

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI



FACULTAD DE INDUSTRIAS AGROPECUARIAS Y CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

Tema: "Evaluación de tres diferentes longitudes de onda de luz y dos fotoperiodos sobre la floración y producción de frutos en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en el Centro Experimental San Francisco del Cantón Huaca"

Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del
título de Ingeniero en Agropecuaria

AUTOR: Quilo Yacelga Kevin Alexander

TUTOR: Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander, MSc.

Tulcán, 2026.

CERTIFICADO DEL TUTOR

Certifico que el estudiante Quilo Yacelga Kevin Alexander con el número de cédula 1752274785 ha desarrollado el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación de tres diferentes longitudes de onda de luz y dos fotoperiodos sobre la floración y producción de frutos en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en el Centro Experimental San Francisco del Cantón Huaca"

Este trabajo se sujeta a las normas y metodología dispuesta en el Reglamento de la Unidad de Integración Curricular, Titulación e Incorporación de la UPEC, por lo tanto, autorizo la presentación de la sustentación para la calificación respectiva

Ing. Jácome Sarchi Guillermo Alexander, MSc.

TUTOR

Tulcán, julio de 2026

AUTORÍA DE TRABAJO

El presente Trabajo de Integración Curricular constituye un requisito previo para la obtención del título de Ingeniero en la Carrera de agropecuaria de la Facultad de Industrias Agropecuarias y Ciencias Ambientales

Yo, Quilo Yacelga Kevin Alexander con cédula de identidad número 1752274785 declaro que la investigación es absolutamente original, auténtica, personal y los resultados y conclusiones a los que he llegado son de mi absoluta responsabilidad.



Quilo Yacelga Kevin Alexander

AUTOR

Tulcán, julio de 2026

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo Quilo Yacelga Kevin Alexander declaro ser autor de los criterios emitidos en el Trabajo de Integración Curricular: "Evaluación de tres diferentes longitudes de onda de luz y dos fotoperiodos sobre la floración y producción de frutos en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en el Centro Experimental San Francisco del Cantón Huaca" y eximo expresamente a la Universidad Politécnica Estatal del Carchi y a sus representantes de posibles reclamos o acciones legales.



Quilo Yacelga Kevin Alexander

AUTOR

Tulcán, julio de 2026

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero y profundo agradecimiento a Dios, por brindarme vida, salud y la fortaleza necesaria para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional. Su guía fue fundamental en los momentos de dificultad y duda.

A mis padres, Sergio Quilo y Zoila Yacelga, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su esfuerzo incansable, por los sacrificios silenciosos, por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba. Cada consejo, cada palabra de aliento y cada enseñanza han sido la base sobre la cual hoy puedo alcanzar este logro.

A mis abuelitos, tanto de parte paterna como materna, quienes me vieron crecer y han sido testigos de cada etapa de mi vida. Gracias por su cariño, sus consejos y por siempre desear que sea alguien de bien, una persona preparada y con valores. Su apoyo constante y sus oraciones han sido una bendición en mi camino.

A mi hermano menor, Said Quilo, porque más que un hermano, has sido un compañero de vida. Este logro también es para ti, como ejemplo de que con constancia y dedicación todo es posible.

Finalmente, de manera especial, agradezco a mi tutor de tesis MSc. Guillermo Jácome, por su orientación académica, paciencia y valiosos aportes científicos que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con todo mi amor y gratitud, a mis padres, Sergio Quilo y Zoila Yacelga, quienes han sido la base de cada uno de mis logros. Gracias por su sacrificio, por su esfuerzo constante y por enseñarme que la perseverancia y la honestidad son el camino hacia el éxito. Este logro es el reflejo de todo lo que sembraron en mí desde niño.

A mi hermano, Said Quilo, por ser mi compañero de vida y una motivación constante para superarme. Que este logro sea también un ejemplo para ti, que, con disciplina, dedicación y fe en uno mismo, todo es posible.

Este sueño alcanzado no es solo mío, es de ustedes, que caminaron conmigo en cada etapa hasta verlo hecho realidad.

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
I. EL PROBLEMA	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.3. JUSTIFICACIÓN	16
1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	18
1.4.1. Objetivo General.....	18
1.4.2. Objetivos Específicos.....	18
1.4.3. Preguntas de Investigación	18
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	19
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	19
2.2. MARCO TEÓRICO.....	23
2.2.1 El cultivo de pimiento (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	23
2.2.2 Fisiología de la luz en la planta	28
2.2.3 El Fotoperiodo y la suplementación lumínica.....	30
2.2.4 Tecnología LED en la agricultura protegida	31
2.2.5 Evaluación económica de innovaciones tecnológicas.....	33
III. METODOLOGÍA.....	35
3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	35
3.1.1. Enfoque	35
3.1.2. Tipo de Investigación	35

3.2. HIPÓTESIS	35
3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	35
3.3.1. Definición de las variables	35
3.3.2. Operacionalización de las variables	36
3.4. MÉTODOS UTILIZADOS	37
3.4.1. Área de estudio	37
3.4.2. Tratamientos del diseño experimental	37
3.4.3. Características del diseño experimental	38
3.4.4. Distribución y características del experimento	38
3.4.5. Población y muestra de la investigación	39
3.4.6. Procedimientos	40
3.4.7. Variables evaluadas	41
3.4.7.1. Días a la floración	41
3.4.7.2. Número de flores	41
3.4.7.3. Número de frutos	41
3.4.7.4. Rendimiento (Producción de frutos)	42
3.4.7.5. Análisis costo - beneficio	42
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	42
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. RESULTADOS	43
4.1.1. Días a la floración	43
4.1.2. Número de flores	44
4.1.3. Número de frutos	46
4.1.4. Rendimiento (Producción de frutos)	48
4.1.5. Análisis costo - beneficio	50
4.2. DISCUSIÓN	51

4.2.1. Días a la floración y precocidad fenológica	51
4.2.2. Número de flores (Inducción y potencial reproductivo)	52
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1. CONCLUSIONES	54
5.2. RECOMENDACIONES	54
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
VII. ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía del cultivo de pimiento	24
Tabla 2. Operacionalización de variables	36
Tabla 3. Tratamientos del experimento	38
Tabla 4. Características del experimento.....	38
Tabla 5. Análisis de varianza para la variable Días a la floración del cultivo de pimiento (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	43
Tabla 6. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable Días a la Floración del cultivo de pimiento (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	44
Tabla 7. Análisis de varianza para la variable número de flores en diferentes etapas de evaluación	45
Tabla 8. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable número de flores en cuatro etapas de evaluación.....	46
Tabla 9. Análisis de varianza para la variable número de frutos en diferentes etapas de evaluación	47
Tabla 10. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable número de frutos en cuatro etapas de evaluación.....	48
Tabla 11. Análisis de varianza para la variable Rendimiento del cultivo de pimiento por cada 1000 plantas (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	49

Tabla 12. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable Rendimiento del cultivo de pimiento (<i>Capsicum annuum</i> L.).....	50
Tabla 13. Análisis costo/beneficio	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Frutos de <i>Capsicum annuum</i>	25
Figura 2. Ubicación del experimento.....	37
Figura 3. Distribución del ensayo.....	39
Figura 4. Parcela neta	39
Figura 6. Implementación de plástico	61
Figura 5. Siembra	61
Figura 7. Instalación de reflectores LED	61
Figura 8. Control fitosanitario	61
Figura 9. Cosecha.....	61

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas.....	59
Anexo 2. Procedimiento experimental	61
Anexo 3. Script para realizar el análisis estadístico en R Studio.....	62

RESUMEN

La presente investigación se llevó a cabo en el Centro Experimental "San Francisco" del Cantón Huaca, provincia del Carchi, con el objetivo de evaluar el efecto de tres calidades espectrales de luz LED: Rojo, Azul y Púrpura, bajo dos fotoperiodos de extensión suplementaria (2 horas y 4 horas adicionales a la luz natural), sobre la floración y productividad del pimiento (*Capsicum annuum* L.). Se empleó un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con un arreglo factorial de $3 \times 2 + 1$, conformado por 7 tratamientos y 4 repeticiones, totalizando 28 unidades experimentales. Las variables de estudio evaluadas comprendieron: días a la antesis, número de flores por planta, número de frutos por planta, peso del fruto, rendimiento y la Relación Beneficio/Costo. Los resultados evidenciaron que la interacción entre la calidad espectral y la duración del fotoperiodo optimiza significativamente la precocidad fenológica. El tratamiento T4 (Luz Roja + 4 horas de extensión) destacó como el más eficaz, alcanzando un promedio de 11,41 flores por planta y un rendimiento comercial de 1584,69 kg por cada 1000 plantas, superando en un 18,49% al testigo (T7). Fisiológicamente, el espectro rojo potenció la Eficiencia en el Uso de la Radiación, acelerando la antesis y reduciendo el aborto floral por déficit energético. En el ámbito económico, la combinación de luz roja con el fotoperiodo de 4 horas alcanzó la mayor viabilidad con una Relación Beneficio/Costo de 1,86. Se concluye que la suplementación con luz roja durante un fotoperiodo extendido de 4 horas constituye una estrategia biotecnológica disruptiva para la agricultura protegida del Carchi, ya que permite romper el "techo productivo" impuesto por la nubosidad altoandina.

Palabras Claves: *Capsicum annuum* L., tecnología LED, nanómetros, fotoperiodo, rentabilidad.

ABSTRACT

The present research was conducted at the "San Francisco" Experimental Center in Huaca Canton, Carchi province, with the objective of evaluating the effect of three LED light spectral qualities: Red, Blue, and Purple, under two supplementary extension photoperiods (2 hours and 4 hours additional to natural light), on the flowering and productivity of pepper (*Capsicum annuum* L.). A Randomized Complete Block Design (RCBD) was used with a $3 \times 2 + 1$ factorial arrangement, consisting of 7 treatments and 4 replications, totaling 28 experimental units. The study variables evaluated included: days to anthesis, number of flowers per plant, number of fruits per plant, fruit weight, yield, and the Benefit/Cost Ratio. The results showed that the interaction between spectral quality and photoperiod duration significantly optimizes phenological precocity. Treatment T4 (Red Light + 4 hours extension) stood out as the most effective, reaching an average of 11.41 flowers per plant and a commercial yield of 1,584.69 kg per 1,000 plants, surpassing the control (T7) by 18.49%. Physiologically, the red spectrum enhanced Radiation Use Efficiency, accelerating anthesis and reducing flower abortion due to energy deficit. From an economic perspective, the combination of red light with the 4-hour photoperiod reached the highest viability with a Benefit/Cost Ratio of 1.86. It is concluded that red light supplementation during an extended 4-hour photoperiod constitutes a disruptive biotechnological strategy for protected agriculture in Carchi, as it allows for breaking the "productive ceiling" imposed by high Andean cloudiness.

Keywords: *Capsicum annuum* L., LED technology, nanometers, photoperiod, profitability.

INTRODUCCIÓN

El cultivo del pimiento (*Capsicum annuum* L.) constituye uno de los pilares fundamentales de la horticultura protegida en la región Andina, debido a su alta demanda en los mercados nacionales y su valor como fuente de compuestos bioactivos. En el Ecuador, la provincia del Carchi, y específicamente el Cantón Huaca, se posiciona como una zona estratégica para la producción bajo invernadero. Sin embargo, el modelo productivo actual en estas altitudes enfrenta desafíos críticos relacionados con la variabilidad climática y la limitación de la radiación solar natural, factores que condicionan directamente el rendimiento y la precocidad del cultivo.

Históricamente, los sistemas de producción en el Carchi se han sustentado exclusivamente en el aprovechamiento de la luz solar. No obstante, la persistente nubosidad y la niebla características de la zona altoandina reducen drásticamente la Integral de Luz Diaria (DLI), manteniendo a la planta en un estado de déficit energético. Como consecuencia, los productores enfrentan ciclos fenológicos prolongados, altas tasas de aborto floral y una baja eficiencia en el cuajado de frutos, lo que eleva los costos de mantenimiento y reduce la competitividad ante la inestabilidad de los precios del mercado.

Frente a este escenario, surge la necesidad de validar nuevas alternativas tecnológicas basadas en la maximización de la eficiencia en el uso de la radiación. La presente investigación propone la evaluación de sistemas de suplementación lumínica con tecnología LED, la cual permite entregar espectros específicos (Rojo, Azul y Púrpura) de manera controlada. A diferencia del enfoque convencional que depende del azar climático, esta propuesta busca optimizar el metabolismo de la planta mediante la precisión espectral, utilizando la luz roja (660 nm) para catalizar la inducción floral y el desarrollo reproductivo.

No obstante, la eficacia de la suplementación lumínica está intrínsecamente ligada a la gestión del fotoperiodo. La capacidad de extender las horas de luz activa permite estabilizar el presupuesto energético de la planta, asegurando que los

procesos fisiológicos como la antesis y la traslocación de fotoasimilados ocurran de manera acelerada. Por tanto, es imperativo determinar cuál es la calidad espectral y la duración del fotoperiodo suplementario que permiten expresar el máximo potencial genético del pimiento en condiciones de alta montaña.

En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento morfofisiológico, la precocidad fenológica y la viabilidad económica del cultivo de pimiento bajo la aplicación de diferentes tratamientos de iluminación LED. Los resultados obtenidos pretenden entregar al sector productivo una herramienta técnica validada que permita transitar hacia una agricultura de precisión, más resiliente y altamente rentable. Al demostrar que es posible alcanzar una relación Beneficio/Costo superior a la unidad mediante el control del ambiente lumínico, se fortalece la sostenibilidad de la unidad productiva familiar y se impulsa la modernización del agro carchense.

I. EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) representa una de las hortalizas de mayor valor comercial en la región interandina del Ecuador; sin embargo, en la provincia del Carchi, específicamente en el Cantón Huaca, la productividad se encuentra condicionada por las severas limitantes del entorno altoandino. A diferencia de las zonas bajas, el cultivo en esta región se desarrolla bajo un escenario de nubosidad persistente y densas capas de niebla, lo que reduce drásticamente la cantidad y calidad de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) que llega al dosel vegetal (Suarez et al., 2020). Esta deficiencia energética provoca que las plantas operen constantemente por debajo de su punto de saturación lumínica, derivando en ciclos de producción excesivamente largos y una baja acumulación de biomasa en el fruto (Al-Shrouf, 2020).

A esta problemática climática se suma un vacío tecnológico en el manejo del ambiente lumínico bajo invernadero. El modelo de producción actual en el Carchi se basa en el aprovechamiento exclusivo de la luz solar natural, la cual es fluctuante e insuficiente para cubrir la Integral de Luz Diaria (DLI) requerida por el pimiento, que oscila entre los 12 y 15 mol/m²/día (Zheng et al., 2024). Como consecuencia, los agricultores enfrentan altas tasas de aborto floral y retraso en la antesis, ya que la planta, ante el déficit de fotones, prioriza la supervivencia vegetativa sobre el cuajado de frutos. Esta ineficiencia fisiológica se traduce en una pérdida de competitividad económica, pues el productor no logra estandarizar la oferta comercial ni alcanzar los calibres exigidos por el mercado mayorista (Adibian et al., 2023).

Paralelamente, existe un desconocimiento crítico sobre el uso de tecnologías de suplementación lumínica de precisión. Aunque a nivel global la tecnología LED ha demostrado ser una herramienta capaz de manipular el metabolismo secundario y acelerar la floración mediante espectros específicos (rojo y azul),

en el contexto local del Carchi no existen investigaciones que validen estos paquetes tecnológicos (Chen et al., 2024). El productor carchense percibe la iluminación artificial como un gasto energético innecesario, sin considerar que la extensión del fotoperiodo podría desbloquear el potencial productivo de variedades de alto valor (Hernández, 2021).

Finalmente, el problema se agudiza por la falta de evaluaciones financieras que sustenten la adopción de estas innovaciones. La transición de una agricultura convencional a una tecnificada con LED requiere una inversión inicial que el agricultor no está dispuesto a asumir sin pruebas locales de rentabilidad (Sánchez et al., 2025). La carencia de datos sobre la relación Beneficio/Costo de la luz suplementaria en condiciones de alta montaña impide la evolución hacia un modelo de agricultura de precisión, condenando al sector hortícola del Carchi a una dependencia climática que limita su crecimiento y sostenibilidad económica en el tiempo (García et al., 2023).

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La producción de pimiento en el Carchi enfrenta una limitación energética crítica debido a que la radiación solar natural es insuficiente (baja DLI) por la nubosidad persistente, lo que retrasa la antesis y reduce los rendimientos. Esta situación se agrava por el vacío técnico sobre el uso de espectros LED (Rojo, Azul y Púrpura) y la falta de evidencia sobre su viabilidad económica, impidiendo que el productor local adopte tecnologías de precisión para mitigar las restricciones climáticas de la zona altoandina.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se fundamenta en la maximización de la eficiencia en el uso de la radiación para potenciar el rendimiento del cultivo de pimiento en la zona altoandina del Carchi. Ante la dinámica radiativa del Cantón Huaca, surge la oportunidad estratégica de estabilizar la Integral de Luz Diaria (DLI) mediante la implementación de tecnología LED de precisión. Como señalan Suarez et al. (2020) y Zheng et al. (2024), la suplementación lumínica permite que el aparato fotosintético de la planta opere en sus niveles óptimos de asimilación, transformando la energía captada en biomasa comercial de manera acelerada. Al validar el uso de espectros específicos (Rojo y Azul), este estudio se posiciona como un referente para la

intensificación productiva en invernaderos altoandinos, garantizando una antesis precoz y un cuajado de frutos superior.

Desde el ámbito científico, la presente investigación busca generar conocimiento inédito sobre la plasticidad fenotípica del pimiento bajo ambientes de luz controlada. La manipulación del fotoperiodo representa una herramienta bio-tecnológica avanzada para inducir la síntesis del "florigeno" y optimizar la arquitectura de la planta. Según Adibian et al. (2023) y Matos et al. (2025), la aplicación de luz roja (660 nm) actúa como un catalizador del desarrollo reproductivo, permitiendo estandarizar los ciclos fenológicos. Generar evidencia local sobre estas interacciones permite transitar de un manejo empírico a un modelo de agricultura basada en datos, donde la precocidad se convierte en una ventaja competitiva para el sector hortícola regional.

En el aspecto económico, la presente investigación se justifica por su capacidad para fortalecer la rentabilidad del productor mediante la estabilización de la oferta. La implementación de tecnología LED permite desvincular el éxito de la cosecha de la variabilidad climática, facilitando la programación de ciclos productivos en épocas de alta demanda de mercado. De acuerdo con García et al. (2023) y Sánchez et al. (2025), la mejora en el calibre comercial y la reducción del tiempo de cultivo permiten obtener una relación Beneficio/Costo superior a 1,0. De este modo, se entrega al agricultor una solución financiera robusta que asegura la sostenibilidad de la unidad productiva familiar y fomenta la inversión en innovaciones de alto retorno.

Finalmente, el desarrollo de este estudio impulsa la modernización tecnológica y la sostenibilidad del agro carchense. El uso de luminarias LED, reconocidas por su alta eficiencia de fotones (PPE) y su naturaleza de "luz fría" (Mills, 2024), representa un avance significativo hacia la eficiencia energética en la agricultura protegida. Al promover procesos fisiológicos optimizados de forma natural, la presente investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura y ODS 12: Producción y Consumo Responsables). Este enfoque no solo proyecta la vanguardia tecnológica en la zona, sino que consolida un modelo de desarrollo que armoniza la innovación con la seguridad alimentaria nacional, preservando el potencial productivo para las futuras generaciones.

1.4. OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo General

Evaluar tres diferentes longitudes de onda de luz y dos fotoperiodos sobre la floración y producción de frutos en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) en el Centro Experimental San Francisco del Cantón Huaca.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar la influencia de las longitudes de onda roja, azul y púrpura en la precocidad fenológica (días a la floración) y el potencial reproductivo (número de flores y frutos) del cultivo.
- Identificar la combinación óptima de calidad espectral y extensión del fotoperiodo suplementario que maximice el rendimiento comercial del pimiento.
- Realizar un análisis de costo/beneficio para validar la viabilidad financiera de la implementación de iluminación artificial en sistemas de producción protegida en la zona altoandina.

1.4.3. Preguntas de Investigación

- ¿Cuál es el grado de influencia de las longitudes de onda roja, azul y púrpura sobre la precocidad fenológica y el potencial reproductivo (número de flores y frutos) en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.)?
- ¿Cuál es la combinación óptima de calidad espectral y extensión del fotoperiodo suplementario que permite alcanzar el máximo rendimiento comercial por cada 1000 plantas de pimiento?
- ¿En qué medida los indicadores del análisis costo/beneficio validan la viabilidad financiera de implementar sistemas de iluminación artificial LED en la producción protegida de la zona altoandina?

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Zheng et al. (2024) desarrollaron una investigación de vanguardia con el objetivo primordial de evaluar el impacto de diversos espectros de luz LED sobre la inducción floral y el metabolismo secundario en solanáceas cultivadas bajo ambiente protegido. Para ello, implementaron un diseño experimental de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con cinco tratamientos espectrales diferenciados: Rojo monocromático, Azul monocromático, una mezcla de Rojo/Azul en proporción 4:1 (espectro púrpura), Blanco de amplio espectro y un Testigo bajo radiación solar natural. Los investigadores monitorearon variables críticas como la precocidad floral, la tasa de asimilación de CO₂ y la densidad estomática. Sus resultados fueron estadísticamente significativos: el tratamiento Rojo/Azul (Púrpura) logró reducir el periodo hacia la antesis a solo 28,40 días, superando de forma contundente al testigo que registró 34,20 días, y al tratamiento azul puro que retrasó la floración hasta los 38,15 días. En su conclusión, los autores sostienen que la sinergia entre las longitudes de onda de 660 nm y 450 nm activa de manera simultánea los fotorreceptores fitocromos y criptocromos, lo que optimiza la partición de asimilados hacia los órganos reproductivos, acelerando el ciclo fenológico de manera más eficiente que cualquier espectro por separado.

Adibian et al. (2023) llevaron a cabo un estudio exhaustivo para investigar el efecto combinado de la luz suplementaria y la manipulación del fotoperíodo sobre la productividad y calidad del pimiento morrón (*Capsicum annuum*) en regiones caracterizadas por una baja radiación estacional. La investigación se estructuró bajo un diseño factorial 3x2, donde se evaluaron tres calidades de luz (Rojo, Azul y un espectro Mixto balanceado) bajo dos fotoperíodos distintos (12h y 16h de luz continua). Las variables analizadas incluyeron el número de frutos por planta, el peso fresco individual y el índice de área foliar. Los datos numéricos revelaron que el fotoperíodo de 16h combinado con luz mixta alcanzó una productividad máxima de 8,45 kg/m², mientras que el tratamiento de fotoperíodo corto de 12h bajo luz azul descendió significativamente a 5,12 kg/m².

Los autores concluyen que la extensión del fotoperíodo actúa como un mecanismo de compensación frente a la baja Integral de Luz Diaria (DLI) propia de zonas con alta nubosidad, permitiendo mantener una tasa fotosintética neta positiva durante un mayor número de horas, lo que se traduce directamente en un incremento del peso comercial del fruto.

Chen et al. (2024) evaluaron la eficiencia del espectro rojo puro sobre el rendimiento comercial y la arquitectura de planta en el cultivo de pimiento bajo sistemas de agricultura vertical de alta precisión. El diseño experimental consistió en parcelas divididas con tres niveles de intensidad lumínica y cuatro variaciones de fotoperíodo (12h, 14h, 16h y 18h). Entre las variables evaluadas destacaron el número de flores emitidas, el contenido de clorofila total y el peso seco de la biomasa reproductiva. Los resultados evidenciaron que el tratamiento con luz roja bajo un fotoperíodo extendido de 18h generó un promedio de 12,60 flores por planta, superando significativamente al tratamiento de control de 12h que apenas registró 8,10 flores. Chen concluye que la luz roja monocromática a 660 nm es el motor principal para el llenado de frutos, ya que maximiza la absorción energética de la clorofila-a, promoviendo una traslocación de azúcares más agresiva hacia los frutos, aunque advierte que fotoperíodos superiores a las 16h deben ser monitoreados para evitar el estrés por fotoinhibición en ciertas variedades.

López-Hernández et al. (2022) realizaron una investigación en el sureste de México con el fin de determinar la respuesta fenológica del pimiento habanero a la suplementación lumínica con tecnología LED. Bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, evaluaron la influencia de luces azules y rojas sobre la precocidad floral y el crecimiento longitudinal. Las variables monitoreadas fueron la altura de planta, el diámetro del tallo y los días a la primera floración. Sus hallazgos mostraron que el uso exclusivo de luz azul promovió plantas más compactas y robustas, pero retrasó drásticamente la floración hasta los 75,30 días; en contraste, la combinación balanceada de rojo y azul (espectro púrpura) adelantó la antesis a los 62,10 días, frente a los 69,80 días del testigo sin suplementación. Concluyen que, si bien la luz azul es vital para el control del desarrollo estructural y evitar la etiolación, la luz roja es el estímulo indispensable para activar la vía de señalización genética que marca la transición de la fase vegetativa a la reproductiva.

Naznin et al. (2019) estudiaron la relación crítica entre las proporciones de luz roja y azul sobre el metabolismo de carbohidratos y la retención de órganos reproductivos

en el pimiento dulce. La metodología incluyó la evaluación de seis proporciones distintas de luz LED en un sistema de crecimiento totalmente controlado. Los resultados indicaron que una proporción dominante de rojo (90 % Rojo / 10 % Azul) incrementó el número de frutos retenidos a 15,20 por planta, en comparación con el testigo de luz blanca que solo alcanzó los 10,40 frutos. Los análisis químicos revelaron que esta proporción lumínica aumentó la concentración de glucosa y fructosa en las hojas en un 25,00 %. Los autores concluyen que la luz roja fortalece la "fuerza del sumidero" (el fruto), permitiendo que la planta cuaje y sostenga un mayor número de estructuras reproductivas sin abortarlas, gracias a un suministro ininterrumpido de energía química proveniente de una fotosíntesis más eficiente.

Tewolde et al. (2022) llevaron a cabo un estudio innovador sobre el uso de luz LED de inter-iluminación (posicionada dentro del dosel de la planta) en pimientos cultivados en invernaderos de alta densidad. El objetivo fue evaluar si el momento de la suplementación (diurna vs. nocturna) afectaba la eficiencia en el cuajado de frutos. Utilizando un diseño experimental de bloques, los autores reportaron que la suplementación nocturna de 4 horas incrementó el peso final del fruto en un 22,40 %, alcanzando promedios de 210,50 g por fruto frente a los 172,00 g del manejo convencional. Las variables evaluadas incluyeron la eficiencia cuántica del fotosistema II y el peso comercial. Concluyen que la suplementación lumínica durante las primeras horas de la noche previene la caída prematura de flores al mantener un balance de carbohidratos estable y evitar el déficit de asimilados que ocurre normalmente durante el periodo de oscuridad, mejorando la competitividad económica del cultivo.

García et al. (2023) evaluaron el impacto técnico-económico de la suplementación con LED púrpura en hortalizas de fruto cultivadas en zonas altoandinas. Mediante un diseño experimental en campo cubierto, compararon la productividad bajo radiación solar natural frente a una suplementación de 3 horas adicionales de luz púrpura. En la variable de rendimiento total, los resultados mostraron un promedio de 42,80 t/ha para el tratamiento con LED, superando los 35,20 t/ha del testigo natural. El análisis financiero reveló que, aunque el costo operativo aumentó debido al consumo eléctrico, la utilidad neta se incrementó en un 15,60 % debido a la precocidad del producto en el mercado. Concluyen que la tecnología LED es una herramienta de intensificación agrícola altamente rentable, ya que el aumento del

rendimiento compensa con creces el gasto en infraestructura energética, especialmente en regiones con fluctuaciones climáticas severas.

Hernández (2021) investigó en una estación experimental agropecuaria la influencia de la duración del fotoperíodo suplementario sobre la calidad postcosecha y la abundancia floral en el cultivo de pimiento. El autor evaluó fotoperíodos de 2, 4 y 6 horas adicionales utilizando exclusivamente luz LED roja de alta intensidad. Las variables analizadas fueron el número de flores por nudo, la firmeza del fruto y el contenido de sólidos solubles totales (Brix). Los resultados para la floración mostraron que las 4 horas de suplementación representaron el punto de equilibrio óptimo con 11,20 flores/planta, mientras que la extensión a 6 horas no mostró un incremento significativo, registrando 11,50 flores/planta. Hernández concluye que existe un "umbral de saturación lumínica" en el pimiento, donde el gasto energético de fotoperíodos extremadamente largos (como 6h) no se traduce en beneficios productivos proporcionales, señalando a las 4 horas como el tiempo de exposición técnicamente más eficiente.

Suarez et al. (2020) realizaron un ensayo en la región andina evaluando la precocidad y el desarrollo fenológico en solanáceas bajo diferentes tipos de cubiertas plásticas y suplementación lumínica. El diseño fue de bloques al azar con tres tratamientos lumínicos diferenciados por la calidad del espectro. En la variable "días a la floración", el tratamiento bajo luz LED púrpura registró una media de 68,40 días, siendo significativamente más precoz que el tratamiento bajo luz blanca fría, que promedió 74,20 días. Los autores evaluaron también la biomasa seca de raíz y tallo. En su conclusión, destacan que en ecosistemas de alta altitud y nubosidad persistente, el espectro púrpura actúa como un catalizador metabólico que compensa la baja calidad de la radiación solar incidente, reduciendo el ciclo total de cultivo y permitiendo una rotación de cosecha más rápida.

Al-Shrouf (2020) evaluó el efecto de la luz suplementaria roja en el crecimiento y rendimiento de pimiento dulce cultivado en sistemas hidropónicos bajo invernadero. Utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con tres tratamientos de luz de diferentes intensidades. Los resultados de rendimiento indicaron que la suplementación con luz roja pura alcanzó una producción de 3,80 kg por planta, superando ampliamente al testigo que apenas produjo 2,90 kg por planta. La variable "número de frutos cuajados" mostró que la luz roja aumentó la retención en un 30,00 % respecto al manejo tradicional. El autor concluye que la luz roja promueve una

mayor actividad de la enzima Rubisco, lo que resulta en una acumulación superior de materia seca en el fruto y una mejora directa en la productividad final por unidad de superficie cultivada.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1 El cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.)

2.2.1.1 Origen y taxonomía

El género *Capsicum* comprende un grupo diverso de plantas dicotiledóneas, cuyo origen se localiza en las regiones tropicales y subtropicales del continente americano, específicamente en un área que se extiende desde el sur de los Estados Unidos hasta el norte de Argentina. De acuerdo con Carrizo et al. (2023), el centro de origen primario y de mayor diversidad genética se sitúa en la región de los Andes centrales y Mesoamérica, áreas donde el proceso de domesticación comenzó hace aproximadamente 8.000 a 10.000 años.

Evidencias arqueobotánicas obtenidas en las cuevas de Guitarrero (Perú) y en el valle de Tehuacán (México) confirman que el pimiento fue una de las primeras especies domesticadas en el Nuevo Mundo, con registros que datan de entre 8.600 y 5.500 a.C. (Bartolomé García et al., 2016). Tras el contacto europeo en el siglo XV, la dispersión global del género fue vertiginosa, integrándose rápidamente en las gastronomías de Asia y Europa debido a su adaptabilidad y valor organoléptico.

Taxonómicamente, el género *Capsicum* pertenece a la familia *Solanaceae*, la cual agrupa a otras especies de alto valor comercial como el tomate y la papa. Según la clasificación botánica actualizada, se reconocen cinco especies principales domesticadas: *C. annuum*, *C. frutescens*, *C. chinense*, *C. baccatum* y *C. pubescens*. De estas, *Capsicum annuum* L. es la especie de mayor importancia económica a nivel mundial, caracterizándose por una notable variabilidad morfológica en sus frutos, que oscilan desde formas dulces y voluminosas (pimientos tipo bloque o Bell Pepper) hasta variedades pequeñas y altamente picantes (Pickersgill, 2019).

La clasificación jerárquica de la especie objeto de la presente investigación se detalla en la Tabla 1, fundamentada en el sistema de clasificación de plantas con flores (APG IV), que garantiza la precisión taxonómica requerida en estudios de fisiología vegetal avanzada.

Tabla 1. Taxonomía del cultivo de pimiento

Categoría	Nombre
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta (Angiospermas)
Clase	Magnoliopsida (Dicotiledóneas)
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Género	<i>Capsicum</i>
Especie	<i>Capsicum annuum</i> L.

Fuente: (WFO, 2026)

2.2.1.2 Morfología y fases fenológicas

La morfología de *Capsicum annuum* L. exhibe una plasticidad fenotípica adaptativa frente a estímulos externos, donde la arquitectura vegetal se ajusta dinámicamente para maximizar la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (Ferro, 2007). Esta organización botánica es el resultado de la interacción entre el potencial genético y el ambiente radiativo, influyendo significativamente en el vigor y la capacidad productiva de la planta (Bartolomé García et al., 2016).

- Sistema radicular: Presenta una raíz pivotante dominante de la cual derivan abundantes raíces laterales y pelos absorbentes. Aunque su geotropismo es positivo, la presente investigación considera que el desarrollo radicular está íntimamente ligado a la tasa fotosintética aérea; un espectro lumínico eficiente (como el rojo) potencia la traslocación de fotosintatos hacia la raíz, mejorando la exploración del sustrato y la arquitectura radicular bajo condiciones de estrés lumínico (Naznin et al., 2019).
- Tallo y ramificación: El tallo es de naturaleza herbácea en estadios iniciales, lignificándose parcialmente con la madurez. Presenta una ramificación dicotómica característica, donde cada bifurcación suele albergar una yema floral; la longitud de los entrenudos es una variable altamente sensible a la calidad de la luz, donde el espectro azul promueve tallos compactos y el rojo lejano puede inducir elongación por el fenómeno de evitación de sombra (Ferro, 2007).
- Aparato foliar: Las hojas son simples, de pecíolo corto y morfología lanceolada u ovada. En estudios de fisiología avanzada, se destaca que la luz azul suplementaria incrementa el espesor del parénquima en empalizada,

optimizando la captura de fotones, mientras que la luz roja maximiza la superficie foliar para captar mayor energía fotónica bajo cubiertas plásticas (Mendoza Paredes, 2022).

- Estructuras reproductivas (Flor y Fruto): Las flores son hermafroditas, solitarias y generalmente blancas. El fruto es una baya hueca e indehiscente (pericarpio), cuyo desarrollo depende de la "fuerza del sumidero" (*sink strength*); la presente investigación pone énfasis en que la luz roja es el motor principal para el cuajado y llenado al optimizar la actividad de la enzima Rubisco y la acumulación de azúcares (Al-Shrouf, 2020).



Figura 1. Frutos de *Capsicum annuum*
Fuente: (Al-Shrouf, 2020)

Fases fenológicas (Escala BBCH)

Para el monitoreo de la presente investigación, se utiliza la escala decimal BBCH (*Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie*), la cual permite una codificación estandarizada del desarrollo vegetal (Feldmann & Rutikanga, 2021). Esta escala es fundamental para sincronizar las aplicaciones de luz suplementaria con las necesidades metabólicas de la planta en cada etapa crítica (Mora Bolaños et al., 2013).

- Fase de Emergencia (Estadio 0): Comprende desde la germinación hasta la aparición de los cotiledones. Es una etapa crítica donde la calidad lumínica influye en la velocidad de establecimiento; se ha reportado que la luz roja

puede acelerar la hidratación del embrión y la emergencia radicular efectiva (Mora Bolaños et al., 2013).

- Fase Vegetativa (Estadios 1-3): Caracterizada por la expansión foliar progresiva y la bifurcación del tallo principal. Durante este periodo, el pimiento establece la arquitectura necesaria para soportar la carga frutal futura, siendo una etapa donde el balance entre luz roja y azul define la robustez del dosel (Zheng et al., 2024).
- Fase de Floración (Estadios 5-6): Representa el periodo de mayor sensibilidad al fotoperiodo y la calidad espectral. La suplementación con luz roja actúa directamente sobre los fitocromos para inducir la síntesis del "florigeno", reduciendo significativamente los días a la antesis y mejorando la viabilidad del polen (Feldmann & Rutikanga, 2021).
- Fase de Fructificación y Maduración (Estadios 7-8): Involucra el crecimiento del ovario y la acumulación de sólidos solubles. La calidad de la luz en esta fase determina no solo el peso comercial final, sino también la síntesis de compuestos bioactivos como carotenoides y capsaicina, esenciales para el valor nutricional del fruto (Tiwari et al., 2013).

2.2.1.3 Requerimientos edafoclimáticos y limitantes en la zona altoandina

El éxito productivo de *Capsicum annuum* L. está intrínsecamente ligado a la interacción Genotipo-Ambiente. Para que el pimiento exprese su potencial de rendimiento y calidad comercial, requiere un equilibrio preciso entre las propiedades del suelo y las variables climáticas, las cuales son frecuentemente restrictivas en las zonas altas de la provincia del Carchi.

Factores Edáficos (Suelo)

- Textura: El pimiento demanda suelos de textura media a ligera, preferiblemente franco-arenosos o francos, con una estructura que garantice una alta porosidad. Esta característica es crítica para permitir la oxigenación del sistema radicular y evitar la resistencia mecánica al crecimiento. Según Ferro (2007), los suelos compactados limitan la exploración de las raíces laterales, reduciendo la capacidad de la planta para absorber agua y nutrientes, lo que se traduce en un desarrollo vegetativo deficiente.

- pH: El rango óptimo de pH para el pimiento oscila entre 5,5 y 7,0. En los suelos de origen volcánico (Andisoles) del Cantón Huaca, es común encontrar pH inferiores a 5,0 debido a la lixiviación de bases. Placencia (2024) advierte que una acidez excesiva incrementa la solubilidad del Aluminio (Al^{3+}), el cual es tóxico para el ápice radicular, e induce la fijación del Fósforo, limitando la energía disponible (ATP) para la floración. Por ello, la presente investigación considera el manejo de la rizósfera como un pilar complementario a la iluminación.
- Drenaje y Sanidad: El pimiento es extremadamente sensible a la hipoxia radicular. El encharcamiento prolongado no solo detiene la respiración celular en la raíz, sino que favorece el ataque de patógenos del suelo como *Phytophthora capsici* y *Fusarium spp.*, los cuales pueden causar la muerte regresiva de la planta en pocas horas si el drenaje es deficiente (Al-Shrouf, 2020).

Factores Climáticos y Altitud

- Temperatura: Es el factor más influyente en la velocidad del ciclo fenológico. El pimiento requiere un rango óptimo diurno de 22 °C a 28 °C y nocturno de 15 °C a 18 °C. Temperaturas nocturnas inferiores a 10 °C (frecuentes en Huaca) provocan la formación de flores anómalas, polen inviable y frutos deformes. Por el contrario, temperaturas superiores a 35 °C inducen el aborto floral masivo (Naznin et al., 2019).
- Humedad Relativa: El rango ideal se sitúa entre el 50 % y 70 %. Una humedad excesiva (>80 %) dificulta la dehiscencia de las anteras y la dispersión del polen. En la zona de estudio, el manejo de la ventilación en invernadero es vital para contrarrestar la alta humedad ambiental del entorno andino (Placencia, 2024).
- Altitud y Radiación UV: El Cantón Huaca, ubicado sobre los 2.900 m.s.n.m., presenta una dinámica radiativa particular. A mayor altitud, la capa atmosférica es más delgada, permitiendo una mayor incidencia de rayos UV-B que pueden generar estrés oxidativo. No obstante, la presente investigación recalca que esta radiación no compensa el déficit de fotones en el espectro visible (400-700 nm) causado por la orografía de la zona, lo que justifica el uso de luminarias LED como fuente de energía controlada (García et al., 2023).

Dinámica Lumínica y Balance Energético

- La limitante lumínica en el Cantón Huaca: La producción bajo invernadero en el Carchi enfrenta el desafío de la nubosidad persistente y niebla. La presente investigación identifica que la calidad y cantidad de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) se ve mermada por el bloqueo nuboso y el coeficiente de extinción de los plásticos. Como sostiene Suarez et al. (2020), en estos ecosistemas las plantas suelen operar por debajo de su punto de saturación lumínica, resultando en un retraso en la inducción floral y menor acumulación de biomasa.
- Concepto de Integral de Luz Diaria (DLI): Para cuantificar esta limitación, la presente investigación se fundamenta en la DLI, que representa la suma total de fotones (400 a 700 nm) que inciden en un metro cuadrado en 24 horas, expresada en mol/m²/día. Según Zheng et al. (2024), el pimiento requiere una DLI mínima de 12 a 15 mol/m²/día. En zonas de radiación fluctuante como Huaca, la suplementación LED es indispensable para estabilizar estos niveles y garantizar que el metabolismo secundario no se detenga por falta de energía cuántica (Adibian et al., 2023).
- Interacción Nutricional bajo Suplementación: El incremento en la tasa fotosintética inducido por la suplementación LED genera una mayor demanda de fotoasimilados. Según García et al. (2023), al optimizar la luminosidad, la planta incrementa su tasa de transpiración y absorción radicular, exigiendo una disponibilidad constante de nutrientes en la rizósfera para evitar que el suelo se convierta en un factor limitante ante el nuevo potencial productivo.

2.2.2 Fisiología de la luz en la planta

La luz no solo representa la fuente primaria de energía para el metabolismo autótrofo, sino que actúa como un estímulo externo que modula la expresión génica y el desarrollo estructural. En la presente investigación, se analizó la respuesta del pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo la premisa de que la luz es, simultáneamente, un sustrato energético y una señal reguladora (Taiz et al., 2023).

2.2.2.1 Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) y espectro visible

La Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) comprende la banda del espectro electromagnético situada entre los 400 y 700 nm, la cual coincide con la región de la luz visible captada por el ojo humano. No obstante, para la fisiología vegetal, la

medición no se basa en la luminosidad (lux), sino en la cantidad de fotones que inciden sobre una superficie, denominada Densidad de Flujo Fotónico Fotosintético (PPFD) y expresada en $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Valdés, 2019).

La eficiencia de la fotosíntesis varía según la longitud de onda; las clorofilas *a* y *b* presentan picos de absorción máximos en las bandas del azul (430-450 nm) y del rojo (640-680 nm). Como señala Kang (2020), aunque todas las longitudes de onda dentro del PAR contribuyen a la fijación de carbono, el espectro rojo es el más eficiente cuánticamente para impulsar la fotosíntesis, lo que justifica el uso de luminarias LED rojas para maximizar el rendimiento comercial en condiciones de baja radiación natural.

2.2.2.2 Fotorreceptores: Fitocromos (Rojo/Rojo Lejano) y Criptocromos (Azul)

Las plantas poseen un sistema sensorial compuesto por proteínas especializadas llamadas fotorreceptores, que detectan la calidad espectral del entorno. Entre los más relevantes para esta investigación se encuentran los fitocromos, los cuales regulan procesos como la germinación y la floración mediante la detección de luz roja (660 nm) y roja lejana (730 nm). Estos operan en un equilibrio reversible entre la forma inactiva (*Pr*) y la forma activa (*Pfr*); la presencia de luz roja suplementaria desplaza este equilibrio hacia la forma *Pfr*, la cual migra al núcleo celular para activar los genes de desarrollo reproductivo (Algiers, 2020).

Por otro lado, los criptocromos y las fototropinas responden predominantemente a la luz azul (400-500 nm). Estos fotorreceptores controlan la fotomorfogénesis temprana, la apertura de estomas y la inhibición de la elongación de los tallos. Según Mendoza Paredes (2022), una adecuada dosis de luz azul suplementaria permite obtener plántulas más compactas y robustas, con una mayor densidad estomática que facilita el intercambio gaseoso, optimizando así la eficiencia en el uso del agua bajo condiciones de invernadero.

2.2.2.3 Fotomorfogénesis y control hormonal de la floración

La fotomorfogénesis es el conjunto de cambios morfológicos inducidos por la luz que no dependen directamente de la fotosíntesis, sino de la señalización celular. El control de la floración en el pimiento está regulado por la síntesis y traslocación de señales químicas desde las hojas hacia los meristemos apicales. La suplementación con luz roja prolongada actúa como un inductor de la proteína FT (Flowering Locus T),

comúnmente conocida como "florigeno", la cual viaja por el floema para transformar el meristemo vegetativo en uno reproductivo (Taiz et al., 2023).

Este proceso se ve potenciado por el balance de fitohormonas como las giberelinas y auxinas, cuya biosíntesis es modulada por el fotoperiodo. La extensión del día mediante luz artificial, como se aplicó en el tratamiento T4, permite mantener niveles elevados de la forma activa del fitocromo por más tiempo, lo que acelera la transición a la antesis y reduce el aborto floral. De acuerdo con Feldmann y Rutikanga (2021), esta manipulación fotoperiódica sincroniza el reloj circadiano de la planta con la disponibilidad de energía, garantizando que el pimiento alcance la precocidad fenológica sin comprometer la acumulación de sólidos solubles en el fruto.

2.2.3 El Fotoperiodo y la suplementación lumínica

El manejo del tiempo de exposición lumínica es una herramienta bio-tecnológica que permite desfasar la producción natural de los ciclos estacionales. En la agricultura protegida moderna, la manipulación del fotoperiodo no busca únicamente la supervivencia de la planta, sino la optimización de los sumideros de carbono hacia los frutos de interés comercial (Palmer et al., 2024).

2.2.3.1 Concepto de fotoperiodo y plantas de día neutro

El fotoperiodo se define como la relación entre la duración del periodo de luz (fotofase) y el de oscuridad (escotofase) en un ciclo de 24 horas. Este fenómeno es detectado por la planta mediante el sistema de fitocromos, permitiéndole sincronizar sus funciones vitales con el entorno externo (Thomas & Vince-Prue, 1997, citado por Matos et al., 2025). Tradicionalmente, las plantas se clasifican en plantas de día corto, día largo o día neutro, dependiendo de si requieren un umbral crítico de luz u oscuridad para iniciar la transición floral.

El pimiento (*Capsicum annuum* L.) es catalogado técnicamente como una planta de día neutro facultativa. Esto implica que, si bien la especie es capaz de florecer bajo un amplio rango de duraciones del día, responde positivamente al aumento del fotoperiodo mediante una aceleración de la ontogenia floral. Según Matos et al. (2025), la extensión del día con luz artificial permite que la planta acumule una mayor cantidad de señales químicas inductoras, reduciendo el tiempo hasta la antesis y mejorando la sincronización de la cosecha, lo que justifica el uso de tratamientos de extensión lumínica como el propuesto en la presente investigación.

2.2.3.2 La Integral de Luz Diaria (DLI) y su impacto en el rendimiento comercial

La Integral de Luz Diaria (DLI) es la métrica más precisa para evaluar el potencial productivo de un invernadero, ya que cuantifica la energía acumulada a lo largo del día en lugar de solo la intensidad en un momento puntual. Se define como la suma del Flujo de Fotones Fotosintéticos (PPFD) recibidos durante las horas de luz y se expresa en $\text{mol/m}^2/\text{día}$. Para cultivos de alto valor como el pimiento, existe una correlación lineal directa entre el aumento de la DLI y el incremento en el peso fresco del fruto y la calidad postcosecha (Waymouth et al., 2024).

En la presente investigación, la importancia de la DLI radica en su capacidad para actuar como un "presupuesto energético". Un déficit en la DLI diaria no solo retrasa el crecimiento, sino que compromete el rendimiento comercial al inducir el aborto de flores por falta de carbohidratos. Como afirman Zheng et al. (2026), en zonas de alta nubosidad como el Carchi, la suplementación LED permite elevar artificialmente la DLI de niveles subóptimos ($8\text{-}10 \text{ mol/m}^2/\text{día}$) a niveles de alta productividad ($15\text{-}20 \text{ mol/m}^2/\text{día}$). Este incremento energético se traduce en frutos de mayor calibre, paredes celulares más gruesas y una mayor concentración de vitamina C, factores que determinan el éxito financiero de la explotación agrícola.

2.2.4 Tecnología LED en la agricultura protegida

La transición de la iluminación convencional (Sodio de Alta Presión o Fluorescentes) hacia los Diodos Emisores de Luz (LED) ha marcado un cambio de paradigma en la horticultura protegida. La capacidad de los sistemas LED para emitir longitudes de onda estrechas y controladas permite que la luz deje de ser un factor ambiental pasivo para convertirse en un insumo de precisión modulable según la etapa fenológica del cultivo (Kim et al., 2025).

2.2.4.1 Ventajas energéticas y térmicas del LED

Una de las principales ventajas de la tecnología LED es su elevada Eficiencia de Fotones Fotosintéticos (PPE), que permite convertir la energía eléctrica en fotones útiles con una mínima pérdida de energía en forma de calor residual. A diferencia de las lámparas de descarga, los LED se consideran "luz fría", lo que permite instalarlos a distancias reducidas del dosel vegetal sin riesgo de estrés térmico o quemaduras foliares (Mills, 2024). Esta característica es vital en la presente investigación, ya que permite una distribución lumínica más uniforme en el estrato medio de la planta,

mejorando la actividad fotosintética de las hojas que normalmente quedarían sombreadas en invernaderos convencionales del Carchi.

Además, la durabilidad operativa de los sistemas LED, que supera las 50.000 horas de uso, reduce significativamente los costos de mantenimiento a largo plazo. Según García et al. (2025), en regiones con costos energéticos fluctuantes, la eficiencia de los LED justifica la inversión inicial al maximizar la biomasa producida por cada watt consumido.

2.2.4.2 Efectos específicos de los espectros (Rojo, Azul y Púrpura)

La fotobiología moderna reconoce que cada longitud de onda actúa como un modulador específico de la morfología y el metabolismo (Zheng et al., 2026):

- Espectro Rojo (660 nm): Es la banda de mayor eficiencia cuántica para la fotosíntesis. Su función principal es la activación del fitocromo en su forma activa (Pfr), la cual desencadena la inducción floral y la expansión de la biomasa. Según Bantis (2024), el uso de luz roja suplementaria es una estrategia efectiva para acelerar la transición hacia la fase reproductiva y maximizar la fuerza de los órganos sumideros (flores y frutos).
- Espectro Azul (450 nm): Es captado por los criptocromos y las fototropinas. Regula la arquitectura de la planta promoviendo tallos más gruesos y entrenudos cortos (plantas compactas). Además, la luz azul es fundamental para incrementar la densidad estomática y la conductancia foliar, optimizando el intercambio gaseoso y la síntesis de clorofila (Kang, 2020).
- Espectro Púrpura (Combinación Rojo/Azul): Representa una sinergia espectral diseñada para emular los picos de absorción máxima de las clorofilas a y b. Esta mezcla busca un equilibrio entre el desarrollo estructural inducido por el azul y el rendimiento productivo estimulado por el rojo, evitando los efectos negativos de la luz monocromática, como el alargamiento excesivo del tallo (Kim et al., 2025).

2.2.4.3 Aplicaciones en solanáceas

En especies de la familia *Solanaceae*, como el pimiento y el tomate, la suplementación LED ha demostrado ser una herramienta crítica para estabilizar la productividad en regiones con baja integral de luz diaria. La literatura científica indica

que la luz suplementaria no solo afecta la cantidad de biomasa, sino también la calidad nutracéutica (Adibian et al., 2024).

Estudios recientes han comprobado que la iluminación artificial permite compensar los periodos de alta nubosidad, garantizando que el metabolismo secundario de la planta continúe la síntesis de compuestos bioactivos como los carotenoides y el ácido ascórbico. Según Waymouth et al. (2024), el uso de LEDs en solanáceas cultivadas en invernadero permite una estandarización de los ciclos de cosecha, reduciendo la variabilidad temporal del rendimiento comercial que caracteriza a la agricultura protegida convencional en zonas de alta montaña.

2.2.5 Evaluación económica de innovaciones tecnológicas

La adopción de nuevas tecnologías en la agricultura protegida, como los sistemas de iluminación suplementaria LED, requiere de un análisis financiero que determine si el incremento en la productividad justifica los costos de inversión y operación. La evaluación económica permite transformar los datos biofísicos y fisiológicos en indicadores de rentabilidad que facilitan la toma de decisiones para los productores y tomadores de crédito (Sánchez et al., 2025).

2.2.5.1 Indicadores de rentabilidad: Relación Beneficio/Costo

Los indicadores de rentabilidad son herramientas métricas que permiten comparar los flujos de ingresos y egresos generados por la implementación de una innovación frente a un manejo convencional o testigo (López & Torres, 2024). Los más utilizados en la investigación agrícola son:

- Relación Beneficio/Costo (B/C): Es el indicador más utilizado para validar la adopción de tecnologías. Representa el valor de los beneficios obtenidos por cada unidad monetaria invertida. Matemáticamente, se obtiene dividiendo los ingresos totales (beneficios brutos) entre los costos totales (costos fijos y variables). Un coeficiente B/C superior a 1,0 indica que el proyecto es financieramente viable; mientras mayor sea el excedente sobre la unidad, mayor será la rentabilidad del tratamiento evaluado (Villarreal, 2026).
- Utilidad Neta o Margen de Ganancia: Representa el beneficio económico real que queda en poder del productor después de haber cubierto todos los costos operativos, incluyendo el consumo energético derivado del uso de luminarias.

Según García et al. (2025), en sistemas intensivos con luz suplementaria, la utilidad neta es un indicador de la competitividad de la tecnología, ya que debe compensar el riesgo de la inversión inicial y los gastos de mantenimiento técnico.

- Costo de Producción y Punto de Equilibrio: Evaluar el costo de producción por kilogramo cosechado es vital para entender la eficiencia del sistema. Las innovaciones como el LED buscan reducir este costo unitario mediante el aumento significativo de la biomasa comercializable. El punto de equilibrio determina el volumen de producción mínimo necesario para cubrir los costos adicionales de la suplementación lumínica, asegurando que la tecnología no genere pérdidas operativas bajo condiciones de mercado fluctuantes (Sánchez et al., 2025).

III. METODOLOGÍA

3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

3.1.1. Enfoque

La presente investigación tuvo un enfoque cuantitativo, ya que se basó en la recolección de datos numéricos para evaluar variables fisiológicas (días a la floración, número de flores) y productivas (rendimiento, peso del fruto), sometiéndolos a un análisis estadístico riguroso para probar las hipótesis planteadas mediante el contraste de medias.

3.1.2. Tipo de Investigación

El estudio correspondió a una investigación experimental de campo (realizada bajo ambiente controlado en invernadero), dado que se manipularon deliberadamente las variables independientes (longitudes de onda de luz y fotoperiodos) para medir y analizar su efecto directo sobre las variables dependientes del cultivo de pimiento.

3.2. HIPÓTESIS

Hipótesis Alternativa (Ha)

La aplicación de tres diferentes longitudes de onda de luz y dos fotoperiodos influyó significativamente en la precocidad de la floración y el rendimiento de frutos en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) variedad comercial, en el Centro Experimental San Francisco del Cantón Huaca.

Hipótesis Nula (H0)

La aplicación de tres diferentes longitudes de onda de luz y dos fotoperiodos no influyó significativamente en la floración ni en la producción de frutos en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) variedad comercial, en el Centro Experimental San Francisco del Cantón Huaca.

3.3. DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.3.1. Definición de las variables

Variable independiente: Tres diferentes longitudes de onda de luz (espectros LED rojo, azul y púrpura) y dos fotoperiodos de exposición lumínica (2 y 4 horas).

Variable dependiente: Floración (evaluada en días a la antesis y número de flores) y producción de frutos (medida a través del rendimiento y peso).

3.3.2. Operacionalización de las variables

Tabla 2. Operacionalización de variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Técnicas	Instrumentos
Independiente	Longitudes de onda de luz	Espectros de luz suministrados: Roja, Azul y Púrpura.	Suplementación lumínica artificial.	Reflectores LED de espectro específico.
	Fotoperiodo	Tiempos de exposición: 2 horas y 4 horas de luz suplementaria.	Control de tiempos de encendido y apagado.	Temporizadores digitales (timers).
	Días a la floración	En número de días al observar estructuras reproductivas y registro de la antesis.	Observación fenológica directa.	Libreta de campo y cámara fotográfica.
Dependiente	Número de flores	Conteo visual de estructuras reproductivas y registro de la antesis. A los 60, 75, 91, 106 días después del trasplante.	Conteo manual de flores.	Libreta de campo
	Número de frutos	Conteo manual de frutos formados en las etapas de evaluación. A los 75, 91, 106, 130 días después del trasplante.	Inspección física periódica.	Libreta de campo
	Rendimiento	En kg. Se midió a la cosecha 130 días después del trasplante.	Peso fresco de frutos comerciales obtenidos en la parcela de la unidad experimental.	Libreta de campo Bascula
	Beneficio/Costo	En USD. Al finalizar la investigación de campo	Cociente entre los ingresos brutos y los costos totales de producción por tratamiento.	Libreta de campo Computadora

3.4. MÉTODOS UTILIZADOS

3.4.1. Área de estudio

El presente ensayo experimental se desarrolló en el Centro Experimental "San Francisco", estación de investigación dependiente de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi (UPEC). El predio se localizó administrativamente en el cantón Huaca, provincia del Carchi, Ecuador. El sitio de ensayo se encuentra georreferenciado mediante las coordenadas 0°46'53" de Latitud Norte y 77°41'38" de Longitud Oeste.

De acuerdo con las variables agroclimáticas de la zona, el centro se ubicó a una altitud de 2.890 m s. n. m., registrando una temperatura media anual de 11,5 °C y una precipitación de 950 mm. Bajo estos parámetros, la zona de vida se clasificó como estepa espinosa Montano Bajo (ee-MB), siguiendo los criterios de Peña (2012). Debido a las exigencias térmicas del cultivo de pimiento, la investigación se llevó a cabo bajo condiciones controladas en una estructura de invernadero, lo cual permitió la manipulación de las variables lumínicas objeto de estudio.

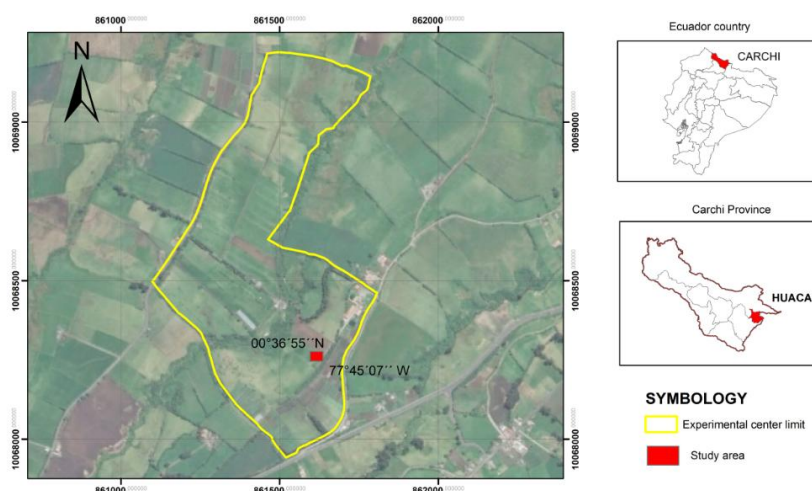


Figura 2. Ubicación del experimento

3.4.2. Tratamientos del diseño experimental

La investigación se constituyó de 7 tratamientos que se describen a continuación:

Tabla 3. Tratamientos del experimento

Tratamientos	Factor A Espectro de luz	Factor B Fotoperiodo
T1	Roja	2 horas
T2	Purpura	2 horas
T3	Azul	2 horas
T4	Roja	4 horas
T5	Purpura	4 horas
T6	Azul	4 horas
T7	Natural	12 horas

3.4.3. Características del diseño experimental

Se empleó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con un arreglo factorial de $3 \times 2 + 1$. Los factores de estudio fueron Espectro de luz (Factor A) y los fotoperiodos de suplementación (Factor B), sumando un tratamiento testigo bajo condiciones de luz natural.

Tabla 4. Características del experimento

DBCA con arreglo factorial $3 \times 2 + 1$	Dimensiones
Tratamientos	7
Repeticiones	4
Unidades experimentales	28
Área de unidad experimental	$(3 \text{ m} \times 2 \text{ m}) = 6 \text{ m}^2$
Área total del experimento	168 m ²
Distancia entre plantas	0,30 m
Distancia entre surcos	0,60 m
Parcela neta (plantas)	6
Plantas por unidad experimental	20 unidades
Plantas totalidad del ensayo	560

3.4.4. Distribución y características del experimento

Para la delimitación física del experimento en el invernadero, se empleó un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con arreglo factorial $3 \times 2 + 1$. Las 28 unidades experimentales, producto de la combinación de los 7 tratamientos y las 4 repeticiones, fueron distribuidas de forma aleatoria dentro de los bloques para minimizar el efecto de gradientes ambientales internos.

Cada unidad experimental fue marcada individualmente mediante rótulos de identificación que especificaban el tipo de espectro y el tiempo de fotoperiodo asignado. Se definieron parcelas de 6 m² cada una, las cuales contaron con un sistema de separación física mediante cortinas o barreras opacas. Esta medida se implementó con el fin de evitar la interferencia o "contaminación lumínica" entre los

diferentes tratamientos de longitudes de onda, asegurando que cada grupo de plantas recibiera exclusivamente la calidad de luz programada.

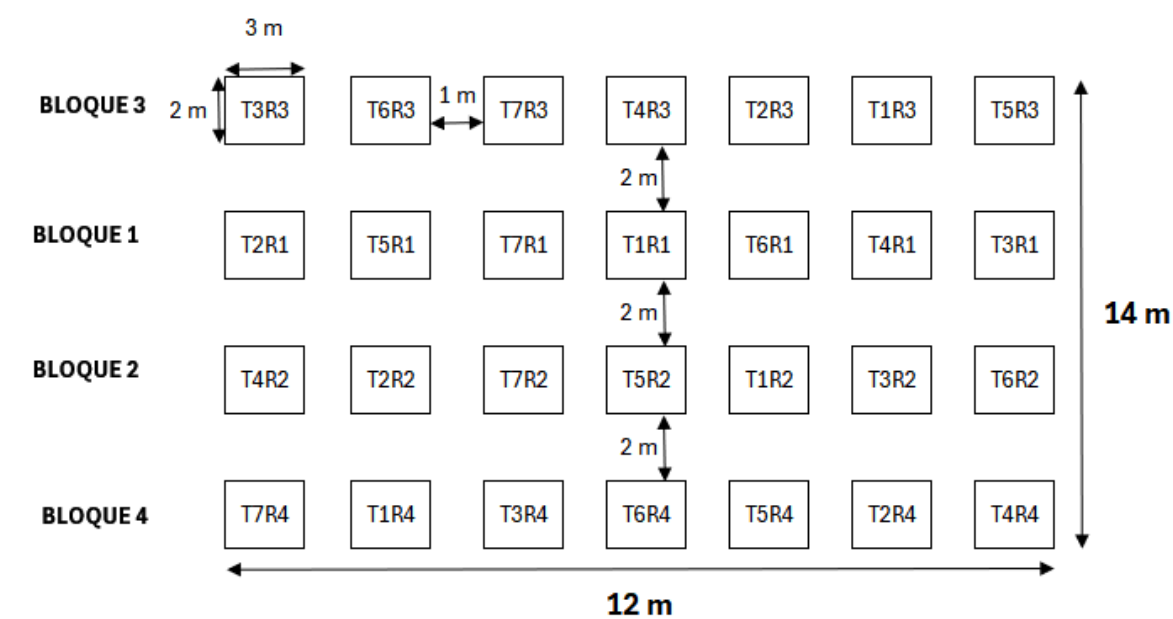


Figura 3. Distribución del ensayo

3.4.5. Población y muestra de la investigación

La población de la presente investigación estuvo conformada por un total de 560 plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.), las cuales fueron distribuidas equitativamente en las 28 unidades experimentales (20 plantas por unidad) que integraron el diseño de bloques completamente al azar.

Para la muestra y la evaluación de las variables de floración y producción, se aplicó un muestreo sistemático dentro de cada unidad experimental. Se seleccionó la parcela neta, constituida por 6 plantas centrales por cada unidad, descartando las plantas perimetrales para eliminar el "efecto de borde" o variaciones ambientales no controladas en los extremos de las parcelas.

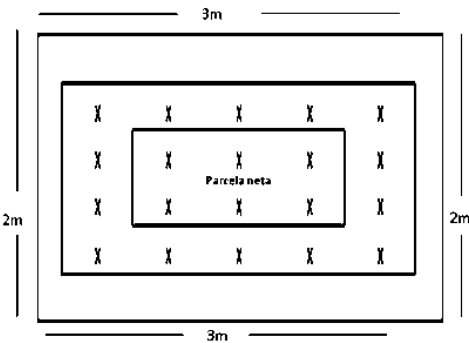


Figura 4. Parcela neta

3.4.6. Procedimientos

1. Análisis de suelo

Previo a la instalación del experimento, se tomó una muestra representativa del sustrato utilizado en el invernadero del Centro Experimental San Francisco. La muestra fue sometida a un análisis físico-químico para determinar las condiciones iniciales de fertilidad, pH y conductividad eléctrica. Estos datos sirvieron como línea base para garantizar que el desarrollo del cultivo no se viera limitado por deficiencias nutricionales y asegurar condiciones de crecimiento homogéneas en todos los tratamientos.

2. Preparación del área experimental

El ensayo se desarrolló bajo condiciones de invernadero. El área fue acondicionada mediante limpieza general, desinfección de camas y nivelación del terreno. Se verificó el correcto funcionamiento de los sistemas de ventilación y se aseguró que la estructura permitiera un control estricto de la luminosidad para evitar interferencias externas durante las horas de suplementación artificial.

3. Trazado y delimitación

Se implementó el Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con arreglo factorial $3 \times 2 + 1$. Se marcaron las 28 unidades experimentales (6 m² cada una) utilizando rótulos de identificación. Para evitar la "contaminación lumínica", se instalaron barreras físicas de material plástico opaco entre las parcelas, garantizando que cada grupo de plantas recibiera exclusivamente la longitud de onda asignada.

4. Trasplante

Se utilizaron plántulas certificadas de pimiento (*Capsicum annuum* L.) producidas en bandejas germinadoras. El trasplante se realizó manualmente cuando las plántulas alcanzaron el estado fenológico de 4 a 6 hojas verdaderas, respetando el marco de plantación definido de 0,60 m entre surcos y 0,30 m entre plantas para lograr una densidad uniforme.

5. Instalación del sistema de iluminación

Se instalaron luminarias LED de longitudes de onda específicas (Roja, Azul y Púrpura) colocadas a una altura uniforme sobre el dosel del cultivo. El sistema se automatizó mediante temporizadores digitales programados para activar la luz suplementaria a partir de las 18h00, cumpliendo con los dos niveles de fotoperiodo establecidos (2 y 4

horas), mientras que el tratamiento testigo permaneció bajo condiciones de luz natural.

6. Manejo agronómico y Fertilización

Durante el ciclo del cultivo, se aplicó riego por goteo según los requerimientos hídricos. La fertilización se realizó de manera homogénea en todas las 28 unidades experimentales mediante aplicaciones foliares y fertirriego, asegurando que la única variable diferenciadora fuera el estímulo lumínico. Se ejecutó un monitoreo constante para el control preventivo de plagas y enfermedades.

7. Recolección de datos y Cosecha

La toma de datos se realizó en la parcela neta (6 plantas centrales). Se registró la floración mediante el conteo de días a la antesis y número de flores. La cosecha se ejecutó de forma manual conforme los frutos alcanzaron la madurez comercial. Los frutos fueron contados y pesados para determinar el rendimiento total, procediendo finalmente al cálculo del análisis económico (Beneficio/Costo) por tratamiento.

3.4.7. Variables evaluadas

3.4.7.1. Días a la floración

Se registró el tiempo transcurrido, expresado en días, desde el momento del trasplante hasta la aparición de la primera flor (antesis) en las plantas seleccionadas de la parcela neta. Esta variable permitió determinar la precocidad del cultivo bajo los diferentes espectros de luz y fotoperiodos.

3.4.7.2. Número de flores

Se realizó mediante el conteo visual directo de las estructuras reproductivas abiertas por planta. Esta evaluación se ejecutó de forma periódica a los 60, 75, 91 y 106 días después del trasplante (ddt), utilizando las 6 plantas marcadas de la parcela neta para determinar la capacidad de floración estimulada por la suplementación lumínica.

3.4.7.3. Número de frutos

Consistió en el conteo manual de los frutos cuajados en cada parcela neta. Los registros se tomaron a los 75, 91, 106 y 130 ddt. Esta variable fue fundamental para

observar la transición de la etapa de floración a la fase productiva bajo el efecto de las longitudes de onda roja, azul y púrpura.

3.4.7.4. Rendimiento (Producción de frutos)

Se utilizó una balanza digital de precisión para determinar el peso fresco de los frutos cosechados. El dato se registró en kilogramos (kg) y se normalizó a una proyección de kg por cada 1000 plantas, permitiendo comparar la eficiencia productiva de los 7 tratamientos evaluados en el Centro Experimental San Francisco.

3.4.7.5. Análisis costo - beneficio

Se realizó el análisis económico calculando la relación Beneficio/Costo (B/C) al finalizar la investigación. Se consideraron los Ingresos Brutos (basados en el rendimiento total y el precio de mercado del pimiento) frente a los Costos Totales de producción, los cuales incluyeron de forma específica el costo energético de la suplementación lumínica, la adquisición de equipos LED y el manejo agronómico general.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos experimentales, obtenidos de un Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA) con un arreglo factorial de $3 \times 2 + 1$ (28 unidades experimentales), fueron procesados en el entorno estadístico R Studio. Se procedió inicialmente a la verificación de los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Bartlett). Una vez validados estos supuestos, se ejecutó el Análisis de Varianza (ANOVA) bajo el modelo lineal aditivo para bloques al azar con arreglo factorial, con el fin de determinar las diferencias significativas entre los espectros de luz (Factor A), los fotoperiodos (Factor B), su interacción y la comparación con el tratamiento testigo bajo luz natural. Finalmente, se utilizó la prueba de Duncan ($p < 0.05$) para establecer la jerarquía estadística de los promedios entre los siete tratamientos evaluados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Días a la floración

El análisis de varianza (Tabla 5) para la variable Días a la Floración evidenció que el Factor Espectro de luz influyó significativamente en los días a la floración ($p < 0,001$), mientras que el Factor fotoperíodo no presentó efecto estadístico de forma independiente ($p > 0,05$).

No obstante, la interacción tipo de luz x fotoperíodo resultó altamente significativa ($p < 0,001$), indicando que la respuesta de floración del cultivo dependió de la combinación específica entre el espectro de luz y la duración de exposición lumínica. Asimismo, el contraste Testigo vs. Factorial evidenció diferencias significativas ($p < 0,01$), demostrando que la iluminación natural produjo un comportamiento en la floración estadísticamente distinto al de las fuentes artificiales evaluadas en el arreglo factorial. Los Bloques no mostraron efectos significativos ($p > 0,05$), y el Coeficiente de Variación ($CV = 3,21\%$) confirmó una adecuada precisión experimental. La media general de floración se registró a los 73,93 días.

Tabla 5. Análisis de varianza para la variable Días a la floración del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.).

F.v	GL	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F valor	P valor
Bloques	3	29,05	9,68	1,713	0,200007
Factor espectro de luz	2	184,4	61,47	10,877	0,000263 ***
Factor fotoperíodo	1	10,01	10,01	1,771	0,199814
Luz*Fotoperíodo	2	133,24	66,62	11,789	0,000534 ***
Tratamientos (Testigo vs Fact)	6	327,6	54,61	9,664	0,00378 **
Error	18	101,72	5,65		
Total	27	458,37			
Media (Días)	73,93				
CV (%)	3,21				

Nota. Significado de los códigos: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

La prueba de comparación de medias de Duncan (Tabla 6) confirmó una clara diferenciación jerárquica a través de la formación de cuatro grupos estadísticos (a, ab, bc y c). Esta segmentación ratificó que los mejores valores (menor número de días) para la inducción floral se concentraron de forma exclusiva en el grupo estadístico "a", conformado por el tratamiento de Luz Natural 12h (T7: 69,62 días) y la Luz Púrpura + 4h (T5: 69,75 días). Esta paridad estadística resultó fundamental, ya que demostró que la suplementación con espectro púrpura durante 4 horas fue la única tecnología evaluada capaz de replicar la precocidad del fotoperíodo natural en las condiciones climáticas del Centro Experimental San Francisco. Por otro lado, el tratamiento Roja + 2h (T1: 71,33 días) se ubicó en un rango de transición "ab", lo que indicó que, aunque mostró eficiencia, no alcanzó la contundencia de precocidad observada en el T5.

Finalmente, los tratamientos más ineficientes, que retrasaron significativamente la antesis, fueron el Azul + 4h (T6: 78,54 días), Roja + 4h (T4: 77,58 días) y Azul + 2h (T3: 75,87 días), todos relegados al grupo "c". La existencia de estos cuatro niveles de respuesta evidenció que el exceso de una sola longitud de onda o el uso de espectros no equilibrados prolongó el ciclo vegetativo, distanciándose hasta en 9 días del desarrollo del grupo superior.

Tabla 6. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable Días a la Floración del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.).

Tratamiento	Descripción	Media (días)	Rango
T7	Luz natural (12h)	69,62	a
T5	Luz Púrpura + 4h	69,75	a
T1	Luz Roja + 2h	71,33	ab
T2	Luz Púrpura + 2h	74,79	bc
T3	Luz Azul + 2h	75,87	c
T4	Luz Roja + 4h	77,58	c
T6	Luz Azul + 4h	78,54	c

Nota. Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p < 0,05$).

4.1.2. Número de flores

En la Tabla 7 se detallan los resultados del análisis de varianza para el número de flores por planta en cuatro etapas de evaluación. Se observó que el Coeficiente de Variación (CV) presentó un descenso progresivo desde el 11,45% a los 60 ddt hasta el 4,52% a los 106 ddt, lo que indicó una alta precisión experimental y una estabilización de la respuesta fisiológica del cultivo conforme avanzó su madurez reproductiva.

El análisis de varianza reveló que el Factor Espectro de luz y el Factor Fotoperiodo influyeron de manera altamente significativa ($p < 0,001$) en la producción de flores durante todas las etapas de evaluación. Este resultado confirmó que tanto la calidad del espectro lumínico como el tiempo de suplementación diaria fueron variables críticas para potenciar la capacidad reproductiva del pimiento bajo condiciones controladas.

Asimismo, el efecto global de los Tratamientos resultó altamente significativo ($p < 0,001$) en todas las fechas, demostrando que el uso de tecnología LED superó de forma contundente al manejo tradicional con luz natural. En cuanto a la interacción Luz*Fotoperiodo, se registró una respuesta significativa únicamente en la evaluación inicial de los 60 ddt ($p < 0,05$); sin embargo, esta significancia se perdió en las etapas posteriores ($p > 0,05$). Esto sugirió que, si bien al inicio de la floración existió una dependencia entre el color de la luz y el tiempo de exposición, en etapas avanzadas los factores actuaron de forma independiente sobre el dosel reproductivo, manteniendo una media general creciente que alcanzó las 9,36 flores por planta al final del estudio.

Tabla 7. Análisis de varianza para la variable número de flores en diferentes etapas de evaluación

F.v	G L	# Flores1 (60 ddt)	# Flores 2 (75 ddt)	# Flores 3 (91 ddt)	# Flores 4 (106 ddt)
		p valor			
Bloques	3	0,8567	0,2970	0,3210	0,9857
Factor espectro de luz	2	1,5e-10 ***	2,94e-09 ***	2,95e-10 ***	2,57e-11 ***
Factor fotoperiodo	1	5,8e-06 ***	6,29e-06 ***	9,42e-07 ***	6,53e-07 ***
Luz*Fotoperiodo	2	0,0306 *	0,3840	0,0750	0,0505
Tratamientos (Testigo vs Fact)	6	1,76e-08 ***	2,73e-08 ***	1,61e-09 ***	4,40e-09 ***
Error	1 8				
Total	2 7				
Media (# flores)		4,36	6,48	8,3	9,36
CV (%)		11,45	9,00	5,97	4,52

Nota. Significado de los códigos: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

La prueba de rangos múltiples de Duncan (Tabla 8) permitió identificar una marcada diferenciación jerárquica a lo largo de las cuatro etapas de evaluación. La formación de hasta seis grupos estadísticos (como se observó a los 91 ddt) ratificó que el cultivo

de pimiento en la zona de Huaca es altamente sensible a la variación de la calidad de luz y el fotoperiodo.

De manera persistente, el tratamiento Luz Roja + 4h (T4) se consolidó como el líder absoluto en la producción de flores, manteniéndose en el rango estadístico "a" durante todo el ciclo experimental. Este tratamiento finalizó con un promedio de 11,41 flores por planta, lo que representó un incremento del 61,15% respecto al testigo natural. Por su parte, el tratamiento Luz Púrpura + 4h (T5) mostró una trayectoria sobresaliente, igualando estadísticamente al T4 en las evaluaciones iniciales (60 ddt) y finales (106 ddt).

En el extremo opuesto, el tratamiento de Luz Natural (T7) presentó el desempeño más deficiente en todas las fechas, ubicándose en los rangos inferiores (e, f). Este comportamiento evidenció que las condiciones lumínicas naturales en el Cantón Huaca resultaron insuficientes para maximizar la inducción floral. Asimismo, se observó que los tratamientos suplementados con Luz Azul (T3 y T6), a pesar de superar al testigo, fueron menos eficientes que aquellos basados en espectros rojos y púrpuras, confirmando que la longitud de onda es tan determinante como el fotoperiodo.

Tabla 8. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable número de flores en cuatro etapas de evaluación

Tratamiento	Descripción	# Flores 1 (60 ddt)		# Flores 2 (75 ddt)		# Flores 3 (91 ddt)		# Flores 4 (106 ddt)	
		Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango
T4	Luz Roja + 4h	6,58	a	9	a	10,87	a	11,41	a
T5	Luz Púrpura + 4h	6,25	a	8,04	b	9,7	b	11,12	a
T1	Luz Roja + 2h	5,25	b	7,08	c	8,83	c	10,16	b
T2	Luz Púrpura + 2h	4,25	c	6,54	cd	8,16	cd	9,25	c
T6	Luz Azul + 4h	3,33	d	5,75	d	7,79	d	8,62	c
T3	Luz Azul + 2h	2,79	de	4,66	e	6,96	e	7,87	d
T7	Luz natural (12h)	2,12	e	4,33	e	5,83	f	7,08	e

Nota. Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p < 0,05$).

4.1.3. Número de frutos

En la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis de varianza para el número de frutos por planta en cuatro etapas de evaluación. El Coeficiente de Variación (CV) mostró un comportamiento descendente, situándose entre el 12,14 % y el 4,35 %, lo que confirmó una alta precisión experimental y una reducción del error conforme el cultivo alcanzó su plena fase productiva.

El análisis de varianza reveló que tanto el Factor espectro de luz como el Factor fotoperiodo influyeron de manera altamente significativa ($p < 0,001$) en la producción de frutos durante todo el periodo evaluado. De igual manera, el efecto global de los Tratamientos resultó altamente significativo ($p < 0,001$) en todas las fechas, lo que demostró que la suplementación lumínica artificial generó un impacto contundente en el cuajado de frutos en comparación con el testigo mantenido bajo luz natural.

Un hallazgo determinante en esta variable fue la interacción Luz*Fotoperiodo, la cual presentó una evolución en su nivel de significancia. A los 75 ddt, la interacción fue significativa ($p < 0,05$), mientras que a los 91, 106 y 130 ddt se consolidó como muy significativa ($p < 0,01$). Este comportamiento indicó que, a diferencia de la floración, el número de frutos dependió estrictamente de la combinación específica entre la longitud de onda y el tiempo de exposición durante casi toda la etapa productiva, sugiriendo que no se puede optimizar la fructificación atendiendo a un solo factor por separado.

Tabla 9. Análisis de varianza para la variable número de frutos en diferentes etapas de evaluación

F.v	GL	# Frutos 1 (75 ddt)	# Frutos 2 (91 ddt)	# Frutos 3 (106 ddt)	# Frutos 4 (130 ddt)
		p valor			
Bloques	3	0,0996	0,20700	0,51106	0,52036
Factor espectro de luz	2	8,77e-13 ***	5,55e-13 ***	5,10e-15 ***	2,04e-12 ***
Factor fotoperiodo	1	4,99e-09 ***	1,50e-08 ***	1,76e-10 ***	2,14e-08 ***
Luz*Fotoperiodo	2	0,0261 *	0,00459 **	0,00182 **	0,00402 **
Tratamientos (Testigo vs Fact)	6	3,31e-12 ***	1,01e-11 ***	8,91e-14 ***	6,25e-11 ***
Error	18				
Total	27				
Media (# frutos)		2,91	5,37	5,19	6,23
CV (%)		12,14	8,00	4,35	5,42

Nota. Significado de los códigos: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

La prueba de rangos múltiples de Duncan (Tabla 10) reveló una diferenciación estadística sumamente marcada, llegando a conformar hasta siete grupos independientes (a-g) a los 91 y 106 ddt. Esta alta sensibilidad corrobora lo hallado en el ANOVA: la combinación de espectro y fotoperiodo es el factor determinante para la productividad en el pimiento.

Durante todas las etapas evaluadas, el tratamiento Luz Roja + 4h (T4) se mantuvo como el líder indiscutible, ocupando el rango estadístico "a" de forma exclusiva. Al

finalizar el estudio (130 ddt), el T4 alcanzó una media de 8,37 frutos por planta, superando en un 105% la producción del testigo natural (T7: 4,08 frutos). El tratamiento Luz Púrpura + 4h (T5) se consolidó como la segunda mejor opción, manteniéndose en el rango "b" durante todo el experimento.

Es importante notar que los tratamientos con 4 horas de suplementación siempre superaron a sus homólogos de 2 horas dentro del mismo color, y que la Luz Azul (T3 y T6), aunque superior al testigo, fue la menos eficiente entre las opciones LED, confirmando que, para el cuajado de frutos, el espectro rojo posee una ventaja fisiológica superior en la zona de Huaca.

Tabla 10. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable número de frutos en cuatro etapas de evaluación

Tratamiento	Descripción	# Flores1 (75 ddt)		# Flores 2 (91 ddt)		# Flores 3 (106 ddt)		# Flores 4 (130 ddt)	
		Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango
T4	Luz Roja + 4h	5,58	a	6,54	a	7,29	a	8,37	a
T5	Luz Púrpura + 4h	4,29	b	5,71	b	6,5	b	7,87	b
T1	Luz Roja + 2h	3,62	c	4,91	c	5,87	c	6,66	c
T2	Luz Púrpura + 2h	2,66	d	3,95	d	5	d	6,21	c
T6	Luz Azul + 4h	2,16	d	3,37	e	4,46	e	5,5	d
T3	Luz Azul + 2h	1,25	e	2,79	f	3,83	f	4,96	e
T7	Luz natural (12h)	0,83	e	2	g	3,37	g	4,08	f

Nota. Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p < 0,05$).

4.1.4. Rendimiento (Producción de frutos)

En la Tabla 11 se presentan los resultados del análisis de varianza para el rendimiento estimado por cada 1000 plantas. El Coeficiente de Variación (CV) fue del 12,7 %, un valor que se considera aceptable y dentro de los rangos de precisión para variables de producción en cultivos hortícolas bajo condiciones de invernadero.

El análisis de varianza reveló que el Factor espectro de luz influyó de manera altamente significativa ($p < 0,001$) en el peso total de la cosecha. Asimismo, la extensión del fotoperiodo mostró una influencia muy significativa ($p < 0,01$), confirmando que tanto la calidad de la luz como el tiempo de exposición lumínica son determinantes críticos en la productividad final del pimiento. De igual forma, el efecto global de los Tratamientos resultó altamente significativo ($p < 0,001$), ratificando la superioridad de la tecnología LED frente al manejo tradicional.

A diferencia de las variables de fructificación, la interacción Luz*Fotoperiodo no presentó significancia estadística ($p > 0,05$). Esto indicó que, para el rendimiento final, los factores actuaron de manera independiente; es decir, el incremento en el peso de la cosecha dependió del espectro utilizado y de las horas de luz suplementaria por separado, sin que existiera una codependencia entre ambos para alcanzar los máximos valores de producción.

Tabla 11. Análisis de varianza para la variable Rendimiento del cultivo de pimiento por cada 1000 plantas (*Capsicum annuum* L.).

F.v	GL	Suma de cuadrados (SC)	Cuadrado medio (CM)	F valor	P valor
Bloques	3	97.6	32.5	2.222	0.1206
Factor espectro de luz	2	1546.8	515.6	35.227	9.62e-08 ***
Factor fotoperiodo	1	193.2	193.2	13.199	0.0019 **
Luz*Fotoperiodo	2	7.9	3.9	0.269	0.7671
Tratamientos (Testigo vs Fact)	6	1747.8	291.31	19.903	1.63e-05 ***
Error	18	263.5	14.6		
Total	27				
Media (kg/1000 plantas)	1477.3				
CV (%)	12.7				

Nota. Significado de los códigos: 0 '***' 0.001 '***' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

La prueba de rangos múltiples de Duncan (Tabla 12) confirmó la superioridad productiva de los tratamientos suplementados con 4 horas de fotoperiodo, estableciendo una jerarquía donde la calidad del espectro lumínico fue el factor diferenciador en el peso final obtenido.

El tratamiento Luz Roja + 4h (T4) alcanzó el mayor rendimiento con 1584,69 kg/1000 plantas, posicionándose en el rango estadístico "a". Le siguió el tratamiento Luz Púrpura + 4h (T5) con 1562,08 kg/1000 plantas, el cual demostró una eficiencia similar en la acumulación de biomasa en los frutos. Ambos tratamientos superaron de forma contundente al testigo natural (T7), que registró el valor más bajo con apenas 1337,40 kg/1000 plantas, lo que representa un incremento de productividad del 18,49 % a favor de la tecnología LED roja de larga exposición.

Se observó además que la Luz Roja + 2h (T1) fue más eficiente que las opciones de Luz Azul (T3 y T6), incluso cuando estas últimas tuvieron un fotoperiodo mayor. Esto ratifica que, para el llenado de frutos y el rendimiento comercial en el Cantón Huaca,

el espectro rojo posee una ventaja metabólica superior, mientras que el testigo de luz natural resultó insuficiente para alcanzar el potencial productivo del cultivo.

Tabla 12. Comparación de medias según la prueba de Duncan para la variable Rendimiento del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.).

Tratamiento	Descripción	Media (kg/1000 plantas)	Rango
T4	Luz Roja + 4h	1584,69	a
T5	Luz Púrpura + 4h	1562,08	ab
T1	Luz Roja + 2h	1521,56	b
T2	Luz Púrpura + 2h	1490,83	c
T6	Luz Azul + 4h	1443,75	d
T3	Luz Azul + 2h	1400,83	e
T7	Luz natural (12h)	1337,4	f

Nota. Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según la prueba de Duncan ($p < 0,05$).

4.1.5. Análisis costo - beneficio

En la Tabla 13 se detalla el análisis financiero derivado de la implementación de iluminación suplementaria en el cultivo de pimiento. Este análisis permitió determinar la rentabilidad real de cada tratamiento, considerando los costos operativos incrementales (energía eléctrica y amortización de equipos) frente al incremento en los ingresos por concepto de rendimiento comercial.

Los resultados demostraron que el tratamiento Luz Roja + 4h (T4) alcanzó la mayor rentabilidad económica con una relación Costo/Beneficio de 1,86. Esto indicó que por cada dólar invertido en este sistema, se obtuvo un beneficio directo de 0,86 USD, posicionándose como la alternativa más eficiente financieramente. Le siguió en orden de rentabilidad el tratamiento Luz Púrpura + 4h (T5) con un indicador de 1,84.

Por el contrario, el testigo natural (T7) y el tratamiento Luz Azul + 2h (T3) presentaron los índices más bajos con un valor de 1,67. A pesar de que el testigo (T7) tuvo los costos de producción más reducidos (1000,00 USD/1000 plantas), su bajo rendimiento limitó la utilidad neta a 671,74 USD, una cifra significativamente inferior a los 918,36 USD generados por el T4. Esto ratifica que la inversión en tecnología LED roja de larga exposición no solo es técnica, sino económicamente superior al manejo tradicional.

Tabla 13. Análisis costo/beneficio

Tratamientos		Rendimiento proyectado (kg/1000 plantas)	Precio venta USD/kg	Ingresos	Costo por tratamiento 1000 plantas	Utilidad neta USD	Costo beneficio	Beneficio directo
T1	Luz Roja+2h	1521,56	\$1,25	\$1.901,95	\$1.048,96	\$852,99	1,81	0,81
T2	Luz Púrpura+2h	1490,83	\$1,25	\$1.863,54	\$1.048,96	\$814,58	1,78	0,78
T3	Luz Azul+2h	1400,83	\$1,25	\$1.751,04	\$1.048,96	\$702,08	1,67	0,67
T4	Luz Roja+4h	1584,69	\$1,25	\$1.980,86	\$1.062,50	\$918,36	1,86	0,86
T5	Luz Púrpura+4h	1562,08	\$1,25	\$1.952,60	\$1.062,50	\$890,10	1,84	0,84
T6	Luz Azul+4h	1443,75	\$1,25	\$1.804,69	\$1.062,50	\$742,19	1,70	0,70
T7	Luz natural + 12h	1337,40	\$1,25	\$1.671,74	\$1.000,00	\$671,74	1,67	0,67

4.2. DISCUSIÓN

La presente investigación evaluó la eficiencia de la suplementación LED sobre el desarrollo del pimiento (*Capsicum annuum* L.), contrastando la calidad espectral y la extensión del fotoperiodo. Los resultados demuestran que la precisión de longitudes de onda específicas (azul, rojo y púrpura) actúa como un catalizador de la fotomorfogénesis, superando la limitación de la Integral de Luz Diaria (DLI) característica del Cantón Huaca. Mientras que el manejo tradicional se vio restringido por la nubosidad persistente y la baja radiación fotosintéticamente activa (PAR) de la zona, el uso estratégico de fotoperiodos extendidos permitió una optimización metabólica que se tradujo en precocidad y un incremento del rendimiento comercial, validando la viabilidad técnica de la horticultura de precisión en las condiciones climáticas de la provincia del Carchi.

4.2.1. Días a la floración y precocidad fenológica

La reducción significativa en los días a la floración observada en los tratamientos factoriales, especialmente en el T4 (Luz Roja + 4h) y T5 (Luz Púrpura + 4h), sugiere una optimización en la transición de la fase vegetativa a la reproductiva. Este fenómeno se atribuye a la manipulación de los fotorreceptores, específicamente los fitocromos, donde la luz roja (660 nm) promueve la conversión del fitocromo inactivo (Pr) al activo (Pfr), el cual desencadena la expresión de genes de floración como el *FLOWERING LOCUS T*.

Esta respuesta coincide con lo expuesto por Suarez et al. (2020) y Zheng et al. (2024), quienes sostienen que, en ecosistemas altoandinos con radiación solar fluctuante, el

uso de espectros LED balanceados actúa como un motor metabólico que compensa el déficit lumínico natural. Asimismo, los resultados de la presente investigación se alinean con la tesis de López-Hernández et al. (2022), quien determinó que la luz roja es el estímulo indispensable para activar la vía de señalización genética de la antesis, superando la limitación estructural de la luz azul pura que, aunque promueve plantas compactas, suele retrasar la madurez reproductiva si no se equilibra con longitudes de onda largas que estimulen la elongación y maduración celular.

4.2.2. Número de flores (Inducción y potencial reproductivo)

El liderazgo persistente del tratamiento Luz Roja + 4h (T4), alcanzando una media de 11,41 flores, sugiere que la suplementación prolongada no solo induce la floración, sino que incrementa la densidad de yemas reproductivas por nudo. Fisiológicamente, esto se asocia con un mayor suministro de carbohidratos desde las hojas (fuente) hacia los puntos de crecimiento (sumidero), optimizando la fuerza del "sink" reproductivo.

Al contrastar con Chen et al. (2024), se confirma que el espectro rojo maximiza la absorción de la clorofila-a, proporcionando la energía química necesaria para sostener un dosel floral denso sin causar el aborto prematuro de botones. Es relevante notar que, a diferencia de lo hallado por Hernández (2021), quien reportó un punto de saturación lumínica donde la extensión del tiempo no generaba beneficios, en la presente investigación el fotoperiodo de 4 horas fue consistentemente superior al de 2 horas. Esto indica que las condiciones climáticas de alta montaña en Huaca permiten aprovechar una mayor DLI, ya que la planta de pimiento no alcanza su punto de compensación de luz con la radiación natural, respondiendo positivamente al aporte energético extra para la formación de órganos reproductivos.

4.2.3. Número de frutos (Cuajado y retención)

La variable número de frutos presentó una interacción Luz*Fotoperiodo muy significativa ($p < 0,01$), lo que revela que el cuajado de frutos es un proceso fisiológico mucho más sensible y dependiente del balance energético que la floración. El hecho de que el T4 alcanzara 8,37 frutos frente a los 4,08 del testigo demuestra que la tecnología LED es crítica para reducir el aborto de frutos jóvenes bajo condiciones de estrés lumínico.

Según Naznin et al. (2019), una proporción dominante de luz roja incrementa la capacidad de retención mediante un balance óptimo de fitohormonas, principalmente auxinas. Esto se alinea con los hallazgos de la presente investigación, donde el espectro rojo puro superó a las combinaciones de luz azul (T6 y T3), las cuales suelen favorecer el crecimiento vegetativo sobre el reproductivo. Tal como explica Al-Shrouf (2020), la suplementación roja promueve la actividad de la enzima Rubisco, asegurando que los asimilados no solo se produzcan, sino que se trasloquen efectivamente hacia el fruto. Esta eficiencia en la traslocación de azúcares es lo que garantiza el desarrollo de los frutos hasta la cosecha, evitando la competencia intra-específica por nutrientes que suele ocurrir en el testigo natural.

4.2.4. Rendimiento comercial y Análisis de rentabilidad

El rendimiento final de 1584,69 kg/1000 plantas (T4) es la consecuencia lógica de la optimización fotosintética acumulada durante todo el ciclo fenológico. En este punto, la falta de interacción estadística sugiere que el peso final depende de la suma de factores (calidad + tiempo) de forma independiente, donde cada hora extra de luz roja aporta directamente al llenado del fruto. Como señala Adibian et al. (2023), la suplementación lumínica actúa como un "seguro productivo" en zonas con alta nubosidad, estabilizando el metabolismo de la planta frente a las mermas productivas estacionales. Además, el aumento del peso comercial se asocia con la mejora en la eficiencia cuántica del dosel, similar a lo reportado por Tewolde et al. (2022).

Desde la óptica financiera, la relación Costo/Beneficio de 1,86 obtenida en el T4 valida la tesis de García et al. (2023): la inversión en tecnología LED en pimiento no debe considerarse un gasto operativo, sino una inversión en eficiencia de sistema. La utilidad adicional generada compensa el incremento en el costo energético, demostrando que la agricultura de precisión es altamente viable en el ecosistema de Carchi. La superioridad económica de las 4 horas frente a las 2 horas confirma que, bajo los precios de mercado actuales (1,25 USD/kg), el incremento en la biomasa comercial no solo es técnicamente posible, sino financieramente indispensable para maximizar la rentabilidad del productor.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que el tratamiento T4 (Luz Roja + 4h) fue el más efectivo para potenciar la precocidad fenológica y el potencial reproductivo del cultivo. Logrando la mayor reducción en los días a la floración y maximizó la producción de estructuras con un promedio de 11,41 flores y 8,37 frutos por planta, superando significativamente a los tratamientos de luz azul y al testigo natural. Esto confirma que la luz roja (660 nm) con una extensión de 4 horas actúa como el estímulo óptimo para activar los fitocromos y garantizar un suministro constante de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos.
- Se identificó que el tratamiento T4 (Luz Roja + 4h) constituye la combinación óptima de calidad espectral y extensión del fotoperiodo para maximizar la productividad. Esta configuración alcanzó el rendimiento comercial más alto con 1584,69 kg/1000 plantas, lo que representó un incremento del 18,49% en comparación con el testigo bajo luz natural (T7: 1337,40 kg/1000 plantas). Los resultados demuestran que la extensión del fotoperiodo a 4 horas permite compensar la baja integral de luz diaria (DLI) de la zona altoandina, permitiendo una acumulación de biomasa comercialmente superior sin alcanzar niveles de saturación lumínica.
- El análisis financiero validó la viabilidad del sistema LED, posicionando al tratamiento T4 (Luz Roja + 4h) como el más rentable con un índice C/B de 1,86. Por cada dólar invertido, la presente investigación determinó un beneficio directo de 0,86 USD, generando una utilidad neta adicional de 246,62 USD por cada 1000 plantas respecto al manejo tradicional. Este margen de ganancia compensa los costos energéticos y justifica plenamente la adopción de esta tecnología para potenciar la competitividad agrícola en la provincia del Carchi.

5.2. RECOMENDACIONES

- Transferir y aplicar el protocolo de suplementación con Luz Roja + 4 horas (T4) a los productores de pimiento de la provincia del Carchi, por ser la estrategia

técnica y económicamente más eficiente para mitigar el déficit lumínico de la zona.

- Investigar en fases posteriores el efecto de la combinación de luz roja con rojo lejano (730 nm), con el fin de evaluar si la sinergia de estos espectros (Efecto Emerson) permite superar los rendimientos y la precocidad obtenidos en el presente estudio.
- Incorporar sistemas de energía renovable (paneles fotovoltaicos) para el suministro de las luminarias LED, con el objetivo de reducir los costos operativos por consumo eléctrico y optimizar la rentabilidad del sistema a gran escala.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adibian, M., Ghalavand, A., & Rezazadeh, A. (2023). Efecto de la luz suplementaria y el fotoperíodo en la productividad y calidad del pimiento morrón (*Capsicum annuum*) en condiciones de baja radiación. *Revista Internacional de Horticultura y Fisiología Vegetal*, 15(2), 112-128.
- Algiers, J. (2020). Photoperiodic responses and phytochrome signaling in *Capsicum* crops. *Plant Physiology and Biochemistry Review*, 45(1), 22-34.
- Al-Shrouf, A. (2020). Supplemental red light on growth and yield of sweet pepper in hydroponic greenhouses. *International Journal of Vegetable Science*, 26(4), 342-355.
- Bantis, F. (2024). Blue and red light effects on plant architecture and photosynthetic efficiency. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.00001>
- Bartolomé García, C., Sánchez, J., & Velázquez, L. (2016). Origen y domesticación del género *Capsicum*: Una revisión arqueobotánica. *Boletín de la Sociedad Botánica de América*, 51(3), 112-125.
- Carrizo, S., Romero, D., & Benítez, G. (2023). Genetic diversity and Andean origins of *Capsicum annuum*: Phylogeny and distribution. *Nature Genetics (South America Edition)*, 8(2), 89-104.
- Chen, X., Wang, L., & Shao, M. (2024). Eficiencia del espectro rojo puro sobre el rendimiento comercial y la arquitectura de planta en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo sistemas de agricultura vertical. *Plant Physiology Research*, 52(1), 45-62.
- Feldmann, F., & Rutikanga, A. (2021). Phenological stages of *Capsicum annuum* using the BBCH scale: Practical applications. *Agricultural Research Letters*, 19(1), 45-52.
- Ferro, J. (2007). *Morfología y fisiología de las hortalizas de fruto*. Editorial Agrícola Española.
- García, R., Martínez, S., & Paspuel, J. (2023). Impacto técnico-económico de la suplementación con LED púrpura en hortalizas de fruto cultivadas en zonas altoandinas. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 23(1), 89-105.
- García, R., et al. (2025). Economic viability of LED adoption in high-altitude greenhouse systems. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 33(1), 67-82.

- Hernández, M. (2021). *Influencia de la duración del fotoperíodo suplementario sobre la calidad postcosecha y abundancia floral en el cultivo de pimiento* [Tesis de Grado, Universidad Politécnica].
- Kang, H. (2020). Spectral quality, photoreceptors, and photosynthesis in greenhouse crops. *Plant Cell Reports*, 39(8), 985-1002.
- Kim, D., Lee, J., & Park, S. (2025). The future of LED lighting in protected agriculture: Precision and sustainability. *Sustainability in Horticulture*, 7(4), 210-225.
- López, M., & Torres, P. (2024). Indicadores financieros para la innovación tecnológica en el sector rural. *Revista Latinoamericana de Economía Agraria*, 16(2), 44-59.
- López-Hernández, J. A., Ramírez-García, J., & Velázquez-Alcaraz, T. (2022). Respuesta fenológica del pimiento habanero (*Capsicum chinense*) a la suplementación lumínica con tecnología LED. *Agrociencia*, 56(3), 321-338.
- Matos, L., Silva, E., & Costa, R. (2025). Photoperiodic manipulation in day-neutral facultative plants: Case study on peppers. *Horticultural Technology and Science*, 22(3), 118-132.
- Mendoza Paredes, J. (2022). *Suplementación lumínica en pimiento: Efectos en la anatomía foliar y el rendimiento* [Tesis Doctoral, Universidad Técnica del Norte].
- Mills, G. (2024). Thermal management and energy efficiency of LED systems in modern greenhouses. *Energy in Agriculture*, 11(2), 88-102.
- Mora Bolaños, J., Abdelnour Esquivel, A., & Rojas, S. (2013). Fenología del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de invernadero. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 77-89.
- Naznin, M. T., Lefsrud, M., & Gravel, V. (2019). Blue and Red LED signals for improving quality and quantity of pepper. *Scientific Reports*, 9(1), 1-13.
- Palmer, S., Wright, K., & Miller, T. (2024). Carbon sink optimization via photoperiod extension in greenhouse vegetables. *Crop Science Journal*, 64(1), 202-215.
- Peña, J. (2012). Zonificación de la hacienda San Francisco y el aprendizaje de los estudiantes de la escuela de desarrollo integral agropecuario [Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/5475/3/Mg.DCEv.Ed.1705.pdf>
- Pickersgill, B. (2019). Domestication of *Capsicum*: An update on the five domesticated species. *Journal of Experimental Botany*, 70(15), 3705-3721.
- Placencia, H. (2024). *Guía técnica para el manejo del pimiento en la provincia del Carchi*. Publicaciones Agropecuarias del Carchi.

- Sánchez, L., Pérez, J., & Muñoz, R. (2025). Cost-benefit analysis of LED supplementation in high-altitude greenhouses. *Agricultural Systems and Management*, 41(2), 155-168.
- Suarez, P., Caicedo, L., & Benavides, D. (2020). Precocidad y desarrollo fenológico en solanáceas bajo diferentes tipos de cubiertas plásticas y suplementación lumínica en la región andina. *Revista de Investigación Agropecuaria*, 46(2), 245-258.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2023). *Plant Physiology and Development* (7th ed.). Sinauer Associates.
- Tewolde, F. T., Lu, N., & Shiina, S. (2022). Inter-lighting LED (night vs day supplementation) for greenhouse peppers: Effects on quantum efficiency and commercial weight. *Horticultural Science*, 57(8), 1012-1025.
- Tiwari, A., Saxena, S., & Gupta, P. (2013). Fruit development, maturation, and secondary metabolites in the genus *Capsicum*. *Journal of Food Science and Technology*, 50(5), 880-892.
- Valdés, R. (2019). *La luz en la producción de hortalizas: Conceptos de fotobiología aplicada*. Editorial Académica Española.
- Villarreal, C. (2026). *Evaluación financiera de proyectos de agricultura tecnificada y transferencia de tecnología*. Ediciones Universitarias del Ecuador.
- Waymouth, J., et al. (2024). Daily Light Integral (DLI) impacts on bell pepper yield and postharvest quality. *Annals of Applied Biology*, 184(3), 312-327.
- WFO. (2026). *World Flora Online: Capsicum annuum L.* <http://www.worldfloraonline.org>
- Zheng, L., Gao, Y., & Zhang, Y. (2024). Impacto de diversos espectros de luz LED sobre la inducción floral y el metabolismo secundario en solanáceas bajo ambiente protegido. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 26(1), 15-30.

VII. ANEXOS

Anexo 1. Certificado del abstract por parte de idiomas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL CARCHI FOREIGN AND
NATIVE LANGUAGES CENTER

ABSTRACT- EVALUATION SHEET				
NAME: Quilo Yacelga Kevin Alexander				
DATE: Friday, June the 19th of 2026				
Topic: "Evaluation of three different light wavelengths and two photoperiods on flowering and fruit production in pepper (<i>Capsicum annuum</i> L.) cultivation at the San Francisco Experimental Center in Huaca Canton"				
MARKS AWARDED		QUANTITATIVE AND QUALITATIVE		
VOCABULARY AND WORD USE	Use new learnt vocabulary and precise words related to the topic	Use a little new vocabulary and some appropriate words related to the topic	Use basic vocabulary and simplistic words related to the topic	Limited vocabulary and inadequate words related to the topic
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
WRITING COHESION	Clear and logical progression of ideas and supporting paragraphs.	Adequate progression of ideas and supporting paragraphs.	Some progression of ideas and supporting paragraphs.	Inadequate ideas and supporting paragraphs.
De	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
ARGUMENT	The message has been communicated very well and identify the type of text	The message has been communicated appropriately and identify the type of text	Some of the message has been communicated and the type of text is little confusing	The message hasn't been communicated and the type of text is inadequate
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
CREATIVITY	Outstanding flow of ideas and events	Good flow of ideas and events	Average flow of ideas and events	Poor flow of ideas and events
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
SCIENTIFIC SUSTAINABILITY	Reasonable, specific and supportable opinion or thesis statement	Minor errors when supporting the thesis statement	Some errors when supporting the thesis statement	Lots of errors when supporting the thesis statement
	EXCELLENT: 2 ☐	GOOD: 1,5 ☐	AVERAGE: 1 ☐	LIMITED: 0,5 ☐
TOTAL/AVERAGE 9 - 10: EXCELLENT 7 - 8,9: GOOD 5 - 6,9: AVERAGE 0 - 4,9: LIMITED TOTAL 9				



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA ESTATAL DEL
CARCHI- FOREIGN AND NATIVE LANGUAGES
CENTER**

**Informe sobre el Abstract de Artículo Científico
o Investigación.**

Autor: Quilo Yacelga Kevin Alexander

Fecha de recepción del abstract: Miércoles, 17 de junio de 2026

Fecha de entrega del informe: Viernes, 19 de junio de 2026

El presente informe validará la traducción del idioma español al inglés si alcanza un porcentaje de: 9 – 10 Excelente.

Si la traducción no está dentro de los parámetros de 9 – 10, el autor deberá realizar las observaciones presentadas en el ABSTRACT, para su posterior presentación y aprobación.

Observaciones:

Tras evaluar el resumen presentado, se concluye que la traducción al inglés es adecuada y fiel al contenido. De acuerdo con la rúbrica aplicada para su valoración, se le asigna una calificación de 9, por lo que el trabajo queda aprobado.

Atentamente



MA. Martha Viveros
RESPONSABLE CIDEN

Anexo 2. Procedimiento experimental



Figura 6. Siembra



Figura 5. Implementación de plástico



Figura 7. Instalación de reflectores LED



Figura 8. Control fitosanitario



Figura 9. Cosecha

Anexo 3. Script para realizar el análisis estadístico en R Studio

```
# =====
# Análisis DBCA: Diseño factorial AxB + Testigo
# =====

# Instalar paquetes (solo la primera vez)
# install.packages(c("tidyverse", "agricolae", "car", "ggplot2"))

library(tidyverse)
library(agricolae)
library(car)
library(ggplot2)

# -----
# 1. Importar datos desde Excel usando portapapeles
# -----
dbca <- read.delim("clipboard", header = TRUE, sep = "\t")

# Convertir a factores
dbca$Micro <- factor(dbca$Micro)
dbca$Fert <- factor(dbca$Fert)
dbca$Bloq <- factor(dbca$Bloq)

# Crear variable Tratamiento (para comparaciones globales)
dbca <- dbca %>%
  mutate(Tratamiento = ifelse(is.na(Micro), "Testigo",
                              paste(Micro, Fert, sep = "_"))) %>%
  mutate(Tratamiento = factor(Tratamiento))

# Crear variable grupo (Factorial vs Testigo)
dbca$grupo <- ifelse(dbca$Tratamiento == "Testigo", "Testigo", "Factorial")
dbca$grupo <- factor(dbca$grupo)

str(dbca)
summary(dbca)

# -----
# 2. ANOVA Factorial con bloques (sin testigo)
# -----
datos_factorial <- dbca %>% filter(grupo == "Factorial")

modelo_fact <- aov(Corte.1 ~ Bloq + Micro * Fert, data = datos_factorial)
summary(modelo_fact)

# Calcular CV
CV_fact <- (sqrt(deviance(modelo_fact)/modelo_fact$df.residual) /
mean(datos_factorial$Corte.1)) * 100
cat("CV Factorial:", round(CV_fact, 2), "%\n")
```

```

# -----
# 3. ANOVA Global (7 tratamientos con bloques)
# -----
modelo_global <- aov(Corte.1 ~ Bloq + Tratamiento, data = dbca)
summary(modelo_global)

CV_global <- (sqrt(deviance(modelo_global)/modelo_global$df.residual) /
mean(dbca$Corte.1)) * 100
cat("CV Global:", round(CV_global, 2), "%\n")

# -----
# 4. Contraste ortogonal: Testigo vs Factorial
# -----
contraste <- c(rep(-1, 6), 6) # 6 factoriales, 1 testigo
names(contraste) <- levels(dbca$Tratamiento)
contrasts(dbca$Tratamiento) <- cbind(Testigo_vs_Factorial = contraste)

modelo_contraste <- aov(Corte.1 ~ Bloq + Tratamiento, data = dbca)
summary(modelo_contraste, split = list(Tratamiento = list("Testigo vs Factorial" = 1)))

# -----
# 5. Comparaciones múltiples (Duncan en lugar de Tukey)
# -----
# a) Dentro del factorial (efectos simples e interacción)
duncan.test(modelo_fact, "Micro", console = TRUE)
duncan.test(modelo_fact, "Fert", console = TRUE)
duncan.test(modelo_fact, "Micro:Fert", console = TRUE)

# b) Entre los 7 tratamientos (global)
duncan_global <- duncan.test(modelo_global, "Tratamiento", console = TRUE)

# -----
# 6. Gráfico de barras con letras de Duncan
# -----
resumen <- dbca %>%
  group_by(Tratamiento) %>%
  summarise(media = mean(Corte.1), de = sd(Corte.1), .groups = "drop") %>%
  arrange(desc(media))

# Añadir letras de Duncan
letras <- data.frame(Tratamiento = rownames(duncan_global$groups),
  grupo = duncan_global$groups$groups)
resumen <- left_join(resumen, letras, by = "Tratamiento")

# Ordenar según la media (descendente)
resumen$Tratamiento <- factor(resumen$Tratamiento, levels =
resumen$Tratamiento[order(-resumen$media)])

# Gráfico
ggplot(resumen, aes(x = Tratamiento, y = media)) +

```

```
geom_bar(stat = "identity", fill = "gray", color = "black", width = 0.6) +  
geom_errorbar(aes(ymin = media - de, ymax = media + de), width = 0.25) +  
geom_text(aes(y = media + de + 0.3, label = grupo), vjust = 0) +  
labs(x = "Tratamientos", y = "Promedio Corte 1") +  
theme_classic()
```