

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**RELACIÓN ENTRE EL RÉGIMEN DE RIEGO Y EL RENDIMIENTO EN EL CULTIVO
DE QUINUA (*CHENOPODIUM QUINOA WILLDENOW*) BAJO CONDICIONES
CONTROLADAS**

POR

RENATO ANTONIO RAVANAL VILLAR

**MEMORIA DE TÍTULO PRESENTADA
A LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE
LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CONCEPCIÓN, CHILE
2026**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**RELACIÓN ENTRE EL RÉGIMEN DE RIEGO Y EL RENDIMIENTO EN EL CULTIVO
DE QUINUA (*CHENOPODIUM QUINOA WILLDENOW*) BAJO CONDICIONES
CONTROLADAS**

POR

RENATO ANTONIO RAVANAL VILLAR

**MEMORIA DE TÍTULO PRESENTADA
A LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE
LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CONCEPCIÓN, CHILE
2026

Aprobada por:

Profesor Asistente, Walter Valdivia C.
Ing. Agrónomo, Mg. Dr.

Guía

Profesor Asistente, Susana Fischer G.
Ing. Agrónomo, Mg. Sc., Dr.

Asesor

Profesor Asistente, Mathias Kuschel O.
Ing. Civil Agrícola, Dr.

Asesor

Profesor Asociado, Manuel Faúndez S.
Ing. Agrónomo, Mg. Sc.

Decano

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Resumen.....	1
Summary	1
Introducción	2
Materiales y Métodos.....	5
Resultados y Discusión.....	11
Conclusiones.....	17
Referencias.....	18

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Página
Figura 1 Ubicación del Ensayo.....	6
Figura 2 Distribución unidades experimentales de acuerdo con los tratamientos y repeticiones.....	7
Figura 3 Temperatura del aire, humedad relativa y precipitación en la Estación Santa Rosa de Agrometeorológica del INIA.....	8
Figura 4 Altura promedio de plantas sometidas a tres tratamientos de riego.....	11
Figura 5 Promedio del rendimiento de plantas de quinua sometidas a tres tratamientos de riego.....	13
Figura 6 Promedio del peso de mil semillas de plantas de quinua sometida a tres tratamientos de riego	15
Figura 7 Contenido de agua en el suelo (θ) y tiempo de riego para T1 en dos profundidades entre los periodos fenológicos de llenado de grano a madurez fisiológica.....	15
Figura 8 Contenido de agua en el suelo (θ) y tiempo de riego para T2 en dos profundidades entre los periodos fenológicos de llenado de grano a madurez fisiológico.....	16
Figura 9 Contenido de agua en el suelo (θ) y tiempo de riego para T3 en dos profundidades entre los periodos fenológicos de llenado de grano a madurez fisiológica.....	16
Tabla 1 Peso fresco y peso seco para los tres tratamientos de riego con desviación estándar.....	12
Tabla 2 Cantidad de agua aplicada en quinua regada con tres regímenes de riego entre los estados fenológicos llenado de grano y madurez fisiológica.....	17

RELACIÓN ENTRE EL RÉGIMEN DE RIEGO Y EL RENDIMIENTO EN EL CULTIVO DE QUINUA (*CHENOPODIUM QUINOA WILLDENOW*) BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

EFFECT OF IRRIGATION REGIME ON THE YIELD OF QUINUA CROPS UNDER CONTROLLED CONDITIONS.

Palabras índice adicionales: Régimen de riego, rendimiento (producción), quinua, condiciones controladas.

RESUMEN

La sequía es uno de los peligros naturales más devastadores para la agricultura, la proporción de sequías han aumentado a nivel mundial superando el 40 % en las últimas dos décadas. Las principales cuencas de Chile presentaron estrés hídrico extremo entre 2010 a 2020, En este contexto, la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), una planta naturalmente tolerante a adversidades climáticas como la sequía, surge como una alternativa prometedora. La presente investigación evaluó la respuesta del rendimiento y el volumen de agua aplicado en el cultivo de quinua bajo tres estrategias de riego en condiciones de invernadero. Se utilizó la variedad "Regalona", estableciendo tres tratamientos: riego cada dos días (T1), cada cuatro días (T2) y cada seis días (T3). El objetivo fue determinar los parámetros productivos y analizar los componentes del rendimiento, cuantificando el agua aplicada desde la fase de llenado de grano hasta la madurez fisiológica. Los resultados demostraron que el régimen de riego con mayor frecuencia (T1) obtuvo el mejor rendimiento. Se observó que, aunque el volumen de agua aplicado varió entre T2 y T3, no existieron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento entre ambos.

SUMMARY

Drought is one of the most devastating natural hazards for agriculture. The proportion of droughts has increased globally, exceeding 40 % over the last two decades. Chile's main basins experienced extreme water stress between 2010 and

2020. In this context, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), a plant naturally tolerant to climatic adversities such as drought, emerges as a promising alternative. This research evaluated the yield response and the volume of water applied in a quinoa crop under three irrigation strategies in greenhouse conditions. The "Regalona" variety was used, establishing three treatments: irrigation every two days (T1), every four days (T2), and every six days (T3). The objective was to determine production parameters and analyze yield components, quantifying the water applied from the grain-filling phase to physiological maturity. The results showed that the most frequent irrigation regime (T1) achieved the best yield. It was observed that, although the volume of water applied varied between T2 and T3, there were no statistically significant differences in yield between the two.

INTRODUCCIÓN

En años anteriores, la sequía en el mundo era percibida como una variabilidad/fenómeno natural del clima, no obstante, modelos climáticos de la actualidad tienen proyectado que aproximadamente la mitad de la superficie terrestre global experimente sequía severa para el fin del siglo XXI, convirtiéndose así en un peligro devastador para la agricultura, generando impactos severos (Liu et al., 2025). Estos impactos pueden afectar directamente a sectores urbanos, ecológicos, agrícolas, entre otros, y por consiguiente a la economía de un territorio, generando así, daños al hábitat de la vida silvestre, humana y cultivos (Chiang et al., 2021). Así lo observó Bhusal et al. (2018) al investigar el impacto del estrés por sequía en dos cultivares de manzano, características morfológicas, fisiológicas, actividad fotosintética y conductividad estomática se redujeron significativamente. Por otro lado, estudios hechos en china confirman que una sequía puede reducir el rendimiento hasta un máximo del 70 % (Wang et al., 2017).

Chile es un país que ha estado experimentando este fenómeno por varios años, aproximadamente desde 2010 que fue cuando comenzó lo que conocemos como la mega sequía (Rangecroft et al., 2016), y gracias a las proyecciones del cambio climático, es muy probable que el país experimente aumentos en la frecuencia de

sequias, debido, a los aumentos de temperatura y baja de precipitaciones en toda la extensión del país lo que genera estrés hídrico permanente, atribuidos a un incremento sostenido en el consumo de agua, así como la reducción de esta. (Peña-Guerrero et al., 2020).

Hoy en día, la selección de cultivos capaces de tolerar el estrés por sequía se volvió una misión crucial para resguardar la seguridad alimentaria mundial. Estas plantas seleccionadas debiesen tener suficientes mecanismos para evadir, tolerar y manejar el estrés abiótico tales como adaptaciones fisiológicas y respuestas moleculares, Un ejemplo de esto sería, el aumento del volumen de suelo explorado por las raíces capaces de absorber agua, redistribución de nutrientes desde las hojas más viejas, engrosamiento de las hojas, entre otras (Wu et al., 2024).

Entre las especies destacadas con este comportamiento, se encuentra la quinua (*Chenopodium quinoa willdenow*). La quinua es una planta andina que se adapta bien a las adversidades que en la actualidad se viven y, se ha demostrado que puede sobrevivir en lugares áridos, suelos pobres y condiciones climáticas adversas. (Razzaghi et al., 2020). Como cultivo, es herbáceo, dicotiledóneo anual de verano, pertenece a la familia Amaranthaceae, esta planta se domesticó por primera vez en los países andinos de Sudamérica hace 7000 años, por sus distintas cualidades (Pathan & Siddiqui, 2022). Tiene un valor nutricional sobresaliente en todas sus partes comestibles (semilla, hojas y brotes) (Schlick, G. & Bubenheim, 1996). La quinua es uno de los únicos alimentos que posee todos los macro y micronutrientes esenciales que el humano necesita para tener una dieta equilibrada, superando a la mayoría de los cereales que hoy se consumen, lo que la vuelve un cultivo atractivo en el mercado. La semilla de quinua puede contener entre 42 % de carbohidratos en la variedad “Roja” y hasta un 83 % en cultivos de quinua en Perú (Encina-Zelada et al., 2017). Las proteínas y los lípidos pueden ser muy variables, dependiendo del genotipo y las condiciones agroecológicas en la que se desarrollan. Así, para un mismo cultivar (“Jessie”), cultivado en Francia y en Alemania las semillas alcanzaron un 12 % de proteína mientras que en Bélgica fue de un 19 % (Čepková et al., 2022).

El requerimiento de agua de un cultivo se define como la cantidad de agua necesaria a reponer a lo largo del ciclo de crecimiento de la planta, tener presente este término a la hora de gestionar un predio productivo permite un mejor desarrollo del cultivo para lograr mayor producción y calidad, asimismo, contribuye a ahorrar cantidades considerables de agua (Reta et al., 2024). Esto relaciona dos términos importantes, el primero es la evaporación del agua del suelo que es mayor al inicio del ciclo de un cultivo, ya que el suelo ocupa más espacio que la planta en crecimiento y conforme la planta ocupa más espacio, este valor desciende pero, el segundo es el que va aumentado, concepto llamado transpiración, este fenómeno se da desde las hojas de la planta, al inicio del ciclo es bajo y luego aumenta debido al espacio ocupado por un cultivo (Santos et al., 2010), juntos conforman un indicador común de las necesidades de agua de los cultivos, que es la evapotranspiración (ET), concepto muy importante en relación con la sequía y escasez de agua (Katul & Novick, 2009b). Otro indicador importante es el coeficiente de cultivo (K_c) utilizado para estimar la evapotranspiración de cultivo (ET_c), este depende principalmente del cultivo, la duración de etapas de crecimiento y el agua en el suelo disponible (Pereira et al., 2015).

Hasta ahora se han investigado varias prácticas de manejo para poder lidiar con la disminución de agua, sin afectar la producción, entre estas estrategias, se encuentran los métodos de siembra, cultivos con bajo requerimientos hídricos, y el riego deficitario (Mirsafi et al., 2024). El riego deficitario como estrategia para mitigar el efecto del estrés hídrico consiste en aplicarle cantidades de agua menores a las demandas por un cultivo determinado, su función principal es disminuir el consumo de agua a la vez que se mejora la respuesta de la planta aumentando así la productividad hídrica de un cultivo, para aplicar correctamente esta estrategia, se recomienda que sea por etapas, el principio de este enfoque es que la respuesta de la planta a una menor cantidad de agua puede no tener un impacto negativo, aunque puede reducir su crecimiento normal, para aplicarlo eficazmente se debe tener en cuenta las etapas críticas de crecimiento y evaluar la sensibilidad de las plantas en sus diferentes etapas del ciclo de vida (Chai et al., 2015). No obstante, en la

práctica, suministrar menor cantidad de agua a un cultivo disminuye su rendimiento, pero puede mejorar la productividad del agua (Ray et al., 2023).

En particular, existe poca información que relacione la respuesta de la quinua a la escasez hídrica en la etapa de llenado de grano y también, los datos de evapotranspiración de cultivos de quinua no siempre están disponibles para proyectos en países en desarrollo, y como ninguna función de agua de cultivo es aplicable de manera universal, se requiere desarrollar información respecto al requerimiento de agua de la quinua en la zona determinada (Aliku et al., 2022).

De acuerdo con los antecedentes descritos anteriormente, se plantea como hipótesis de trabajo que aplicar diferentes regímenes de riego desde la etapa de llenado de grano hasta la madurez fisiológica en la quinua, generará cambios en el consumo de agua del cultivo de quinua y en el rendimiento. En consecuencia, el objetivo general de esta investigación será evaluar la respuesta del rendimiento del cultivo de quinua y el volumen de agua aplicado bajo tres estrategias de riego. Por su parte, los objetivos específicos serán determinar parámetros productivos del cultivo de quinua frente a diferentes regímenes de riego, analizar los componentes del rendimiento bajo diferentes regímenes de riego y determinar las diferencias de agua aplicada al cultivo de quinua sometida a diferentes regímenes de riego entre los periodos fenológicos de llenado de grano a madurez fisiológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del ensayo

El experimento se llevó a cabo en la comuna de Chillán en la Estación Experimental “El Nogal” (36°35'43.2" S, 72°04'39.9" O y 140 msnm), perteneciente a la Universidad de Concepción, ubicada en la comuna de Chillán, provincia de Punilla, Región de Ñuble, en el Valle Central de Chile, bajo condiciones semi protegidas dadas por una cobertura plástica (Figura 1). El clima de la zona se clasifica como Mediterráneo, con una temperatura media anual de 13,4 °C, una temperatura

promedio máxima de 29,5 °C en enero, y temperatura mínima promedio de 7,5 °C en Julio (Santibáñez Q et al., 2017).

Figura 1. Ubicación del ensayo.



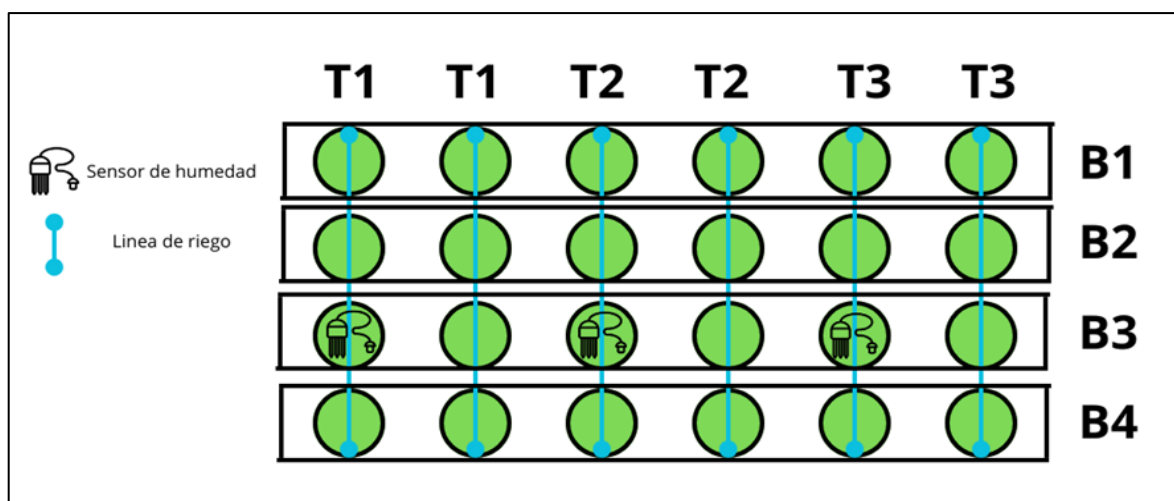
Manejo agronómico

Bajo la cobertura plástica se instalaron tubos negros de HDPE corrugados de 0,70 m de altura y 0,30 m de diámetro, los cuales fueron llenados con una mezcla de suelo de la serie Santa Bárbara con 30,8 % de arena, 54,8 % de limo y 15,2 % de arcilla, clasificado como medial, amorfo, Typic Haploxerands (Stolpe 2005), con una porosidad del 72,4 %.

En estos tubos se sembraron 4 semillas de quinua de la variedad Regalona. Una vez emergidas y desarrolladas hasta la cuarta hoja verdadera se procedió a elegir la mejor planta, en cuanto a desarrollo y sanidad, y se eliminaron las tres plantas restantes. La fertilización se realizó de acuerdo con el análisis de suelo (N-P-K y S), aplicando 64 U de P_2O_5 a la forma de SFT, 68 U de K_2O a la forma de sulfato de potasio aplicados a la cuarta hoja verdadera quedando 1 sola planta y 75 U de N parcializadas en tres dosis desde la cuarta hoja verdadera al inicio de la emisión de la panoja.

Para el riego, se estableció un sistema por goteo, con 1 emisor auto compensado por cada tubo, con un caudal de 2 Lh^{-1} . Se le aplicó el 100 % de los requerimientos hídricos del cultivo desde germinación hasta el inicio de la etapa de llenado de grano, para homogeneizar el contenido de agua del suelo antes de comenzar con los tratamientos de riego diferencial. Una vez que la planta alcanzó el estado fenológico correspondiente al llenado de grano, la cantidad de agua se aplicó de acuerdo con el tratamiento. El ensayo se llevó a cabo en un terreno de $4,8 \times 2,6 \text{ m}$, protegido por una cobertura plástica, en el interior se instalaron 24 tubos HDPE corrugados, distribuidos equitativamente en 8 tubos para cada tratamiento y a su vez, 4 tubos distribuidos en dos hileras para cada tratamiento (Figura 2.).

Figura 2. Extracto del ensayo y la distribución de unidades experimentales de acuerdo con los tratamientos y repeticiones.



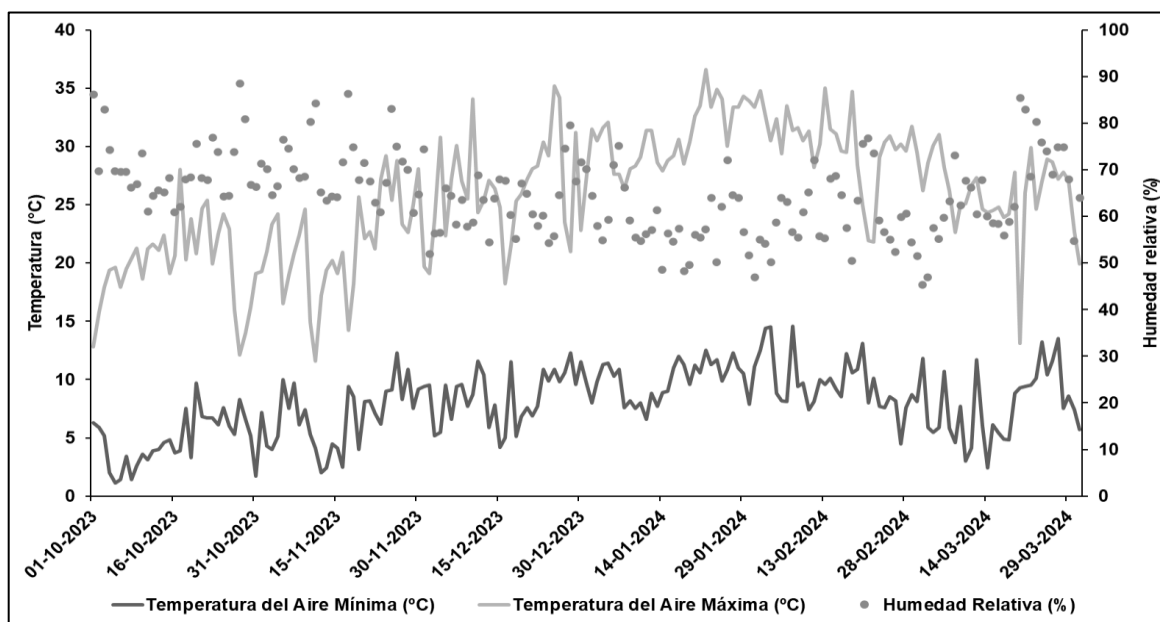
En un tubo representativo de cada tratamiento se instalaron dos sensores de humedad (TEROS 10) a los 20 y 40 cm de profundidad, los cuales se conectaron a un datalogger (ZL6, METERGROUPE) el cual registró y almacenó el contenido de agua en el suelo ($\theta_v, \text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) cada 30 min.

Las malezas de hoja ancha y las gramíneas se controlaron manualmente.

Los registros meteorológicos (temperatura máxima, mínima y humedad relativa) se observan en la Figura 3, los datos fueron obtenidos desde la estación Santa Rosa, Chillan, Ñuble, perteneciente a la red de Agrometeorología INIA

(<https://agrometeorologia.inia.cl/>). Se utilizaron los datos correspondientes al periodo comprendido entre octubre de 2023 y marzo de 2024.

Figura 3. Temperatura del aire, humedad relativa y precipitación en la Estación Santa Rosa de Agrometeorológica del INIA.



Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y 4 repeticiones (Figura 2). El tratamiento correspondió a la disponibilidad de agua (AW) en la zona radicular, desde los 0 a los 40 cm, desde el inicio de la etapa de llenado del grano hasta la madurez fisiológica de esta. Se establecieron tres tratamientos de riego, donde el tratamiento 1 (T1) se regó con una frecuencia de 2 días hasta llegar a capacidad de campo, para el tratamiento 2 (T2) se regó con una frecuencia de 4 días hasta llegar a capacidad de campo y para el tratamiento 3 (T3) se regó con una frecuencia de 6 días hasta llegar a capacidad de campo.

Evaluaciones

Contenido de agua en el suelo

La determinación del contenido de agua del suelo fue mediante sensores de humedad TDR, con un intervalo de 30 minutos para la toma de datos desde las

primeras etapas de desarrollo hasta la etapa de madurez fisiológica. La capacidad de retención del agua en el suelo se analizó utilizando los conceptos de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), lo cual fue llevado a cabo en el laboratorio de Física de Suelos del Departamento de Suelos y Recursos Naturales de la Facultad de Agronomía.

Altura de planta

Esta medición se realizó previo a cosecha. Se procedió a medir cada planta con una regla graduada en cm, desde ras de suelo al extremo superior de esta en cada unidad experimental, luego con una tijera de podar se cortó el tallo a ras de suelo y se dispuso cuidadosamente el material vegetal en bolsas de papel previamente etiquetadas.

Peso fresco de biomasa total

La determinación del peso fresco de biomasa se realizó luego de haber sido cosechada la planta completa, y antes del proceso de secado, con la finalidad de observar la capacidad de crecimiento y acumulación de biomasa. El material vegetal se organizó por tratamiento y repetición colocándose en bolsas de papel previamente etiquetadas. Se pesó la planta completa colectada, en una balanza electrónica de precisión ($\pm 0,01g$) (L1002i – BEL Engineering). Luego se pesó la bolsa de papel para descontar el peso de esta y obtener el peso fresco por planta.

Peso seco de biomasa total

La determinación del peso seco de biomasa tuvo como finalidad cuantificar la biomasa libre de humedad. Una vez cosechadas las plantas de acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente para la biomasa fresca, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de plantas medicinales, las plantas fueron dispuestas de manera uniforme en bolsas de papel previamente identificadas. El secado de las muestras se realizó en condiciones controladas a temperatura ambiente hasta alcanzar peso constante, este criterio se verificó mediante determinaciones sucesivas de peso de las plantas. El peso seco de cada muestra se obtuvo utilizando una balanza electrónica de precisión ($\pm 0,01g$) (L1002i – BEL Engineering).

Rendimiento

Para el rendimiento de semillas, se tomaron todas las muestras de las dos hileras de tubos de cada tratamiento. Una vez que la panoja alcanzó el estado de madurez y un 85% de esta estuviese seca a la vista, las plantas se cosecharon mediante tijeras de poda, se colocaron en bolsas de papel de color café rotulada con anterioridad. Posteriormente, se secaron a temperatura ambiente por 5 días. Luego se trillaron en una trilladora estacionaria de fabricación artesanal nacional. Se eliminaron las impurezas y residuos vegetativos de las muestras, se pesaron las semillas cosechadas en una balanza electrónica de precisión ($\pm 0,01g$) (L1002i – BEL Engineering) y se determinó el rendimiento de semillas por planta en gramos (g).

Peso mil semillas

Este parámetro es utilizado principalmente como indicador de calidad física y potencial de rendimiento del grano, su determinación se realizó con el objetivo de estimar tamaño y masa promedio de las semillas de quinua de todos los tratamientos. Primero se aseguró que el material estuviese libre de impurezas, restos vegetales y semillas dañadas. Luego, para cada unidad experimental se tomaron 2 repeticiones de 100 semillas, se promediaron y extrapolaron para obtener el valor equivalente a 1000 semillas. Utilizando un contador manual y verificando la integridad de cada semilla se tomó el peso con una balanza de precisión ($\pm 0,01g$) (L1002i – BEL Engineering).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico con el fin de explicar variaciones en la disponibilidad de agua, para cada tratamiento. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) verificando previamente los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de errores utilizando las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, a su vez se aplicó una prueba de comparación de medias, por lo que se utilizó la prueba de LSD Fisher con un 95 % de nivel de confianza. El procesamiento de datos se realizó utilizando el software estadístico InfoStat, registrando los resultados en tablas y gráficos para su interpretación.

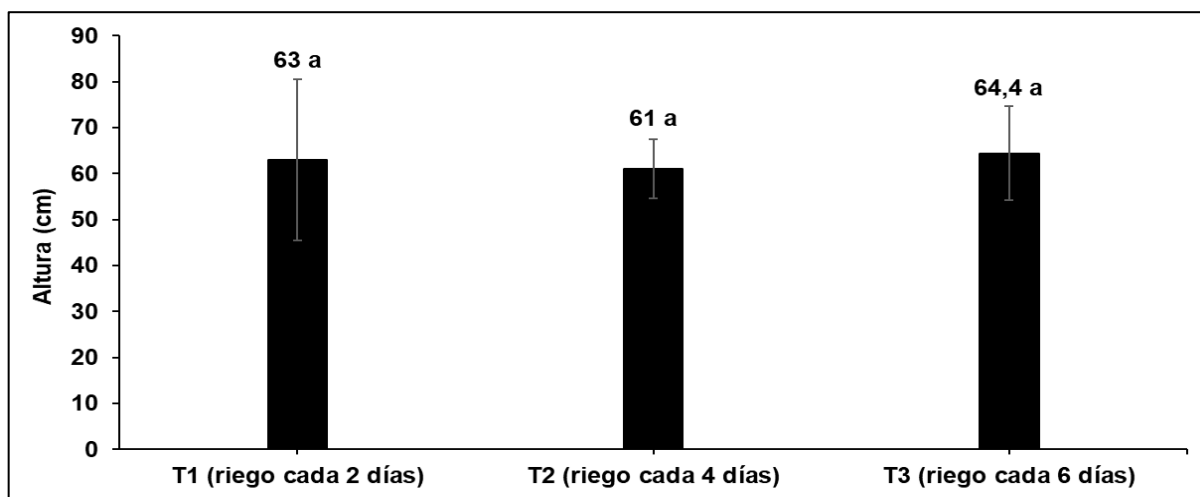
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura de planta

La variación de la altura de planta al final de la temporada en los diferentes niveles de riego se muestra en la Figura 4. Independiente de la cantidad de agua que recibieron los cultivos, no afectó significativamente la altura de la planta, y se podría explicar ya que fenológicamente alcanza su mayor altura en estado reproductivo, y no cambia posteriormente, eso se ve reflejado en que no hubo diferencias significativas. Para T1, T2 y T3, presentaron valores medios de 63, 61 y 64,4 cm respectivamente.

Así lo demuestran Nguyen et al. (2025), en un estudio que se realizó en condiciones de invernadero semicontroladas, donde se utilizaron 5 genotipos de quinua para ver la respuesta genotipo x estrés ambiental, entre esos, la sequía. Esta investigación reportó una reducción significativa en la biomasa seca y la capacidad fotosintética bajo disponibilidad limitada de agua, pero señalan que la quinua a menudo mantiene la altura de la planta y continúa el desarrollo reproductivo hasta cierto punto.

Figura 4. Altura promedio de plantas sometidas a tres tratamientos de riego.



Peso fresco y peso seco de la biomasa total (Pf y Ps)

En peso fresco y peso seco, si se observaron diferencias significativas La Tabla 1 muestra los resultados tanto de peso fresco como peso seco, evidenciando diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 1. Peso fresco y peso seco para los tres tratamientos de riego con desviación estándar.

Tratamiento	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
T1 (riego cada 2 días)	389,2 g $\pm$ 123,4 a	199,9 g $\pm$ 52,3 a
T2 (riego cada 4 días)	166,6 g $\pm$ 14,8 b	102,3 g $\pm$ 11,5 b
T3 (riego cada 6 días)	210,1 g $\pm$ 15,2 b	118,4 g $\pm$ 10,4 b

Para peso fresco, el tratamiento T1 presento un valor promedio mayor con 389,19 g planta⁻¹, el cual fue significativamente distinto a los tratamientos T2 (166,59 g planta⁻¹) y T3 (210,10 g planta⁻¹). Por su parte T2 y T3 no presentaron diferencias significativas entre sí.

Los resultados de peso fresco indican que T1 favoreció de manera importante a la acumulación de biomasa en plantas de quinua, duplicando e incluso triplicando los resultados de los demás tratamientos. El valor de peso fresco más alto dado en T1 puede deberse a mayor disponibilidad de agua, lo que a su vez ayuda a promover una mayor expansión celular y acumulación de tejido.

Para peso seco, se observaron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 2). El tratamiento T1 obtuvo el valor promedio más alto con 199,86 g planta⁻¹, el cual es estadísticamente superior a T2 (102,30 g planta⁻¹) y T3 (118,40 g planta⁻¹). Por su parte, los tratamientos T2 y T3 no presentaron diferencias significativas entre sí.

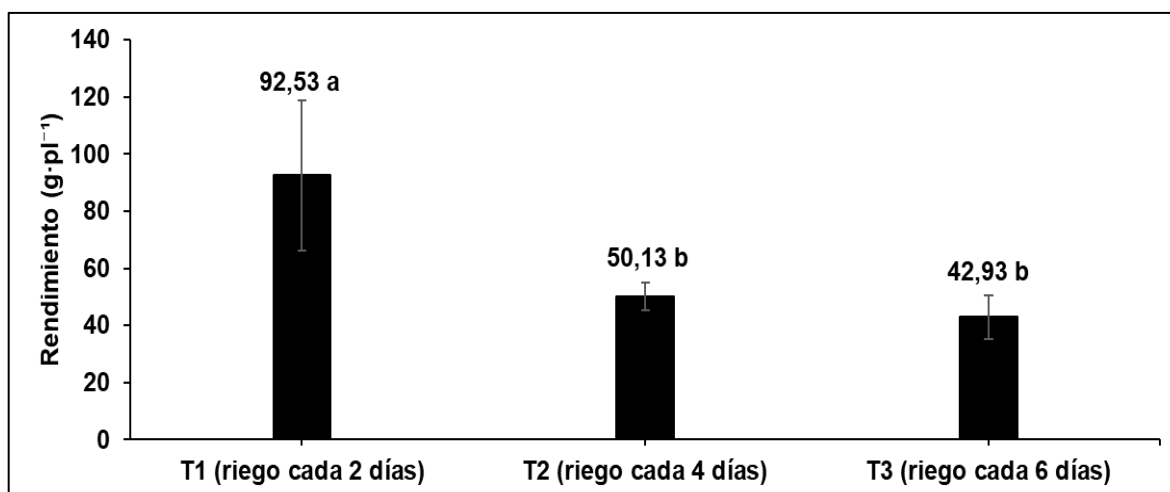
El valor máximo obtenido en T1 indica que el tratamiento no solo permitió mayor acumulación de biomasa fresca, sino también mayor cantidad de material vegetal tras la pérdida de humedad, lo que refleja mejor vigor y mayor proporción de tejidos vegetales. Por otro lado, los tratamientos T2 y T3 alcanzaron valores equivalentes, lo que sugiere que, bajo las condiciones limitadas de agua en el suelo de ambos los tratamientos, el desarrollo vegetativo se vio afectado disminuyendo la capacidad de acumulación de biomasa.

Estos valores concuerdan con otras investigaciones, Maestro-Gaitán et al. (2022), evaluó la respuesta de 4 genotipos de quinua adaptados a Europa (F14, F15, F16 y Titicaca), aplicando un tratamiento en déficit de agua y otro bien regado, todos los genotipos presentaron un valor mayor en biomasa total de la planta frente a sus homólogos en déficit hídrico, lo que hace alusión a una respuesta fenológica al estrés, como menos cantidad de tallos, y disminución de la transpiración a través de la reducción del área foliar implicando cambios en la arquitectura de la planta.

Rendimiento

La Figura 5 presenta el rendimiento de las plantas de quinua frente al estrés hídrico, el análisis de los resultados demuestra que las plantas del T1 obtuvieron un mayor rendimiento en comparación con T2 y T3, presentando una media de 92,5 g por planta, así también, no se presentan diferencias significativas entre T2 y T3, observándose un rendimiento promedio de 50,1 y 42,9 g respectivamente sugiriendo así una menor tolerancia al estrés hídrico. En general el estrés hídrico afecto negativamente a todas las plantas, siendo más pronunciada la reducción del rendimiento a menor cantidad de agua disponible.

Figura 5. Promedio del rendimiento de plantas de quinua sometidas a tres tratamientos de riego.



Resultados similares se obtuvieron en una investigación hecha al sur de Europa, donde el clima se caracteriza por tener temperaturas cálidas, se aplicaron dos

tratamientos de riego, uno con riego completo (arriba del 70 % de CC) y uno con déficit hídrico a largo plazo (-40 % de CC), se utilizaron las variedades F14, F15, F16 y Titicaca. Se observó un comportamiento similar en cuanto a rendimientos por tratamiento, la mayoría de los cultivares presentaron valores mayores en un riego completo, con un valor máximo promedio de 20 g pl^{-1} , rendimiento menor que lo que se obtuvo en esta investigación, no obstante todos los cultivares mostraron disminuciones significativas de rendimiento bajo condiciones de estrés, con una caída del 46 % de productividad aproximadamente (Maestro-Gaitán et al. (2023)), lo que se asemeja a lo obtenido en esta investigación, ya que T2 produjo 45,8 % y T3 produjo 53,6 % menos rendimiento que T1.

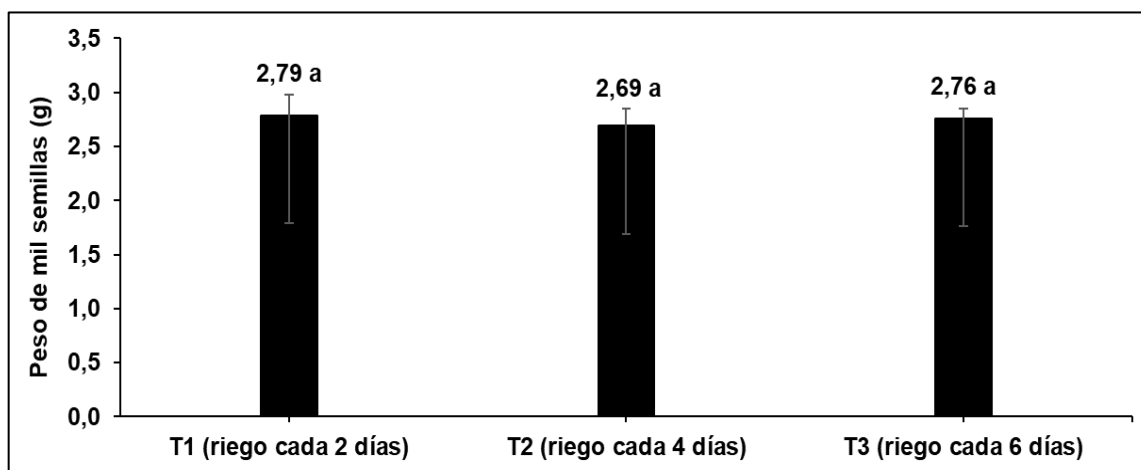
Así también lo demuestran Saddiq et al. (2021), en Dera Ghazi Khan, Pakistán, ensayo en el cual las condiciones de los tratamientos fueron riegos al 100, 50 y 25 % de capacidad de campo, se usaron 20 genotipos de quinua en un invernadero controlado. En los experimentos bajo la condición de estrés hídrico, los rasgos de crecimiento y rendimiento se redujeron significativamente en comparación con el tratamiento control.

Peso de mil semillas

La Figura 6 muestra el peso de 1000 semillas donde se evidencia que entre los tratamientos no existen diferencias significativas, con un valor promedio de 2,79, 2,69 y 2,76 gramos en los tratamientos que recibieron 138, 101 y 111 litros de agua (T1, T2 y T3). Sin embargo, Awa et al. (2024) exponen que se realizaron estudios experimentales con riego por goteo sin acolchado para investigar la adaptabilidad del crecimiento y la respuesta a diferentes niveles de riego de la quinua en una región árida del noroeste de China, y aunque se utilizó la misma variedad de semilla para los diferentes tratamientos, se observó que la cantidad de agua durante la etapa de crecimiento reproductivo afectó el peso de los granos de quinua.

Por otro lado, varios autores (Hinojosa et al. (2018), Geerts et al. (2008)) reportan que el peso de mil semillas varía más en función del genotipo que del contenido de agua aplicado en la temporada, lo que coincide con el presente estudio.

Figura 6. Promedio del peso de mil semillas de plantas de quinua sometida a tres tratamientos de riego.



Contenido de agua en el suelo

En la Figura 7, 8 Y 9 se observa el contenido de humedad del suelo, entre el 16 de enero y el 27 de febrero, a una profundidad de 20 Y 40 cm, T1 tuvo una variación de humedad de 0,356 a 0,232 m^3/m^3 , en ese periodo se aplicaron 22 riegos. Para el mismo tratamiento a una profundidad 40 cm se observó un contenido de humedad que vario entre 0,379 a 0,246 m^3/m^3 .

Figura 7. Contenido de agua en el suelo (θ) y tiempo de riego para T1 en dos profundidades entre los periodos fenológicos de llenado de grano a madurez fisiológica.

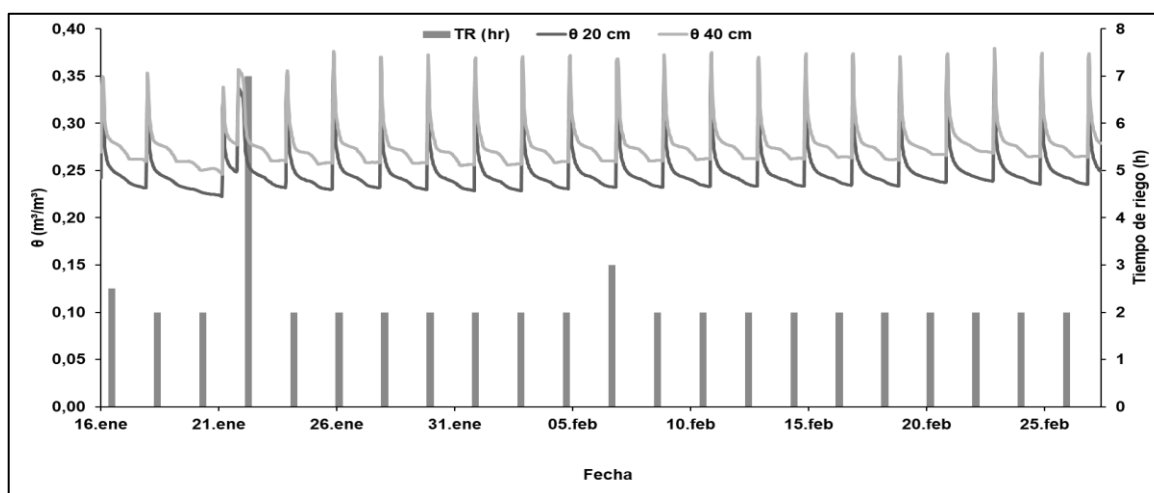


Figura 8. Contenido de agua en el suelo (θ) y tiempo de riego para T2 en dos profundidades entre los periodos fenológicos de llenado de grano a madurez fisiológica.

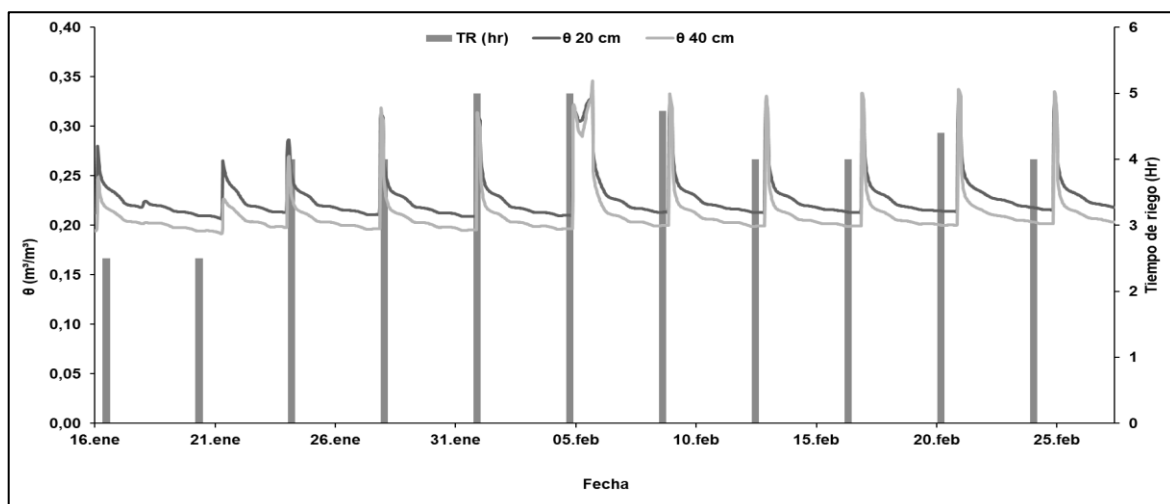
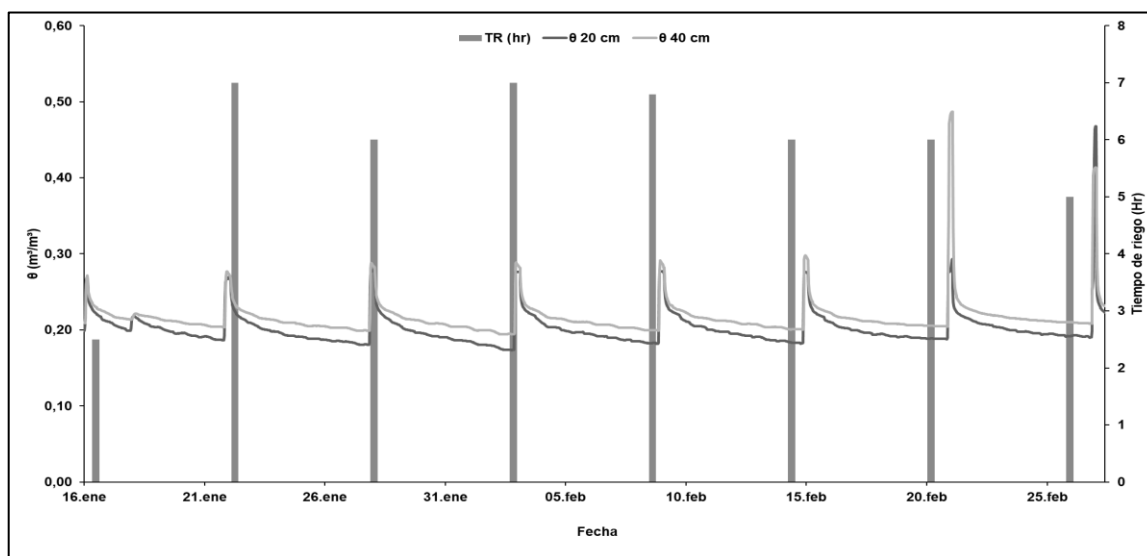


Figura 9. Contenido de agua en el suelo (θ) y tiempo de riego para T3 en dos profundidades entre los periodos fenológicos de llenado de grano a madurez fisiológica.



En el caso de T2 a una profundidad de 20 cm el suelo presentó un contenido de humedad que varió de 0,335 a 0,207 m^3/m^3 durante el tiempo de aplicación, ahora bien, a una profundidad de 40 cm se observó una variación de humedad entre 0,346 a 0,191 m^3/m^3 , aplicándose un total de 11 riego. Como observación adicional, entre

el 05 de febrero y el 09 de febrero se vio una variación atípica en el movimiento del agua del suelo, esto posiblemente puede deberse a que el data logger funciona con batería solar y ese día no logro cargarse, apagándose el equipo sin poder obtener datos.

Para finalizar, T3 a una profundidad de 20 cm tuvo un contenido de humedad que vario entre 0,293 a 0,174 m^3/m^3 , y a una profundidad de 40 cm vario entre 0,293 a 0,194 m^3/m^3 . En ese periodo se aplicaron 8 riegos. Como observación adicional, en las últimas aplicaciones de riego, 21 de febrero y 27 de febrero se vio un comportamiento atípico en el contenido de humedad, disparándose precipitadamente a 0,483 m^3/m^3 a una profundidad de 40 cm para la primera fecha, y 0,464 m^3/m^3 a una profundidad de 20 cm en la segunda fecha, lo cual resulta extraño, puesto que los tiempos de riego se respetaron.

El agua aplicada entre los estados fenológicos de llenado de grano y madurez fisiológica se muestra en la Tabla 2. En general, el T1 que corresponde al riego cada dos días obtuvo la mayor cantidad de agua aplicada, por su parte para T2, el agua aplicada tuvo una reducción de un 26,81 % en comparación con T1, y T3 fue un 19,57 % menos que T1. Las diferencias en agua aplicada se deben a que en T1 se rego 53,56 h, en T2 44,22 h, y en T3 46,53 h durante la aplicación de los tratamientos.

Tabla 2. Cantidad de agua aplicada en quinua regada con tres regímenes de riego entre los estados fenológicos llenado de grano y madurez fisiológica.

Tratamiento	Cantidad de agua a aplicar
Tratamiento 1 (cada 2 días)	137 litros
Tratamiento 2 (cada 4 días)	101 litros
Tratamiento 3 (cada 6 días)	112 litros

CONCLUSIÓN

El estudio realizado en un invernadero durante el periodo de octubre 2023 a marzo de 2024 demostró que los diferentes regímenes de riego (T1, T2 y T3) si generaron cambios significativos en el rendimiento, peso fresco y peso seco.

El rendimiento total del cultivo de quinua respondió de forma directa a la disponibilidad del agua, observando un valor más alto en plantas regadas con riego pleno, Los tratamientos con déficit hídrico se vieron afectados por la disminución del vigor vegetal y menor desarrollo de biomasa, evidenciando que la disponibilidad de agua es un factor determinante para la productividad de la planta de quinua.

El peso de mil semillas mostró que los distintos regímenes de riego no generaron diferencias significativas a pesar de las variaciones de cantidad de agua aplicada, se mantuvo una respuesta similar, este resultado sugiere que, bajo las condiciones del estudio, este componente no fue determinante para explicar cambios en el rendimiento asociado al manejo del riego.

La evaluación del agua aplicada entre las etapas de llenado de grano a madurez fisiológica evidencio diferencias entre regímenes de riego. Cada tratamiento recibió volúmenes distintos lo que confirmo la aplicación de las estrategias de manejo de riego establecidas. Estas variaciones permitieron distinguir la respuesta del cultivo frente diferentes volúmenes de agua.

Se recomienda continuar evaluando la repuesta de la quinua frente al estrés hídrico en etapas fenológicas críticas del cultivo y ampliar ensayos a campo abierto para validar respuestas bajo condiciones reales de producción.

REFERENCIAS

- 1 Awa, M., Zhao, J., & Tumaerbai, H. (2024). Deficit irrigation–based improvement in growth and yield of quinoa in the northwestern arid region in China. *Sustainability*, 16(10), 4136. <https://doi.org/10.3390/su16104136>
- 2 Aliku, O., Oshunsanya, S. O., & Aiyelari, E. A. (2022). Estimation of okra crop evapotranspiration using drainage lysimeters under dry season conditions. *Scientific African*, 16, e01189.
- 3 Bhusal, N., Han, S. G., & Yoon, T. M. (2019). Drought stress impacts on photosynthetic response, leaf water potential, and stem sap flow in two apple cultivars (*Malus × domestica* Borkh.). *Scientia Horticulturae*, 246, 535–543.

- 4 Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H., Waskom, R. M., Niu, Y., & Siddique, K. H. M. (2015). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1). <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>
- 5 Chiang, F., Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2021). Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration and intensity. *Nature Communications*, 12(1), 2754.
- 6 Encina-Zelada, C., Cadavez, V., Pereda, J., Gómez-Pando, L., Salvá-Ruiz, B., Teixeira, J. A., ... & Gonzales-Barron, U. (2017). Near infrared transmission spectroscopy for estimating the composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grains. *LWT – Food Science and Technology*, 79, 126–134.
- 7 Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J., & Taboada, C. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European Journal Of Agronomy*, 28(3), 427-436. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.008>
- 8 Hinojosa, L., Matanguihan, J. B., & Murphy, K. M. (2018). Effect of high temperature on pollen morphology, plant growth and seed yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Journal Of Agronomy And Crop Science*, 205(1), 33-45. <https://doi.org/10.1111/jac.12302>
- 9 Hlásná Cepková, P., Dostálíková, L., Viehmannová, I., Jágr, M., & Janovská, D. (2022). Genetic resources diversity of quinoa for sustainable production: A survey on nutritional traits influenced by environmental conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 960159.
- 10 Katul, G. G., & Novick, K. A. (2009). Evapotranspiration. In *Encyclopedia of Inland Waters* (pp. 661–667). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-012370626-3.00012-0>
- 11 Liu, Y., Hu, T., Zuo, Q., Yu, L., & Yang, J. (2025). Understanding copula-based multivariate standardized drought indices for characterizing meteorological, hydrological and agricultural droughts across global land areas. *Agricultural Water Management*, 320, 109864. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109864>
- 12 Maestro-Gaitán, I., Granado-Rodríguez, S., Orús, M., Matías, J., Cruz, V., Bolaños, L., & Reguera, M. (2022). Genotype-dependent responses to long-term water stress reveal different water-saving strategies in *Chenopodium*

- quinoa Willd. *Environmental and Experimental Botany*, 201, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104976>
- 13 Maestro-Gaitán, I., Granado-Rodríguez, S., Poza-Viejo, L., Matías, J., Márquez-López, J. C., Pedroche, J. J., Cruz, V., Bolaños, L., & Reguera, M. (2023). Quinoa plant architecture: A key factor determining plant productivity and seed quality under long-term drought. *Environmental and Experimental Botany*, 211, 105350. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105350>
 - 14 Mirsafii, S. M., Sepaskhah, A. R., & Ahmadi, S. H. (2024). Quinoa growth and yield, soil water dynamics, root growth, and water use indicators in response to deficit irrigation and planting methods. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100970. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100970>
 - 15 Nguyen, V. L., Hieu, T. D., Phan, T. H. N., Nguyen, V. L., Chu, D. H., Bertero, D., Curti, N., Ta, V. T., McKeown, P. C., & Spillane, C. (2025). Impact of genotypes, environmental stresses, and genotype by environment interactions on growth and yield of quinoa at flowering stage. *PLoS ONE*, 20(9), e0331652. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331652>
 - 16 Pathan, S., & Siddiqui, R. A. (2022). Nutritional composition and bioactive components in quinoa greens (*Chenopodium quinoa* Willd.): A review. *Nutrients*, 14(3), 558.
 - 17 Peña-Guerrero, M. D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, C., Ribbe, L., & Meza, F. (2020). Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 65(6), 1005–1021.
 - 18 Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4–20.
 - 19 Rangelcroft, S., Van Loon, A. F., Maureira, H., Verbist, K., & Hannah, D. M. (2016). Multimethod evaluation of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region. *Earth System Dynamics Discussions*, 2016, 1–32.
 - 20 Ray, L. I., Swetha, K., Singh, A., & Singh, N. (2023). Water productivity of major pulses: A review. *Agricultural Water Management*, 281, 108249. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108249>
 - 21 Razzaghi, F., Bahadori-Ghasroldashti, M. R., Henriksen, S., Sepaskhah, A. R., & Jacobsen, S. E. (2020). Physiological characteristics and irrigation water productivity of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under deficit irrigation

imposed at different growing stages. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 206(3), 390–404.

- 22 Reta, B. G., Hatiye, S. D., & Finsa, M. M. (2024). Crop water requirement and irrigation scheduling under climate change scenario, and optimal cropland allocation in the lower Kulfo catchment. *Heliyon*, 10(10), e31332. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31332>
- 23 Saddiq, M. S., Wang, X., Iqbal, S., Hafeez, M. B., Khan, S., Raza, A., Iqbal, J., Maqbool, M. M., Fiaz, S., Qazi, M. A., Bakhsh, A., Jahanzaib, N., & Gulshan, A. B. (2021). Effect of water stress on grain yield and physiological characters of quinoa genotypes. *Agronomy*, 11(10), 1934. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101934>
- 24 Santos, L., De Juan, J., Picornell, M., & Tarjuelo, J. (2010). *El riego y sus tecnologías*. Editorial CREA-UCLM.
- 25 Schlick, G., & Bubenheim, D. L. (1996). Quinoa: Candidate crop for NASA's Controlled Ecological Life Support Systems. *NASA Technical Reports*.
- 26 Wang, Q., Wu, J., Li, X., Zhou, H., Yang, J., Geng, G., ... & Tang, Z. (2016). A comprehensive quantitative method to evaluate drought impacts on crop yield using daily multi-scale SPEI and a crop growth process model. *International Journal of Biometeorology*, 61, 685–699.
- 27 Wu, Y., Liu, J., Zhao, L., Wu, H., Zhu, Y., Ahmad, I., & Zhou, G. (2024). Abiotic stress responses in crop plants: A multi-scale approach. *Journal of Integrative Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.09.003>