

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

**El efecto de diferentes tipos de luz en el crecimiento de la Quinoa
(*Chenopodium quinoa* Wild.) y su respuesta a la salinidad**

Blanca Martina Bautista Zapata

Ingeniería en Biotecnología

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera en Biotecnología

Quito, 17 de mayo de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias Biológicas y Ambientales

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**El efecto de diferentes tipos de luz en el crecimiento de la Quinoa
(*Chenopodium quinoa* Wild.) y su respuesta a la salinidad.**

Blanca Martina Bautista Zapata

Nombre del profesor, Título académico

María de Lourdes Torres, PhD.

Nombre del profesor, Título académico

Milton Gordillo, MSc.

Quito, 17 de mayo de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Blanca Martina Bautista Zapata

Código: 00213314

Cédula de identidad: 1726005034

Lugar y fecha: Quito, 17 de mayo de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

RESUMEN

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) es una planta andina, altamente nutritiva que posee características de importancia agrícola como una alta variabilidad genética y la capacidad de crecer en condiciones adversas como baja temperatura, salinidad y sequía. El presente trabajo reporta el efecto que tienen diferentes luces (azul, roja y rojo lejano) sobre dos variables de crecimiento: altura y biomasa, evaluando cuatro genotipos diferentes. De igual manera se evaluó el efecto de un tratamiento de salinidad de 200 mM NaCl sobre el crecimiento de las variedades de quinoa. Para la ejecución de la investigación se utilizó un modelo anidado de tres factores y se realizó la siembra en un cuarto de cultivo adaptado con luces LED. Se encontró, que a las 12 semanas las plantas bajo el tratamiento de luz rojo lejano presentaron alturas significativamente mayores a las plantas bajo luz blanca. En términos de biomasa, las plantas bajo luz azul acumularon menos biomasa, y bajo luz roja acumularon más biomasa. Cuando se evaluó el efecto del tratamiento de salinidad de 200 mM NaCl, se evidenció una disminución significativa en la altura, tallos más cortos y un aumento en el número de hojas comparado con el grupo control de 0 mM NaCl. Por otro lado, no fue posible determinar una relación entre el efecto de la luz y la salinidad. Finalmente, este estudio proporciona una base importante sobre el efecto de diferentes luces sobre el crecimiento de la quinoa para futuras investigaciones que evalúen otras características importantes de esta planta como por ejemplo el rendimiento y la producción de grano.

Palabras clave: Quinoa, *Chenopodium quinoa*, crecimiento, luces, salinidad, biomasa

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) is a highly nutritious Andean plant with agriculturally important characteristics such as high genetic variability and the ability to grow under adverse conditions such as low temperature, salinity, and drought. The present work reports the effect of different lights (blue, red, and far-red) on two growth variables: plant height and biomass, considering four different genotypes. In addition, the effect of salinity treatment (200 mM NaCl) on the growth of quinoa varieties was also evaluated. For the execution of the research, a nested three-factor model was used, and planting was carried out in a culture room adapted with LED lights. It was found that at 12 weeks the plants under the far-red light treatment presented significantly greater heights than the plants under white light. In terms of biomass, plants under blue light accumulated less biomass, whereas plants under red light accumulated more biomass. When the effect of the 200 mM NaCl salinity treatment was evaluated, there was a significant decrease in height, shorter stems, and an increase in the number of leaves compared to the 0 mM NaCl control group. Additionally, it was not possible to determine a correlation between the effect of light and salinity. Finally, this study provides an important basis on the effect of different lights on quinoa growth for future research, for evaluating other important traits in this species, such as grain yield and grain characteristics.

Key words: Quinoa, *Chenopodium quinoa*, growth, light, salinity, biomass

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	12
1.1	Características, propiedades y distribución	12
1.2	Importancia en la industria	12
1.3	Relevancia del estudio de la luz en la agricultura.....	13
1.4	Impacto de la salinidad en la agricultura	14
1.4.1	Mecanismos de tolerancia a la salinidad en <i>Chenopodium quinoa</i> Wild.....	14
1.5	Efecto de la luz sobre la salinidad	15
1.6	Objetivo del estudio	15
2	MÉTODOS	16
2.1	Material vegetal y condiciones de cultivo	16
2.2	Tratamiento de luz.....	16
2.3	Tratamiento de sal.....	16
2.4	Diseño experimental	17
2.5	Parámetros evaluados	17
2.5.1	Parámetros morfológicos.....	17
2.5.2	Cálculo de parámetros de crecimiento	18
2.6	Corrección espacial de datos	18
2.7	Análisis estadísticos	18
3	RESULTADOS.....	19
3.1	Análisis de altura	19
3.2	Biomasa seca total (biomasa).....	20
3.3	Proporción de peso de tallos y hojas	21
3.3.1	Tallos.....	21
3.3.2	Hojas.....	21
3.4	Área foliar específica (SLA).....	21
4	DISCUSIÓN.....	23

4.1	Evaluación del efecto del tratamiento de luces sobre el crecimiento de <i>Chenopodium quinoa</i> Wild.	23
4.1.1	Influencia del tratamiento de luz rojo lejano en el crecimiento	23
4.1.1.1	<i>Altura</i>	23
4.1.1.2	<i>Efecto sobre las hojas</i>	23
4.1.2	Influencia del tratamiento de luz roja en el crecimiento	24
4.1.2.1	<i>Efecto sobre las hojas</i>	24
4.1.2.2	<i>Biomasa</i>	25
4.1.3	Influencia del tratamiento de luz azul en el crecimiento	25
4.1.3.1	<i>Biomasa</i>	25
4.2	Evaluación del efecto del tratamiento de salinidad sobre el crecimiento de <i>Chenopodium quinoa</i> Wild.	25
4.3	Limitaciones y perspectivas futuras	26
5	CONCLUSIONES	27
6	TABLAS	28
7	FIGURAS	30
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
9	ANEXOS	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de varianza (ANOVA) para altura, y área foliar específica (SLA) y su nivel de significancia (valor p: códigos de significancia * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$), observaciones (n=128).	28
Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA) para las variables de biomasa, proporción de peso de tallos (SWR), y peso de hojas (LWR), con su respectivo nivel de significancia (valor p: códigos de significancia * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$), observaciones registradas (n=128).....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre la altura de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.	30
Figura 2. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0mM, 200mM) sobre la biomasa de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.	31
Figura 3. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre la proporción de peso de tallos (SWR) de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.	32
Figura 4. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre la proporción de peso de hojas (LWR) de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.	33
Figura 5. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre el índice de área específica foliar (SLA) de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.....	34

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Promedios de variables de crecimiento con su error estándar.....	41
--	----

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Características, propiedades y distribución

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild) es un cultivo originario de los Andes, y en la última década ha adquirido importancia global por sus características nutricionales y su adaptabilidad climática (Fletcher, 2016). Este cultivo es capaz de crecer en altitudes tan bajas como a nivel del mar y tan altas como por sobre los 4.000 msnm. Además, se adapta a temperaturas mínimas de -1°C, sequías, y salinidad (Bazile et al., 2015). El centro de origen de esta especie es cercano al Lago Titicaca en Bolivia, desde el cual se distribuyó al norte y sur de los Andes, hasta Colombia y Chile, respectivamente (Jaramillo Roman, 2021). La distribución de esta especie y su capacidad para prosperar en condiciones ambientales diversas son un reflejo de la alta variabilidad genética con la que cuenta (Adolf et al., 2012).

1.2 Importancia en la industria

La quinoa pertenece al género *Chenopodium* y a la familia Amaranthaceae (Jaramillo Roman, 2021). Tiene crecimiento herbáceo, alcanza alturas de 0.4 a 3 m, tiene un ciclo de vida de entre 150 y 220 días, y sus semillas son comestibles (Jaramillo Roman, 2021; Rosentrater & Evers, 2018). Una característica distintiva, en comparación con los cereales, es que la quinoa posee 15% de proteína, contiene todos los aminoácidos esenciales, y un alto porcentaje de lisina (Romano & Ferranti, 2019). Posee alrededor de un 30-70% de almidón, tiene fibra, vitaminas B, C y E, minerales como Ca y Mg, flavonoides, y no contiene gluten por lo que es apto para celíacos (Romano & Ferranti, 2019). Su impacto positivo en la alimentación llevó a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) a declarar al año 2013 como el Año Internacional de la Quinoa, y considerar a este alimento como “uno de los granos del siglo XXI” (Scanlin & Lewis, 2017).

El nombre quinoa, deriva del quechua boliviano y significa “grano madre” y ha sido un alimento fundamental para pueblos originarios. Ahora es considerado un superalimento y se

consume mundialmente (Scanlin & Lewis, 2017). En cuanto a su producción global, el 90% se centra en Bolivia y Perú, al que Ecuador contribuye con un 1% (Scanlin & Lewis, 2017). El resto de la producción se divide en países de Europa, Norteamérica y Asia (Romano & Ferranti, 2019).

1.3 Relevancia del estudio de la luz en la agricultura

Las plantas usan la luz como fuente de energía para la fotosíntesis y como señalización para iniciar procesos biológicos como la germinación, crecimiento, o formación de frutos (Neo et al., 2022). El rango en el que se produce una fotosíntesis óptima se conoce como Radiación Fotosintética Activa (PAR, por sus siglas en inglés) y está entre los 400 nm y 700 nm; rango en el que las plantas absorben de manera muy eficiente la luz azul y roja (Neo et al., 2022). Sin embargo, la luz es un espectro de ondas amplias, y las plantas están adaptadas para receptor tanto la luz visible, así como la región UV-A/B del espectro lumínico (Neo et al., 2022). Cuentan con 5 fotorreceptores que son proteínas que detectan longitudes de onda específica. Los fitocromos son fotorreceptores que receptan la luz roja y rojo lejano, y están ligados a los cambios en la morfología de las plantas (fotomorfogénesis), crecimiento de tallos, inicio de la floración y germinación (Paik & Huq, 2019). Por otro lado, los criptocromos y fototropinas son los fotorreceptores que detectan la luz azul, y regulan el crecimiento, la apertura y el engrosamiento de las hojas, mientras que los fotorreceptores UVR8 detectan la luz UV-A/B y están involucrados en el fototropismo (Paik & Huq, 2019).

Las diferentes longitudes de onda tienen un efecto sobre el crecimiento de las plantas. Por ejemplo, cuando la lechuga es cultivada en invernadero y con un suplemento de luz roja, azul y verde, aumenta su producción (Tarakanov et al., 2022; Razzak et al., 2022); y en las fresas se ha conseguido aumentar su nivel de azúcar con un incremento en la luz roja (Jiang et al., 2023). Estos experimentos se realizan bajo condiciones controladas como invernaderos.

1.4 Impacto de la salinidad en la agricultura

Uno de los tipos de estrés abiótico que afecta a la agricultura globalmente es la salinidad. En 2016, un estudio determinó que aproximadamente el 10% del suelo disponible para la agricultura estaba afectado por la salinidad; en el 2021 esta cifra ascendió a 33%, y de continuar así, se estima que para el 2050 afecte al 50% (Daliakopoulos et al., 2016; Hossain, 2019; Chele et al., 2021). La salinidad del suelo se refiere al incremento de sales, cationes de sodio (Na^+) y pH, alterando los ciclos naturales, bioquímicos, hidrológicos y de erosión de la Tierra. Consecuentemente, se acumulan iones que interfieren con la capacidad de retención de agua en el suelo, y que esta se pierda por evaporación (Daliakopoulos et al., 2016). Algunas de las causas de la salinización son: el excesivo uso de fertilizantes, el uso de agua inadecuada para riego, la contaminación industrial de aguas subterráneas, entre otras (Chele et al., 2021).

La acumulación de sales en el suelo limita la absorción de agua, y afecta el crecimiento de la planta puesto que reduce la fotosíntesis, inhibe la expansión del tejido vegetal, se acumulan iones no compatibles, y especies reactivas de oxígeno, causando daño oxidativo y la muerte celular (Jaramillo Roman, 2021). Por estas razones es importante investigar las adaptaciones desarrolladas por las plantas halotolerantes, como la quinoa, al incremento de solutos en el medio.

1.4.1 Mecanismos de tolerancia a la salinidad en *Chenopodium quinoa* Wild.

La quinoa exhibe una notable variabilidad genética, y se han documentado algunos genotipos capaces de crecer en ambientes de alta salinidad, similares a los niveles del agua de mar (40 dS m^{-1} o 500 mM) (Iqbal et al., 2020). Para adaptarse a estas condiciones extremas, la quinoa ha desarrollado varios mecanismos que le permiten mantener la estabilidad celular. Entre estos mecanismos se encuentra la producción de vesículas de sal que recubren las hojas, la acumulación de solutos compatibles como el potasio (K^+), la compartimentalización de iones de sodio (Na^+) y cloro (Cl^-), y el engrosamiento de las hojas (Iqbal et al., 2020).

1.5 Efecto de la luz sobre la salinidad

El estudio del efecto de diferentes tipos de luces sobre estreses abióticos como la salinidad ha ganado relevancia porque permite identificar alteraciones en los patrones de crecimiento que resulten de interés en la agricultura (Miao et al., 2024). Esto, a causa de que la luz influye sobre la morfología, capacidad fotosintética, producción de fruto y rendimiento de la planta (Miao et al., 2024). De igual manera también influye sobre la respuesta a estrés abiótico. Wang y colaboradores (2021), encontraron que exponer plantas de tomate a luz rojo lejano en invernadero mejoraban su tolerancia a la salinidad a través de la disminución de especies reactivas de oxígeno. Es por eso que conocer el efecto que tienen diferentes tipos de luces sobre el crecimiento de la quinoa, y su efecto bajo tratamientos de salinidad, puede aportar con información valiosa sobre el rol de la luz y su regulación al estrés.

1.6 Objetivo del estudio

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar cómo las longitudes de onda azul, roja y rojo lejano afectan el crecimiento de la quinoa, utilizando cuatro genotipos: dos variedades comerciales Tunkahúan (Ecuador) y Bastille (Holanda), y dos accesiones de la colección de quinoa de la Universidad San Francisco de Quito: 5_Chimborazo y 1_Cañar. Adicionalmente, este estudio busca evaluar la respuesta de estos genotipos al ser sometidos a un tratamiento de salinidad.

2 MÉTODOS

2.1 Material vegetal y condiciones de cultivo

El material vegetal corresponde a dos accesiones comerciales, Tunkahúan proveniente de Ecuador, y Bastille proveniente de Holanda; y a dos accesiones que forman parte del banco de germoplasma de la Universidad San Francisco de Quito: 5_Chimborazo, y 1_Cañar. El sustrato escogido para la siembra fue vermiculita. Las semillas fueron sembradas en macetas de 0,6 L con vermiculita humedecida con 120 mL de agua. La siembra se realizó en el cuarto de cultivo del Laboratorio de Biotecnología Vegetal USFQ. El cuarto de cultivo está equipado con 4 lámparas LED, que conforman 4 cubículos delimitados por cortinas que bloquean la entrada de luz externa. La temperatura se mantuvo en un rango 20-23°C y un fotoperiodo 16/8. El riego a partir de la primera semana se hizo con una solución fertilizante Hoagland 0.5x y se regó con 60 mL de la solución 3 veces por semana.

2.2 Tratamiento de luz

Se usaron luces LED ELIXIA del fabricante Heliospectra que dispone de cuatro longitudes de onda manipulables: luz azul (450 nm), luz roja (660 nm), luz rojo lejano (735 nm) y un canal para luz blanca; y es posible conseguir radiación de 1140 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para cada longitud de onda (Heliospectra, s.f). Se ajustó la intensidad lumínica y se establecieron los siguientes tratamientos de combinación de luces: luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) + luz roja ($100 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) + luz azul ($100 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); y luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) + luz rojo lejano ($100 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

2.3 Tratamiento de sal

Los tratamientos de salinidad empleados fueron 0 mM NaCl y 200 mM NaCl, a los que se les denominó control y tratamiento. La solución de salinidad para el tratamiento se preparó con 128.568 g de NaCl en 10 L de agua destilada con Hoagland 0.5x para llegar a la concentración establecida. El riego con el tratamiento salino inició a partir de la cuarta semana y se mantuvo hasta la semana 12 (última semana del experimento). Se midió la conductividad

semanalmente para controlar y mantener la concentración de sal en 200 mM.

2.4 Diseño experimental

En el presente estudio se utilizó un diseño Split-split-plot, el cual consiste en un sistema anidado con tres unidades experimentales denominadas “whole plots” (Montgomery et al., 2013). Cada “whole plot” corresponde a un tratamiento lumínico con cuatro niveles: luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$); luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) + luz roja ($100 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$); luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) + luz azul ($100 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$); luz blanca ($200 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) + luz rojo lejano ($100 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Dentro de cada “whole plot” existe un “split” que corresponde a un tratamiento de salinidad con cloruro de sodio (NaCl) con dos niveles: 0 mM y 200 mM. Además, dentro de cada “split”, se incluye un segundo “split” que representa al genotipo utilizado y cuenta con cuatro niveles correspondientes a los cuatro genotipos: Tunkahuán, Bastille, 5_Chimborazo y 1_Cañar. Este diseño experimental se eligió porque: (1) los factores se mantuvieron constantes en el experimento y (2) los factores están anidados o contenidos dentro de otro factor, permitiendo así un mayor control sobre las variaciones experimentales. El experimento consta de cuatro réplicas, por lo que se obtuvo un total de 128 observaciones, que se calculan multiplicando los niveles de cada factor por las réplicas ($4 \times 2 \times 4 \times 4$).

2.5 Parámetros evaluados

2.5.1 Parámetros morfológicos.

A partir del día de la siembra, las plantas crecieron durante 12 semanas. Al finalizar la semana 12, las plantas fueron sacrificadas para la toma de datos morfológicos. El experimento tuvo esta duración puesto que el enfoque principal era analizar las diferencias producidas durante el periodo de desarrollo vegetativo. De cada una de las plantas se recolectó dos hojas primordiales, que son las dos primeras hojas que nacen en la punta de la planta. Se registró una foto de las hojas primordiales junto a una regla, y fondo blanco. Las fotos fueron procesadas con el software ImageJ para determinar su área. Para el registro de peso, cada planta se separó

en tallo, hojas, y de ser el caso, inflorescencia. Cada parte se guardó en fundas de papel y se pesó de manera individual y en conjunto para tener el peso fresco individual y total de plantas. Las fundas pasaron por un secador por 72 horas a 60°C. Finalizado el secado, se realizó un segundo pesaje para determinar el peso seco.

2.5.2 Cálculo de parámetros de crecimiento

La Proporción de Peso de Hojas (LWR) y el Área Foliar Específica (SLA) se determinaron con las fórmulas: $LWR = \frac{\text{Peso seco de hojas}}{\text{Peso seco total}}$ y $SLA = \frac{\text{Área de hojas}}{\text{Peso seco de hojas}}$ (Sudhakar et al., 2016). Mientras que la Proporción de Peso de Tallos (SWR) se calculó de la siguiente forma $SWR = \frac{\text{Peso seco de tallos}}{\text{Peso seco total}}$ (Shiple, 2002).

2.6 Corrección espacial de datos

Para compensar la heterogeneidad de la intensidad lumínica debido a la distribución espacial, se utilizó el paquete `statgenSTA` disponible en RStudio ((Rodríguez-Álvarez et al., 2018). Con este paquete, es posible corregir la variabilidad no deseada asociada a la disposición espacial, y asegurar que las diferencias observadas en el estudio se deban a los factores experimentales y no a variaciones aleatorias en la iluminación.

2.7 Análisis estadísticos

Los análisis fueron realizados con RStudio. Los datos corregidos se sometieron a la prueba de Levene para comprobar igualdad de varianzas, y la prueba de Shapiro-Wilk para el supuesto de normalidad. Para determinar la significancia de los datos se utilizó un análisis de varianza (ANOVA). La prueba post-hoc utilizada fue Tukey-HSD y se consideró un nivel de significancia $p > 0.05$ (Montgomery et.al 2013).

3 RESULTADOS

3.1 Análisis de altura

La luz tuvo un efecto significativo ($p < 0.001$) sobre la altura de las plantas en la semana 12. Cuando se analiza el efecto de los tratamientos de luces en condiciones control (0 mM NaCl), se observa en la Figura 1, que bajo luz rojo lejano las plantas tienen una altura promedio mayor que bajo luz blanca. Las plantas expuestas a luz rojo lejano registraron una altura promedio general de 57.54 ± 3.03 cm, y de este grupo el genotipo Tunkahúan registró una altura promedio de 73.09 ± 4.31 cm. Respecto a la luz blanca, el promedio general de altura fue de 37.22 ± 3.06 cm, y bajo esta luz el genotipo Tunkahúan tuvo una altura promedio de 50.06 ± 2.24 cm. Si se comparan ambas alturas, se denota que un mismo genotipo creció casi 20 cm más bajo luz rojo lejano que bajo luz blanca. En la Figura 1, es posible observar las diferencias en altura de cada genotipo con el tratamiento de luz.

El segundo factor de interés a analizar es el tratamiento de salinidad, el cual tuvo un efecto significativo ($p < 0.001$) sobre la altura de las plantas. De manera general, como se observa en Figura 1, las plantas registran alturas menores comparadas con el grupo control (0 mM NaCl). Cuando se analiza el promedio general del tratamiento de salinidad, la altura de ese grupo es de 30.11 ± 1.45 cm, mientras que las plantas del grupo control tienen una altura de 40.79 ± 2.88 cm. Si se analiza la altura por tratamiento de luces considerando únicamente al grupo de plantas que estuvo expuesto al tratamiento de salinidad (200 mM NaCl), solamente la luz rojo lejano y roja tienen una diferencia significativa con respecto a la luz blanca. En luz rojo lejano, bajo condiciones de salinidad, se registró una altura promedio de 39.10 ± 3.12 cm, en luz roja un promedio de 22.31 ± 0.86 cm y en luz blanca 29.76 ± 0.02 cm. Siendo luz rojo lejano la que, de manera general produce plantas más altas y luz roja plantas más pequeñas cuando se compara con el control.

El tercer factor analizado fue el genotipo. En la Tabla 1, se observa que existen significativas al comparar las alturas ($p < 0.001$). No obstante, no existe una tendencia evidente porque en cada tratamiento de luz los genotipos se comportan de distinta manera. Por ejemplo, en condiciones control el genotipo Tunkahúan registra la mayor altura (50.06 ± 2.24 cm) dentro del grupo de luz blanca, mientras que en luz azul, el genotipo 5_Chimborazo es significativamente más alto (42.26 ± 2.70 cm).

3.2 Biomasa seca total (biomasa)

La biomasa seca total es la segunda variable de crecimiento analizada, y corresponde a la suma del peso seco de las hojas y tallos. En primer lugar, los tratamientos de luces tienen un efecto significativo ($p < 0.001$) sobre la biomasa producida bajo condiciones control. De estos, los únicos tratamientos de luces que tienen diferencias significativas con respecto a la luz blanca son: luz azul y luz roja. En luz azul, las plantas tuvieron un promedio general de biomasa de 1193.6 ± 192.7 mg, en luz roja de 2680.9 ± 218.1 mg, mientras que en luz blanca registraron un promedio general de 1610.4 ± 117.9 mg. De esta manera, es posible notar que de manera general, las plantas acumularon más biomasa bajo luz roja y menos bajo luz azul en comparación con luz blanca.

Cuando se toma en cuenta el tratamiento de salinidad de 200 mM NaCl, no se evidenciaron diferencias significativas ($p = 0.818$) con respecto a las plantas en control. Al comparar la biomasa producida bajo tratamiento de salinidad (1751.52 ± 265.88 mg) con la biomasa producida en condiciones control (1748.67 ± 196.1 mg), se observan valores similares. En cuanto al factor genotipo, éste tiene un efecto significativo sobre las diferencias observadas ($p < 0.001$), para cada genotipo en cada tratamiento de luz. Por ejemplo, el genotipo 5_Chimborazo, bajo tratamiento de salinidad y luz rojo lejano, registró la biomasa más baja (583.24 ± 92.6 mg) en comparación al resto de genotipos, como se denota en Figura 2 y Anexo 1.

3.3 Proporción de peso de tallos y hojas

Al no detectar diferencias significativas entre el tratamiento de salinidad (200 mM NaCl) y control (0 mM NaCl) en la variable de biomasa, se analizó la distribución de biomasa en tallos y hojas. Para esto se determinó el ratio de biomasa seca de tallos (biomasa seca de tallos dividida para biomasa seca total, (SWR)), y también el ratio de biomasa seca de hojas (biomasa seca de hojas dividida para biomasa seca total, (LWR)). (Tabla 2).

3.3.1 Tallos.

En condiciones control (0 mM NaCl), las plantas bajo el tratamiento de luz rojo lejano generaron valores mayores de SWR que bajo luz blanca. Cuando se toma en cuenta el tratamiento de salinidad (200 mM NaCl), de manera general se observa una reducción en la proporción de biomasa de tallos (Figura 3). Bajo condiciones de salinidad (200 mM NaCl), las plantas bajo la luz rojo lejano tienen valores de SWR mayores que luz blanca, mientras que las plantas que crecieron bajo luz azul presentan valores de SWR menores.

3.3.2 Hojas.

En condiciones de control (0 mM NaCl), las plantas bajo el tratamiento de luz rojo lejano generaron menos biomasa destinada a hojas con respecto a las plantas bajo luz blanca. Cuando se toma en cuenta el tratamiento de salinidad (200 mM NaCl), de manera general hay más biomasa destinada a hojas en plantas del grupo tratamiento con respecto al grupo control (Figura 4). Dentro del grupo de tratamiento de salinidad, se puede destacar, que las luces rojo y azul tienen valores mayores de LWR respecto a la luz blanca mientras que la luz rojo lejano presenta valores menores para esta variable.

3.4 Área foliar específica (SLA)

Este índice indica la relación entre la superficie (área) y peso seco de cada hoja. Un mayor valor de SLA, indica que las hojas poseen una amplia superficie y que son más livianas y delgadas; mientras que valores menores de SLA indican que la superficie es menor y las hojas

son más pesadas y gruesas. Bajo condiciones control (0 mM NaCl), existen diferencias entre los tratamientos de luces ($p < 0.001$). Las plantas bajo luz rojo lejano presentan valores de SLA mayores con respecto a las plantas en luz blanca, mientras que las plantas bajo luz azul presentan valores menores de SLA. Cuando se introduce el tratamiento de salinidad (200 mM NaCl), se observan diferencias significativas con respecto al grupo control (0 mM NaCl), pues las plantas que crecieron bajo tratamiento salino presentaron menores valores de SLA (Figura 5).

4 DISCUSIÓN

4.1 Evaluación del efecto del tratamiento de luces sobre el crecimiento de *Chenopodium quinoa* Wild.

4.1.1 Influencia del tratamiento de luz rojo lejano en el crecimiento

4.1.1.1 Altura

En este estudio se investigó el efecto de diferentes tipos de luces sobre el crecimiento de la quinoa y su respuesta a la salinidad. Los datos revelan que la luz tiene un efecto significativo en las variables de crecimiento analizadas. En primer lugar, se encontró que en condiciones control (0 mM NaCl); bajo la luz rojo lejano las plantas registran alturas más altas comparadas con la luz blanca. Estos resultados concuerdan con lo reportado en otros estudios. En un estudio enfocado en un cultivo de maíz, se observó que a medida que incrementa la luz rojo lejano, los cultivares generaron una mayor altura (Dubois & Brutnell, 2011). Al ser una longitud de onda amplia que normalmente se encuentra en mayor proporción en ambientes asociados a sombra, la luz rojo lejano despierta cambios morfológicos denominados “Síndrome de Huida de Sombra”. Entre los principales cambios, se produce elongación de los tallos, para generar plantas más altas que puedan competir por la disponibilidad de luz (Meijer et al., 2022).

El aumento de altura de las plantas de quinoa bajo la luz rojo lejano, puede estar relacionada con la estimulación de fitocromos, que son fotorreceptores sensibles a esta longitud de onda (Tan et al., 2022). Estudios previos realizados en *Arabidopsis thaliana* encontraron que la luz rojo lejano promueve la interacción entre fitocromos y proteínas reguladoras de la fotomorfogénesis como SPA y COP1 (Sheerin et al., 2015). Cuando la cantidad de luz rojo lejano aumenta, se favorece la traslocación de la proteína COP1 al núcleo de la célula, la cual, mediante ubiquitinación degrada factores de transcripción como HY5, un inhibidor de la elongación de tallos, favoreciendo así la generación de plantas más altas (Kong et al., 2024).

4.1.1.2 Efecto sobre las hojas

Por otro lado, en hojas se ha reportado que la luz rojo lejano puede promover o inhibir

la formación de tejido foliar (Kong et al., 2024). En el presente estudio se evidenció que las plantas bajo luz rojo lejano producen menos biomasa de hojas en comparación con las plantas bajo luz blanca ($p < 0.001$). Esto es consistente con una investigación en uvas en invernadero, en la que al incorporar luz rojo lejano al cultivo se registró una menor acumulación de biomasa en las hojas y una reducción en el área foliar específica, comparada con las plantas en luz blanca (Kong et al., 2024). No obstante, en *C. quinoa* no se detectó una disminución significativa en el área foliar específica. Por el contrario, bajo luz rojo lejano, para dos de los cuatro genotipos analizados, se obtuvieron valores de área foliar específica mayores con respecto a las plantas que crecieron bajo luz blanca, mostrando hojas con superficies significativamente más amplias ($p < 0.001$) (Figura 5). Esto concuerda con una investigación en soya, en la que el área de las hojas aumentó en 1.13 veces al ser expuestas a luz rojo lejano (Yang et al., 2020). No obstante, en este estudio los resultados sugieren que el efecto principal de la luz rojo lejano sobre el crecimiento de las plantas de quinoa principalmente aumenta de la altura de las plantas.

4.1.2 Influencia del tratamiento de luz roja en el crecimiento

4.1.2.1 Efecto sobre las hojas

Bajo luz roja y condiciones control (0 mM NaCl), se observó un incremento significativo en la biomasa total ($p < 0.001$) (Figura 2) y una disminución del SLA en comparación con los resultados de luz blanca ($p < 0.01$) (Figura 5). La disminución en los valores de SLA implican hojas más gruesas, con menos superficie (Greenwood et al., 2017). Al comparar el efecto de la luz roja en cultivos de trigo, se observó resultados similares: engrosamiento de hojas. Esto sucede porque la luz roja está en el rango de longitudes de onda en el que la planta es fotosintéticamente activa y para hacer un uso eficiente de la cantidad de esta luz, estas plantas producen más tejido foliar (Zheng & Van Labeke, 2017). En específico, más tejido de empalizada, para minimizar la dispersión de la luz y más tejido esponjoso, para capturar mejor la luz. Este fenómeno también ha sido reportado en las plantas: *F. benjamina* y *S. speciosa* cuando fueron cultivadas en invernadero (Zheng & Van Labeke, 2017).

4.1.2.2 Biomasa

Respecto a la biomasa, un estudio con la planta *Hypericum perforatum* expuesta a diferentes concentraciones de luz roja y cultivada en invernadero se encontró que una concentración del 100% de esta luz resultaba en un aumento significativo de la biomasa seca, de metabolitos secundarios y una reducción en el tiempo de floración (Karimi et al., 2022). Otros estudios asocian a la absorción de luz roja con la formación de fitohormonas como la giberelina, por lo que un aumento en esta longitud de onda puede promover la formación de tejido vegetal (Reid et al., 1968). No obstante, el efecto de la luz roja depende de la especie de planta y en el caso de la quinoa, los resultados sugieren que contribuye a la acumulación de biomasa.

4.1.3 Influencia del tratamiento de luz azul en el crecimiento

4.1.3.1 Biomasa

Las plantas de quinoa expuestas al tratamiento de luz azul mostraron una reducción significativa ($p < 0.01$) en la acumulación de biomasa seca total en comparación con las plantas en luz blanca, en condiciones control (0 mM NaCl). En un estudio de lechugas expuestas a luz azul, se encontró que bajo esta longitud de onda el crecimiento foliar se redujo y por lo tanto también disminuyó la acumulación de biomasa (Meijer et al., 2022). De manera similar, otro estudio en tomates reportó que con un tratamiento de luz azul, la biomasa en hojas disminuyó y se produjeron tallos más cortos (Kaiser et al., 2019). Una posible explicación a la disminución de la biomasa es que la luz azul, al tener una longitud de onda más corta que la luz roja, no posee la misma eficiencia fotosintética y, por lo tanto, no promueve el desarrollo del tejido foliar (Kaiser et al., 2019). No obstante, el mecanismo exacto detrás de este fenómeno no está del todo dilucidado, y varía según la especie de planta utilizada.

4.2 Evaluación del efecto del tratamiento de salinidad sobre el crecimiento de *Chenopodium quinoa* Wild.

Los resultados del tratamiento de salinidad (200 mM NaCl) indican que la altura de las

plantas de este grupo fue generalmente menor en comparación con las plantas que crecieron bajo condiciones control (0 mM de NaCl). Además, se observó que bajo el tratamiento de salinidad se produjeron tallos más cortos, y un mayor número de hojas en comparación con las plantas del grupo control. Estudios similares apoyan estos hallazgos, puesto que se ha reportado que el incremento de sales en el sustrato reduce la altura de la planta *Oenanthe javanica*, cuando crece en invernadero con concentraciones de 200 mM de NaCl (Kumar et al., 2021). Los cambios morfológicos indican una respuesta de adaptación frente al tratamiento salino porque al aumentar la cantidad de solutos se limita la absorción de nutrientes y agua causando estrés osmótico en la planta (Kumar et al., 2021). Las plantas bajo salinidad optan por un metabolismo más conservador y enfocan su energía en mantener la homeostasis (Kumar et al., 2021).

4.3 Limitaciones y perspectivas futuras

Esta investigación se planteó determinar si existe una relación entre el efecto de diferentes tipos de luces y las respuestas al tratamiento de salinidad en la quinoa. Aunque se observan diferencias causadas por el tratamiento de luces en el grupo de plantas expuestas a 200 mM de NaCl, los efectos de las diferentes longitudes de onda no son significativos y no explican la respuesta a la salinidad. Adicionalmente, el presente estudio se enfocó en describir el efecto de la luz sobre el crecimiento y no sobre el rendimiento y producción de grano. Se encontró plantas con mayor altura bajo luz rojo lejano, pero eso no implica una menor o mayor producción de semillas. Cuando se evalúa el crecimiento de una planta bajo estrés, se espera que alguno de los tratamientos evaluados le permita mantener la misma producción que en condiciones normales (Jaramillo Roman, 2021). Es por esto que, a pesar de los cambios en parámetros de crecimiento, no es posible asociar a la luz con la mitigación del efecto de la salinidad, y por eso se necesita continuar con la investigación y evaluar la producción de grano.

5 CONCLUSIONES

La presente investigación se centró en evaluar el efecto de diferentes tipos de luces en el crecimiento de *Chenopodium quinoa* Wild., y su respuesta a la salinidad. Bajo la luz rojo lejano existió un mayor crecimiento en altura en comparación con la luz blanca en condiciones control (0 mM NaCl). Bajo luz rojo lejano la cantidad de hojas disminuyó, y el área foliar específica aumentó; mientras que en luz roja se encontraron hojas con áreas pequeñas, pero más gruesas. Con luz azul se acumuló menor cantidad de biomasa total en comparación con la luz blanca en condiciones control. Respecto a los tratamientos de salinidad, se encontró que bajo este tipo de estrés, las plantas reducen su altura y engrosan sus hojas. No fue posible establecer una relación entre el efecto de la luz y la respuesta a la salinidad en este estudio. Para una comprensión más completa de esta interacción, se recomienda evaluar parámetros adicionales como la producción de grano. Aunque nuestros resultados proporcionan una base sólida para futuras investigaciones, es fundamental continuar explorando el efecto de diferentes longitudes de onda de luz en el crecimiento de la quinoa, ya que esto podría conducir al desarrollo de soluciones innovadoras para abordar el problema creciente de la salinidad en el suelo, y desarrollar variedades comerciales que respondan mejor a condiciones de salinidad del suelo.

6 TABLAS

Tabla 1. Análisis de varianza (ANOVA) para altura, y área foliar específica (SLA) y su nivel de significancia (valor p: códigos de significancia * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$), observaciones (n=128).

Factor	Variables	Altura	SLA
	Niveles	Valor p	Valor p
<i>Luz</i>	Blanca	$<2 \times 10^{-16}$ ***	1.47×10^6 ***
	Roja		
	Rojo Lejano		
	Azul		
<i>Tratamiento de salinidad</i>	0 mM	$<2 \times 10^{-16}$ ***	0.001698 **
	200 mM		
<i>Genotipo</i>	Tunkahuan	$<2 \times 10^{-16}$ ***	4.45×10^5 ***
	Bastille		
	1_Canar		
	5_Chimborazo		
<i>Interacción entre factores</i>	Luz x Tratamiento de salinidad	2.65×10^6 ***	0.000106 ***
	Luz x genotipo	3.18×10^{10} ***	9.59×10^7 ***
	Genotipo x tratamiento de salinidad	0.00413 **	0.021 *
	Luz x tratamiento de salinidad x genotipo	6.07×10^5 ***	0.18

Tabla 2. Análisis de varianza (ANOVA) para las variables de biomasa, proporción de peso de tallos (SWR), y peso de hojas (LWR), con su respectivo nivel de significancia (valor p: códigos de significancia * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$), observaciones registradas (n=128).

Factor	Variables	Biomasa	SWR	LWR
	Niveles	Valor p	Valor p	Valor p
<i>Luz</i>	Blanca	1.29x10 ¹⁰ ***	1.53x10 ¹¹ ***	6.68x10 ¹⁵ ***
	Roja			
	Rojo Lejano			
	Azul			
<i>Tratamiento de salinidad</i>	0 mM	0.818	9.09x10 ¹¹ ***	7.12x10 ¹⁵ ***
	200 mM			
<i>Genotipo</i>	Tunkahuan	1.10x10 ⁸ ***	<2x10 ¹⁶ ***	2.05x10 ⁷ ***
	Bastille			
	1_Canar			
	5_Chimborazo			
<i>Interacción</i>	Luz x Tratamiento de salinidad	0.00119 **	0.000884 ***	0.0242 *
	Luz x genotipo	0.00106 **	5.27x10 ⁷ ***	0.1137
	Genotipo x tratamiento de salinidad	0.13144	1.17x10 ⁹ ***	0.4945
	Luz x tratamiento de salinidad x genotipo	0.00347 ***	0.000134 ***	0.425

7 FIGURAS

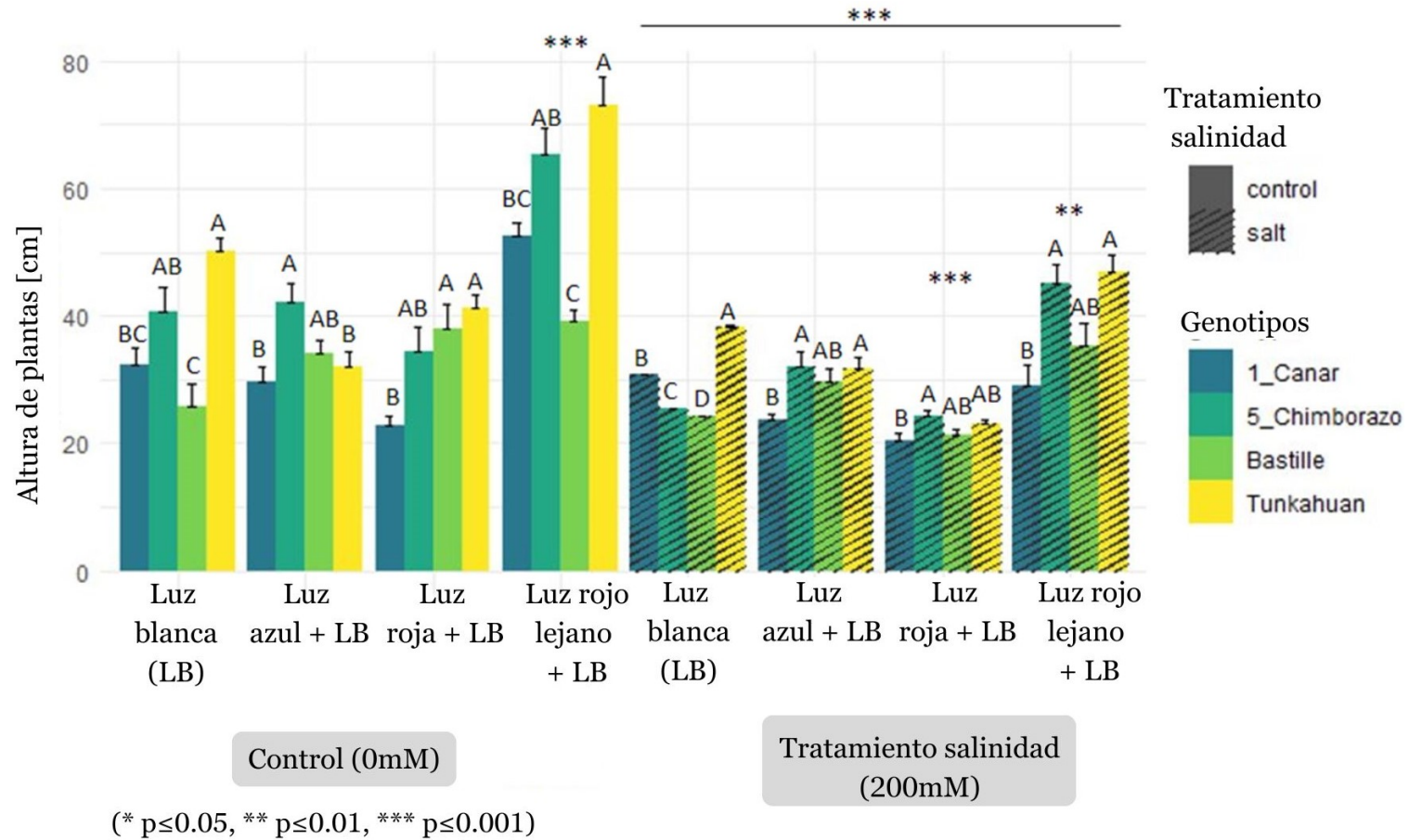


Figura 1. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre la altura de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.

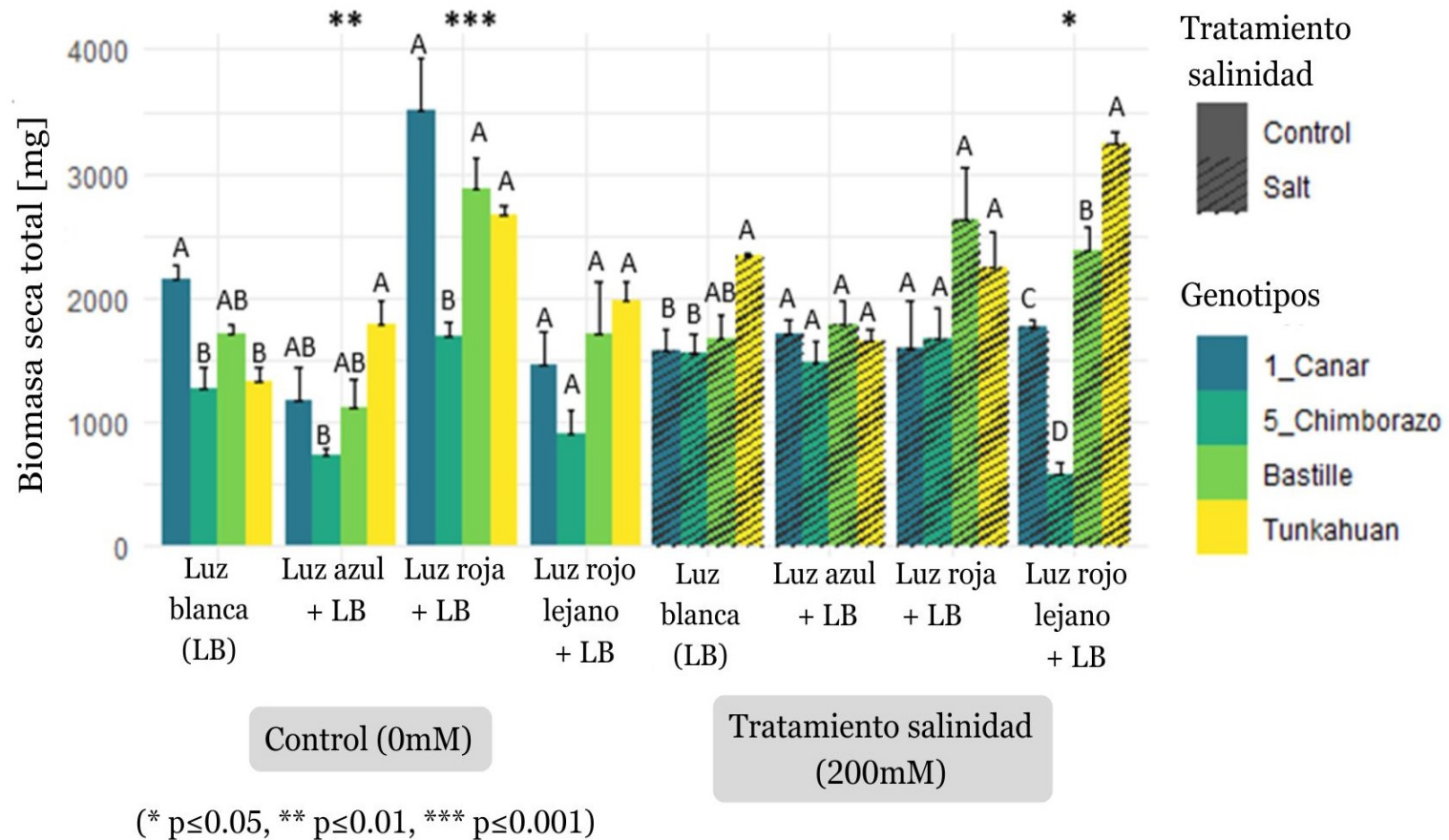


Figura 2. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0mM, 200mM) sobre la biomasa de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.

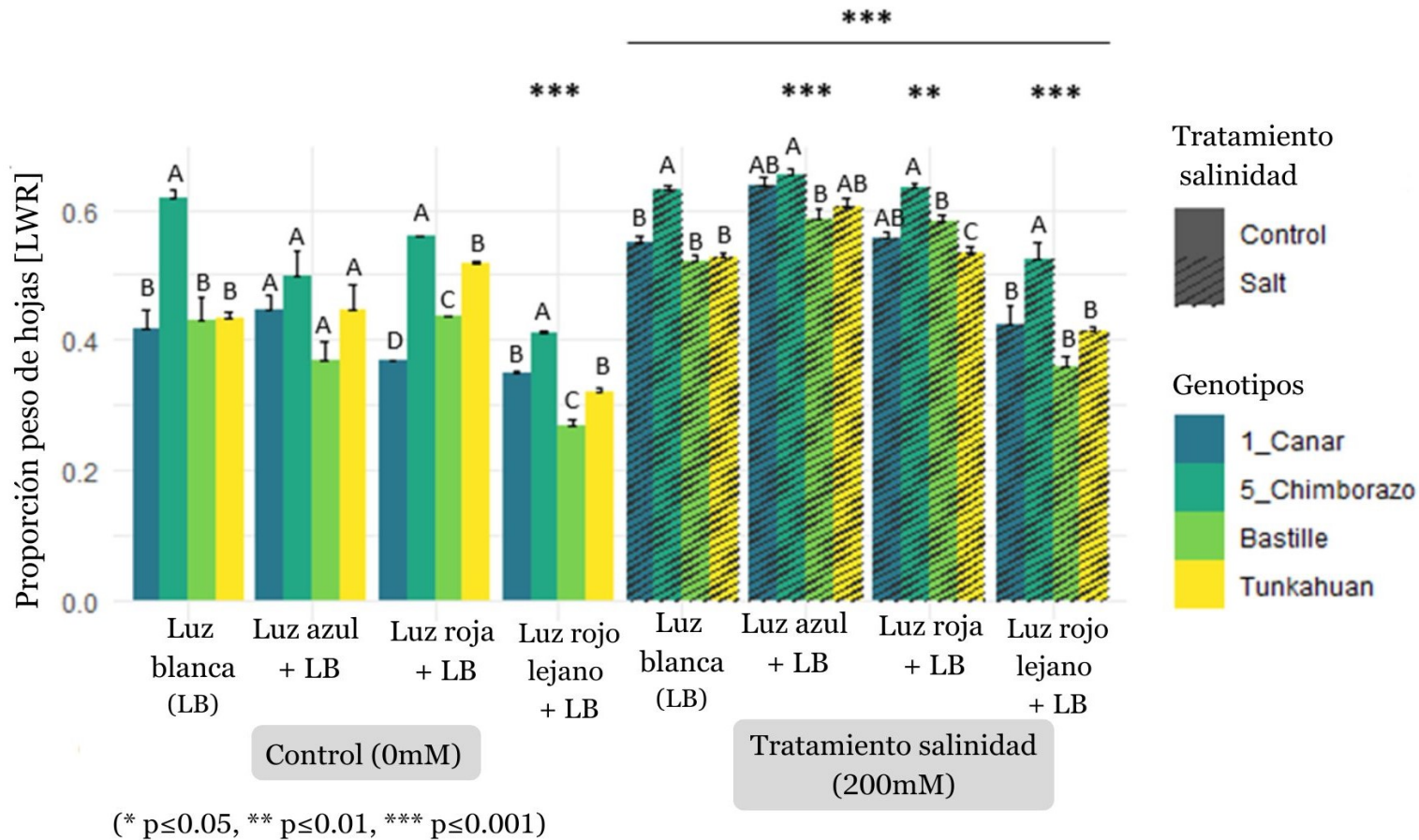


Figura 3. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre la proporción de peso de hojas (LWR) de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.

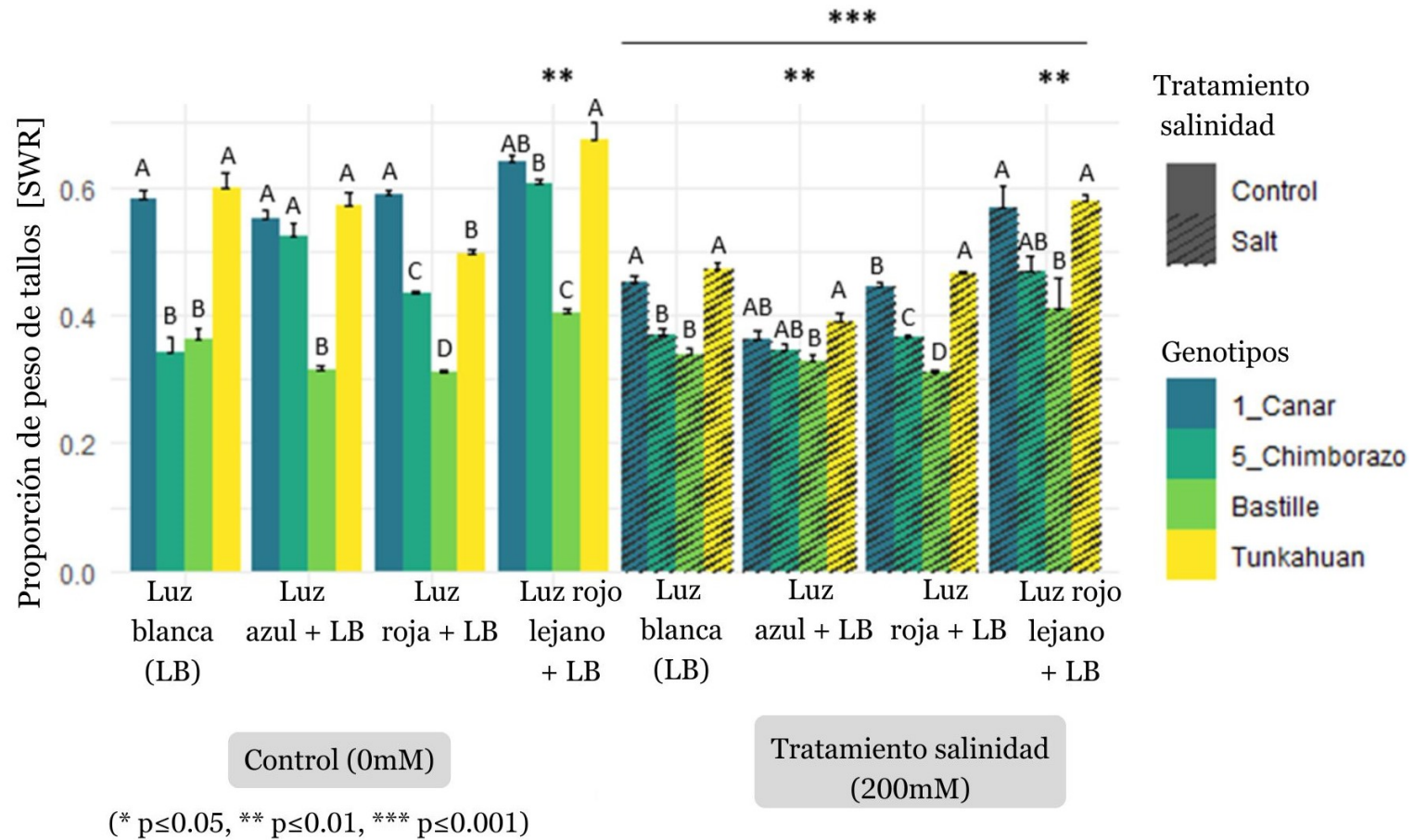
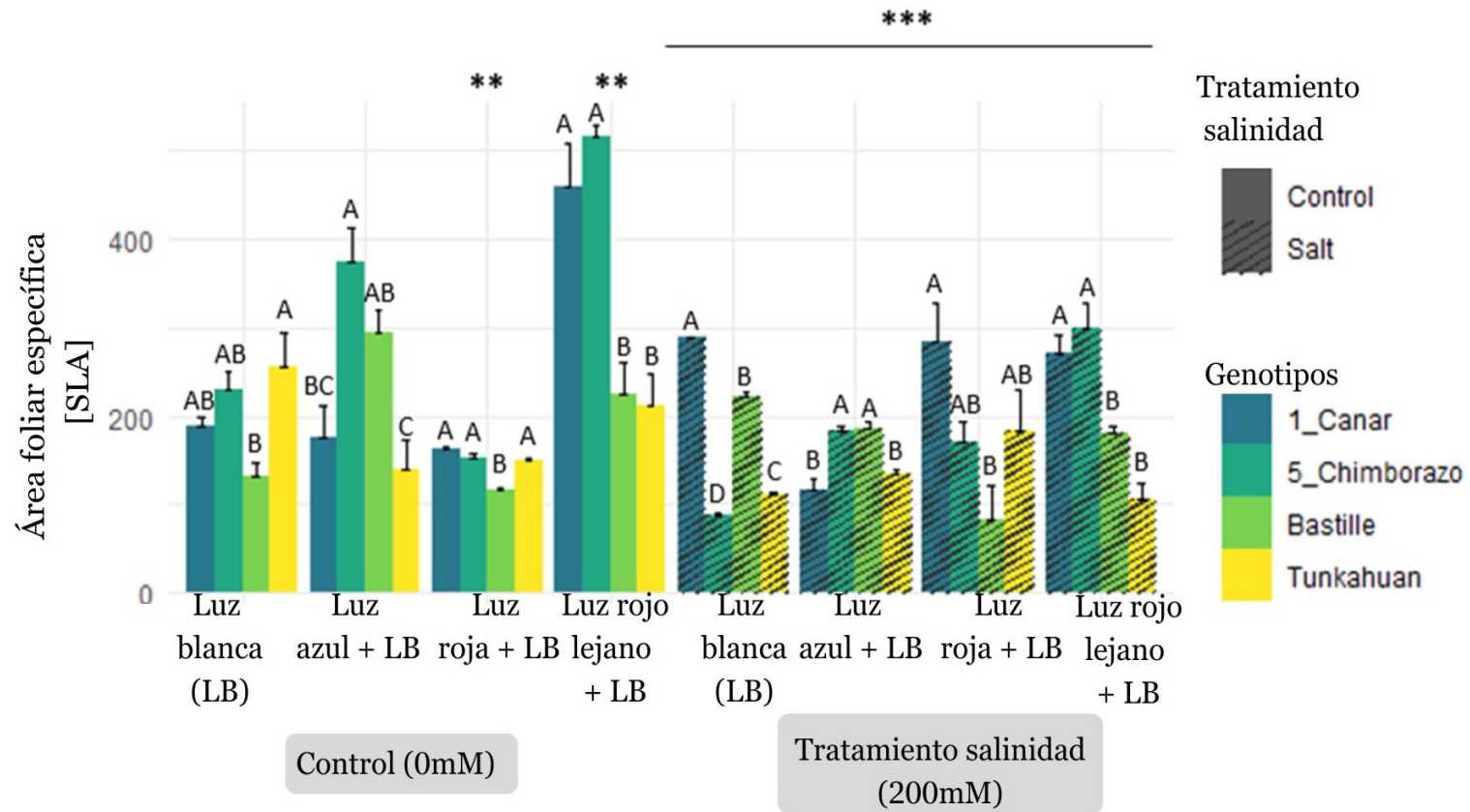


Figura 4. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre la proporción de peso de tallos (SWR) de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12



(* $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$)

Figura 5. Gráfico de barras del efecto de cuatro diferentes tipos de luz y dos tratamientos de sal (0 mM, 200 mM) sobre el índice de área específica foliar (SLA) de cuatro genotipos de quinoa registrada en la semana 12.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Motos, J. R., Ortuño, M. F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M. J., & Hernandez, J. A. (2017). Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms. *Agronomy*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy7010018>
- Adolf, V. I., Shabala, S., Andersen, M. N., Razzaghi, F., & Jacobsen, S.-E. (2012). Varietal differences of quinoa's tolerance to saline conditions. *Plant and Soil*, 357(1-2), 117-129. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1133-7>
- Bazile, D., Bertero, D., & Nieto, C. (2015). *State of the art report on quinoa around the world in 2013. Roma (Italy): FAO, 589 p.*
- Chele, K. H., Tinte, M. M., Piater, L. A., Dubery, I. A., & Tugizimana, F. (2021). Soil Salinity, a Serious Environmental Issue and Plant Responses: A Metabolomics Perspective. *Metabolites*, 11(11), 724. <https://doi.org/10.3390/metabo11110724>
- Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of The Total Environment*, 573, 727-739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
- Dubois, P. G., & Brutnell, T. P. (2011). Topology of a maize field: Distinguishing the influence of end-of-day far-red light and shade avoidance syndrome on plant height. *Plant Signaling & Behavior*, 6(4), 467-470. <https://doi.org/10.4161/psb.6.4.14305>
- ELIXIA. (s. f.). *Heliospectra*. Recuperado 14 de abril de 2024, de <https://heliospectra.com/led-grow-lights/elixia/>
- Fletcher, R. J. (2016). Pseudocereals, Overview. En *Reference Module in Food Science*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.00039-1>
- Gangappa, S. N., & Botto, J. F. (2016). The Multifaceted Roles of HY5 in Plant Growth and

Development. *Molecular Plant*, 9(10), 1353-1365.

<https://doi.org/10.1016/j.molp.2016.07.002>

Greenwood, S., Ruiz-Benito, P., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Kitzberger, T., Allen, C. D., Fensham, R., Laughlin, D. C., Kattge, J., Bönisch, G., Kraft, N. J. B., & Jump, A. S. (2017). Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area. *Ecology Letters*, 20(4), 539–553.

<https://doi.org/10.1111/ele.12748>

Hossain, M. (2019). *Present Scenario of Global Salt Affected Soils, its Management and Importance of Salinity Research. 1*, 1-3.

Iqbal, S., Shahzad, B., Sohail Saddiq, M., Yang, A., Akhtar, S., & Jacobsen, S.-E. (2020). The Extraordinary Salt Tolerance of Quinoa. En *Emerging Research in Alternative Crops*. Springer International Publishing. <https://www.springerprofessional.de/en/the-extraordinary-salt-tolerance-of-quinoa/18382560>

Jaramillo Roman, V. (2021). *Salt tolerance strategies of the ancient Andean crop quinoa* [Wageningen University]. <https://doi.org/10.18174/535249>

Jiang, L., Chen, X., Gu, X., Deng, M., Li, X., Zhou, A., Suo, M., Gao, W., Lin, Y., Wang, Y., He, W., Li, M., Chen, Q., Zhang, Y., Luo, Y., Wang, X., Tang, H., & Zhang, Y. (2023). Light Quality and Sucrose-Regulated Detached Ripening of Strawberry with Possible Involvement of Abscisic Acid and Auxin Signaling. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/ijms24065681>

Karimi, M., Ahmadi, N., & Ebrahimi, M. (2022). Red LED light promotes biomass, flowering and secondary metabolites accumulation in hydroponically grown *Hypericum perforatum* L. (cv. Topas). *Industrial Crops and Products*, 175, 114239.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114239>

Kong, J., Zhao, Y., Fan, P., Wang, Y., Xu, X., Wang, L., Li, S., Duan, W., Liang, Z., & Dai,

- Z. (2024). Far-red light modulates grapevine growth by increasing leaf photosynthesis efficiency and triggering organ-specific transcriptome remodelling. *BMC Plant Biology*, 24(1), 189. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04870-7>
- Kumar, S., Li, G., Yang, J., Huang, X., Ji, Q., Liu, Z., Ke, W., & Hou, H. (2021). Effect of Salt Stress on Growth, Physiological Parameters, and Ionic Concentration of Water Dropwort (*Oenanthe javanica*) Cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 12, 660409. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.660409>
- Meier, L. (s. f.). *Chapter 7 Split-Plot Designs | ANOVA and Mixed Models*. Recuperado 14 de abril de 2024, de <https://people.math.ethz.ch/~meier/teaching/anova/split-plot-designs.html>
- Meijer, D., Meisenburg, M., van Loon, J. J. A., & Dicke, M. (2022). Effects of low and high red to far-red light ratio on tomato plant morphology and performance of four arthropod herbivores. *Scientia Horticulturae*, 292, 110645. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110645>
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8. ed). Wiley.
- Neo, D. C. J., Ong, M. M. X., Lee, Y. Y., Teo, E. J., Ong, Q., Tanoto, H., Xu, J., Ong, K. S., & Suresh, V. (2022). Shaping and Tuning Lighting Conditions in Controlled Environment Agriculture: A Review. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2(1), 3-16. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.1c00241>
- Olmos, E., Jimenez-Perez, B., Roman-Garcia, I., & Fernandez-Garcia, N. (2024). Salt-tolerance mechanisms in quinoa: Is glycinebetaine the missing piece of the puzzle? *Plant Physiology and Biochemistry*, 206, 108276. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108276>
- Paik, I., & Huq, E. (2019). Plant photoreceptors: Multi-functional sensory proteins and their signaling networks. *Seminars in cell & developmental biology*, 92, 114-121.

<https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2019.03.007>

Razzak, Md. A., Asaduzzaman, Md., Tanaka, H., & Asao, T. (2022). Effects of supplementing green light to red and blue light on the growth and yield of lettuce in plant factories. *Scientia Horticulturae*, 305, 111429.

<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111429>

Rodríguez-Álvarez, M. X., Boer, M. P., van Eeuwijk, F. A., & Eilers, P. H. C. (2018). Correcting for spatial heterogeneity in plant breeding experiments with P-splines. *Spatial Statistics*, 23, 52-71. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2017.10.003>

Romano, A., & Ferranti, P. (2019). Sustainable Crops for Food Security: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). En *Encyclopedia of Food Security and Sustainability* (pp. 399-402). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22573-0>

Rosentrater, K. A., & Evers, A. D. (2018). Introduction to cereals and pseudocereals and their production. En *Kent's Technology of Cereals* (pp. 1-76). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100529-3.00001-3>

Scanlin, L., & Lewis, K. A. (2017). Quinoa as a Sustainable Protein Source. En *Sustainable Protein Sources* (pp. 223-238). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802778-3.00014-7>

Sheerin, D. J., Menon, C., zur Oven-Krockhaus, S., Enderle, B., Zhu, L., Johnen, P., Schleifenbaum, F., Stierhof, Y.-D., Huq, E., & Hiltbrunner, A. (2015). Light-Activated Phytochrome A and B Interact with Members of the SPA Family to Promote Photomorphogenesis in Arabidopsis by Reorganizing the COP1/SPA Complex. *The Plant Cell*, 27(1), 189-201. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.134775>

Shipley, B. (2002). Trade-offs between net assimilation rate and specific leaf area in determining relative growth rate: Relationship with daily irradiance. *Functional Ecology*, 16(5), 682-689. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00672.x>

Smart LED light solutions for Greenhouse—Heliospectra. (s. f.). Recuperado 14 de abril de 2024, de <https://heliospectra.com/>

Sudhakar, P., Latha, P., & Reddy, P. V. (2016a). Chapter 3—Plant growth measurements. En P. Sudhakar, P. Latha, & P. V. Reddy (Eds.), *Phenotyping Crop Plants for Physiological and Biochemical Traits* (pp. 27-31). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804073-7.00003-X>

Sudhakar, P., Latha, P., & Reddy, P. V. (2016b). Chapter 4—Photosynthetic rates. En P. Sudhakar, P. Latha, & P. V. Reddy (Eds.), *Phenotyping Crop Plants for Physiological and Biochemical Traits* (pp. 33-39). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804073-7.00004-1>

Tan, T., Li, S., Fan, Y., Wang, Z., Ali Raza, M., Shafiq, I., Wang, B., Wu, X., Yong, T., Wang, X., Wu, Y., Yang, F., & Yang, W. (2022). Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity. *The Crop Journal*, *10*(2), 300-309.
<https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.007>

Tarakanov, I. G., Tovstyko, D. A., Lomakin, M. P., Shmakov, A. S., Sleptsov, N. N., Shmarev, A. N., Litvinskiy, V. A., & Ivlev, A. A. (2022). Effects of Light Spectral Quality on Photosynthetic Activity, Biomass Production, and Carbon Isotope Fractionation in Lettuce, *Lactuca sativa* L., Plants. *Plants*, *11*(3), 441.
<https://doi.org/10.3390/plants11030441>

Wang, J., Zhen, J., Hu, W., Chen, S., Lizaga, I., Zeraatpisheh, M., & Yang, X. (2023). Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective. *International Soil and Water Conservation Research*, *11*(3), 429-454.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>

Yang, F., Liu, Q., Cheng, Y., Feng, L., Wu, X., Fan, Y., Raza, M. A., Wang, X., Yong, T., Liu, W., Liu, J., Du, J., Shu, K., & Yang, W. (2020). Low red/far-red ratio as a signal

promotes carbon assimilation of soybean seedlings by increasing the photosynthetic capacity. *BMC Plant Biology*, 20(1), 148. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02352-0>

Zheng, L., & Van Labeke, M.-C. (2017). Long-Term Effects of Red- and Blue-Light Emitting Diodes on Leaf Anatomy and Photosynthetic Efficiency of Three Ornamental Pot Plants. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00917>

9 ANEXOS

Anexo 1. Promedios de variables de crecimiento con su error estándar.

Luz	Tratamiento salinidad	Genotipo	Biomasa	Altura	Área foliar específica
<i>Azul</i>	0mM	1 Cañar	1159.71 ± 283.6	42.26 ± 2.7	175.64 ± 35.5
<i>Azul</i>	0mM	5 Chimborazo	722.64 ± 66.2	29.73 ± 2.2	375.70 ± 37.1
<i>Azul</i>	0mM	Bastille	1114.29 ± 224.8	34.04 ± 2.2	294.30 ± 26.3
<i>Azul</i>	0mM	Tunkahuan	1777.66 ± 196.3	31.90 ± 2.4	140.09 ± 32.9
<i>Azul</i>	200mM	1 Cañar	1702.22 ± 110.5	31.99 ± 2.3	116.03 ± 12.6
<i>Azul</i>	200mM	5 Chimborazo	1106.70 ± 387.5	23.57 ± 1.1	183.09 ± 6.0
<i>Azul</i>	200mM	Bastille	1343.44 ± 466.4	29.61 ± 2.1	185.51 ± 7.5
<i>Azul</i>	200mM	Tunkahuan	1239.71 ± 418.0	31.86 ± 1.6	134.69 ± 5.7
<i>Rojo Lejano</i>	0mM	1_Cañar	1449.00 ± 271.1	65.39 ± 4.0	344.81 ± 119.8
<i>Rojo Lejano</i>	0mM	5_Chimborazo	899.12 ± 189.1	52.63 ± 2.0	517.13 ± 11.5
<i>Rojo Lejano</i>	0mM	Bastille	1712.08 ± 409.5	39.05 ± 1.8	225.85 ± 34.1
<i>Rojo Lejano</i>	0mM	Tunkahuan	1978.83 ± 152.8	73.09 ± 4.3	211.96 ± 35.3
<i>Rojo Lejano</i>	200mM	1_Cañar	1756.27 ± 57.1	45.06 ± 3.1	203.31 ± 69.3
<i>Rojo Lejano</i>	200mM	5_Chimborazo	583.24 ± 92.6	28.99 ± 3.5	298.63 ± 29.3
<i>Rojo Lejano</i>	200mM	Bastille	2386.51 ± 183.6	35.34 ± 3.5	180.07 ± 9.1
<i>Rojo Lejano</i>	200mM	Tunkahuan	3235.76 ± 93.5	47.02 ± 2.4	106.76 ± 16.4
<i>Blanca</i>	0mM	1 Cañar	2148.58 ± 110.9	40.64 ± 3.8	189.17 ± 8.5
<i>Blanca</i>	0mM	5 Chimborazo	1270.14 ± 175.1	32.27 ± 2.6	172.27 ± 59.1
<i>Blanca</i>	0mM	Bastille	1698.84 ± 79.8	25.90 ± 3.6	98.28 ± 34.4
<i>Blanca</i>	0mM	Tunkahuan	1324.41 ± 106.1	50.06 ± 2.2	190.76 ± 69.3
<i>Blanca</i>	200mM	1 Cañar	1577.86 ± 157.2	25.55 ± 0.0	216.94 ± 72.3
<i>Blanca</i>	200mM	5 Chimborazo	1548.62 ± 151.5	30.82 ± 0.0	87.54 ± 2.1
<i>Blanca</i>	200mM	Bastille	1664.34 ± 200.0	24.24 ± 0.0	222.84 ± 3.1
<i>Blanca</i>	200mM	Tunkahuan	1754.46 ± 585.2	38.41 ± 0.0	111.61 ± 2.1
<i>Roja</i>	0mM	1 Cañar	3509.37 ± 416.4	33.52 ± 5.0	163.00 ± 3.3
<i>Roja</i>	0mM	5 Chimborazo	1682.63 ± 116.4	22.75 ± 1.5	153.16 ± 3.7
<i>Roja</i>	0mM	Bastille	2869.46 ± 253.4	38.03 ± 3.8	86.08 ± 28.8
<i>Roja</i>	0mM	Tunkahuan	2662.03 ± 86.0	41.31 ± 2.0	149.01 ± 3.4
<i>Roja</i>	200mM	1 Cañar	1585.67 ± 389.7	24.25 ± 1.0	283.16 ± 44.0
<i>Roja</i>	200mM	5 Chimborazo	1669.32 ± 257.1	20.56 ± 1.0	169.16 ± 24.5
<i>Roja</i>	200mM	Bastille	2627.37 ± 413.2	21.35 ± 0.8	84.31 ± 37.4
<i>Roja</i>	200mM	Tunkahuan	2242.89 ± 291.0	23.06 ± 0.7	183.19 ± 47.5