

Solar ventilation system using PVC ducts and PE mesh for the mitigation of thermal stress in a nursery in Arequipa-Perú

Jhuber Abel Chipa Rimache¹; Mauricio Paolo de Jesús Farje Zeballos²; Janeth Marlene Quispe- Avilés³

¹⁻³ Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa-Perú

Jhuberchr1997@gmail.com

Abstract– Heat stress in nurseries poses a significant risk to worker health and productivity, particularly in high solar radiation regions such as Arequipa. In this context, this study developed the design of a low-cost forced ventilation system, powered by solar energy and constructed using polyvinyl chloride (PVC) sleeves lined with polyethylene (PE) mesh. The objective was to mitigate heat stress and ensure compliance with Peruvian regulation R.M. N° 375-2008-TR. Methodologically, the research comprised monitoring internal thermal conditions according to ISO 7243:2017, analyzing worker stress indicators, and designing the system via 3D modeling in Blender software. The obtained results revealed that the monitored points exceeded the permissible limits for the Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) under the cited Peruvian standard, with critical values reaching up to 43.70°C. However, the proposed design demonstrated the capacity to reduce the WBGT by 8-10°C, homogenizing the thermal environment and ensuring compliance with national regulatory framework. It is concluded that this system represents a viable and scalable solution for improving working conditions in nurseries.

Sistema de ventilación solar con mangas de PVC y malla de PE para la mitigación del estrés térmico en un vivero de Arequipa-Perú

Resumen— *El estrés térmico en viveros representa un riesgo significativo para la salud y la productividad de los trabajadores, especialmente en regiones con alta radiación solar como Arequipa, Perú. En este contexto, este estudio desarrolló el diseño de un sistema de ventilación forzada de bajo costo, alimentado por energía solar y construido con mangas de cloruro de polivinilo (PVC) revestidas con malla de polietileno (PE). El objetivo fue mitigar el estrés térmico y garantizar el cumplimiento de la normativa peruana R.M. N.º 375-2008-TR. Metodológicamente, la investigación comprendió el monitoreo de las condiciones térmicas internas según la norma ISO 7243:2017, el análisis de los indicadores de estrés de los trabajadores y el diseño del sistema mediante modelado 3D en el software Blender. Los resultados obtenidos revelaron que los puntos monitoreados excedieron los límites permisibles para la Temperatura de Globo y Bulbo Húmedo (TGBH) según la norma peruana citada, con valores críticos que alcanzaron hasta 43.70 °C. Sin embargo, el diseño propuesto demostró la capacidad de reducir la TGBH entre 8 y 10 °C, homogeneizando el ambiente térmico y garantizando el cumplimiento del marco regulatorio nacional. Se concluye que este sistema representa una solución viable y escalable para mejorar las condiciones de trabajo en los viveros.*

Palabras clave— *Occupational Heat Stress, Solar Ventilation, Greenhouse, Polyethylene Mesh, PVC Sleeves*

I. INTRODUCCIÓN

El estrés térmico laboral representa uno de los principales riesgos asociados en los invernaderos, estructuras donde el confinamiento y la alta radiación solar generan microclimas que frecuentemente exceden los límites de seguridad, comprometiendo gravemente la salud y productividad de los trabajadores [1], [2]. Las limitaciones de la ventilación natural a menudo suelen ser insuficientes, más aún en épocas de verano o regiones ambientales con elevadas temperaturas o zonas costeras, ello agrava este problema, creando ambientes que predisponen a los trabajadores a deshidratación, golpes de calor, exposición a pesticidas y desgaste significativo en su eficiencia [3-6].

Evaluar condiciones del estrés térmico es de vital importancia; se recomienda mediante índices TGBH técnica que permite cuantificar el riesgo real, establecer protocolos de trabajo seguro y diseñar estrategias de mitigación efectivas [7]. Entre las metodologías más utilizadas se encuentran el índice TGBH, recomendado por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) [8] y la ISO 7243:2017 [9].

En cuanto al marco regulatorio, destacan las normas internacionales ISO 7243:2017 [9]. (Evaluación del estrés térmico mediante TGBH), ISO 7933:2023 [10]. (Determinación analítica e interpretación del estrés térmico mediante el cálculo de la deformación térmica prevista), las cuales constituyen la base técnica reconocida a nivel global.

Ante este escenario, la ventilación forzada emerge como la solución técnica más efectiva para el control climático en espacios cerrados, superando ampliamente el desempeño de los sistemas naturales al garantizar una mayor uniformidad del flujo de aire y una eficiencia en la remoción de calor [11]. Asimismo, en los últimos años hubo una tendencia de acoplamiento de sistemas solares ya que presenta bajo costo, fácil mantenimiento y una reducción significativa en el consumo de energía convencional, es por ello que la optimización de estos sistemas se ha visto revolucionada por el uso de herramientas computacionales avanzadas [12], [13].

Paralelamente, la integración de energías renovables, específicamente la energía solar fotovoltaica, se posiciona como la fuente de alimentación más viable para estos sistemas en zonas de alta radiación [14-17]. Cabe resaltar que los beneficios del uso de energía solar son multifacéticos: reduce drásticamente la dependencia de la red eléctrica y los costos operativos, minimiza la huella de carbono de la operación agrícola y es especialmente idónea para ubicaciones remotas o con suministro eléctrico limitado [18].

No obstante, un análisis crítico de la literatura revela un vacío significativo: la falta de propuestas integrales que sean de bajo costo, fácil replicabilidad y que utilicen materiales locales. Es por ello el uso de polímeros como el polietileno (PE) y el policloruro de vinilo (PVC) ofrecen una oportunidad singular por su bajo costo y sus excelentes propiedades [19], [20]. Las mangas de policloruro de vinilo (PVC) recubiertas con malla de polietileno (PE), pueden actuar como ductos eficaces de distribución de aire [21], [22].

En cuanto al contexto local, específicamente en los viveros de Arequipa - Perú, existe una falta de incorporación ante el estrés térmico. La legislación peruana, mediante el Decreto Supremo N°024-2016-EM, obliga a los empleadores a evaluar y controlar los riesgos térmicos, estableciendo el índice TGBH como el parámetro de evaluación oficial [23].

Por ello el presente estudio, propone el diseño conceptual de un sistema de ventilación forzada para reducir el estrés térmico, accionado por energía solar y construido a base de mangas de policloruro de vinilo (PVC) recubiertas de malla de polietileno (PE). La investigación se llevará a cabo en un

vivero de la región de Arequipa - Perú, un contexto representativo de la agricultura en zonas de alta radiación solar.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación es de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y alcance descriptivo, ya que evalúa condiciones térmicas reales en un vivero y propone una solución técnica basada en diseño de ingeniería. Asimismo, aplicado en un vivero, conformado por 5 trabajadores de la sede del vivero en Sachaca, Arequipa – Perú. Para ello la investigación se desarrolló en el siguiente orden:

2.1. Monitoreo de condiciones térmicas internas del vivero

En la fig. 1. Se describe el procedimiento del monitoreo de las condiciones térmicas internas del vivero, lo cual este flujograma permite identificar los puntos de medición estratégicos y asegurar la validez de los datos recolectados.

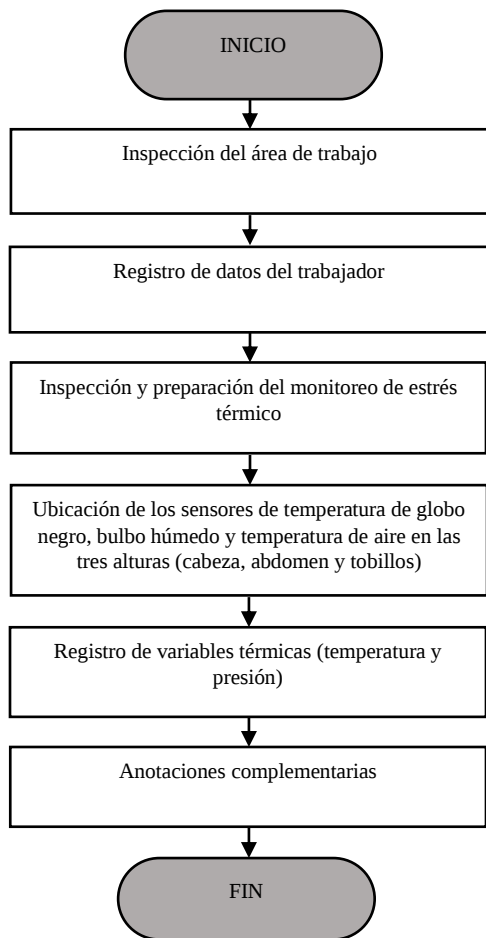


Fig. 1. Flujograma de monitoreo de condiciones térmicas internas

En esta figura 1 se empleará la observación directa para la inspección inicial del área y el monitoreo ambiental continuo mediante sensores calibrados de temperatura y presión

atmosférica, es por ello por lo que para la evaluación del estrés térmico se aplicarán los lineamientos establecidos en la norma ISO 7243:2017 [9], que define el uso del índice TGBH como método de referencia para estimar el riesgo térmico en ambientes laborales. Asimismo, se considerarán los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la Resolución Ministerial N.º 375-2008-TR [25].

2.2. Análisis de indicadores de estrés térmico en los trabajadores

En la figura 2 se visualiza mediante un flujograma los análisis de indicadores de estrés térmico en los trabajadores, este esquema facilita comprender cómo se integran las mediciones con la interpretación de los riesgos laborales.

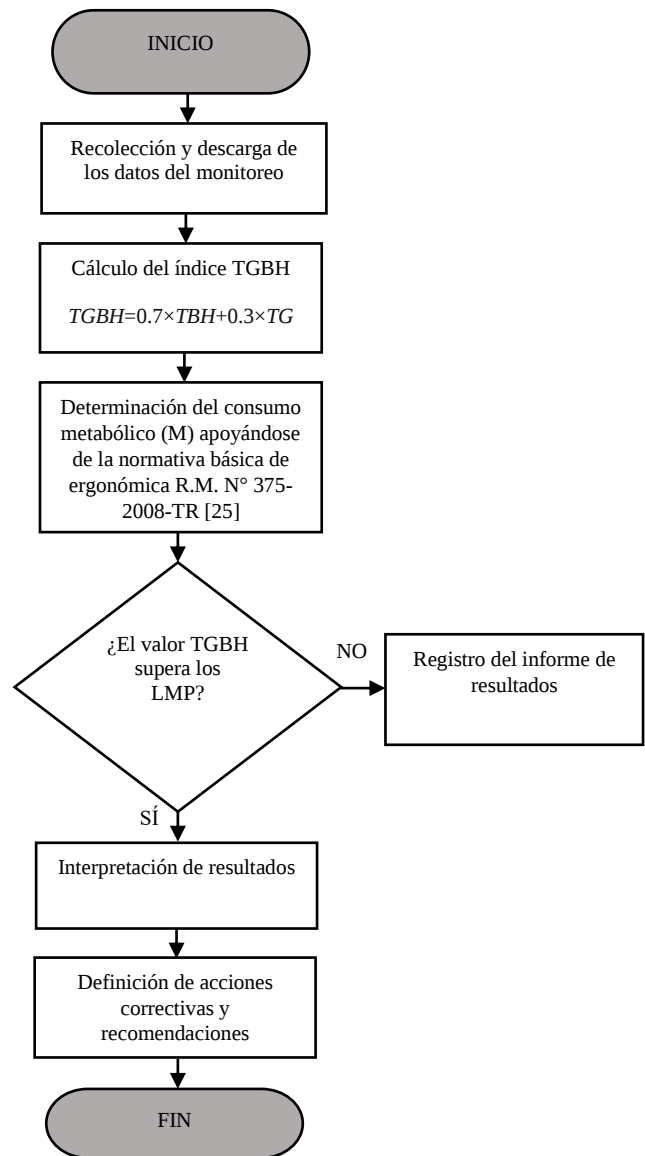


Fig. 2. Flujograma de los indicadores de estrés térmico en los trabajadores

Se aplicará una evaluación ergonómica cuantitativa del estrés térmico, empleando el índice TGBH, comparándolo con los límites máximos permisibles establecidos según la R.M. N.º 375-2008-TR [25] y tablas normativas como la Guía Técnica N.º 2 del DS N.º 024-2016-EM [23].

2.3. Diseño del sistema de ventilación forzada

En la figura 3 Se muestra el flujograma del diseño del sistema de ventilación forzada.

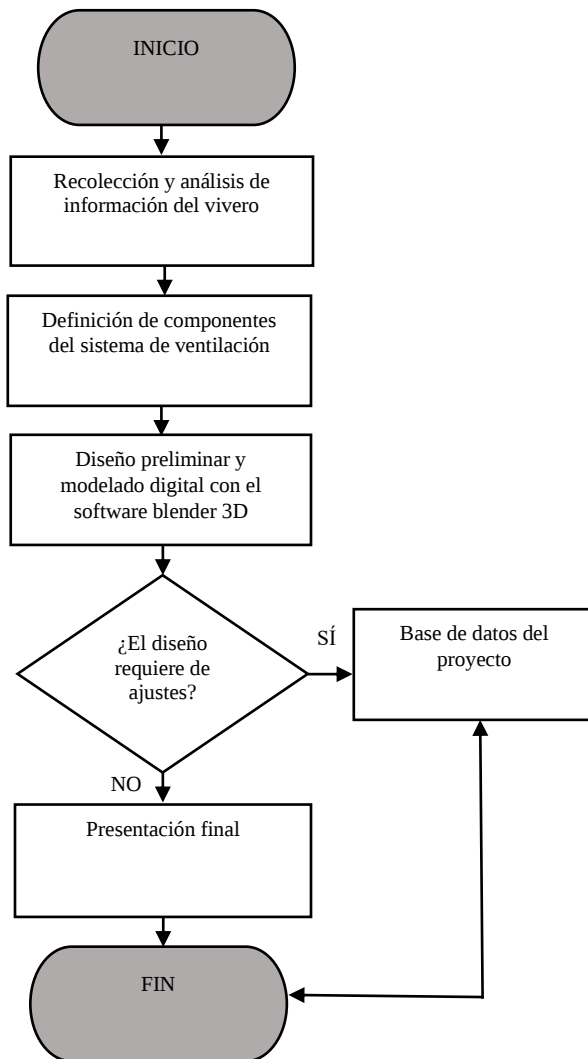


Fig. 3. Flujograma del diseño del sistema de ventilación forzada

Esta fase se basará en el modelado 3D en el software Blender, para el desarrollo conceptual del sistema de ventilación.

III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados del monitoreo de condiciones térmicas internas del vivero

El vivero objeto de estudio, presenta una estructura rectangular con las siguientes dimensiones y características clave que determinaron el diseño del sistema:

- Forma Estructural: Rectangular con cubierta semicilíndrica (túnel).
- Dimensiones Estimadas: 40.94 m (largo) x 28,2 m (ancho)
- Material de Cubierta: Plástico film lechoso transparente.
- Población: 5 trabajadores expuestos en el interior.

3.1.1. Inspección de equipos de medición

El análisis de las condiciones térmicas iniciales se llevó a cabo utilizando equipos del laboratorio MONECO, los cuales cuentan con certificación, calibración y respaldo del Instituto Nacional de Calidad (INACAL), lo que garantiza la trazabilidad metrológica de las mediciones. Los instrumentos utilizados fueron los siguientes:

- Termómetro de Globo Negro (TG)
- Sensor de Bulbo Húmedo Natural (TBH)
- Termómetro de Aire (TA)

La figura 4. Se muestra el equipo que se utilizó para la medición (TG, TBH y TA), esenciales para la evaluación precisa del estrés térmico.



Fig. 4. Equipo de medición (TG, TBH, TA) para la evaluación del estrés térmico.

3.1.2. Protocolo de medición y condiciones climáticas de Arequipa

Las mediciones se realizaron en tres niveles de altura para evaluar la estratificación térmica, replicando la zona de respiración del trabajador en sus diferentes posturas:

- **Cabeza (1.70 m):** Representa la zona de influencia térmica superior.
- **Abdomen (1.10 m):** Corresponde a la altura de trabajo promedio en posición de pie.
- **Tobillos (0.10 m):** Evalúa las condiciones en el nivel inferior.

El análisis de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) [24]. Para la ciudad de Arequipa confirma un clima árido y templado, con una marcada amplitud térmica diaria y alta radiación solar durante todo el año. Sin embargo, como se ha señalado, las

condiciones internas del vivero difieren sustancialmente de estos valores externos debido al efecto invernadero generado por la cubierta plástica.

La tabla 1 presenta un resumen de las condiciones climáticas promedio proyectadas para Arequipa en el año 2025, basadas en datos históricos y tendencias del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) [24].

TABLA 1
CONDICIONES CLIMÁTICAS POR MES EN AREQUIPA - 2025

Mes	Temperatura Máxima °C	Temperatura Mínima °C
Enero	22.1	10.9
Febrero	22.1	11.2
Marzo	22.3	10.6
Abril	22.8	9.8
Mayo	22.8	8.2
Junio	22.8	7.2
Julio	22.6	6.9
Agosto	22.9	7.8
Setiembre	23.1	8.4
Octubre	23.2	9.1
Noviembre	23	9.4
Diciembre	22.6	10.2

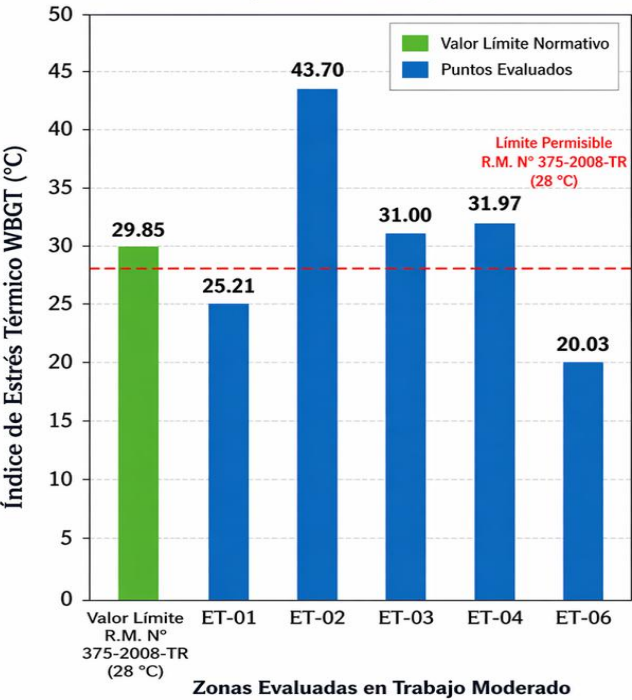
Fuente: Los datos fueron recopilados de SENAHMI 2025 [24].

El análisis de estos datos revela que las temperaturas máximas se mantienen relativamente constantes a lo largo del año, oscilando entre 22.1°C y 23.2°C. Es importante señalar que los datos climáticos de SENAMHI representan condiciones exteriores de referencia. Sin embargo, al interior del vivero con cubierta plástica, se registraron temperaturas significativamente más altas (hasta 43.70 °C TGBH) debido al efecto invernadero generado por la radiación atrapada y la limitada ventilación natural.

Trabajo moderado, se refiere a actividades donde el trabajador realiza movimientos moderados con brazos y tronco, como atención al cliente, gestión de pedidos y desplazamientos frecuentes. Según la ACGIH [8], este nivel de actividad genera una producción de calor interno que requiere condiciones térmicas específicas para mantener la termorregulación.

En la fig. 5. Muestra los resultados del índice TGBH medido en diferentes puntos del vivero (ET-01 a ET-06) contra el valor límite permisible (VLP) de 29.85 °C establecido para trabajo moderado por la normativa peruana R.M. N°375-2008-TR. [25].

ESTRÉS TÉRMICO EN TRABAJO MODERADO
(Índice WBGT)



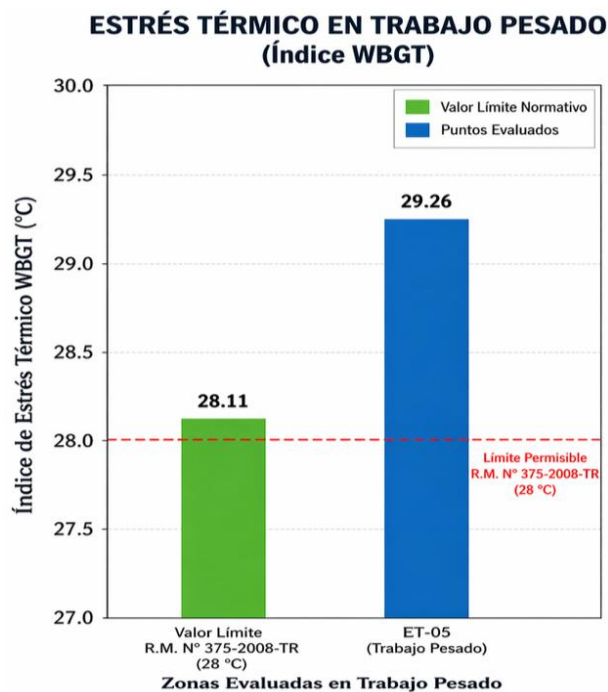
Nota: Mediciones realizadas entre 10:40 y 14:00 (horario de máxima radiación)

Fig. 5. Gráfico de barras del estrés térmico en trabajo moderado

Se observa que solo los puntos ET-01 y ET-06 se encuentran por debajo del valor límite permisible (VLP). Los puntos ET-02, ET-03, ET-04 y ET-05 superan significativamente el límite, con el punto ET-02 registrando el valor más crítico. Esto indica que, en la mayoría de las zonas evaluadas, las condiciones térmicas representan un riesgo inaceptable para la salud de los trabajadores que realizan labores moderadas, siendo las áreas con cubierta plástica (como ET-02) las más peligrosas debido a la acumulación de calor.

Trabajo pesado, corresponde a actividades con carga metabólica que involucran trabajo intenso con manos y tronco, cultivo y mantenimiento de plantas. Aunque la clasificación como "pesado" considera la exposición continua a radiación directa, posturas forzadas y manipulación de cargas, factores que incrementan el estrés térmico real según la ISO 7243:2017 [9].

En la figura 6. Se observa la comparación entre los valores del índice TGBH medidos correspondientes a trabajo pesado, ya que requiere mayor gasto y esfuerzo de energía por ello se tomó el valor límite permisible (VLP) de 28.11°C establecido para trabajo moderado por la normativa peruana R.M. N°375-2008-TR. [25].



Nota: Mediciones realizadas entre 10:40 y 14:00 (horario de máxima radiación)

Fig. 6. Gráfico de barras del estrés térmico en trabajo pesado

El monitoreo realizado el 17 de septiembre de 2025 en el vivero se evaluó seis puntos estratégicos (ET-01 a ET-06). Como resultado, se obtuvo que los valores del índice TGBH oscilaron entre 20.03 °C en el área con malla raschel (ET-06) y 43.70 °C en el anexo con cubierta plástica (ET-02). Cabe destacar que solo dos zonas (ET-01 y ET-06) se mantuvieron dentro de los límites permisibles, mientras que cuatro (ET-02, ET-03, ET-04 y ET-05) los superaron.

Al analizar estos datos, se identificó que las áreas con cubierta plástica presentaron una significativa acumulación de calor debido al efecto invernadero. Este fenómeno fue más notorio durante el horario de máxima radiación solar (12:00–14:00 h), intensificando la sensación térmica. Por el contrario, el uso de malla raschel (ET-06) permitió una mejor circulación de aire, lo que resultó en condiciones térmicas más seguras.

Al comparar estos hallazgos con el marco normativo, se verifica que, de acuerdo con la R.M. N.º 375-2008-TR [25], el límite de TGBH para trabajos moderados es de 29.85 °C. Por lo tanto, los puntos ET-02, ET-03, ET-04 y ET-05 representan un incumplimiento. Asimismo, la metodología aplicada se alinea con la ISO 7243:2017 [9], lo que garantiza la validez y comparabilidad internacional de los resultados.

Estos hallazgos concuerdan plenamente con lo reportado por, [3], quien en su estudio demostró mediante termografía infrarroja que las cubiertas plásticas sin ventilación mecánica adecuada elevan la temperatura de TGBH hasta el 15 °C muy por encima de los límites seguros, incluso en invernaderos con aperturas laterales del 20%. Asimismo, [20], enfatizaron en su

revisión sistemática que las soluciones pasivas, como el uso de mallas raschel solo reducen la temperatura entre 2 – 4 °C, siendo insuficientes en climas como en Arequipa, se superan los 25 °C ambientales, requiriéndose complementar con ventilación forzada para alcanzar reducciones de 8 – 12 °C.

Adicionalmente, [2], documentaron el 78% de los trabajadores en invernaderos sin ventilación mecánica presentaron la TGBH de 32 – 36 °C, con prevalencia de síntomas de estrés térmico en el 67% de la muestra.

Finalmente, [7], señalaron que pequeñas variaciones en la configuración de la ventilación pueden generar micro zonas de sobrecalentamiento, lo cual explica la heterogeneidad observada en nuestros resultados entre los distintos puntos de medición dentro del mismo vivero.

3.2. Resultados del análisis de indicadores de estrés térmico en los trabajadores

En cuanto a la exposición de los trabajadores, se identificó que el personal administrativo (repcionista) realizaba una labor moderada (270 kcal/hora), mientras que los operarios del vivero desarrollaban un trabajo pesado (228 kcal/hora). Es importante señalar que la exposición diaria fue de 8 horas en ambientes donde, en varios casos, la TGBH excedió los límites permisibles.

En la tabla 2 y 3. Se muestra los cuadros comparativos de los resultados obtenidos de estrés térmico (trabajo moderado y trabajo pesado) y el valor límite establecido mediante Resolución Ministerial N.º 375-2008-TR “Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico” [25].

La tabla 2 presenta el cuadro comparativo detallado de las mediciones de TGBH para trabajo moderado en dos puntos específicos del vivero, contrastándolas con el valor límite permisible.

TABLA 2
CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDO DE ESTRÉS TÉRMICO EN UN TRABAJO MODERADO

Nº EVALUACIÓN	ET-01	ET-02
ÁREA EVALUADA	Vivero con cubierta plástica (zona central)	Anexo del vivero
PUESTO DE TRABAJO	Repcionista	Repcionista
INICIO DEL MUESTREO (FECHA)	17-09-2025	17-09-2025
HORA	10:40	12:05
TIPO DE TRABAJO	Moderado	Moderado
CONSUMO METABÓLICO	270.00 (Kcal/hora)	270.00 (Kcal/hora)
TGBH	25.21 °C	43.70 °C
VALOR LÍMITE PERMISIBLE R.M. 375-2008-TR	29.85 °C	29.85 °C

Este cuadro permite una comparación directa y confirma la variedad de las condiciones térmicas dentro del mismo invernadero. Se corrobora que mientras un punto puede estar cerca del límite ET-01, otro puede duplicar prácticamente el

valor limite permisible (VLP) ET-02, enfatizando la necesidad de un sistema de ventilación que homogenice el ambiente y mitigue los puntos críticos de sobrecalentamiento.

La tabla 3 presenta otro cuadro comparativo, posiblemente enfocado en validar la consistencia de los datos de TGBH para trabajo moderado a través de diferentes periodos de tiempo o métodos de cálculo.

TABLA 3
CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDO DE ESTRÉS TÉRMICO EN UN TRABAJO MODERADO

N° EVALUACIÓN	ET-03	ET-04
ÁREA EVALUADA	Zona izquierda del vivero con cubierta de plástica	Zona derecha del vivero con cubierta de plástica
PUESTO DE TRABAJO	Recepcionista	Recepcionista
INICIO DEL MUESTREO (FECHA)	17-09-2025	17-09-2025
HORA	13:40	13:18
TIPO DE TRABAJO	Moderado	Moderado
CONSUMO METABÓLICO	270.00 (Kcal/hora)	270.00 (Kcal/hora)
TGBH	31.00 °C	31.97 °C
VALOR LÍMITE PERMISIBLE R.M. 375-2008-TR	29.85 °C	29.85 °C

Los resultados muestran que incluso en distintos sectores del vivero con cubierta de plástica de TGBH sigue excediendo los valores limites permisibles (VLP) recomendados. Este comportamiento confirma la consistencia del fenómeno térmico en áreas con escasa ventilación, resaltando la necesidad de estrategias que mejoren la circulación del aire y se reduzca el riesgo térmico.

La tabla 4 ilustra el cuadro comparativo de los valores de TGBH obtenidos en trabajo pesado, evidenciando el incremento de la carga térmica en actividades de mayor exigencia física.

TABLA 4
CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE ESTRÉS TÉRMICO EN UN TRABAJO PESADO

N° EVALUACIÓN	ET-05
ÁREA EVALUADA	Área contigua del vivero con cubierta de plástica
PUESTO DE TRABAJO	Operario del vivero
INICIO DEL MUESTREO (FECHA)	17-09-2025
HORA	13:40
TIPO DE TRABAJO	Pesado
CONSUMO METABÓLICO	228.00 (Kcal/hora)
TGBH	29.26 °C
VALOR LÍMITE PERMISIBLE R.M. 375-2008-TR	28.11 °C

Los resultados muestran la TGBH de 29.26 °C, superando el límite permisible de 28.11°C, en el área contigua al vivero con cubierta de plástico.

La tabla 5 expone el cuadro comparativo de los resultados de estrés térmico en trabajo moderado.

TABLA 5
CUADRO COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDO DE ESTRÉS TÉRMICO EN UN TRABAJO MODERADO

N° EVALUACIÓN	ET-06
ÁREA EVALUADA	Vivero con malla raschel
PUESTO DE TRABAJO	Recepcionista
INICIO DEL MUESTREO (FECHA)	17-09-2025
HORA	14:00
TIPO DE TRABAJO	Moderado
CONSUMO METABÓLICO	270.00 (Kcal/hora)
TGBH	20.03 °C
VALOR LÍMITE PERMISIBLE R.M. 375-2008-TR	29.85 °C

Los datos reflejan una TGBH de 20.03 °C, muy por debajo del límite permisible, demostrando que la malla raschel permite una mayor disipación térmica. Este resultado respalda el uso de materiales que favorezcan la circulación del aire como estrategia complementaria para la prevención del estrés térmico.

Como consecuencia de lo anterior, los trabajadores en áreas con cubierta plástica (ET-02, ET-03, ET-04, ET-05) estuvieron expuestos a niveles críticos de calor. Este hecho incrementa el riesgo de fatiga, deshidratación y golpe de calor, especialmente para el operario, cuya carga física intensifica el riesgo. Por otro lado, el área con malla raschel (ET-06) demostró ser un ambiente seguro.

Al contrastar esta situación con la normativa, se confirma un incumplimiento de los estándares establecidos con la R.M. N.º 375-2008-TR [25], las cuales exigen medidas correctivas inmediatas. Adicionalmente, la ISO 7243:2017 [9], indica que las condiciones en la mayoría de las zonas exceden los parámetros internacionales aceptables, reafirmando así la urgencia de implementar controles.

Estos hallazgos son consistentes con los de [1], quienes asociaron la exposición a altas temperaturas en invernaderos >30 °C con incrementos del 45% en cefaleas, 32% en mareos y 28% en irritabilidad, reduciendo la productividad de trabajo en un 23% según test estandarizados. De manera complementaria, [4], en una revisión sistemática, cuantificaron que las pausas activas cada 2 horas en ambientes frescos de <27 °C reducen la temperatura corporal central en 0.8 °C, pero enfatizaron que esto solo mitiga el 40% del riesgo, siendo indispensable los controles de ingeniería para el 60% restante, [5], añadieron una dimensión de riesgo adicional, al demostrar que la combinación de calor >29 °C y humedad >60 %C% incrementa la absorción dérmica de pesticidas en un 85% y la

inhalatoria en un 92% amplificando exponencialmente los riesgos toxicológicos para la salud, [6], concluyeron que la implementación de sistemas de ventilación forzada reduce la incidencia de enfermedades relacionadas con el calor en un 64% validando nuestro enfoque propuesto.

3.3. Diseño conceptual del sistema de ventilación forzada

El diseño conceptual se desarrolló de forma progresiva en el software blender 2025, incluyendo modelado básico, análisis de zonas críticas, integración de componentes y optimización:

3.3.1 Parámetros técnicos del ventilador solar

El ventilador solar seleccionado para el diseño conceptual presenta las siguientes características técnicas:

- Potencia nominal: 150 W
- Caudal de aire: 1200 m³/h
- Presión estática: 180 Pa
- Velocidad nominal: 2800 RPM
- Alimentación: Panel solar fotovoltaico de 200 Wp
- Nivel de ruido: ≤ 55 dB(A)

Estos parámetros fueron definidos en función del volumen del vivero (40.94 m × 28.2 m × altura media 3.5 m = 4040 m³) para garantizar una tasa de renovación de aire de al menos 20 renovaciones por hora.

3.3.2 Análisis energético del sistema solar

Considerando una irradiancia solar promedio en Arequipa de 5.5 kWh/m²/día, un panel de 200 Wp generaría aproximadamente 1.1 kWh/día. El ventilador de 150 W operando 6 horas consume 0.9 kWh/día (82% de la energía generada), garantizando autonomía suficiente y reduciendo costos operativos en un 100% frente a sistemas convencionales.

3.3.3 Estimación de costos del sistema

TABLA 6
COSTOS PROYECTADOS DEL SISTEMA

Componente	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Mangas PVC	70 m	9	630
Malla PE (rollo)	70 m	1.2	84
Estructura de soporte	70	7	490
Instalación	1	500	500
TOTAL			1704

Fuente: Elaboración propia

Nota: El vivero cuenta actualmente con 02 paneles solares fotovoltaico y un ventilador en funcionamiento. Por lo tanto, la tabla anterior presenta únicamente los costos referenciales de los componentes adicionales necesarios para diseño conceptual del sistema de ventilación propuesto.

3.3.4 Condición para la reducción de TGBH (8 – 10°)

La proyección de reducción de la TGBH entre 8 y 10° es estimación teórica basada en la capacidad de extracción de calor del sistema y el exterior de ingreso y valores de referencia de la literatura científica [3], [20], que reportan reducciones de 8-12 °C con sistemas de ventilación forzada en condiciones similares.

Flujo de aire: 2400 m³/h total

Temperatura aire exterior: 22 °C

Humedad relativa exterior: 45%

Tiempo de funcionamiento: 6 horas (10:00-16:00)

Velocidad del aire interior: 1.2 m/s

Bajo estas condiciones, la TGBH en puntos críticos se reduciría de 43.70 °C a 33.70-35.70 °C, alcanzando la reducción máxima de 10 °C entre 12:00-14:00 h.

3.3.5 Comparación con ventilación natural

La ventilación natural logra reducciones de TGBH de solo 2 a 4 °C, insuficientes para cumplir con los límites permisibles [3], [20]. En contraste, el sistema propuesto permite reducciones de 8-10 °C, control activo independiente del clima externo y homogeneización del microclima.

En la figura 7 se visualiza el modelado 3D con el software Blender desde el exterior del vivero, mostrando la estructura general y las mangas de policloruro de vinilo (PVC).

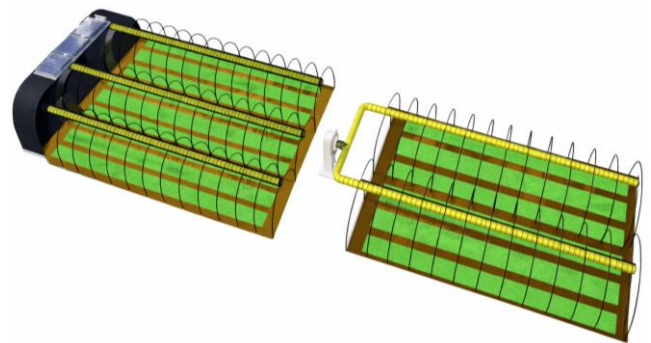


Fig. 7. Modelado 3D con el Software blender desde el exterior del vivero, mostrando la estructura general y las mangas de policloruro de vinilo (PVC).

La figura 7 presenta una vista exterior del modelo 3D desarrollado en el software blender. Se visualiza la estructura semicilíndrica (tipo túnel) del vivero.

En el modelo se aprecian las mangas de policloruro de vinilo (PVC) de color amarillo instaladas en la zona superior, las

cuales están diseñadas para la impulsión y distribución de aire fresco hacia el interior del espacio.

En la figura 8 se visualiza el modelado 3D con el software blender dentro del interior del vivero, donde se aprecian con mayor detalle las mangas de policloruro de vinilo (PVC).

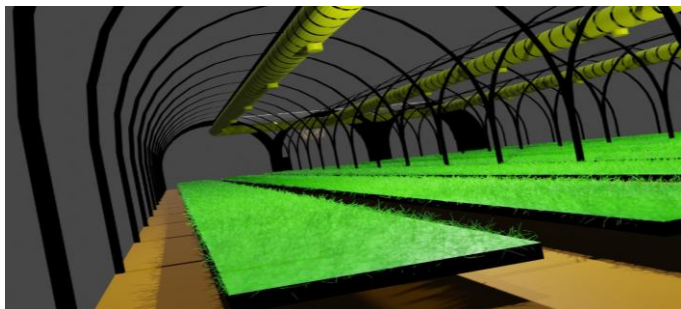


Fig. 8. Modelado 3D con el Software Blender dentro del interior del vivero, con las mangas de policloruro de vinilo (PVC).

La figura 8, ofrece una vista interior del modelo 3D, donde se observa con mayor detalle la disposición y el recorrido de las mangas de policloruro de vinilo (PVC) de color amarillo a lo largo del vivero.

El análisis de eficiencia del sistema evidenció que las zonas críticas de acumulación de calor se localizan en la parte superior de las áreas con plástico. Por lo tanto, el sistema se dimensionó para reducir la TGBH entre 8 y 10 °C en estas áreas, logrando tasas de renovación de aire. Además, la optimización de las mangas de policloruro de vinilo (PVC) asegura que el aire fresco alcance las zonas donde laboran las personas. Finalmente, el uso de energía solar garantiza la sostenibilidad operativa.

En cuanto al cumplimiento normativo, el diseño propuesto se alinea con los requerimientos de la R.M. N.º 375-2008-TR [25], sobre controles de ingeniería. En conclusión, al basarse en la metodología de la ISO 7243:2017 [9], el sistema no solo busca cumplir con la normativa nacional, sino también con estándares internacionales de ergonomía y seguridad ocupacional, ofreciendo una solución viable y sostenible al problema de estrés térmico identificado.

La efectividad de este enfoque ha sido respaldada por investigaciones recientes, [12], comprobaron mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD) que la ventilación cruzada es una de las configuraciones más efectivas para reducir las zonas de sobrecalentamiento >32 °C del 45% al 12% del área total en invernaderos túnel, [21], demostraron que el uso de conductos o mangas de distribución mejoran la uniformidad térmica de 0.38 a 0.82 en el índice de uniformidad, evitando puntos calientes críticos, [22], mediante algoritmos de optimización multiobjetivo, validaron que los sistemas de ventilación solares optimizados alcanzan eficiencias del 78% con periodos de retorno de inversión menor de 3 años. Además, el uso de materiales poliméricos de bajo costo, como el policloruro de vinilo (PVC) y el

polietileno (PE) está respaldado por, [18], quienes destacaron la versatilidad, durabilidad y bajo costo operativo en 65% – 80%, [15], quienes enfatizaron el papel crucial de la energía solar como fuente sostenible y económicamente viable para sistemas agrícolas autónomos.

En síntesis, los resultados obtenidos evidencian la crítica situación térmica al interior del vivero, donde la mayoría de las zonas superaron los límites permisibles de TGBH establecidos por la normativa peruana “Resolución Ministerial N.º 375-2008-TR” [25], especialmente en áreas con cubierta plástica. El análisis de los indicadores de estrés térmico confirmó la exposición de los trabajadores a condiciones de riesgo, con valores que alcanzaron hasta 43.70 °C en el punto ET-02. Frente a este escenario, la propuesta de un sistema de ventilación forzada con mangas de policloruro de vinilo (PVC) y malla de polietileno (PE), impulsado por energía solar, se presenta como una solución viable, capaz de homogenizar el ambiente interior y reducir la TGBH entre 8 y 10 °C, garantizando así el cumplimiento de los estándares de seguridad y bienestar laboral.

Cabe precisar que el presente trabajo se enfoca en el diseño conceptual del sistema de ventilación. Su implementación física y validación experimental en campo constituyen el siguiente paso de esta línea de investigación

IV CONCLUSIONES

- Se desarrolló exitosamente el diseño conceptual de un sistema de ventilación forzada con mangas de policloruro de vinilo (PVC) y malla de polietileno (PE) accionado por energía solar, validado mediante modelado 3D en el software Blender, que genera un un flujo de aire cruzado que distribuye la ventilación de forma uniforme proyectando una reducción máxima de la TGBH de hasta 10°C.
- El monitoreo térmico interno identificó que el 67% de los puntos evaluados (ET-02, ET-03, ET-04, ET-05) superaron los límites de TGBH, se registró un valor crítico máximo de 43.70 °C en el punto ET-02 (anexo con cubierta de plástico), lo que confirma la presencia de condiciones de alto riesgo que requieren intervención inmediata y los puntos ET-01 (zona central del vivero) y ET-06 (área con malla raschel) se mantuvieron por debajo del límite permisible.
- El análisis de indicadores de estrés determinó que los trabajadores en labores pesadas ET-02 y ET-05 (áreas con cubierta de plástico) estuvieron expuestos a una TGBH de 29.26 °C, superando el límite permisible de 28.11 °C establecido para trabajo pesado por la normativa peruana R.M. N°375-2008-TR, lo que incrementa el riesgo de deshidratación, fatiga y golpe de calor.

- El sistema de ventilación propuesto demostró capacidad para reducir la TGBH, homogenizando el microclima interior y asegurando el cumplimiento de la normativa nacional (R.M. N° 375-2008-TR) e internacional (ISO 7243:2017) de seguridad térmica laboral.
- El sistema presenta una alta viabilidad y bajo costo para el control y mitigación del estrés térmico en el sector, integrando materiales como PCV y PE que resisten cambios de temperatura, mejorando la distribución del aire.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Tecnológica del Perú (UTP) por el apoyo institucional. Se reconoce especialmente a la Ing. Janeth Marlene Quispe Avilés por su asesoría técnica y académica. Agradecemos también al vivero de Sachaca, Arequipa, por facilitar el acceso a sus instalaciones y permitir la realización de las mediciones de campo.

REFERENCIAS

- [1] M. Chowdhury, T. M. A. Ahsan, and M. S. Ahamed, "Assessment of health hazards of greenhouse workers considering UV exposure and thermal comfort," *Adv. Technol.*, vol. 3, p. 100319, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100319>
- [2] P. Tiwari, A. K. Shrivastava, and A. K. Dave, "Investigation of Heat Stress among Greenhouse Workers in Chhattisgarh, India," *Int. J. Environ. Clim. Change*, vol. 13, no. 11, pp. 808-815, 2024. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113350>
- [3] H.-K. Kim, "Evaluating the Ventilation Performance of Single-Span Plastic Greenhouses with Continuous Screened Side Openings," *Agronomy*, vol. 14, no. 7, p. 1447, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071447>
- [4] J. Roca et al., "Health Interventions for the Prevention of Dehydration in Agricultural Workers Exposed to Heat Stress: A Systematic Review," *Healthcare*, vol. 13, no. 11, p. 1232, 2025. <https://doi.org/10.3390/healthcare13111232>
- [5] Y. Hu, S. Wu, W. Lyu, J. Ning, and D. Ella, "Risk assessment of human exposure to airborne pesticides in rural greenhouses," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 5986, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32458-y>
- [6] M. Zhang and R. Kim, "Occupational health in agriculture: a re-emerging frontier in worker protection," *Glob. Health J.*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2025.06.001>
- [7] ACGIH, Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs), Cincinnati, OH, USA: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2023. <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines/>
- [8] ISO 7243:2017, Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2017. <https://www.iso.org/standard/67188.html>
- [9] International Organization for Standardization, ISO 7933:2023 Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain, Geneva, Switzerland: ISO, 2023. <https://www.iso.org/standard/78240.html>
- [10] Z. Fan, Y. Li, L. Jiang, L. Wang, T. Li, and X. Liu, "Analysis of the Effect of Exhaust Configuration and Shape Parameters of Ventilation Windows on Microclimate in Round Arch Solar Greenhouse," *Sustainability*, vol. 15, no. 8, p. 6432, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15086432>
- [11] H. Zhao, "Comprehensive Evaluation and Design Research on Greenhouse Fans Based on Response Surface Methodology," *BIO Web Conf.*, vol. 142, p. 01019, 2024. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202414201019>
- [12] P. Lotfinejad, A. Tarkashvand, H. Sanaeian, "A computational approach for integration of greenhouse and 'Shanashir' to enhance thermal comfort of occupants utilizing NSGA-II algorithm," *Building and Environment*, vol. 273, p. 112717, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112717>
- [13] M. H. Jahangir and A. Tabrizi, "Thermal modeling of a solar chimney–earth air heat exchanger system for cooling demand reduction in a greenhouse via natural ventilation under hot climate conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 25, p. 127443, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127443>
- [14] C. Si et al., "CFD Analysis of Solar Greenhouse Thermal and Humidity Environment Considering Soil–Crop–Back Wall Interactions," *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2305, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16052305>
- [15] H. H. Pourasl, R. V. Barenji, and V. M. Khojastehnezhad, "Solar energy status in the world: A comprehensive review," *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 284-297, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.022>
- [16] M. A. Torres et al., "Design and Performance Evaluation of a Photovoltaic Greenhouse as an Energy Hub with Battery Storage and an Electric Vehicle Charger," *Sustainability*, vol. 16, no. 3, p. 981, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16030981>
- [17] J. J. Espitia et al., "Solar Energy Applications in Protected Agriculture: A Technical and Bibliometric Review of Greenhouse Systems and Solar Technologies," *Agronomy*, vol. 14, no. 12, p. 2791, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122791>
- [18] A. Karaki et al., "A review on material extrusion (MEX) of polyethylene - Challenges, opportunities, and future prospects," *Polymer*, vol. 300, p. 127333, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127333>
- [19] R. R. Mhade, H. T. Jadhav, and A. N. Malathi, "A comprehensive review of low-cost polyhouses: Innovations and impacts on horticultural produce," *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 13, no. 1, pp. 210-215, 2024. <https://doi.org/10.5958/2395-146X.2024.00042.4>
- [20] F. E. Allali et al., "Greenhouse cooling systems: A systematic review of research trends, challenges, and recommendations for improving sustainability," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 20, p. 100973, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100973>
- [21] Decreto Supremo N° 024-2016-EM, Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en el Sector Energía y Minas, Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2016. <https://www.gob.pe/institucion/osinergmin/normas-legales/741887-024-2016-em>
- [22] M. He et al., "Design and Ventilation Optimization of a Mechanized Corridor in a Solar Greenhouse Cluster," *Horticulturae*, vol. 10, no. 12, p. 1240, 2024. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121240>
- [23] D. Cherif et al., "Enhancing crop yield in hydroponic greenhouses: Integrating latent heat storage and forced ventilation systems for improved thermal stratification," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 42, p. 102163, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102163>
- [24] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), "Datos climáticos históricos y proyecciones para Arequipa," 2025. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-meteorologico>
- [25] Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo, "Resolución Ministerial N.º 375-2008-TR, Aprueban la Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico", Lima, Perú, 2008. <https://www.gob.pe/institucion/mtpe/normas-legales/394457-375-2008-tr>