

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Sostenibilidad de horticultura circular mediante la tecnología  
hidropónica acondicionada en invernadero para el altiplano  
peruano**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autor:**

Luis Angel Quispe Mamani

Fernando Quispe Yucra

**Asesor:**

Ing. Bernardino Tapia Aguilar

**Juliaca, noviembre de 2024**

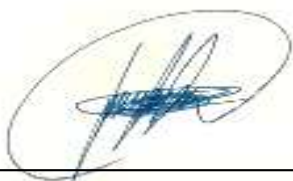
## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mg. Bernardino Tapia Aguilar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de ingeniería ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

### **DECLARO:**

Que la presente investigación titulada: **“SOSTENIBILIDAD DE HORTICULTURA CIRCULAR MEDIANTE LA TECNOLOGÍA HIDROPÓNICA ACONDICIONADA EN INVERNADERO PARA EL ALTIPLANO PERUANO”** de los autores **Luis ángel Quispe Mamani** y **Fernando Quispe Yucra**, tiene un índice de similitud de **4 %** verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 27 días del mes de noviembre del año 2024



---

Mg. Bernardino Tapia Aguilar

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 04 día(s) del mes de noviembre del año 2024 siendo las 12:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Msc. Miguel Angel Salcedo Enriquez el (la) secretario(a): Msc. Loreyda Abigail Bondou Turpe y los demás miembros: Msc. Rose Adelina Pallata Chura Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera y el (la) asesor(a) Msc. Bernardino Tapia Aguilar con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

"Sostenibilidad de horticultra circular mediante la tecnología hidropónica acondicionada en invernadero para el altiplano peruano"

del(los) bachiller(es): a) Luis Angel Quipe Mamani

b) Fernando Quipe Yura

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Ambiental

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Luis Angel Quipe Mamani

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

Bachiller (b): Fernando Quipe Yura

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>15</u>	<u>B-</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]  
Presidente/a

[Firma]  
Asesora

[Firma]  
Bachiller (a)

[Firma]  
Miembro

[Firma]  
Bachiller (b)

[Firma]  
Secretaría

[Firma]  
Miembro

[Firma]  
Bachiller (c)

## **AGRADECIMIENTO**

De todos los retos y desafíos que surgieron como un ciclo sin fin, agradecemos a los verdaderos artífices de la investigación nuestros padres:

- Justina Mamani Lopez,
- Victor Quispe Laruta
- Gregoria Laruta (Coco)
- Grudo Quispe Achata
- Marcelina Yucra Choque y a todo el linaje Quispe Yucra

Ingeniero Bernandino Tapia y Fredy Chambi (por los sabios consejos) y toda la gratitud a nuestro buen padre amigo Jesús, por cada idea, guía y sabiduría compartida, así mismo, agradecemos a nosotros por dar un paso de fe en hacer posible lo que se daba por hecho como imposible, que todo el sacrificio, perseverancia y aprendizaje sea útil para el servicio de la población y más aún, sirva como un recordatorio de cuan extraordinario y maravilloso es este mundo, diseñado con una perfección que trasciende lo inimaginable.

## INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	iv
INDICE DE TABLAS.....	vi
INDICE DE FIGURAS .....	vii
INTRODUCCION.....	11
MATERIALES Y METODOS.....	12
RESULTADO Y DISCUSIONES .....	21
CONCLUSION .....	36
LITERATURA CITADA.....	37
ANEXOS.....	43

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Oferta nutricional del agua(manantial) y Demanda Nutricional para el cultivo de lechuga hidroponica.....	13
<b>Tabla 2.</b> Análisis de rigidez y deformaciones del invernadero hidropónico, extraída del programa SAP 2000 .....	21
<b>Tabla 3.</b> Consumo hídrico integral del sistema hidropónico NFT piramidal .....	27
<b>Tabla 4.</b> Consumo Energetico del Sistema Hidropónico NFT piramidal, en la Produccion de Lechuga Hidroponica en el Altiplano – Peruano .....	29
<b>Tabla 5.</b> Inversión Real para la producción de lechuga hidropónica en sistema NFT piramidal en el altiplano peruano .....	30
<b>Tabla 6.</b> Análisis de Factibilidad Económica en la Producción de Lechuga Hidropónica en el Tiempo, para el Altiplano de Puno, Perú.....	31
<b>Tabla 7.</b> Rentabilidad económica de proyectos hidropónicos NFT piramidal en el altiplano .....	32

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Modelamiento en el SAP 2000v23 y aplicación de carga muerta, viva, viento(W1-barlovento/W2-sotavento), sismo XY) por el área tributaria.....	viii
<b>Figura 2.</b> Manejo y control de los parámetros de pH y Conductividad Eléctrica de las soluciones nutritivas de las 3 parcelas S1(La Molina), SN2(Furlani) y SN3(Hoagland&Arnon) durante el tiempo de la investigación 18 enero – 15 febrero ...	16
<b>Figura 3.</b> Plano de distribución propuesto del sistema integrado para el proyecto hidropónico del estudio .....	17
<b>Figura 4.</b> Flujograma propuesto del funcionamiento sistemático IoT del invernadero hidropónico.....	18
<b>Figura 5.</b> Operación del Sistema NFT piramidal Inteligente, propuesto de la investigación.....	19
<b>Figura 6.</b> Construcción finalizada del invernadero hidropónico conforme a la normativa nacional E-020, 030 y 090 e internacional ASCE 7:16.....	23
<b>Figura 7.</b> Panel de control y monitoreo del invernadero hidropónico en Arduino Cloud .....	24
<b>Figura 8.</b> Data del Sistema IoT, sobre el Comportamiento de la Luminosidad (PPFD) y la Temperatura dentro del invernadero en un lapso de 24 horas .....	25
<b>Figura 9.</b> Data del Sistema IoT, Comportamiento de la Temperatura Respecto a la Humedad dentro del Invernadero en un lapso de 24h .....	26
<b>Figura 10.</b> peso fresco (A), altura de la planta (b) y numero de hojas (c) de las 3 variedades de lechuga con diferente solución nutritivas en 28 DPA .....	34

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Evidencia De Sumisión.....	43
<b>Anexo B.</b> Resolución De Aprobación Del Perfil De Tesis .....	44
<b>Anexo C.</b> Resolucion De Cambio De Titulo Del Perfil De Tesis (Título Actual).....	45

## **Sostenibilidad de horticultura circular mediante la tecnología hidropónica acondicionada en invernadero para el altiplano peruano**

**RESUMEN:** El altiplano peruano enfrenta desafíos climáticos adversos anualmente debido al fenómeno “EL NIÑO”, esto impacta negativamente la sostenibilidad agrícola en la región altiplánica. Este estudio evaluó la sostenibilidad de la horticultura circular mediante la tecnología hidropónica Nutrient Film Technique (NFT) piramidal en la región altiplánica. Desarrollado en tres sistemas NFT de 3m<sup>2</sup> (3×1) en condiciones de invernadero semiautomatizado con IoT, diseñado estructuralmente según la normativa nacional e internacional, además, se evaluó la sostenibilidad Ecológica a través del Rendimiento hídrico-energético. Económico: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna Retorno (TIR) e índice Beneficio/Costo (B/C) y Socialmente la calidad y rendimiento biométrico mediante el comportamiento de tres variedades de lechuga: Seda-Butterhead (Ls1), Lollo Rosa-Acephala (Ls2), Iceberg-Greak lake (Ls3) suministrada por tres soluciones nutritivas: La molina (Sn1), Furlani (Sn2), Hoagland&Arnon (Sn3) durante 28 Días Post Almacigo (DPA). Se produjo lechugas con un peso entre 200 – 300 g por planta con la Sn3:Ls1 y alcanzó un rendimiento de 12.91 kg m<sup>-2</sup>. Así mismo, obtuvo un VAN de S/13,230.61, TIR del 58.78% y B/C de 1.58 resultando económicamente rentable. Inclusive, logró un rendimiento hídrico de 16.91 L kg<sup>-1</sup> por ciclo lo que redujo un 93% el consumo hídrico en contraste a métodos agrícolas convencionales. Sin embargo, alcanzo una eficiencia energética de 3.28 kWh kg<sup>-1</sup> por ciclo equivalente a 91% menos eficiente. Estos resultados prometen que la hidroponía formara parte de la columna vertebral en el desarrollo de un futuro hortícola sostenible, Optimización y diversificando los productos hortícolas en la región altoandina, Puno, Perú.

**Palabras clave:** *Lactuca sativa l.*, rendimiento ecológico, rentabilidad socioeconómica, hidroponía NFT, solución nutritiva,

## **Sustentabilidade da horticultura circular através da tecnologia hidropônica condicionada em estufa para o altiplano peruano**

**RESUMO:** As terras altas do Peru enfrentam desafios climáticos adversos anualmente devido ao fenômeno “EL NIÑO”, o que impacta negativamente a sustentabilidade agrícola na região das terras altas. Este estudo avaliou a sustentabilidade da jardinagem circular usando tecnologia hidropônica piramidal Nutrient Film Technique (NFT) na região montanhosa. Desenvolvido em três sistemas NFT de 3m<sup>2</sup> (3×1) em condições de estufa semiautomática com IoT, projetado estruturalmente de acordo com regulamentações nacionais e internacionais, além disso, a sustentabilidade ecológica foi avaliada através do desempenho hídrico-energético. Econômico: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e índice Benefício/Custo (B/C) e Socialmente, a qualidade e desempenho biométrico através do comportamento de três variedades de alface: Seda-Butterhead (Ls1), Lollo Rosa -Acephala (Ls2), ligo Iceberg-Greak (Ls3) abastecido por três soluções nutritivas: La molina (Sn1), Furlani (Sn2), Hoagland&Arnon (Sn3) por 28 dias após Almacigo (DPA). Alfaces com peso entre 200 – 300 g por planta foram produzidas com Sn3:Ls1 e atingiram produtividade de 12,91 kg m<sup>-2</sup>. Da mesma forma, obteve VPL de S/13.230,61, TIR de 58,78% e B/C de 1,58, resultando em rentabilidade econômica. Alcançou ainda um rendimento de água de 16,91 L kg<sup>-1</sup> por ciclo, o que reduziu o consumo de água em 93% em contraste com os métodos agrícolas convencionais. Contudo, alcançou uma eficiência energética de 3,28-kWh kg<sup>-1</sup> por ciclo, equivalente a 91% menos eficiente. Estes resultados prometem que a hidroponia fará parte da espinha dorsal do desenvolvimento de um futuro hortícola sustentável, otimizando e diversificando os produtos hortícolas na região alta andina, Puno, Peru.

**Palavras-chave:** *Lactuca sativa* L., desempenho ecológico, rentabilidade socioeconômica, hidroponia NFT, solução nutritiva,

## INTRODUCCION

Las anomalías provocadas por el fenómeno el Niño, que involucra heladas, granizos, sequias y vientos impredecibles, afecta significativamente el desarrollo sostenible de la agricultura en la región altiplánica de Puno, Perú (IPE, 2024). Las prácticas agrícolas convencionales por su uso ineficiente del agua, degradación de suelo, alteración de ecosistema y reducida producción, resultan insostenibles a largo plazo y más alarmante aun el pronóstico de aumento poblacional de 9.700 millones para el año 2050, intensificando la demanda hídrica, espacio y alimentos (UNESCO, 2021; ONU, 2022).

La hidroponía surge como una tecnología prometedora en tendencia bajo un modelo de horticultura circular (Salinas-Velandia et al., 2022), optimizando la gestión hídrica y seguridad alimentaria en un mínimo espacio, mientras maximiza la calidad y producción, mediante un ciclo de cultivo que utiliza agua y soluciones nutritivas como medio de cultivo, inhibiendo la necesidad de extensas de suelo agrícola (Beltrano y Gimenez, 2015; Payen et al., 2022).

Barbosa et al., (2015); Dutta et al., (2023a) En la hidroponía el rendimiento hídrico supera a la agricultura convencional de  $13 \pm 2.7$  ahorro hidrico. Lazo & Gonzabay, (2020a) evidencio la rentabilidad de los proyectos hidropónicos con una ratio beneficio-costos (B/C) de 1.26, así mismo, la integración de tecnologías como el Internet de las cosas (IoT) en la hidroponía optimiza el monitoreo y control sobre las variables ambientales, mejorando la producción en calidad y cantidad (Casey et al., 2022; Kaur et al., 2023).

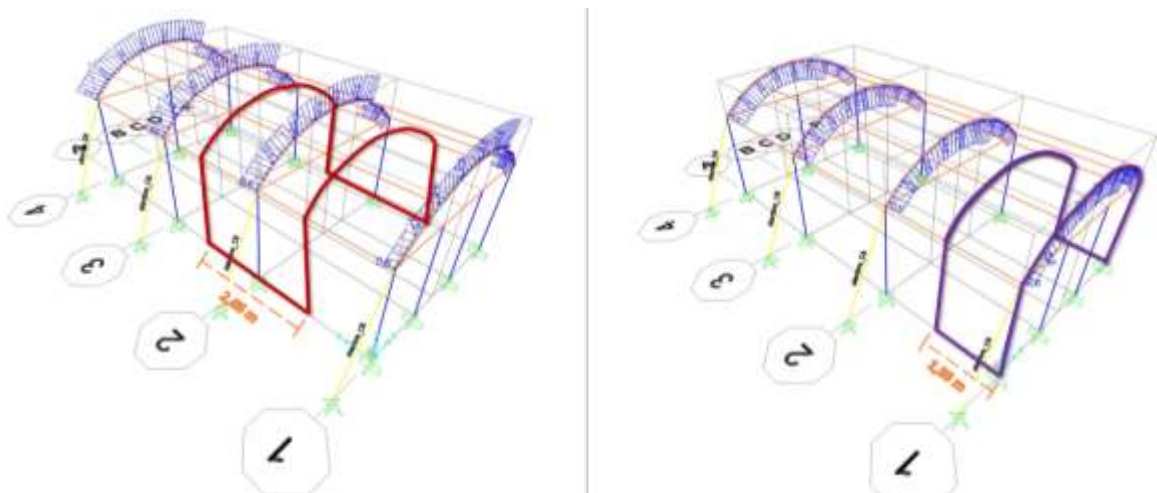
Ante la ineficiente sostenibilidad de la horticultura convencional. La presente investigación evaluó la sostenibilidad de la horticultura circular mediante la tecnología

hidropónica Nutrient Film Technique (NFT) piramidal en condiciones del altiplano de Puno, Perú.

## MATERIALES Y METODOS

El proyecto fue acondicionado en un invernadero hidropónico diseñado, edificado y ubicada geográficamente 15°30'52.15" latitud sur, 70°10'58.16" longitud oeste, altitud de aproximadamente 3826 msnm, dentro de la Universidad Peruana Unión Filial – Juliaca, que comprende características climáticas: Temperatura anual 18.8 - 7.8°C máxima y mínima. Así mismo, vientos moderados e irregulares 2 – 30 Km por hora, precipitación pluvial de 118mm en los meses de enero, febrero y marzo, tiempo en el cual se desarrolló la investigación, datos conforme al reporte del (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Peru (SENAMHI), 2020).

El invernadero se diseñó de tipo curvo orientado E - W con un superficie de 32 m<sup>2</sup>, 8m de longitud, 4m de ancho, altura de 3.5m de tubos de acero galvanizado ASTM A500 grado A, cubierta de plástico agro film calibre 10 translucido de 200 micrones(0.234 kg m<sup>-2</sup>) con el programa SAP 2000v23 de manera simplificada,



**Figura 1.** Modelamiento en el SAP 2000v23 y aplicación de carga muerta, viva, viento(W1-barlovento/W2-sotavento), sismo XY) por el área tributaria

siguiendo las directrices de la (American Society of Civil Engineers (ASCE), 2017) y la Norma técnica de Edificación NTE E.020, E.030 y E.090 del (Servicio Nacional de Capacitaciones Para la Industria de la Construcción (SENCICO), 2020) (Figura 1).

La investigación tomo a la lechuga (*Lactuca Sativa*) como organismos vivos de prueba, objetivamente las variedades: Lechuga Seda – Butterhead (Ls1); lollo rosa - Acephala (Ls2); americana – Great Lakes (Ls3). El almacenado tuvo una duración de 30 días en sustrato de arena de construcción usando tamices N° 60 (0.25 mm) y N° 8 (2.36 mm). Así mismo, en la etapa de post almacenado, se trasplantó a los sistemas NFT piramidal acondicionada en un área de 3m<sup>2</sup> (3m largo, 1 ancho) con 10 tubos de PVC de 75mm de diámetro, almacena en un recipiente de 150 L.

Se dispuso de 3 soluciones nutritivas propias de la comunidad hidropónica: “La Molina” (Sn1); “Furlani” (Sn2) y “Hoagland&Arnon” (Sn3), preparada bajo el criterio de oferta y demanda nutricional de los macros (N, P, K, Ca, Mg, S) y microelementos (Fe, B, Cu, Zn, Mn y Mo) del agua. Obtenido la brecha se equilibró las concentraciones según los requerimientos nutricionales propuestos por los autores en el cultivo de lechugas hidroponica (Tabla 1).

**Tabla 1.** Oferta nutricional del agua(manantial) y Demanda Nutricional para el cultivo

Elementos	Peso Atómico	Formas de absorción	Aporte nutricional (mg/L)	Requerimiento Nutricional (mg/L)		
			Manantial – M-01	SN 1 “La Molina” (Rodriguez et al., 2001)	SN 2 “Furlani” (Cometti et al., 2006)	SN 3 “Hoagland&Arnon (Hoagland y Arnon, 1937)
Macroelementos						
Nitrógeno	14,01	N – NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	12.60	190	174	210
		N – NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		19	24	14

Fosforo	30,97	P – H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	35	39	31
		P – HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			
Potasio	39,09	K <sup>+</sup>	20.72	210	183
Calcio	40.08	Ca <sup>2+</sup>	47.89	150	142
Magnesio	24.30	Mg <sup>2+</sup>	17.25	45	38
Azufre	32,06	S – SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	12	70	52
Microelementos					
Hierro	55,84	Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup>	1	2	2,5
Cobre	63,54	Cu <sup>2+</sup>	0,1	0,02	0,02
Manganeso	54,93	Mn <sup>2+</sup>	0,5	0,4	0,5
Boro	10,81	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> , BO <sub>4</sub> O <sub>2</sub> <sup>2-</sup>	0,5	0,3	0,5
Zinc	65,38	Zn <sup>2+</sup>	0,15	0,06	0,05
Molibdeno	95,96	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,05	0,06	0,01

Las soluciones nutritivas se dividieron en 3 recipientes rotuladas como Soluciones Madre (SM) A, B y C en 5 litros, se optó por incrementar la concentración en 5 veces la inicial con la finalidad de facilitar el manejo, la mezcla se realizó considerando las bases de incompatibilidad y solubilidad de los fertilizantes.

Solución Madre “SN1 - La Molina”: SM-A 645 g nitrato calcio (15,5% N – 19,3% CaO) y 286 g Nitrato de potasio (13,5% N – 45,5 K<sub>2</sub>O), SM-B “La Molina”: 286 g nitrato de potasio (13,5% N – 45,5% K<sub>2</sub>O), 132 g fosfato monoamónico (12% N – 61% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y 45 g sulfato de potasio (17% S – 50% K<sub>2</sub>O) y SM-C 344 g sulfato de magnesio (13% S – 16% MgO), 16,67 g hierro quelatado (6% Fe EDDHA), 0,71 g molibdato de amonio (54% Mo), 2,9 g ácido bórico (17,46% B) y compuestos sulfatados de cobre 0,4 g (25% Cu – 12,82% S), manganeso 1,6 g (31% Mn – 18,5% S) y zinc 0,71 g (21% Zn – 11% S).

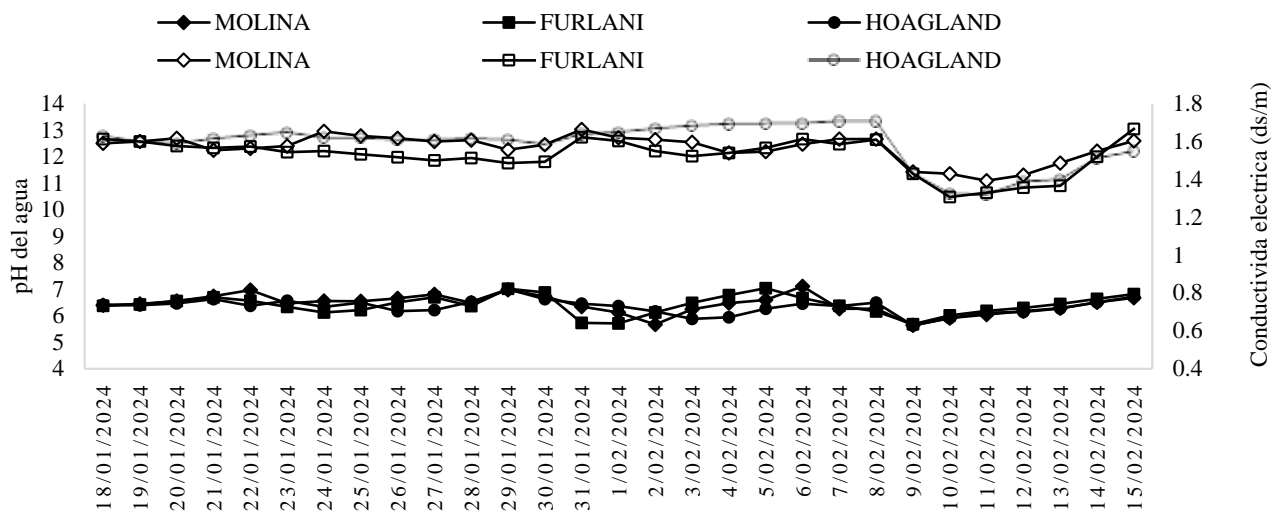
Solución Madre “SN2 - Furlani”: SM-A 587 g nitrato calcio (15,5% N – 19,3% CaO) y 261 g Nitrato de potasio (13,5% N – 45,5 K<sub>2</sub>O), SM-B “La Molina”: 261 g nitrato de potasio (13,5% N – 45,5% K<sub>2</sub>O), 147 g fosfato monoamónico (12% N – 61% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y 21 g sulfato de potasio (17% S – 50% K<sub>2</sub>O) y SM-C 245 g sulfato de magnesio (13% S – 16% MgO), 33,3 g hierro quelatado (6% Fe EDDHA), 0,11 g molibdato de amonio (54% Mo), 1,72 g ácido bórico (17,46% B) y compuestos sulfatados de cobre 0,08 g (25% Cu – 12,82% S), manganeso 1,29 g (31% Mn – 18,5% S) y zinc 0,29 g (21% Zn – 11% S).

Solución Madre “SN3 – Hoagland&Arnon”: SM-A 705 g nitrato calcio (15,5% N – 19,3% CaO) y 326 g Nitrato de potasio (13,5% N – 45,5 K<sub>2</sub>O), SM-B “La Molina”: 326 g nitrato de potasio (13,5% N – 45,5% K<sub>2</sub>O), 117 g fosfato monoamónico (12% N – 61% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y 54,7 g sulfato de potasio (17% S – 50% K<sub>2</sub>O) y SM-C 218 g sulfato de magnesio (13% S – 16% MgO), 41,67 g hierro quelatado (6% Fe EDDHA), 0,02 g molibdato de amonio (54% Mo), 2,86 g ácido bórico (17,46% B) y compuestos sulfatados de cobre 0,08 g (25% Cu – 12,82% S), manganeso 1,61 g (31% Mn – 18,5% S) y zinc 0,24 g (21% Zn – 11% S).

El pH y CE fueron medidos periódicamente con equipos digitales, para mantener el pH de las soluciones nutritivas en el umbral de 5,5 – 7, aplicándose una dilución al 0,5 Mol de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Da Silva et al., (2021), las altas concentraciones de sales minerales son inversamente proporcional a la generación de biomasa en la producción de lechuga. De igual manera, Ayres et al., (2022) recomienda que el pH para cultivos hidropónicos de la lechuga debe mantenerse en el rango de 5.8 – 6.2 para garantizar la disponibilidad

máxima de los nutrientes esenciales, razón por la que se midieron diariamente en las 3 parcelas durante los 28 DPA (Figura 2).

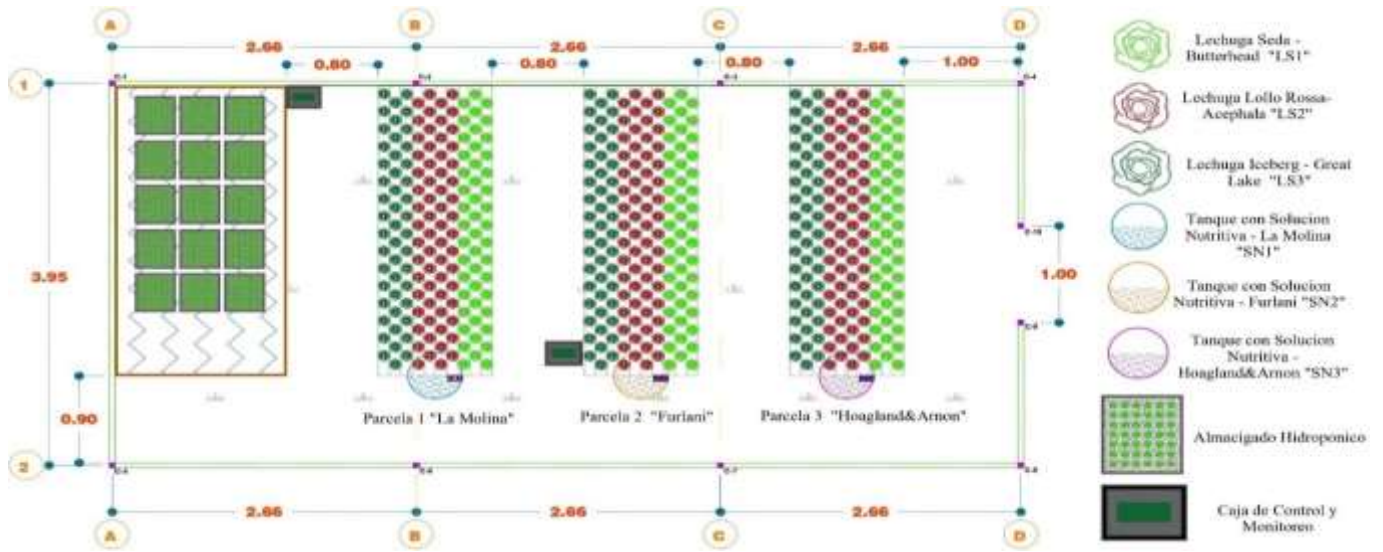


**Figura 2.** Manejo y control de los parámetros de pH y Conductividad Eléctrica de las soluciones nutritivas de las 3 parcelas S1(La Molina), SN2(Furlani) y SN3(Hoagland&Arnon) durante el tiempo de la investigación 18 enero – 15 febrero

La investigación es de tipo aplicada, lo que cuantifica la sostenibilidad de la horticultura circular en la región altioplánica a través del sistema hidropónico NFT piramidal analizados longitudinalmente por su rendimiento ecológico, económico y social, en el tiempo de la investigación.

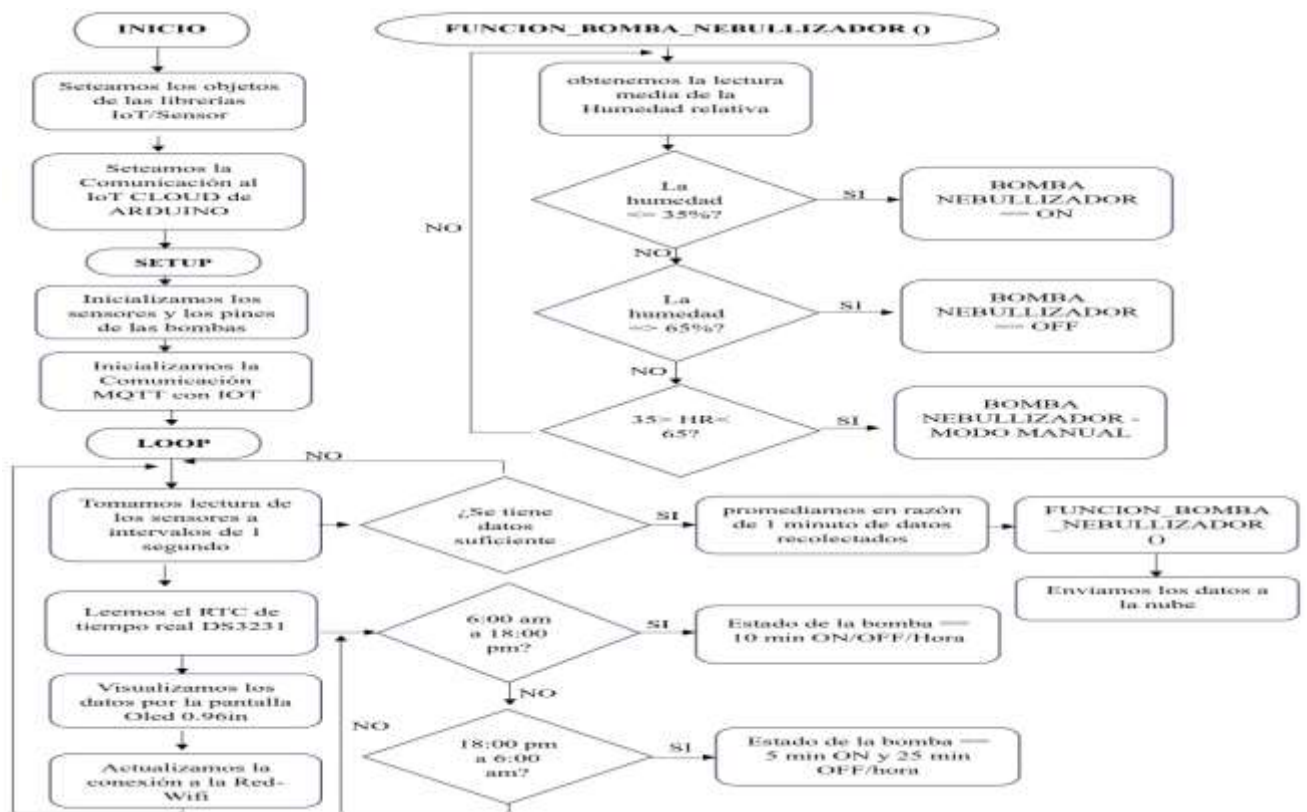
Los resultados del análisis del rendimiento social (análisis biométrico) se sometieron a un análisis de varianza y si las medias resultantes son significativas, se aplicó la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Así el arreglo de los tratamientos aplicados se agrupa por parcelas (sistemas NFT piramidal de  $3\text{m}^2$  + soluciones nutritivas) y subparcelas (variedades de lechuga) que combinan (Sn1:Ls1, Sn1:Ls2, Sn1:Ls3, Sn2:Ls1, Sn2:Ls2, Sn2:Ls3, Sn3:Ls1, Sn3:Ls2, Sn3:Ls3), así mismo, se analizó el rendimiento por  $\text{kg m}^{-2}$  en la cosecha y un análisis longevo de la calidad biométrica en 28 DPA (Días Post Almacigo) utilizando indicadores como la altura de la lechuga (cofia

– ápice), número de hojas y el peso fresco con un muestreo aleatorio, quedando distribuida en 3 parcelas con 3 sub parcelas dentro del invernadero (figura 3).



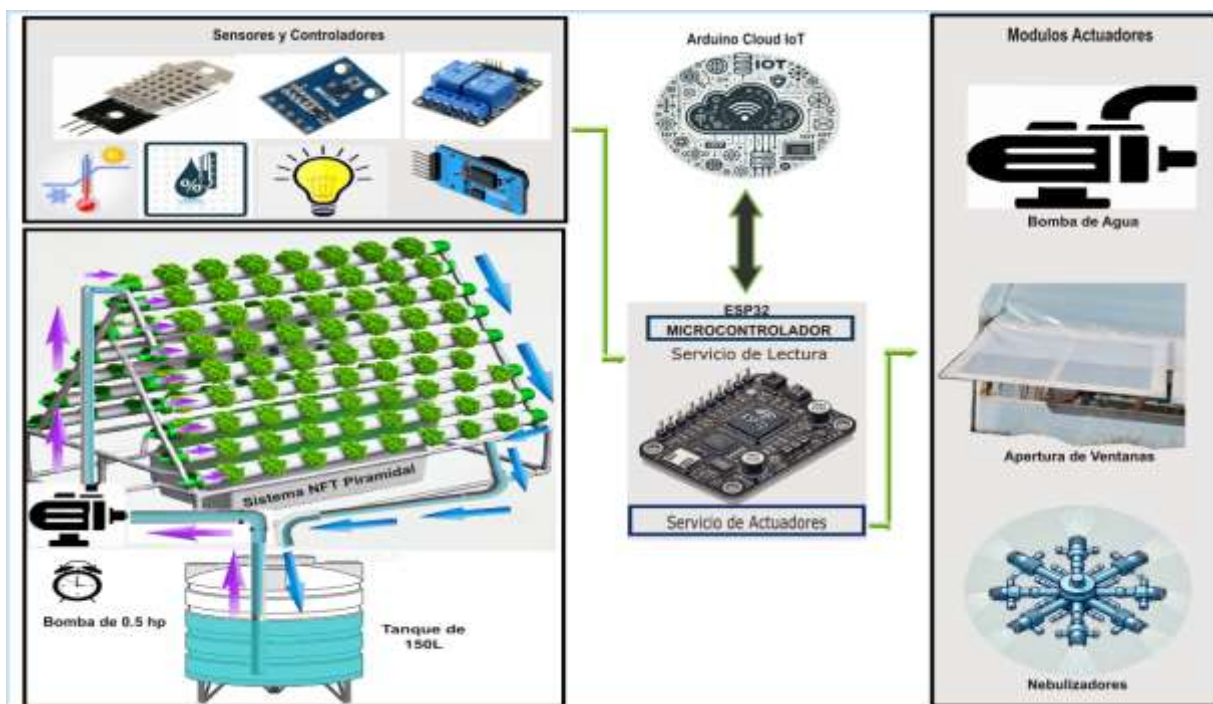
**Figura 3.** Plano de distribución propuesto del sistema integrado para el proyecto hidropónico del estudio

El sistema de control basado en el internet de las cosas (IoT), fue planteado con el fin de optimizar y controlar el sistema integrado del proyecto hidropónico, para el sistema se usó el System on Chips (SoC) esp32, exactamente el kit de desarrollo esp32 NodeMCU de Espressif como el núcleo del sistema embebido, que integra Bluetooth y Wifi lo que hace posible su uso en el IoT (IEEE Staff, 2019). El flujo de trabajo del sistema de monitoreo y control para el sistema Hidropónico NFT piramidal propuesto, se explica en la figura 4.



**Figura 4.** Flujograma propuesto del funcionamiento sistemático IoT del invernadero hidropónico

Las variables ambientales fueron monitoreadas por los sensores: DHT22 usado para medir temperatura ambiente y humedad relativa, el reloj RTC DS3231 para el control horario, BH1750 el cual mide la luminosidad y los módulos relés electromagnéticos de 2 y 4 canales para controlar las bombas de riego AC, las cuales fueron de la marca Meba de 370 Watts, los riegos en las 3 parcelas fueron de 2 turnos, diurno 6:00 – 18:00 pm por 10 min ON y 10 min OFF por hora y nocturno 18:00 – 6:00 am 5 min ON y 25 min OFF por hora, respecto a la cuarta bomba se utilizó con 4 nebulizadores marca Forgger de 4 salidas equidistantes a 1.4m usada para mantener el umbral confort de la humedad relativa en 35 – 50% requerida por las lechugas, la figura 5, explica el proceso productivo del sistema NFT inteligente propuesto.



**Figura 5.** Operación del Sistema NFT piramidal Inteligente, propuesto de la investigación

Para determinar el rendimiento hídrico del sistema hidropónico NFT piramidal, se siguió la metodología de diferencial volumétrico en el recipiente de 150 L por 24 horas, añadiéndose, el consumo por los nebulizadores calculada con la Eq. 1, siendo necesario el tiempo de funcionamiento de la bomba, el cual se obtuvo de la nube de Arduino Cloud, incurriendo en la totalidad de las variables para la cuantificación de la demanda hídrica requerida por el sistema NFT piramidal integrado ( $L\ kg^{-1}$ ).

$$Q_d = N_n \times Q_f \times T_f \quad (1)$$

Donde:

$Q_d$  - Consumo diario del nebulizador (L por día);

$N_n$  - Numero de nebulizador en la línea;

$Q_f$  - Caudal de funcionamiento de los nebulizador (L por hora); y,

$T_f$  - Tiempo de funcionamiento de la bomba (hora por día).

El Rendimiento energético del sistema hidropónico se calculó con la Eq. 2, para esto se consideró los equipos y su potencia, dentro de ello se encuentra el módulo devkit esp32, sensores y las bombas de riego, para obtener el tiempo de funcionamiento de las bombas y nebulizador se recurrió a los registros de la nube de Arduino Cloud.

$$Q_e = P_e \times T_f \quad (2)$$

Donde:

$Q_e$  - Consumo diario de energía (kWh por día);

$P_e$  - Potencia de funcionamiento del equipo (kWh); y,

$T_f$  - Tiempo de funcionamiento del equipo (hora por día).

En el análisis de rentabilidad económica del sistema hidropónico NFT piramidal, se tomó como punto de partida la construcción del invernadero hidropónico a los costes de operación y mantenimiento, proyectada para 5 años con una tasa de descuento (TD) del 15% el cual se considera como una rentabilidad mínima en proyectos de alto riesgo (Carriquiry et al., 2019). Así mismo, se analizó el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) e índice de beneficio/costo (B/C) calculadas por las Eqs 3,4 y 5, respectivamente.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+r)^t} - C \quad (2)$$

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+r)^t} - C \quad (3)$$

Donde:

$Ft$  - Flujo de efectivo en el tiempo (\$);

$r$  - Tasa de descuento (%);

t - periodo de tiempo (años); y,

C - Inversión Inicial (\$).

$$\text{Ratio} \frac{B}{C} = \frac{V_b}{V_c + I} \quad (4)$$

Donde:

Vb – VAN de los Beneficios (\$);

Vc – VAN de los Costos (\$); y,

I - Inversión Inicial (\$).

## RESULTADO Y DISCUSIONES

Los datos de las deflexiones y flechas de la estructura del invernadero modelado en el SAP 2000v23 (Tabla 2), subraya que la estructura tiene una mayor respuesta a la deflexión por cargas de viento en Barlovento. Así mismo, el análisis sísmico realizado con los criterios establecidos por la E-030 para el invernáculo, tiende a desplazarse en lo mínimo respecto a las cargas por viento (barlovento). Por lo que, las cargas venticas podrían llegar a provocar un fallo en la infraestructura agrícola.

**Tabla 2.** Análisis de rigidez y deformaciones del invernadero hidropónico, extraída del programa SAP 2000

Casos de Carga Críticos	Sección	Deflexiones		
		U1 (mm)	U2 (mm)	U3 (mm)
Barlovento	N 64	13.8	-0.1	-7.7
	N 53	13.7	-0.1	-7.7
	N 75	13.2	-0.1	-7.6
	N 72	12.4	-0.1	-7.3
	N 65	12.3	-0.1	-5.4
	N 64	-3.3	0.001	1.6

	N 53	-3.3	0.001	1.6
Sotavento	N 75	-3.2	0.001	1.6
	N 42	-3.0	0.001	1.5
	N 63	-3.0	0.001	0.6
	C 1	0.2	0.001	1.5
Carga de servicio	C 2	0.4	0.001	2.9
	C 3	0.4	0.001	2.9
	C 4	0.2	0.001	1.5

N – Nodo, los principales nodos afectados por las cargas de viento se encuentran en el parabólico de la estructura, C – corte transversal, se tienen 4 cortes transversales con deflexiones por servicio, U1 – Eje X, U2 – Eje Y, U3 – Eje Z

El diseño del invernadero hidropónico alcanzó un desplazamiento lateral máximo U1 de 13.8 mm, por el escenario más crítico ejercida por la carga de los vientos del Sur. Huang et al., (2024) afirma que la tipología de los invernaderos abovedados es influenciada mayormente por la presión del viento en dirección de barlovento, por lo que las infraestructuras agrícolas tienen mayores desgastante por cargas de vientos. Respectivamente, la E-020 establece que el desplazamiento lateral del invernadero no debe de exceder el 1% la altura de la estructura, de igual manera, la ASCE 7:16 determina que la deformación límite para estructura en acero deberá ser inferior a la  $Haltura/150$ . obteniendo el umbral de probabilidad de falla estructural lateral de 23 – 38 mm.

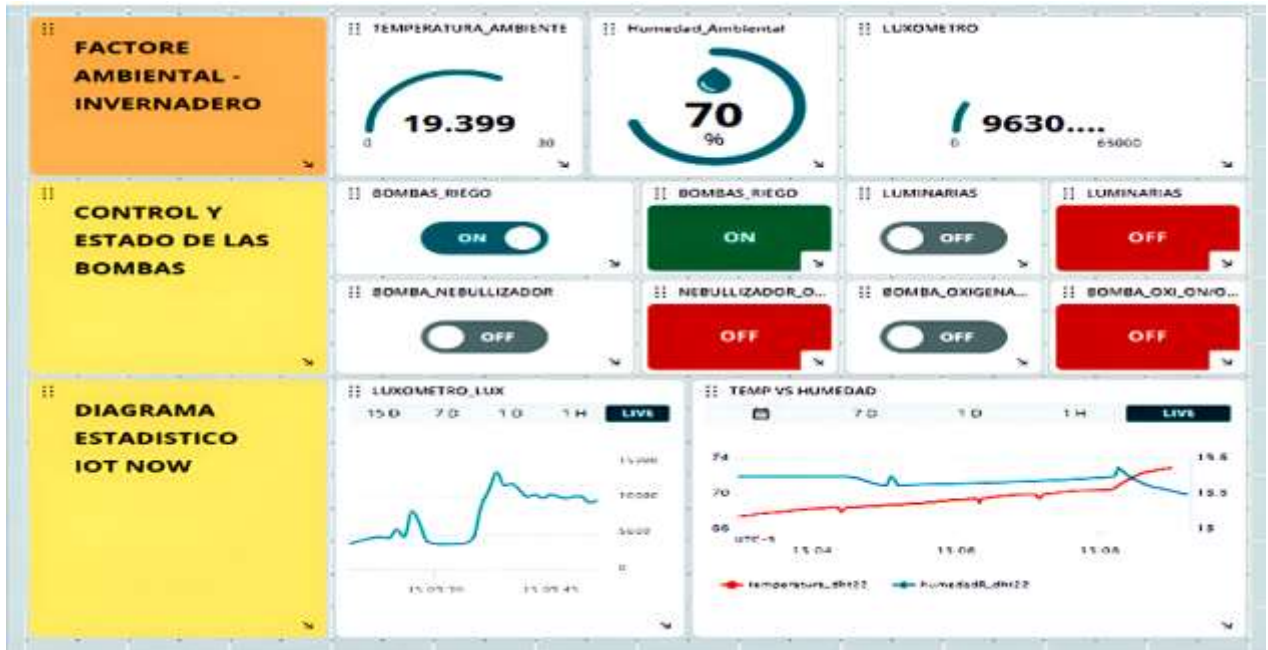
Así mismo, el análisis de rigidez toma criterios de las flechas producidas por el invernadero a causa de cargas de servicio, considerando los lineamientos de la normativa E-020 y ASCE 7:16 las deflexiones verticales no deben exceder la luz del elemento/240 equivalente a 16,6 mm U3 en dirección a la fuerza gravitatoria. La (Tabla 2) muestra la deflexión vertical en el diseño del invernadero alcanzando 2,9 mm U3 este valor indica que la estructura se está desplegando hacia abajo respecto a su posición original en condiciones de servicio.

Obteniéndose que el diseño del invernadero cumple con las directrices de rigidez de la norma nacional E-020 e internacional ASCE 7:16. Determinado la estabilidad y seguridad de la estructura se finalizó la construcción con el ensamblaje, con la técnica de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) recomendado para estructuras de acero por la E-090 (Figura 6).



**Figura 6.** Construcción finalizada del invernadero hidropónico conforme a la normativa nacional E-020, 030 y 090 e internacional ASCE 7:16

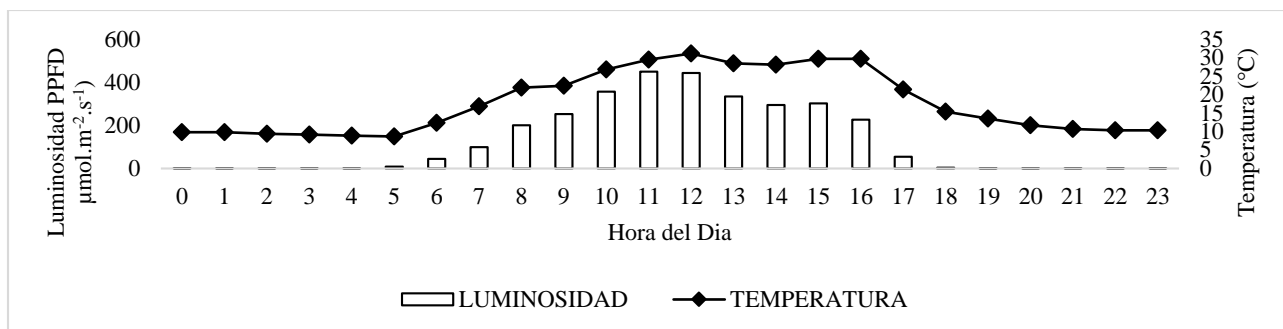
De acuerdo al flujograma de trabajo propuesto se programó el sistema IoT, obteniéndose datos de los parámetros ambientales, estado y control de las bombas del invernadero, visualizados y controlados desde la plataforma de Arduino Cloud (figura 7).



**Figura 7.** Panel de control y monitoreo del invernadero hidropónico en Arduino Cloud

La versión gratuita de Arduino Cloud limita ciertas características en la aplicación del usuario IoT: Principalmente en la cantidad de variables y el almacenamiento de los datos por únicamente un día, por lo que, Arduino Cloud “fabricante” permite almacenar datos hasta 90 días , variables ilimitadas, actualización inalámbrica, uso compartido del panel de control con otros usuarios (ARDUINO, 2024), no obstante, existen plataformas que brindan el servicio IoT cloud como ThingSpeak, Ubidots, Blynk IoT, sin embargo, a pesar del coste elevado los beneficio son más extendidos en términos seguridad y aplicación para el usuario final.

La Figura 8, muestran los datos obtenidos de Arduino cloud, sobre las variables ambientales de la luminosidad en términos de Luminosidad Photosynthetic photon Flux Density (PPFD) medidos por el sensor BH1750 en relación a la temperatura dentro del invernáculo monitoreada por el sensor DHT22 durante 24 horas.



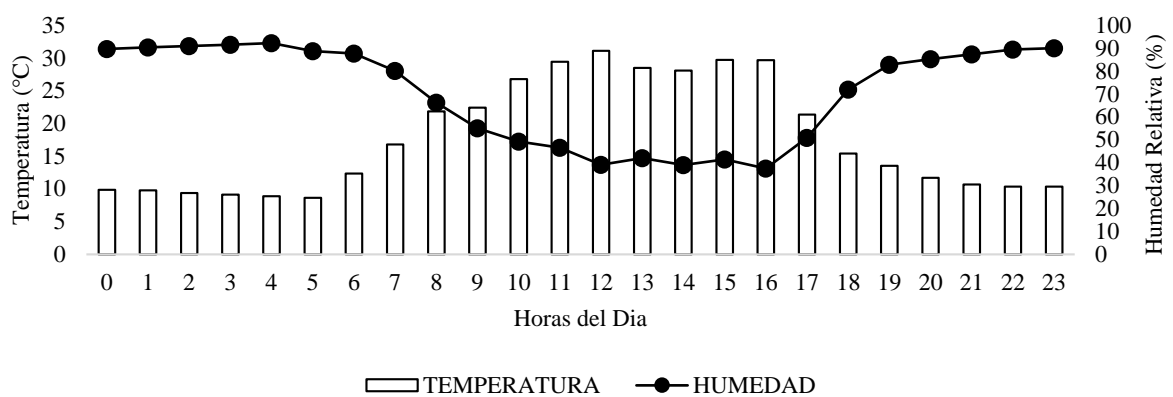
**Figura 8.** Data del Sistema IoT, sobre el Comportamiento de la Luminosidad (PPFD) y la Temperatura dentro del invernadero en un lapso de 24 horas

Existe una relación proporcional entre la luminosidad y la temperatura. De acuerdo con Xu y Cui, (2021) la relación viene a causa de que la luminosidad es un subconjunto de la radiación solar, por lo que a medida que aumente la radiación solar aumentara la iluminación consecuentemente la temperatura, lo que conllevara al efecto invernadero en la superficie del invernáculo, reportado temperatura mínima de  $8.7^{\circ}\text{C}$  ascendiendo a  $31^{\circ}\text{C}$  en la hora solar pico. De igual manera, las horas de luz durante la investigación (verano) fueron alrededor de 9 horas de luz pasiva con una media  $318 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Según Song et al., (2020); Tsouvaltzis et al., (2020); Sutulienė et al., (2022) la intensidad lumínica para una óptima producción de lechuga hidropónica está en el rango de  $250 - 300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , lo cual tiende a mejorar la calidad del producto significativamente en los niveles de antocianina, antioxidantes, vitamina C, azúcar y proteína soluble.

El gráfico muestra que la relación es más contundente en horario diurno, caso opuesto en horario nocturno observándose que la temperatura es mayormente influenciada por la capacidad del invernadero reteniendo la radiación absorbida durante el día. Choab et al., (2021); Badji et al., (2022) observaron que los invernaderos orientados de E – W optimizan la captación y transmisión de luz, al estar expuesto la totalidad del día al sol. Por el contrario, la pérdida de calor por convección a causa de

los vientos irregulares y niveles reducidos de temperatura en el exterior influyeron en la temperatura interna del invernadero.

En cuanto al comportamiento de la temperatura (°C) respecto a la humedad relativa (%), ambas variables se midieron con el sensor DHT22 a una altitud paralela a la altura media del sistema hidropónico, adquiriendo datos más significativos que repercuten sobre las lechugas hidropónicas del estudio (Figura 9).



**Figura 9.** Data del Sistema IoT, Comportamiento de la Temperatura Respecto a la Humedad dentro del Invernadero en un lapso de 24 horas

La temperatura respecto a la humedad relativa (HR) dentro del invernáculo son inversamente proporcional según lo mostrado en la Figura 7. De acuerdo a H. A. Ahmed et al., (2020); Chia y Lim (2022) la humedad relativa para la lechuga esta entre 50 - 85% para un óptimo balance hídrico y fotosíntesis de la planta. En condiciones de baja humedad, la lechuga cierra sus estomas para conservar agua, inhibiendo el proceso de fotosíntesis, por ende, reduce el crecimiento de la lechuga. Para controlar el descenso de la HR el sistema IoT puso en funcionamiento los nebulizadores lo que mantuvo la  $HR > 35\%$ . Adicionalmente, se observó que sin la implementación de los nebulizadores el ambiente presenta una abrupta caída en la humedad relativa a intervalos de 15 – 20%.

Evidentemente los valores de HR dentro del invernadero fueron menores al óptimo, no obstante, los cultivos de la investigación no mostraron visualmente estrés significativo como marchitez, hojas secas o enrollamiento ante la humedad observada, sin embargo, se mantuvo el umbral en 35 – 65% por los nebulizadores que se accionaron con una frecuencia intermitente en horas solar pico (10:00 – 15:00 pm) con un tiempo de funcionamiento medio diario de 35 min día<sup>-1</sup>. Por la relación temperatura/humedad mostrada en la figura 9, los nebulizadores al entrar en funcionamiento incrementaron los niveles de humedad lo que a su vez redujo la temperatura dentro del invernadero.

La producción de la lechuga hidropónica en sistema NFT piramidal en condiciones del altiplano peruano, alcanzo un rendimiento hídrico de 16.91 L kg<sup>-1</sup> por ciclo, dentro del cálculo se incluyó el consumo hídrico por los nebulizadores (Tabla 3).

**Tabla 3.** Consumo hídrico integral del sistema hidropónico NFT piramidal

Parcelas	Consumo hídrico L *ciclo <sup>-1</sup>	**Operación del nebulizador L por ciclo	Consumo total L por ciclo	Consumo por planta L planta <sup>-1</sup> por ciclo	Rendimiento hídrico (L kg <sup>-1</sup> por ciclo)
Molina	301				
Furlani	299	470.96	1369.96	3.04	16.91
Hoagland&Arnon	299				

\*- Ciclo de cultivo inicio desde el día 0 DPA (días post almacigo) con una duración de 28 DPA, \*\*- el consumo de operación de los nebulizadores se calculó con la Ec. 3, considerando el funcionamiento intermitente al día de la bomba nebulizadora que fue de 35 min día<sup>-1</sup> para mantener el umbral de HR > 35% proporcionada por la data de la nube IoT

El sistema NFT piramidal logro una eficiencia hídrica porcentual del 93%, lo que representa un ahorro hídrico de 14.71 veces superior en contraste con la agricultura convencional. Dicho por Pomoni et al., (2023) la agricultura convencional demanda exorbitantes cantidades de agua alcanzando los 250 L por kg, por el contrario, la hidroponía  $20 \pm 3.8$  L kg<sup>-1</sup> por lechuga hidropónica, debido a la recirculación hídrica

característico de los sistemas hidropónicos NFT. De igual manera, Dutta et al., (2023b) coincide en que el consumo de lechuga en sustrato alcanza un consumo hídrico de 260 L por kg, por ser un sistema abierto sin recirculación. Tal hecho, evidencia que los sistemas hidropónicos NFT alcanzan un rendimiento hídrico superior a otras tecnologías en la producción de lechuga.

No obstante, mantener un óptimo confort fenológico de las lechugas hidropónicas no es gratis demanda una inversión hídrica, lo que incrementa parcialmente el consumo de agua de los sistemas hidropónicos en el altiplano peruano, reduciendo el rendimiento hídrico. En este caso en particular el consumo de agua pudo llegar a niveles cercano o incluso superior a 20 L kg<sup>-1</sup> por ciclo. Si la configuración del sistema IoT fuese más conservador en el manejo del rango óptimo del 50 – 85%, eludiéndose el caso principalmente por la rápida evaporación, resequedad y efecto lupa en el ambiente de los cultivos, lo que conlleva a una repercusión clara evidente en las hojas del cultivo durante las horas solar pico que presenta el invernadero (Figura 8).

El consumo energético del sistema control esp32 fueron casi insignificante, alrededor de 1.54 kWh por ciclo, sin embargo, el panorama cambia con los sistemas de riego, disparándose a niveles de consumo alrededor de 266.627 kWh ciclo<sup>-1</sup>, debido principalmente al uso de bombas de gran potencia, lo que representa una eficiencia energética de 3.278 kWh por kg lechuga hidropónica producida en el altiplano bajo invernadero pasivo semi automatizado (Tabla 4).

**Tabla 4.** Consumo Energetico del Sistema Hidroponico NFT piramidal, en la Produccion de Lechuga Hidroponica en el Altiplano – Peruano

Sistemas	Consumo diario kWh por dia	Consumo kWh por ciclo	Rendimiento Energético kWh kg <sup>-1</sup> por ciclo
Sistema de Control ESP32 - IOT	0.053	1.541	
Sistema de bombas de riego	9.194	266.627	3.278

Casey et al., (2022) nos deja claro que el consumo de energía en la hidroponía es significativo, llegando a niveles de 15 kWh por kg de lechuga producida, mientras tanto, el consumo energético en la agricultura convencional es de 0.27 kWh kg<sup>-1</sup>, resultando más eficiente respecto a los cultivos hidropónicos NFT piramidal, que alcanzó a requerir  $11 \pm 1$  veces más demanda energética. Por lo que, el rendimiento energético es del 91% menos eficiente que la agricultura convencional.

La producción hidropónica en invernaderos activos demanda un consumo energético de 70 veces más respecto a invernaderos pasivos, atribuido al consumo por calefactores, ventiladores, enfriadores, humidificadores, iluminación y bombeo (Dutta et al., 2023c). En comparación al consumo energético del proyecto, el sistema NFT piramidal conjunto obtuvo una moderada eficiencia energética del 78 – 87% optimizando la gestión energética.

Es importante mencionar que el rendimiento hídrico en la producción hidropónica respecto a la agricultura convencional es innegablemente significativa en todo aspecto, no obstante, cuando se trata de rendimiento energético resulta deficiente incumpliendo parcialmente los lineamientos de eco sostenibilidad, no cabe duda que es otro desafío a la que los hidro cultores a den desafiar con la implementación de energías renovables (solar, eólica, biomasa, geotérmica, Hidrogeno Verde, etc.) o Sustituir por

equipos de mayor eficiencia energética (bombas acuario y bombas DC) optimizando la eficiencia energética.

Económicamente, se requiere una moderada inversión inicial de S/ 11,500.00 (once mil quinientos nuevos soles) para la puesta en marcha de una infraestructura hidropónica integral para el altiplano peruano para un área de 32 m<sup>2</sup> (4 × 8), la inversión esta repartida en una serie de gastos estratégicos al mas mínimo detalle (Tabla 5).

**Tabla 5.** Inversión Real para la producción de lechuga hidropónica en sistema NFT piramidal en el altiplano peruano

Secciones	Fases	Monto S/.
1	Construcción del invernadero (4 × 8 × 3,5)	S/ 4,082.62
2	Semi-automatización del Invernadero Hidropónico	S/ 153.00
3	Análisis e insumos para la Solución Nutritiva	S/ 1,163.6
4	Implementación Sistema Hidropónico NFT - Piramidal	S/ 2,355.8
5	Operación del sistema (Equipos y material)	S/ 3,661.55
	Total	S/ 11,416.57

El 35% de la inversión es acarreado por la construcción del invernadero hidropónico, porque claro, en el altiplano bajo sus condiciones climáticas el invernadero es indispensable. Luego, la operación del sistema con el 32 % de la inversión neta, dirigida principalmente por el consumo energético del sistema integral, seguidamente, la implementación del sistema NFT piramidal representa el 20 % siendo volátil según el material seleccionado, así mismo, el análisis e insumos para las soluciones nutritivas el 10%, esencial para nutrir parcelas de cultivo y por último el sistema de control y monitoreo IoT propuesto representa el 1% de la inversión, estos gastos dan a intuir que los costos de operación del sistema está directamente relacionadas a los equipos

empleados, que no solo afecta ecológicamente sino también a las arcas monetarias de los emprendedores hidropónicos en la región.

El flujo de caja durante los 5 años en la producción de lechuga hidropónica en el altiplano, se anticipa para una producción anual de 5400 lechuga, comercializado a un precio base de S/ 2.00 por cabeza de lechuga hidropónica, con un peso mínimo garantizado de 180 g (Tabla 6).

**Tabla 6.** Análisis de Factibilidad Económica en la Producción de Lechuga Hidropónica en el Tiempo, para el Altiplano de Puno, Perú

Detalles	Años					
	0	1	2	3	4	5
<b>INGRESO</b>						
Inversión			S/ 11,500.00			
Producción Anual		5400	5400	5400	5400	5400
Costo de lechuga		S/ 2.00	S/ 2.00	S/ 2.00	S/ 2.00	S/ 2.00
Beneficio Total	S/ 11,500.00	S/ 10,800.00	S/ 10,800.00	S/ 10,800.00	S/ 10,800.00	S/ 10,800.00
<b>EGRESOS</b>						
Operación Mantenimiento		S/ 2,500.00	S/ 2,500.00	S/ 2,500.00	S/ 2,500.00	S/ 4,000.00
Servicio de Compra/Venta		S/ 500.00	S/ 500.00	S/ 500.00	S/ 500.00	S/ 500.00
Servicio IoT		S/ 360.00	S/ 360.00	S/ 360.00	S/ 360.00	S/ 360.00
Costo Total		S/ 3,360.00	S/ 3,360.00	S/ 3,360.00	S/ 3,360.00	S/ 4,860.00
Beneficio Neto		S/ 7,440.00	S/ 7,440.00	S/ 7,440.00	S/ 7,440.00	S/ 5,940.00

Los beneficios netos anuales andan por los S/10,800.00, estimando que la inversión se recupere en aproximadamente  $\geq 15$  meses. Apartir del segundo año, se proyecta ingresos brutos constante de S/ 7,440.00. Sin embargo, el flujo de caja indica que el capital de inversión inicial para implementar sistemas hidropónicos en el altiplano peruano tienden a ser significativo, causados principalmente por el costo de implementación, gastos de operación y mantenimiento del sistema, que es lo que

parcialmente inhibe el margen del crecimiento económico en la inversión hidropónica, estrechando los beneficios el 5to año donde los costos de operación y mantenimiento ascienden a un monto de S/4,000.00 por el necesario mantenimiento y cambio en la fachada del invernadero.

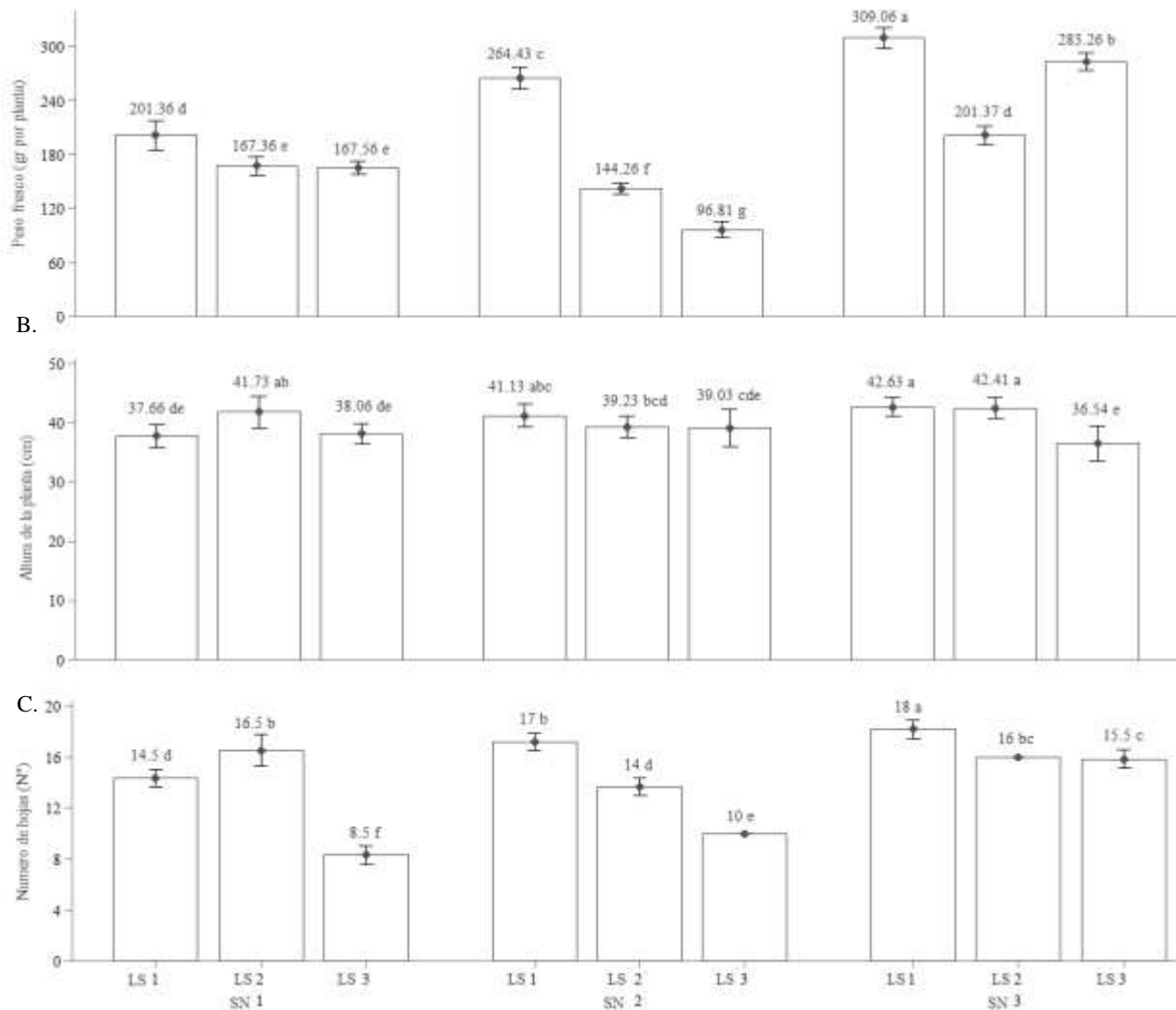
El análisis de la viabilidad económica del sistema alcanzó un VAN de S/ 13,230.61 con una TIR del 58.78 % y un Índice de B/C de 1.58 a partir de una tasa de descuento del 15% para las inversiones productivas de lechuga hidropónica en el altiplano peruano (Tabla 7). Estos valores muestran ser atractivos para las futuras inversiones en el sector agrícola en la región.

**Tabla 7.** Rentabilidad económica de proyectos hidropónicos NFT piramidal en el altiplano

Detalle	Valor
Tasa de Descuento	15%
Valor Actual Neto (Soles peruanos)	S/ 13,230.61
Tasa Interna de Retorno	58.78%
Índice de B/C	1.58

Con esta rentabilidad económica expuesta resulta atractivo económicamente para los futuros emprendimientos de los hidro cultores en el altiplano, existen otros sistemas hidropónicos como la técnica raíz flotante que según (Lazo y Gonzabay, 2020b) tienden a ser opciones viables económicamente, con un índice de B/C de 1.26, de igual manera, S. V. Souza et al., (2019) afirma que la producción de lechuga en medios hidropónicos NFT el índice B/C estimado es de 2.13, años después, Souza et al., (2023) sostiene que los sistemas de hidropónico en sustrato obtuvieron un índice B/C de 1.57 esto debido al valor agregado y estima de la región Brasileña respecto a la seguridad alimentaria, sin lugar a duda los sistemas hidropónicos con su amplia gama de opciones representa una gran oportunidad de inversión en este sector que va en auge.

Por otro lado, las soluciones nutritivas obtuvieron impactos variados y significativos en las variedades cultivadas, principalmente en el peso fresco ( $p \leq 0.05$ ). (Figura 10) se observó que la Sn3 propuesta por Hoagland&Arnon logro mayores rendimiento en la variedad Ls1 obteniendo un peso fresco máximo de 309.1 g, 18 hojas por planta, 42.6 cm de la altura de la planta (cofia al ápice), seguida por la variedad Ls3 obteniendo un peso fresco de 283.3 g, 16 hojas por planta, 36.5 cm de la altura de la planta en 28 DPA y en la variedad Ls2 obtuvo un peso fresco de 201.4 g, 16 hojas por planta y una altura de 42.4 cm en 28DPA.



Sn1, SN2, SN3 – soluciones nutritivas la Molina, Furlani y Hoagland&Arnon respectivamente, LS1, LS2, LS3 – variedad de lechuga seda(butterhead), lollo rosa (Acephala) y americana (Great Lakes), asi mismo, las letras

minúsculas diferentes representan diferencias significativas entre soluciones y variedades según la prueba de tukey ( $p < 0.05$ ), así mismo, las barras verticales muestran el error de la media estándar ( $n = 3$ )

**Figura 11.** peso fresco (A), altura de la planta (b) y numero de hojas (c) de las 3 variedades de lechuga con diferente solución nutritivas en 28 DPA

Los rendimientos biométricos fueron más significativos según la prueba Tukey en las 3 variedades por la solución nutritiva formulada por Hoagland&Arnon, el peso fresco de requisito social, alcanzó  $309.06 \text{ g planta}^{-1}$  en la variedad Seda Butterhead (Ls1). Lazo y Gonzabay, (2020c) observaron que las lechugas hidropónicas de la variedad Acephala en 22 DPA obtiene un rendimiento máximo en el peso fresco de  $150.1 \text{ g}$  por planta, realizado en un invernadero hidropónico pasivo con clima tropical. Igualmente, Gumisiriza et al., (2022) obtuvo un rendimiento medio de  $120 \text{ g}$  por planta en la variedad de lechugas de hoja suelta verde y roja en un sistema hidropónicos NFT en 40 DPA en un ambiente caluroso, así mismo, Sapkota et al., (2019) reportó un rendimiento medio de  $115.33$  y  $93.17 \text{ g}$  por planta en las variedades seda(buttercrunch) y morada (Black Seeded Simpson), respectivamente, Ahmed et al., (2021) estudiando los cultivos hidropónicos orgánicos e inorgánicos observo crecimientos más óptimos con soluciones inorgánicas, resultando con un peso fresco de  $182.3 \text{ g planta}^{-1}$  cultivada con la solución nutritiva formulada por Hoaglan&Arnon.

Dando por hecho que los cultivos de lechuga hidropónica de la variedad Seda Butterhead en el altiplano representan una gran oportunidad socioeconómico, también, se observó que el crecimiento de las lechugas hidropónicas está relacionada a la disponibilidad y balance de los nutrientes en la Solución Nutritiva, en una misma proporción se encuentran las variables ambientales principalmente la temperatura, humedad relativa, luminosidad,  $\text{CO}_2$  y viento, cumplen un rol significativo en el desarrollo de la planta, inclusive factores que parezcan insignificante como la posición y ubicación del sistema hidropónico en el invernáculo repercuten en el crecimiento de las

planta, por lo tanto, la efectividad de una solución nutritiva esta intrínsecamente influenciada por varios factores.

Una cuestión significativa que contribuye e impulsa la aceptación social es el rendimiento intensivo de la producción de lechuga hidropónica destacándose en: calidad, cantidad y practicidad de la técnica. En términos de rendimiento intensivo el sistema propuesto produjo 45 – 50 plantas  $m^{-2}$  por ciclo, la lechuga Seda Butterhead (Ls1) obtuvo el mayor rendimiento alrededor de 12,9  $kg m^{-2}$ , por su rápida adaptabilidad al clima local es la variedad más recomendada para iniciar en el cultivo hidropónico en el altiplano peruano, la variedad Americana (Ls3) con una media de 9.1  $kg m^{-2}$  y la variedad de Lollo Rosa (Ls2) con 8.5  $kg m^{-2}$  en 28 DPA. Contrastando con cultivos en suelos, dicho y hecho, el sistema hidropónico NFT piramidal obtuvo un rendimiento de 5 veces más productividad por ciclo de cultivo, evidenciando el potencial de los cultivos de lechuga hidropónica en la región altoandina de Puno, Perú.

## CONCLUSION

1. El sistema hidropónico NFT piramidal alcanzó un rendimiento hídrico de 16.91 L por kilogramo de lechuga producida, logrando una gestión hídrica 93% más eficiente respecto técnicas hortícolas convencional.
2. El sistema alcanzó un rendimiento energético de 3.28 kWh por kilo de lechuga producida, lo que representa en una demanda energética de 91% superior en comparación al agro convencional.
3. El sistema NFT piramidal propuesto promete una perspectiva viable para las inversiones agrícolas en la región altoandina, con un VAN (S/ 13,230.61), TIR (58.78%) y representa un radio B/C (1.58).
4. La hidroponía resultó en una oportunidad socio agronómica inmensa, logrando una aceptabilidad y rendimiento intensivo de 12.91 kg de lechuga producida por metro cuadrado.
5. El microcontrolador esp32 para IoT se perfila como un prospecto tecnológico en la agricultura de precisión, facilitando el control y monitoreo ambiental en tiempo real.

## LITERATURA CITADA

Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. In *South African Journal of Botany* (Vol. 130, pp. 75–89). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>

Ahmed, Z. F. R., Alnuaimi, A. K. H., Askri, A., & Tzortzakis, N. (2021). Evaluation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) production under hydroponic system: Nutrient solution derived from fish waste vs. inorganic nutrient solution. *Horticulturae*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7090292>

ARDUINO. (2024). *Arduino Cloud Plans and Benefits*. Recuperado el 04 de abril de 2024, de Cloud Arduino: <https://cloud.arduino.cc/plans/>

American Society of Civil Engineers (ASCE). (2017). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. In *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>

Ayres, J. I., Grasso, R., & Berrueta, D. C. (2022). *Hortifruticultura 108 Revista INIA-Nº 71 Hortifruticultura*. <http://www.inia.uy/>

Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A., & Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 373). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133753>

Barbosa, G. L., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land,

- water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph120606879>
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Universidad Nacional la Plata.
- Carriquiry, M., Piaggio, M., & Sena, G. (2019). *Guia de Analisis Costo-Beneficio*.  
<https://www.fao.org/3/ca2795es/ca2795es.pdf>
- Casey, L., Freeman, B., Francis, K., Brychkova, G., McKeown, P., Spillane, C., Bezrukov, A., Zaworotko, M., & Styles, D. (2022). Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 369.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133214>
- Choab, N., Allouhi, A., Maakoul, A. El, Kousksou, T., Saadeddine, S., & Jamil, A. (2021). Effect of Greenhouse Design Parameters on the Heating and Cooling Requirement of Greenhouses in Moroccan Climatic Conditions. *IEEE Access*, 9, 2986–3003. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047851>
- Cometti, N. N., Furlani, P. R., Hugo, /, Ruiz, A., Inácio, E., & Filho, F. (2006). *Nutrição Mineral de Plantas*.
- da Silva, A. C. R. A., da Silva, G. F., de Menezes, S. M., Cruz, R. Í. F., Júnior, J. A. S., & Rolim, M. M. (2021). Accumulation of cations in lettuce cultivars under low-cost hydroponic system with brackish waters. *Revista Brasileira de Engenharia*

*Agricola e Ambiental*, 25(12), 833–839. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n12p833-839>

Dutta, M., Gupta, D., Sahu, S., Limkar, S., Singh, P., Mishra, A., Kumar, M., & Mutlu, R. (2023). Evaluation of Growth Responses of Lettuce and Energy Efficiency of the Substrate and Smart Hydroponics Cropping System. *Sensors*, 23(4). <https://doi.org/10.3390/s23041875>

Gumisiriza, M. S., Ndakidemi, P., Nalunga, A., & Mbega, E. R. (2022). Building sustainable societies through vertical soilless farming: A cost-effectiveness analysis on a small-scale non-greenhouse hydroponic system. *Sustainable Cities and Society*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103923>

Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1937). *The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil*.

Huang, B., Liu, J., Li, Z., Wang, W., Wang, X., Liu, X., & Xiao, T. (2024). Analysis of wind pressure characteristics of typical agricultural greenhouse buildings on tropical islands. *Advances in Aerodynamics*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s42774-023-00170-0>

IEEE Staff. (2019). *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. IEEE.

IPE – Instituto Peruano de Economía (2024). *La agricultura cayó 4,1% en el 2023, el peor resultado desde 1992*. <https://www.ipe.org.pe/portal/la-agricultura-cayo-4-1-en-el-2023-el-peor-resultado-desde-1992/>

- Kaur, G., Upadhyaya, P., & Chawla, P. (2023). Comparative analysis of IoT-based controlled environment and uncontrolled environment plant growth monitoring system for hydroponic indoor vertical farm. *Environmental Research*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115313>
- Lazo, R. P., & Gonzabay, J. Q. (2020a). Economic analysis of hydroponic lettuce under floating root system in semi-arid climate. *Granja*, 31(1), 121–133. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>
- Lazo, R. P., & Gonzabay, J. Q. (2020b). Economic analysis of hydroponic lettuce under floating root system in semi-arid climate. *Granja*, 31(1), 121–133. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>
- ONU. (2022). *World population will reach 8 billion in 2022 \_ United Nations*. <https://www.un.org/>
- Payen, F. T., Evans, D. L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Marshall, R., Mead, B. R., & Davies, J. A. C. (2022). How Much Food Can We Grow in Urban Areas? Food Production and Crop Yields of Urban Agriculture: A Meta-Analysis. *Earth's Future*, 10(8). <https://doi.org/10.1029/2022EF002748>
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A Review of Hydroponics and Conventional Agriculture Based on Energy and Water Consumption, Environmental Impact, and Land Use. In *Energies* (Vol. 16, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16041690>

Rodriguez, D., Hoyos, M., & Chang, M. (2001). *Soluciones nutritivas en hidroponía, formulación y preparación*. Centro de Investigación de Hidroponía e Investigación Mineral (Ed.) Universidad Agraria La Molina.

Salinas-Velandia, D. A., Romero-Perdomo, F., Numa-Vergel, S., Villagrán, E., Donado-Godoy, P., & Galindo-Pacheco, J. R. (2022). Insights into Circular Horticulture: Knowledge Diffusion, Resource Circulation, One Health Approach, and Greenhouse Technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph191912053>

Sapkota, S., Sapkota, S., & Liu, Z. (2019). Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>

SENCICO - Servicio Nacional de Capacitaciones Para la Industria de la Construcción (2020). *Normas del Reglamento Nacional de Edificaciones*. Recuperado el 13 de marzo de 2024, de Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción: <https://www.gob.pe/sencico>

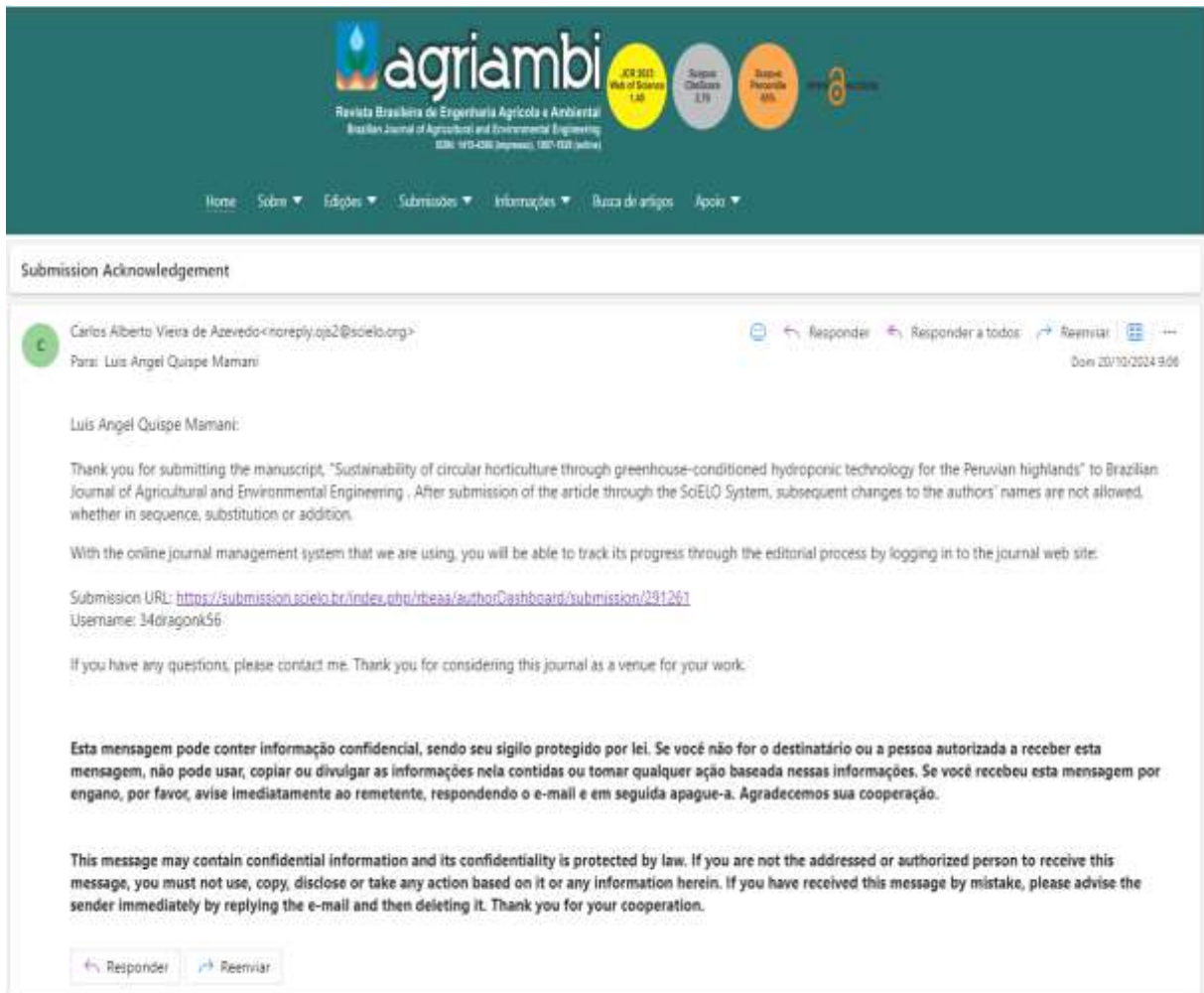
SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2020). *Promedio de temperatura normal para JULIACA*. Recuperado el 13 de marzo de 2024, de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú: <https://www.senamhi.gob.pe/>

Song, J., Huang, H., Hao, Y., Song, S., Zhang, Y., Su, W., & Liu, H. (2020). Nutritional quality, mineral and antioxidant content in lettuce affected by interaction of light intensity and nutrient solution concentration. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59574-3>

- Souza, S. V., Gimenes, R. M. T., & Binotto, E. (2019). Economic viability for deploying hydroponic system in emerging countries: A differentiated risk adjustment proposal. *Land Use Policy*, *83*, 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.020>
- Souza, V., Gimenes, R. M. T., de Almeida, M. G., Farinha, M. U. S., Bernardo, L. V. M., & Ruviaro, C. F. (2023). Economic feasibility of adopting a hydroponics system on substrate in small rural properties. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *25*(8), 2761–2775. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02529-9>
- Sutulienė, R., Laužikė, K., Pukas, T., & Samuolienė, G. (2022). Effect of Light Intensity on the Growth and Antioxidant Activity of Sweet Basil and Lettuce. *Plants*, *11*(13). <https://doi.org/10.3390/plants11131709>
- Tsouvaltzi, P., Kasampali, D. S., Aktsoglou, D. C., Barbayiannis, N., & Siomos, A. S. (2020). Effect of reduced nitrogen and supplemented amino acids nutrient solution on the nutritional quality of baby green and red lettuce grown in a floating system. *Agronomy*, *10*(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy10070922>
- UNESCO. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021 Facts and figures VALUING WATER World Water Assessment Programme United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*. [www.unesco.org/](http://www.unesco.org/)
- Xu, Y., & Cui, G. (2021). Influence of spectral characteristics of the Earth's surface radiation on the greenhouse effect: Principles and mechanisms. *Atmospheric Environment*, *244*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117908>

## ANEXOS

### Anexo A. Evidencia De Sumisión.



The screenshot shows the header of the journal website, including the logo for 'agriambi' (Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental) and its English translation. It also displays metrics such as 'JCR 2021' and 'Scopus Q1'. Below the header is a navigation menu with options like 'Home', 'Sobre', 'Edições', 'Submissões', 'Informações', 'Busca de artigos', and 'Ajuda'. The main content is an email titled 'Submission Acknowledgement' from Carlos Alberto Vieira de Azevedo to Luis Angel Quispe Mamani. The email body contains a thank-you message, a submission URL, and a warning about confidentiality. At the bottom, there are buttons for 'Responder' and 'Reenviar'.

Submission Acknowledgement

Carlos Alberto Vieira de Azevedo <noreply.ajs2@scielo.org>  
Para: Luis Angel Quispe Mamani  
Dom 20/10/2024 9:06

Luis Angel Quispe Mamani:

Thank you for submitting the manuscript, "Sustainability of circular horticulture through greenhouse-conditioned hydroponic technology for the Peruvian highlands" to Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering. After submission of the article through the SciELO System, subsequent changes to the authors' names are not allowed, whether in sequence, substitution or addition.

With the online journal management system that we are using, you will be able to track its progress through the editorial process by logging in to the journal web site.

Submission URL: <https://submission.scielo.br/index.php/rbeaa/authorDashboard/submission/291261>  
Username: 34dragonk56

If you have any questions, please contact me. Thank you for considering this journal as a venue for your work.

**Esta mensagem pode conter informação confidencial, sendo seu sigilo protegido por lei. Se você não for o destinatário ou a pessoa autorizada a receber esta mensagem, não pode usar, copiar ou divulgar as informações nela contidas ou tomar qualquer ação baseada nessas informações. Se você recebeu esta mensagem por engano, por favor, avise imediatamente ao remetente, respondendo o e-mail e em seguida apague-a. Agradecemos sua cooperação.**

**This message may contain confidential information and its confidentiality is protected by law. If you are not the addressed or authorized person to receive this message, you must not use, copy, disclose or take any action based on it or any information herein. If you have received this message by mistake, please advise the sender immediately by replying the e-mail and then deleting it. Thank you for your cooperation.**

Responder Reenviar

## Anexo B. Resolución De Aprobación Del Perfil De Tesis



"AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO"

RESOLUCIÓN N° 0295-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña 27 de junio de 2023

### VISTO:

El expediente de **Luis Angel Quispe Mamani**, identificado(a) con Código Universitario N° 201810514 y **Fernando Quispe Yucra**, identificado(a) con Código Universitario N° 201510817, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

### CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Luis Angel Quispe Mamani** y **Fernando Quispe Yucra**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Una Perspectiva Sostenible de Horticultura Urbana Circular con la Técnica Hidropónica NFT Tridimensional, Fundamentada por el Consumo Hídrico, Energético y Soluciones Nutritivas en Condiciones Altiplánicas" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 27 de junio de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

### SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "**Una Perspectiva Sostenible de Horticultura Urbana Circular con la Técnica Hidropónica NFT Tridimensional, Fundamentada por el Consumo Hídrico, Energético y Soluciones Nutritivas en Condiciones Altiplánicas**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **MSc. Bernardino Tapia Aguilar** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **MSc. Rose Adeline Callata Chura** y **Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



  
Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
DECANA



  
Dr. Santiago Ramírez López  
SECRETARIO ACADÉMICO

cc:  
-Interesado  
-Asesor  
-Dirección General de Investigación  
-Archivo

Anexo C. Resolución De Cambio De Título Del Perfil De Tesis (Título Actual).



"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

**RESOLUCIÓN N° 0343-2024/UPeU-FIA-CF-T**

Lima, Ñaña 04 de junio de 2024

**VISTO:**

El expediente de **Luis Angel Quispe Mamani**, identificado(a) con código universitario N° **201810514** y **Fernando Quispe Yucra** identificado(a) con código universitario N° **201510817** de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

**CONSIDERANDO:**

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del proyecto de tesis;

Que **Luis Angel Quispe Mamani** y **Fernando Quispe Yucra**, han solicitado la modificación de la denominación del proyecto de tesis titulado "Una Perspectiva Sostenible de Horticultura Urbana Circular con la Técnica Hidropónica NFT Tridimensional, Fundamentada por el Consumo Hídrico, Energético y Soluciones Nutritivas en Condiciones Altiplánicas";

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 04 de junio de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

**SE RESUELVE:**

Aprobar la modificación de la denominación del proyecto de tesis titulado "Una Perspectiva Sostenible de Horticultura Urbana Circular con la Técnica Hidropónica NFT Tridimensional, Fundamentada por el Consumo Hídrico, Energético y Soluciones Nutritivas en Condiciones Altiplánicas", por el de: "Sostenibilidad de horticultura circular mediante la tecnología hidropónica acondicionada en invernadero para el altiplano peruano", en el registro respectivo y disponer que con la orientación de su asesor el(la) **MSc. Bernardino Tapia Aguilar**, sea desarrollado y ejecutado el proyecto de tesis por **Luis Angel Quispe Mamani** y **Fernando Quispe Yucra**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución, a partir de la inscripción inicial.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
**DECANA**



Ph.D. Silvia Pilco Quesada  
**SECRETARIA ACADÉMICA**

- CC:
- Interesado
  - Asesor
  - DGI
  - Archivo