arduino, la pantalla LCD, los botones, e relé y los sensores, todos estos conectados gracias a los cables puente.

Los sensores de humedad se ubicaron en 4 de las 12 columnas de cultivo seleccionadas al azar y se instalaron en las raíces de las lechugas. Cada sensor de humedad se conectó a 4 metros de cable ethernet y en conjunto a su vez a la placa Arduino mediante el protoboard.

Los sensores de CE y de pH se sumergieron dentro del tanque que contenía la solución nutritiva que se mantuvieron siempre por debajo del nivel de la solución nutritiva para garantizar una mejor lectura de estos parámetros. Estos sensores también se conectaron a la placa Arduino mediante el protoboard.

El relé depende como nexo de conexión entre la placa Arduino y la bomba periférica. El tablero de control y la bomba se ubicaron cerca o al lado del tanque que contenía la solución nutritiva para permitir un mejor control y manejo del cabezal de riego.

Para el funcionamiento de la Placa Arduino y sus componentes se usó energía eléctrica, este fue conectado a un toma corriente por medio de un cargador y un cable tipo A.

Conducción del ensayo

Las plántulas de lechuga de la variedad visir fueron adquiridas de la empresa hidropónica ayacuchana “Allin Kausay”, los cuales fueron extraídas de las bandejas de germinación y trasplantadas al sistema aeropónico vertical cuando tenían de 3 a 4 hojas verdaderas y un desarrollo de 4 semanas.

El trasplante se realizó el día 01/03/2023, las plántulas se colocaron en los codos hidropónicos de las columnas de cultivo, cuidando que las raíces quedaran suspendidas al interior de las columnas sostenidas con un pedazo de esponja envuelta alrededor del tallo para evitar que las plántulas de lechuga cayeran al vacío de las columnas de cultivo.

En la fertilización se empleó la Solución Nutritiva adquirida de la empresa Allin Kausay compuesta por la Solución A y la Solución B.

El pH y la Conductividad Eléctrica de la Solución Nutritiva fueron monitoreados por Arduino a través de pHmetro y el conductímetro, de la misma manera se observaron los valores de estos a través de la pantalla LCD.

El pH se mantuvo entre 5.6 – 6.5, cuando se observaba un incremento del pH que sobrepasaba los parámetros adecuados y alertados por el tablero de control (Arduino), a la solución nutritiva se le añadía ácido fosfórico de manera gradual hasta llegar al parámetro establecido (5.6 - 6.5).

La Conductividad Eléctrica se manejó de la siguiente manera: la primera y segunda semana fue de 1.8 mS/cm; la tercera, cuarta y quinta semana fue de 2.2 mS/cm; y la última semana 3 mS/cm; cuando se observaba la disminución en los parámetros de la CE establecida se le añadía las soluciones nutritivas A y B equitativamente y gradualmente, y al observar un incremento en la CE se le añadía agua gradualmente hasta establecer los parámetros de CE adecuados.

Para el riego se empleó agua potable junto a las soluciones A y B con una concentración de 6 L. de solución A/1000 L. de agua y 6 L. de solución B/1000 L preparados en el tanque de 122.5 L. Los riegos fueron a través de nebulizadores impulsados por una electrobomba de 0.5 HP, controlados por el relé junto al Arduino y el sensor de lluvia, este último colocado en las raíces de las lechugas y controlando su humedad en ellas.

Se realizó el control fitosanitario preventivo, para el control de hongos se usó Bacterin Triple Acción, para el control de plagas se empleó Cammin Triple Acción.

La cosecha de las plantas de lechuga se realizó el 09/04/2023 a los 40 días después del trasplante.

Evaluaciones realizadas

Evaluación de la construcción del sistema aeropónico vertical en la producción de lechuga

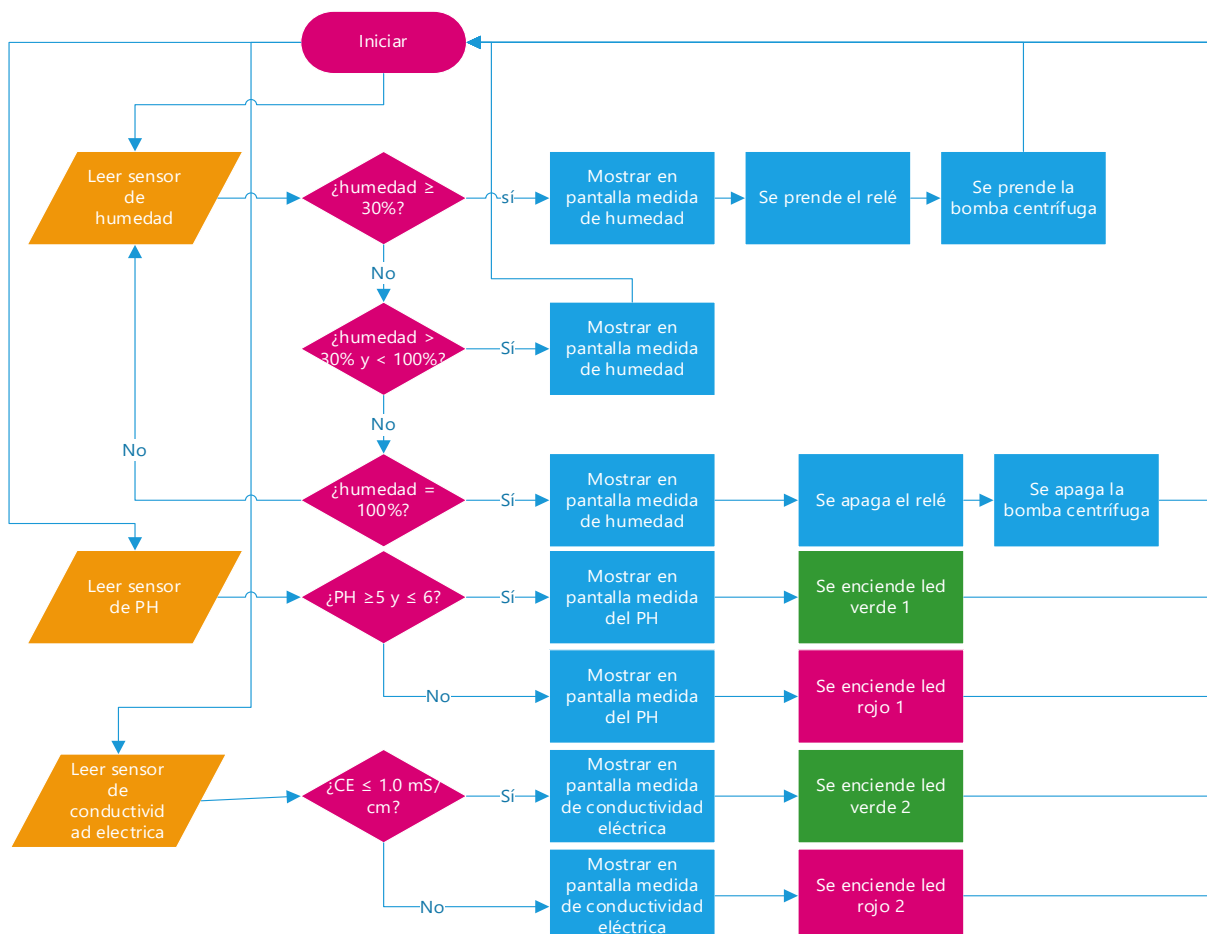
Se monitoreó el adecuado funcionamiento del sistema aeropónico vertical, tomando en cuenta su adecuada construcción, el buen funcionamiento del sistema de riego, y cantidad de lechugas que se lograron producir en el sistema propuesto.

Evaluación del diseño e implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico vertical

Se monitoreo el buen funcionamiento del diseño mostrado en la figura 1, así como la implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico.

Figura 1

Flujograma de programación para la plataforma electrónica Arduino.



Nota: Elaboración propia.

Evaluación de la rentabilidad económica de la producción del cultivo de lechuga bajo el sistema propuesto

Para realizar la evaluación de rentabilidad económica en la producción de lechuga mediante el sistema propuesto, se tuvo en cuenta los costos de inversión de los materiales necesarios para la construcción del sistema aeropónico vertical y el sistema de riego, así como los costos de inversión de la plataforma electrónica Arduino y sus dispositivos complementarios.

Se llevó a cabo evaluaciones en la producción de lechuga, considerando en primer lugar el tiempo o día en que se cosechó (desde el trasplante al sistema aeropónico hasta el día de la cosecha).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Construcción del sistema aeropónico vertical en la producción de lechuga

La construcción del sistema aeropónico vertical para este trabajo de investigación se realizó tomando en cuenta la base propuesta por Arano (1990), en su libro “La Gasetta del Cultivo sin Tierra”

Los materiales empleados a base de PVC del sistema aeropónico fueron de buena calidad y cumplieron su objetivo, así como la utilización de la pintura blanca para pintar todo el sistema a fin de reflejar los rayos solares, permitiendo prolongar la vida útil del sistema.

La distribución de los codos hidropónicos (10 cm. horizontal y 18 cm. vertical) fue adecuada, lo que permitió el crecimiento y desarrollo de las lechugas. Además, estos codos resultaron ser lo suficientemente resistentes como para soportar el peso de las plantas.

La distancia entre las columnas de cultivo (1 m. x 1 m.) aseguró que las plantas recibieran suficiente luz solar y una buena ventilación, lo que les permitió crecer en condiciones óptimas.

El sistema de riego funcionó de manera óptima, ya que no hubo ningún problema ni fuga en el sistema, lo que permitió ahorrar agua. La solución nutritiva recirculó debido a la pendiente del 1.5% que se le dio al sistema de drenaje, lo que impidió el desperdicio y redujo el consumo de este recurso. El agua de riego y los nutrientes se utilizó únicamente en los procesos fisiológicos de la lechuga y el único desperdicio fue en la evapotranspiración.

Diseño e implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino al sistema aeropónico vertical

El diseño e implementación de la plataforma electrónica de código abierto Arduino se llevó a cabo utilizando datos y conceptos presentes en la página web <http://www.arduino.cc/es>, así como en la Guía Básica de Arduino disponible en la página web <http://www.maristashuelva.es> (Maristas Huelva, sf) con resultados satisfactorios.

Durante el desarrollo del trabajo de investigación. Se comprobó que la placa Arduino Nano cumplió con todas las expectativas y requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema de control. Su versatilidad y capacidad para manejar múltiples entradas y salidas permitieron una programación precisa y eficiente.

Durante el proceso de investigación, se observó que la pantalla resultó ser una herramienta muy efectiva para facilitar la visualización de los datos en tiempo real, lo que permitió un monitoreo más eficiente y preciso de los valores de la solución nutritiva.

Se pudo observar que el relé cumplió adecuadamente la función para la que había sido asignada, en efecto, se demostró el dispositivo de prender y apagar la unidad de bombeo en función del nivel de humedad por el sensor de humedad conectado al Arduino.

El sensor de humedad detectó con satisfactoriamente el aumento o disminución de la humedad en las raíces de las lechugas, lo cual pudo encender o apagar la unidad de bombeo para efectuar el riego. La programación del sensor se estableció entre el 100% y el 30% de humedad. Cuando la humedad disminuía hasta el 30%, el sensor lo detectaba y llevaba la información hacia Arduino para ser procesada y, con ello, encender la bomba mediante el relé. Una vez que el sensor detectó que la humedad de las raíces había llegado al 100% se detenía el riego.

El sensor de Conductividad Eléctrica permitió monitorear la cantidad de sales disueltas que existían en la solución nutritiva durante el estudio. Se observó que la solución nutritiva se mantuvo dentro de los valores de 1.8 a 3.0 dS/m, recomendables para el cultivo de lechuga.

El sensor de pH, nos permitió monitorear el pH de la SN el cual se mantuvo dentro de los valores de 5.6 a 6.5, que son los adecuados para la lechuga, cuando se daba una variación del pH de la SN el Arduino emitía la señal de alerta por medio de un led rojo para de esta manera, se pudo actuar de manera oportuna en la calibración del pH.

Análisis económico de costos de inversión y producción

Tabla 4

Costos del Sistema Aeropónico Vertical de 12 m² para el cultivo de lechuga, costos expresados en Nuevos soles a noviembre del 2022.

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario S/.	Precio de referencia S/.
Materiales del sistema aeropónico				1617
Tuvo PVC de 6" x 6 m.	Unidad	4	85	340
Tuvo PVC de 4" x 3 m.	Unidad	4	13	52
Tapa PVC de 6"	Unidad	12	3	36
Reducción PVC de 6" x 4"	Unidad	12	8	96
T PVC de 4"	Unidad	10	8	80
Codo PVC 4"	Unidad	5	6	30
Codo hidropónico de 34 mm.	Unidad	450	2	900
Esmalte Blanco	Galón	1	35	35
Pegamento de PVC 1/64 gal.	Unidad	1	8	8
Malla raschel 65%	Metros ²	20	2	40

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 4**, se muestra los costos de inversión en la construcción del Sistema Aeropónico Vertical con las características antes descritas, el cual asciende a S/. 1617.00 no incluyendo dentro del monto la mano de obra, pues fue realizado en su totalidad por los investigadores.

Tabla 5

Costos del Sistema de Riego, costos expresados en Nuevos soles a noviembre del 2022.

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario S/.	Precio de referencia S/.
Materiales del sistema de riego				547.5
Tanque de agua de 122.5 L	Unidad	1	150	150
Bomba periférica de 0.5 HP	Unidad	1	120	120
Nebulizadores de 10L/hora	Unidad	24	8	192
Filtro de anillos 120 mech de 1"	Unidad	1	25	25
Manguera HDPE de 16 mm.	Metros	20	1	20
Niples de 1"	Unidad	4	2.5	10
Válvula tipo bola de 1"	Unidad	2	6	12
Manguera HDPE de 1"	Metros	5	2	10
Conector Inicial de 16 mm.	Unidad	3	1.5	4.5
Microtubos de 4.2 mm.	Metros	3	1	3
Teflón	Unidad	1	1	1

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 5**, se muestra los costos de inversión en la construcción del Sistema de Riego que fue instalado al Sistema Aeropónico Vertical, el cual asciende a S/. 547.40 no incluyendo dentro del monto la mano de obra, pues fue realizado por el investigador.

Tabla 6

Costos de la Plataforma Electrónica Arduino y componentes, costos expresados en Nuevos soles a noviembre del 2022.

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitario S/.	Precio de referencia S/.
Materiales de la plataforma electrónica Arduino				157
Placa Arduino Nano	Unidad	1	45	45
Pantalla LCD	Unidad	1	18	18
Cable de puente	Unidad	20	0.25	5
Relé	Unidad	1	3	3
Sensor de lluvia	Unidad	4	2	8
Sensor de EC	Unidad	1	16	16
Sensor de pH	Unidad	1	40	40
Cable ethernet	Metros	20	1	20
Protoboard	Unidad	1	2	2

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 6**, se muestra los costos de inversión de Arduino y componentes, el costo asciende a S/.157.00, estos materiales fueron adquiridos e importados de la tienda virtual Aliexpress, los costos incluyen el envío hasta la ciudad de Ayacucho.

Tabla 7

Costos fijos para la producción de 450 plantas de lechugas, expresados en Nuevos soles a noviembre del 2022.

Ítem	Unidad	Cantidad	Costo unitarios S/.	Precio de referencia S/.
Costos fijos				157.5
Solución Nutritiva A	Litros	12	5	60
Solución Nutritiva B	Litros	12	5	60
Plántulas de lechuga	Unidad	450	0.05	22.5
Fluido eléctrico				10
Agua				5

Nota: Elaboración Propia.

En la **Tabla 7**, se muestra los costos fijos para la producción de 450 plantas de lechugas, el costo asciende a S/.157.00, presupuesto con el cual se logró producir 450 plantas de lechuga en 40 días, los costos de agua y luz provienen del incremento en el recibo.

Rentabilidad económica y financiera

El precio de venta por lechuga fue de 1 nuevo sol y pérdida de cultivo del 6%.

Tabla 8

Flujo de Caja durante 5 años de la producción de 450 lechuga cada 40 días en el sistema propuesto.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
INGRESOS						
Ventas de lechugas		4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00
Total, de Ingresos	0	4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00	4,050.00
EGRESOS						
Inversión	2,321.50					
Gastos fijos		1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50
Total, de egresos	2,321.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50	1,417.50
Flujo de caja económico	-S/. 2,321.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50	S/. 2,632.50
VAN = S/. 6,503.05						
TIR = 111%						
B/C = 3.8						

Nota: Elaboración Propia

En la **Tabla 8**, se reporta el flujo de caja durante 5 años para conocer la rentabilidad de la producción de lechuga bajo el sistema propuesto, habiéndose evaluado la rentabilidad económica con la tasa de descuento de 15% anual.

Según el estudio realizado por Portilla (2016) acerca de un sistema automatizado para huertos en casa basado en aeroponía, se logró un rápido crecimiento de las plantas sin enfrentar problemas de plagas. El autor también destaca que este sistema cumple con las necesidades de

luz, riego y nutrientes necesarios para el óptimo desarrollo de las plantas, además de resaltar un significativo ahorro de agua. Estos resultados coinciden con las conclusiones de Choez (2019) y con la presente investigación, que también obtuvo una respuesta satisfactoria en el cultivo en un corto período de tiempo y un notorio ahorro en el consumo de agua en comparación con otros métodos de cultivo.

Rocha (2017) llevó a cabo un experimento en cultivos aeropónicos de lechuga, observando un desarrollo óptimo de las plantas, un notorio ahorro de recursos naturales y un aumento en la producción. Por otro lado, Jesica (2013) señala que la aeroponía ha mejorado la calidad de la producción de hortalizas y destaca su capacidad para ahorrar espacio y aprovechar dimensiones que, de otro modo, no se utilizarían, así como para controlar problemas fitosanitarios en las plantas. Estos hallazgos se asemejan a los resultados obtenidos en este estudio, donde se lograron resultados satisfactorios en el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*) en un espacio limitado.

En esta investigación se demostró que el sistema aeropónico permite una reducción en el espacio de producción y, al mismo tiempo, logra un rendimiento satisfactorio. Esto concuerda con el trabajo de Hernández (2013), quien diseñó un prototipo de huertos aeropónicos y comprobó que dicho modelo alcanza niveles elevados de rendimiento. Además, se constató que este enfoque aeropónico disminuye la dependencia del espacio y del suelo, además de requerir un bajo consumo de agua y nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas.

CONCLUSIONES

1. La construcción del sistema aeropónico vertical, siguiendo los principios propuestos por Arano (1990), demostró ser altamente efectiva en el crecimiento y desarrollo de las lechugas. Las lechugas se cosecharon a los 40 días después de ser trasplantadas, con un peso fresco promedio de 280 gramos por planta, se obtuvo una densidad de 40 lechugas por metro cuadrados, para lo cual los materiales utilizados cumplieron con su función. Asimismo, el sistema de riego operó de manera fluida promoviendo el cuidado del agua. Estos resultados validan la efectividad de nuestro enfoque basado en los principios de Arano y subrayan su aplicabilidad en el cultivo de lechugas en sistema aeropónico vertical asistido por Arduino.
2. El diseño e implementación de la plataforma electrónica Arduino resultó satisfactorio, utilizando la placa Arduino Nano junto a otros componentes como la pantalla, relé, los sensores, etc., lo que permitió un control preciso del sistema aeropónico. Esta plataforma demostró ser esencial al facilitar el monitoreo en tiempo real de datos críticos. En cuanto a

la humedad de las raíces, si esta disminuía al 30%, Arduino activaba automáticamente el sistema de riego hasta alcanzar el 100% de humedad, momento en el cual el sistema se apagaba de manera eficiente. Además, los parámetros de conductividad eléctrica se establecieron en 1.8 mS/cm, 2.2 mS/cm y 3.0 mS/cm. Cualquier variación en estos parámetros, ya sea un aumento o una disminución, era detectada por Arduino, que generaba notificaciones para tomar las acciones adecuadas. Lo mismo sucedía con los valores de pH, que se mantuvieron entre 5.6 y 6.5. cualquier desviación en el pH generaba una señal de alerta por parte Arduino. Lo que permitía realizar ajustes inmediatos. Esta meticulosa atención a mantener el pH y la conductividad eléctrica dentro de los valores adecuados de la solución nutritiva fue fundamental para el éxito de nuestra investigación.

3. El análisis económico reveló que la producción de lechuga bajo el sistema aeropónico vertical resulta rentable. El cálculo del Valor Actual Neto (VAN) arrojó un valor positivo, indicando que los beneficios superan los costos de inversión y producción. Además, la Tasa interna de Retorno (TIR) fue del 111%, demostrando la viabilidad financiera de este trabajo. La relación Beneficio – Costo (B/C) de 3.8, lo que significa que, por cada unidad monetaria invertida se espera obtener 3.8 unidades monetarias de beneficio. Esto indica que este sistema de cultivo es considerado rentable, ya que genera más ingresos que egresos.

RECOMENDACIONES

1. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la viabilidad y eficiencia del sistema aeropónico vertical con Arduino en la producción de lechuga. Se recomienda considerar la implementación de este sistema en escala comercial, en una agricultura urbana, en espacios limitados o áreas con condiciones desfavorables para el cultivo tradicional en suelo; aprovechando los beneficios de ahorro de agua, control preciso y alta productividad que ofrece.
2. Para llevar adelante este sistema de cultivo a nivel comercial más alto, es recomendable realizar un análisis de mercado más detallado para evaluar la demanda de lechugas cultivadas en sistemas aeropónicos o hidropónicos. También es importante realizar un estudio de viabilidad comercial que tome en cuenta los costos de producción a gran escala, la competencia existente y las estrategias de comercialización necesarias para alcanzar el éxito en el mercado.
3. Como consecuencia de los resultados positivos, se sugiere realizar investigaciones adicionales para evaluar la aplicabilidad del sistema aeropónico vertical en otros cultivos y

expandir la gama de productos. Estos trabajos podrían investigar la adaptabilidad del sistema a diferentes condiciones climáticas, mejorar aún más la eficiencia y la rentabilidad mediante la optimización de la automatización y la incorporación de tecnologías avanzadas.

REFERENCIAS

- Arano, C.R. (1990). La gaceta del cultivo sin tierra. Buenos Aires – Argentina.
- Arduino. (2011). Básicos-Arduino Formato PDF. Disponible en: <http://www.arduino.cc/es>.
- Choez, M. V. (2019). Cultivando lechugas (*Lactuca sativa L.*) bajo condiciones de hidroponía con concentraciones crecientes de una solución nutritiva a nivel de invernadero.
- Hernández, S. C., y Sebastián, P. M. (2013). Diseño de un prototipo de un sistema de producción tipo Aeropónico. Bogota D. C: Universidad EAN.
- Jesica, R. A. (2013). Sistema Aeropónico en la agricultura protegida/Caso estudio Saltillo Coahuila: Centro de estudios en química Aplicada.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). Cómo alimentar al mundo en 2050. <http://www.fao.org/3/i1680s/i1680s.pdf>
- Portilla, G. P. (2016). Diseño y construcción de un sistema de automatización para huertos domésticos con tecnología aeropónica. Quito: Escuela Politécnica Nacional.