

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO
EN EL RENDIMIENTO DE LA QUINOA (CHENOPODIUM QUINOA WILLD),
EN EL GENOTIPO “AG 2010”.**

EXEQUIEL VARGAS

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO A LA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
AGRÍCOLA.

**CHILLÁN – CHILE
2022**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO
EN EL RENDIMIENTO DE LA QUINOA (CHENOPODIUM QUINOA
WILLD.), GENOTIPO “AG 2010”.**

Aprobado por:

Jorge Jara Ramírez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Profesor Guía

Jerónimo Paredes Cáceres
Licenciado en Matemáticas, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Susana Fischer Ganzoni
Ingeniero Agrónomo, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Walter Valdivia Cea
Ingeniero Agrónomo, Mg Cs., Dr.
Asesor Externo

Evaluador Externo

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Asistente

Directora de Departamento

María Eugenia Gonzáles
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Decana

ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos específicos.....	7
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	8
3.1. Área de estudio.....	8
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
4.1. Diseño experimental.....	10
4.2. Manejo de los experimentos.....	10
4.3. Variables a medir y equipamiento técnico.....	12
4.4. Datos meteorológicos.....	14
5. RESULTADOS.....	15
5.1. Humedad de suelo.....	15
5.2. Potencial hídrico foliar.....	16
5.3. Resistencia estomática hídrico foliar.....	18
5.4. Rendimiento.....	20
6. CONCLUSIONES.....	24
7. LITERATURA CITADA.....	26

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Parcela experimental (cuadro azul) de la Universidad de Concepción Chillán (cuadro rojo), Región de Ñuble, Chile. (Fuente: Elaboración propia Google Earth, 2021)	11
Figura 2.	Temperatura mínima diaria (Tmin), temperatura máxima diaria (Tmax) y precipitación diaria (Pp) para la temporada 2015-2016. DDA representa los días del año. Fuente: Elaboración propia.....	16
Figura 3.	Evolución de agua disponible para la planta en el perfil de suelo respecto a los días del año (DDA), para cinco tratamientos de riego: T0, T20, T40, T70 y T100, corresponden cuando AW alcance niveles de 0, 20, 40, 70 y 100 % en el perfil de suelo en la zona de raíces de 60 cm de profundidad respectivamente. Capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP).....	17
Figura 4.	Evolución del potencial hídrico foliar (PHF) del genotipo AG 2010 al medio día solar y en sus respectivos días de medición (DDA día del año). Cada punto es un promedio de 4 mediciones en cada tratamiento de riego: T0, T20, T40, T70 y T100 (riego cuando el porcentaje de agua disponible, AW, alcance niveles de 0, 20, 40 y 70 % en el perfil de suelo en la zona de raíces). T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de agua. * diferencias significativas entre tratamientos para el día de medición. ns (no hay diferencias significativas). Fuente: Elaboración propia.....	19
Figura 5.	<i>DDA 361</i> , evolución horaria del potencial hídrico foliar (PHF) del genotipo AG 2010. Barras verticales indican \pm una desviación estándar. Cada medición es el promedio de 4 repeticiones para cada tratamiento de riego: T100 y T0 (T100 es el tratamiento de 100 % de humedad aprovechable en el suelo y T0 es el tratamiento de no riego). Fuente: Elaboración propia.....	20

Figura 6. Evolución de la resistencia estomática (rvs) al medio día solar en el genotipo AG 2010 medida desde el inicio de llenado de grano a madurez fenológica, para los tratamientos T0 y T100. Cada observación es un promedio de cuatro mediciones para cada tratamiento. Las barras verticales indican \pm una desviación estándar. Fuente: Elaboración propia.....

ÍNDICE DE TABLAS**En texto**

	Página
Tabla 1. Profundidad de estrata de suelo, Densidad aparente (ρ_{aparente}), capacidad de campo (Θ_{cc}) y punto de marchitez permanente (Θ_{pmp}).....	14
Tabla 2 Rendimiento, genotipo AG 2010, para cinco tratamientos de riego (T0, T20, T40, T70 y T100) dentro del periodo fenológico entre llenado de grano y madurez fisiológica.....	26

ÍNDICE DE ECUACIONES**En texto**

	Página
Ecuación 1. Nivel de agua disponible para la planta (AW).....	10
Ecuación 2. resistencia a la difusión de vapor de agua de la epidermis de la hoja (r_{vs}).....	13

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO EN EL RENDIMIENTO DE LA QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD.), GENOTIPO “AG 2010”

Palabras clave: humedad del suelo, potencial hídrico de la hoja, resistencia estomática

RESUMEN

Se realizó un estudio para determinar el efecto del riego deficitario controlado en el rendimiento de grano, potencial de agua en la hoja y resistencia estomática en el cultivo de la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), genotipo AG 2010. El estudio se realizó en la Estación Experimental de la Universidad de Concepción campus Chillán, durante la temporada 2015-2016. Se aplicaron cinco niveles de disponibilidad de agua aprovechable en el suelo para la planta (AW) al momento del riego: 0 %, 20 %, 40 %, 70 % y 100 %, durante el periodo fenológico de inicio de llenado de grano a madurez fisiológica. Los resultados mostraron que la mayor producción de grano fue en el tratamiento regado, cuando la disponibilidad de agua en el suelo era de un 100 % AW, con un total de 2,61 ton ha⁻¹. La segunda mayor producción correspondió al tratamiento regado a 40 % AW, con un total de 2,60 ton ha⁻¹. Los rendimientos más bajos se alcanzaron en las condiciones de 0 y 20 % AW con 2,07 ton ha⁻¹. Se observó una tendencia a mayores valores del potencial hídrico foliar en el tratamiento T70 y T100, tratamientos con mayor disponibilidad de agua en el suelo para la planta en el periodo de estudio. La resistencia estomática entregó diferencias

sólo entre los tratamientos T0 y T100, en donde a mayor disponibilidad de agua en el suelo, se obtiene una menor resistencia estomática.

**EVALUATION OF THE EFFECT OF CONTROLLED DEFICIT IRRIGATION
ON THE YIELD OF QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD.)
GENOTYPE “AG 2010”.**

Keywords: soil moisture, leaf water potential, stomatic resistance.

SUMMARY

A study was carried out to determine the effect of controlled deficit irrigation on the yield, water potential in the leaf and stomatal resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*), genotype AG 2010. The study was conducted at the Experimental Station of the University of Concepción, Chillán campus, during the 2015-2016 season.

Five levels of availability water in the soil for the plant (AW) at the irrigation time were applied: 0 %, 20 %, 40 %, 70 % and 100 %, from the beginning of grain filling throughout maturity physiological stages. The results showed that the highest grain production of 2.61 ton ha⁻¹ was obtained by the irrigated treatment when the availability of water in the soil was 100 % AW. The second highest production corresponded to the treatment irrigated at 40 % AW, with a total of 2.60 ton ha⁻¹. The lowest yields were reached under the conditions of 0 and 20 % AW with 2.07 ton ha⁻¹. A tendency to higher values of foliar water potential was observed in the T70 and T100 treatments, treatments with greater availability of water in the soil for the plant in the study period. The stomatal resistance showed differences only between the T0 and T100 treatments,

where the greater the availability of water in the soil, the lower the stomatal resistance is obtained.

1. INTRODUCCIÓN

La quinoa es un pseudocereal con más de tres mil genotipos, tanto cultivadas como silvestres, agrupándose en cinco categorías básicas según el gradiente altitudinal. Así, se reconocen los ecotipos de nivel del mar, del altiplano, de valles interandinos, de los salares y de los Yungas. Los principales productores son Bolivia, Perú y Estados Unidos y, actualmente, se cultiva en varios países de Europa, Asia y África. Los rendimientos oscilan desde 1 ton ha⁻¹ hasta las 2,7 ton ha⁻¹ (Bazile et al., 2016). Este cultivo, de gran valor nutritivo, ha demostrado gran adaptabilidad y rusticidad para resistir a condiciones de sequía y heladas (García et al., 1992). La quinoa tiene una extraordinaria adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas. Puede crecer en climas con humedades relativas desde 40 % hasta 88 %, y soporta temperaturas desde -4 °C hasta 38 °C. Es una planta eficiente en el uso de agua, tolerante y resistente a la falta de humedad del suelo, y permite producciones aceptables con precipitaciones de 100 a 200 mm (PROINPA, 2011).

En la planta de quinoa se han identificado varios mecanismos de resistencia a la sequía, asociados a la regulación de la conductancia estomática como punto de control del flujo neto de vapor de agua y CO₂ (Lawlor, 2002). La quinoa es considerada como uno de los cultivos más resistentes a la sequía, además de poseer un alto nivel de tolerancia a las heladas, suelos salinos, enfermedades y plagas (Mujica et al., 2001).

Howell (2001) señala que, a nivel mundial, cada vez existe una menor disponibilidad de agua y la agricultura necesita aumentar su producción debido al crecimiento de la población mundial. Existen muchos lugares de norte a sur de Chile, en donde la restricción hídrica obliga a los agricultores a utilizar cultivos capaces de completar su desarrollo en condiciones de estrés hídrico. Así, por ejemplo, en el sur del país en cuencas de la Araucanía se estiman para las siguientes décadas aumentos de 1,7°C en temperaturas promedio, un aumento de un 5 a 6% en evapotranspiración y disminución de 210 mm en lluvias (Martínez-Retureta et al., 2021). Es por eso que resulta de interés estudiar el comportamiento de la quinoa en condiciones limitadas de abastecimiento de agua a fines del periodo de desarrollo fenológico de la planta - inicio de llenado de grano a madurez fisiológica (diciembre-enero)-, cuando el periodo de estiaje se manifiesta en el Valle Central regado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Evaluar el rendimiento en grano, resistencia estomática y potencial de agua en la planta de quinoa (genotipo AG 2010), sometida a estrés hídrico con riego deficitario controlado en el periodo fenológico de inicio de llenado de grano a madurez fisiológica.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar el rendimiento en grano de la quinoa, genotipo AG 2010, sometido a riego deficitario en el periodo fenológico de llenado de grano a madurez fisiológica, cuando el nivel de humedad en el suelo al momento del riego alcanza un 100 %, 70 %, 40 %, 20 % y 0 % de disponibilidad en el perfil de la zona de raíces (AW).
- Cuantificar el nivel de estrés hídrico alcanzado por el genotipo AG 2010 y su relación con el potencial de agua en la planta y resistencia estomática.
- Analizar relaciones de contenido de humedad de suelo, potencial hídrico de la planta, resistencia estomática y rendimiento del genotipo AG 2010.

3. ANTECEDENTES GENERALES

3.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental “El Nogal”, ubicada en la Universidad de Concepción, Campus Chillán, Provincia de Diguillín, Región de Ñuble, coordenadas UTM norte 5.946.607 m; este 760.844 m; huso 18 (Figura 1). La zona de estudio tiene características climáticas identificadas con respecto al resto del Chile Central. Domina el clima templado cálido mediterráneo con estación seca y lluviosa semejantes en duración. El mes más caluroso es enero, con temperaturas medias de 19,7 °C. Las máximas absolutas se registran el mismo mes, donde alcanzan valores superiores a los 34 °C. El mes más frío es julio, que anota temperaturas que oscilan entre los 1 °C y 5 °C (Del Pozo et al., 1999).

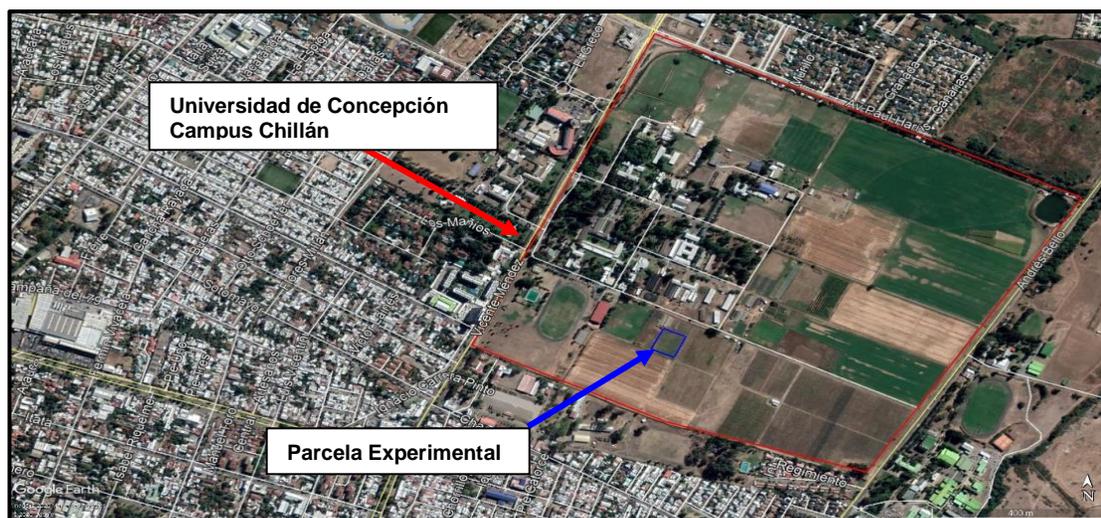


Figura 1. Parcela experimental (recuadro azul) y Campus de la Universidad de Concepción en Chillán (recuadro rojo), Región de Ñuble, Chile. Fuente: Google Earth, 2021.

El suelo del ensayo corresponde a la serie Arrayán, que son suelos formados a partir de cenizas volcánicas recientes, depositadas sobre un substrato no relacionado, constituidos por tobas, materiales fluviales, y materiales fluvioglaciares, que se presentan compactados, pero no cementados, y que son lentamente permeables. Son suelos muy profundos, bien drenados, de texturas medias con dominancia de la clase textural franco limosa. Bien estructurado en superficie, con abundante porosidad asociada a un buen arraigamiento. Se ubica en topografía plana o casi plana, permeabilidad moderada y un escurrimiento superficial lento.

En el lugar del experimento, el suelo corresponde a la familia media térmica de los Humic Haploxerands, de la serie Arrayán. Las características físico-hídricas del suelo que fue parte del experimento se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Profundidad de estrata de suelo, densidad aparente (ρ_{ap}), capacidad de campo (Θ_{cc}) y punto de marchitez permanente (Θ_{pmp}).

Estrata (cm)	ρ_{ap} (Mg m ⁻³)	Θ_{cc} (m ³ m ⁻³)	Θ_{pmp} (m ³ m ⁻³)
00 - 30	1,31	0,395	0,173
30 - 60	1,33	0,396	0,220
60 - 90	1,29	0,328	0,204
90 - 120	1,22	0,364	0,205

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Diseño experimental

Se adoptó un diseño experimental de bloques completos al azar, con cinco tratamientos de riego y cuatro repeticiones para el genotipo AG 2010. El tratamiento de riego correspondió al nivel de agua disponible para la planta (AW) en la zona de raíces antes del riego, desde la etapa de inicio de llenado de grano hasta madurez fisiológica. Se establecieron los tratamientos de riego, con aplicaciones de agua cuando el suelo alcanzó el 100 %, 70 %, 40 %, 20 % y 0 % de AW (T100, T70, T40, T20 y T0, respectivamente) en los primeros 60 cm de profundidad de suelo. La Ecuación 1 se usó para determinar AW:

$$AW = \frac{\sum_{i=1}^2 (\theta_i^{ac} - \theta_i^{pmp}) \Delta Z_i}{\sum_{i=1}^2 (\theta_i^{cc} - \theta_i^{pmp}) \Delta Z_i} \cdot 100 \quad [1]$$

donde θ_i^{ac} es el contenido de humedad actual en el suelo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) medido con neutrómetro, θ_i^{cc} es el contenido de humedad a capacidad de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) y θ_i^{pmp} es el contenido de humedad a punto de marchitez permanente ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), en 0,30 m de estrata de suelo (ΔZ_i). AW fue calculado para un total de 0,60 m de profundidad de raíces ($i = 2$).

4.2. Manejo de los experimentos

La siembra se realizó con una dosis de 15 kg ha^{-1} , donde cada parcela constaba de 4 hileras de 5 m de largo, con espaciamento de 0,5 m entre hileras. Una vez que se alcanzó las 6 hojas verdaderas, se realizó un raleo dejando 12 plantas por metro lineal en cada hilera. Se instalaron cintas de riego con goteros integrados, espaciados a 0,1 m, con un caudal de 5 L h^{-1} por metro lineal, a una presión de 0,7 bar.

Desde la siembra (05 de octubre de 2015) hasta el comienzo del estado fenológico de llenado de grano (18 de diciembre de 2015), el ensayo fue regado cada vez que la humedad del suelo alcanzaba el 70 % de AW en la profundidad de raíces. Para homogenizar la disponibilidad de agua en el suelo (AW) en cada unidad experimental, antes de inicio de los tratamientos diferenciales de manejo de humedad de suelo se regó por surcos hasta alcanzar condiciones de capacidad de campo (100 % AW).

Terminada la etapa de mediciones del estudio (después de que el cultivo alcanzó madurez fisiológica), el 13 de enero de 2016 se cosecharon 2 metros lineales de las dos hileras centrales de cada unidad experimental. Posteriormente, se realizó un proceso de secado al aire libre durante siete días para, finalmente, trillar y cuantificar lo cosechado.

El grano fue secado al aire libre, por dos semanas, a una temperatura promedio diaria de $19 \text{ }^{\circ}\text{C}$, con la precaución de mantenerlo a la sombra hasta la obtención de peso constante.

4.3. Variables a medir y equipamiento técnico

Para cumplir los objetivos del estudio, se programaron mediciones para la temporada 2015-2016 entre los meses de diciembre y enero usando los sensores y equipos técnicos que se describen a continuación:

- ❖ Humedad de suelo (neutrómetro Troxler 4300).
- ❖ Resistencia estomática (porómetro AP4).
- ❖ Potencial de agua en la hoja (cámara Scholander).

4.3.1 Humedad de suelo

Para el registro de la humedad de suelo, en las hileras centrales de cada una de las unidades experimentales, se instalaron tubos de acceso de aluminio de 50 mm de diámetro. Se tomaron mediciones a 15, 45, 75 y 105 cm de profundidad de cada tubo instalado en las 20 parcelas, por medio de una sonda con un dispositivo emisor de neutrones Troxler 4300, realizando mediciones cada tres días en el periodo analizado.

4.3.2 Resistencia estomática

La conductancia estomática, se midió con un porómetro AP4. Las mediciones se realizan entre las 12 y 14 horas. Para ello se seleccionan hojas adultas, ubicadas en el tercio medio y orientación norte (Ferreyra et al., 2010).

Se debe considerar que la hoja de quínoa presenta estomas en el haz y envés; es por ello que se hizo cada una de las mediciones en ambos lados de la

misma, utilizando la Ecuación 2 para establecer la resistencia a la difusión de vapor de agua de la epidermis de la hoja (r_{vs}).

$$r_{vs} = \frac{r_{ab} \cdot r_{ad}}{r_{ab} + r_{ad}} \quad [2]$$

en donde r_{ab} es la resistencia en el envés de la hoja y r_{ad} corresponde a la resistencia en el haz de la hoja (mediciones en $s \text{ cm}^{-1}$). Se escogió al azar dos hojas por unidad experimental, ambas mediciones en hojas expuestas al sol.

4.3.3 Potencial hídrico foliar

El potencial hídrico foliar se midió utilizando la cámara Scholander, empleando hojas ubicadas en el tercio medio de cada planta y orientadas hacia el sol. En el momento de coleccionar la muestra, éstas fueron sometidas a un recubrimiento por medio de una bolsa plástica y papel aluminio para evitar la pérdida de agua en la hoja. Posteriormente se introdujo dentro de la cámara, realizando las mediciones entre las 11 y 14 horas. Las muestras se cortaron y en menos de tres minutos se introdujo la ramilla en la cámara de presión, con el pecíolo hacia el exterior. Con la lámina de la hoja en el interior de la cámara se aplicó presión mediante nitrógeno gaseoso. Una vez que apareció la gota de savia por el pecíolo, se registró la lectura del manómetro que indicaba la tensión o potencial hídrico foliar. Además, en dos días se midió el potencial hídrico en la planta desde las 05:00 am hasta las 20:00 pm; dichas muestras fueron tomadas cada tres horas.

4.4. Datos meteorológicos

A 500 m del ensayo experimental se encuentra la Estación Meteorológica de la Facultad de Ingeniería Agrícola (Datalogger Thies Clima, model DLx-Met, Adolf Thies GmbH & Co., Göttingen, Deutschland), en donde se registró la temperatura del aire y precipitaciones en el período de estudio (Figura 2)

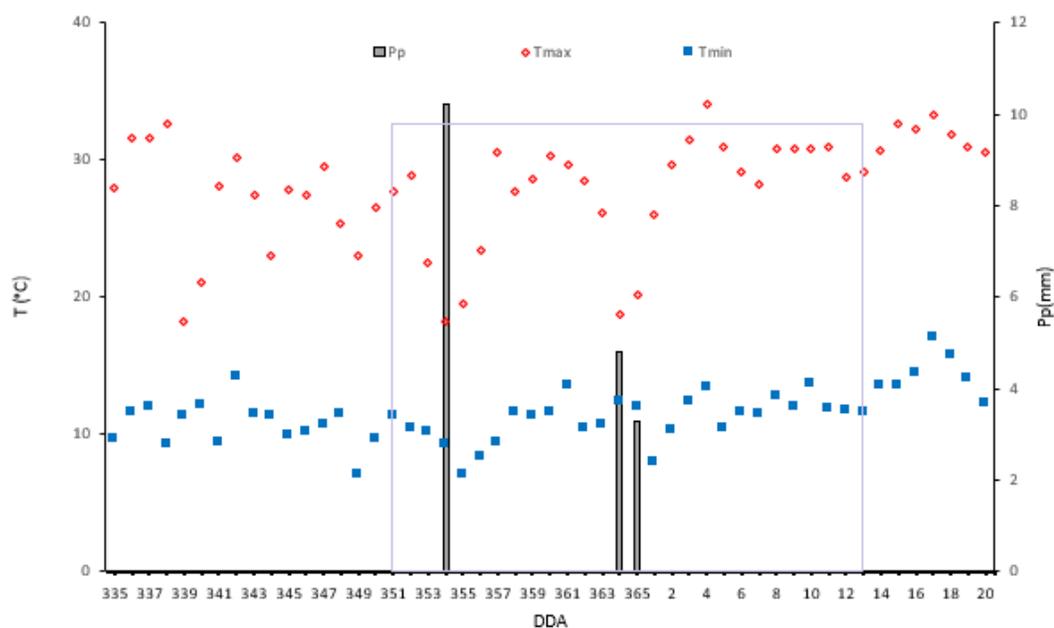


Figura 2. Temperatura mínima diaria (Tmin), temperatura máxima diaria (Tmax) y precipitación diaria (Pp) para la temporada 2015-2016. DDA representa los días del año. Recuadro transparente marca el paso entre inicio del periodo fenológico de llenado de grano a madurez fisiológica. Fuente: Elaboración propia.

5. RESULTADOS

5.1. Humedad de suelo

En la Figura 3 se presenta el comportamiento del contenido de humedad volumétrico del suelo para el genotipo AG 2010 de quinoa, sometido a cinco tratamientos de riego, en el periodo correspondiente a la etapa fenológica de inicio de llenado de grano a madurez fisiológica. El tratamiento T100 recibió seis riegos, el T70 fue llevado a capacidad de campo tres veces, el T40 se regó en dos ocasiones, el T20 obtuvo un riego y T0 no se regó. Todos éstos datos son desde inicio de llenado de grano hasta madurez fisiológica.

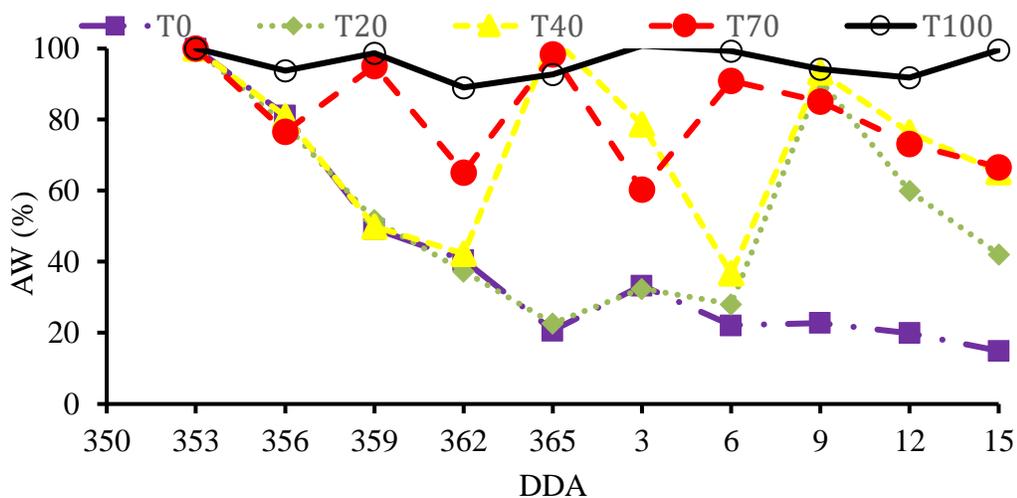


Figura 3. Evolución de agua disponible para la planta de quinoa en el perfil de suelo (AW) respecto a los días del año (DDA), temporada 2015-2016, para cinco tratamientos de riego: T0, T20, T40, T70 y T100, cuando AW al momento del riego alcance niveles de 0, 20, 40, 70 y 100 % en la zona de raíces de 60 cm de profundidad, respectivamente. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3 se destaca un comportamiento estable de AW para la condición del tratamiento 100 %, mientras que para la condición de 40 % y 70 % se encontraron mayores variaciones en el periodo de tiempo estudiado. Para la condición de T0 se observó una estabilidad después del día 364 con AW alrededor del 20 %. Todos los tratamientos tuvieron humedades de suelo a capacidad de campo (AW de 100 %) a inicios del periodo de llenado de grano.

5.2. Potencial hídrico foliar

En la Figura 4 se visualiza el comportamiento del potencial hídrico foliar (PHF) para el genotipo AG 2010 sometido a cinco condiciones de manejo hídrico a partir del día 353 de 2015 hasta el día 7 de 2016. El menor valor de PHF se presentó el día 3 de 2016 para el tratamiento T0 (sin riego en el periodo de estudio).

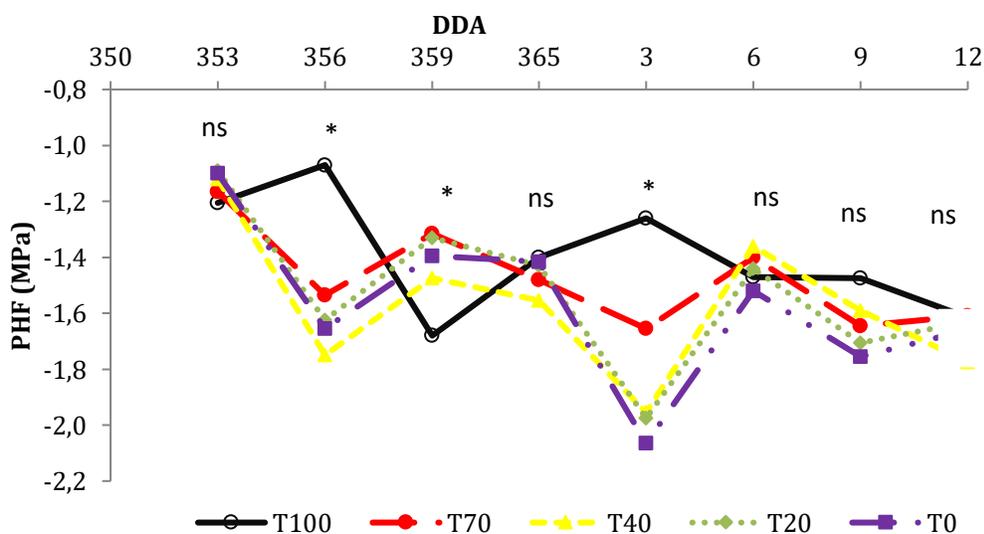


Figura 4. Evolución del potencial hídrico foliar (PHF) del genotipo AG 2010 al medio día solar a través de los días del año (DDA), temporada

2015-2016. Cada punto es un promedio de 4 mediciones en cada tratamiento de riego: T0, T20, T40, T70 y T100 cuando el agua disponible en el suelo para la planta (AW) al momento del riego alcance niveles de 0, 20, 40, 70 y 100 % en la zona de raíces de 60 cm de profundidad, respectivamente. * y ns significan que hay y no hay diferencias significativas entre tratamientos para el día de medición, respectivamente. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 4 se observan mediciones de PHF con diferencias significativas ($P \leq 0,01$) de T100 con T40, T20 y T0 en el DDA 356 y 3. Por otra parte, se observa que en el DDA 353, 359, 3, 6 y 9 no existieron diferencias significativas con respecto al PHF. Además, se observa que el día con mayor diferencia en PHF entre tratamientos correspondió al DDA 3, con 0.8 MPa entre T100 y T0, coincidiendo con temperaturas del aire de 26.4°C, humedad relativa mínima de 25,4 % y déficit de presión de vapor máximo de 0,75 kPa. Finalmente, entre los tratamientos T100, T70, T40, T20 y T0, se observó que no hay diferencias significativas entre tratamientos a partir del DDA 6, manteniéndose una estabilidad del potencial hídrico foliar. Lo anterior estaría indicando que existe una adaptabilidad de la planta en dicho período fenológico a los diferentes tipos de estrés hídrico.

La cuantificación de la respuesta de la planta en términos de PHF a lo largo del día de los tratamientos extremos, T100 (100% de disponibilidad de agua) y T0 (0% de disponibilidad de agua), se muestra en la Figura 5.

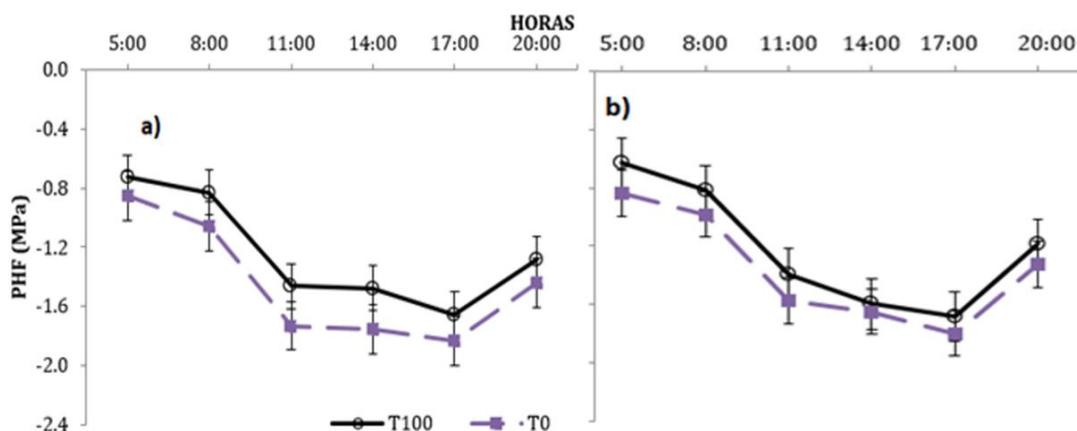


Figura 5. Evolución horaria del potencial hídrico foliar (PHF) del genotipo AG 2010 en a) día del año 361 y b) día del año 4, temporada 2015-2016. Barras verticales indican \pm una desviación estándar. Cada medición es el promedio de 4 repeticiones para cada tratamiento de riego: T100 y T0 (T100 es el tratamiento de 100% de humedad aprovechable en el suelo y T0 es el tratamiento de no riego). Fuente: Elaboración propia.

El PHF evolucionó a lo largo del día con un comportamiento similar entre ambas curvas para los dos días de evaluación. En el DDA 361 se observó una mayor diferencia de PHF entre ambos tratamientos, aún y cuando no hubo diferencias estadísticamente significativas ($P > 0,05$), y en donde la diferencia máxima es de 0,28 MPa alrededor del mediodía (Fig. 5 a). En la mañana y al atardecer las diferencias entre los dos tratamientos extremos son mínimas en ambos días. Por otra parte, en el DDA 4 las diferencias entre tratamientos se redujeron, lo que indicaría una adaptabilidad de las plantas del tratamiento sin riego a las condiciones de sequía impuestos.

5.3. Resistencia estomática hídrico foliar

La resistencia estomática (r_{vs}) medida al medio día mostró diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en las respuestas del genotipo AG 2010 (Figura 6) sólo para las plantas de los tratamientos T100 y T0. Los mayores valores de resistencia estomática de T0 a medida que avanza el periodo de estrés hídrico, indicaría una respuesta de la quinoa ante condiciones adversas de disponibilidad de agua en el suelo.

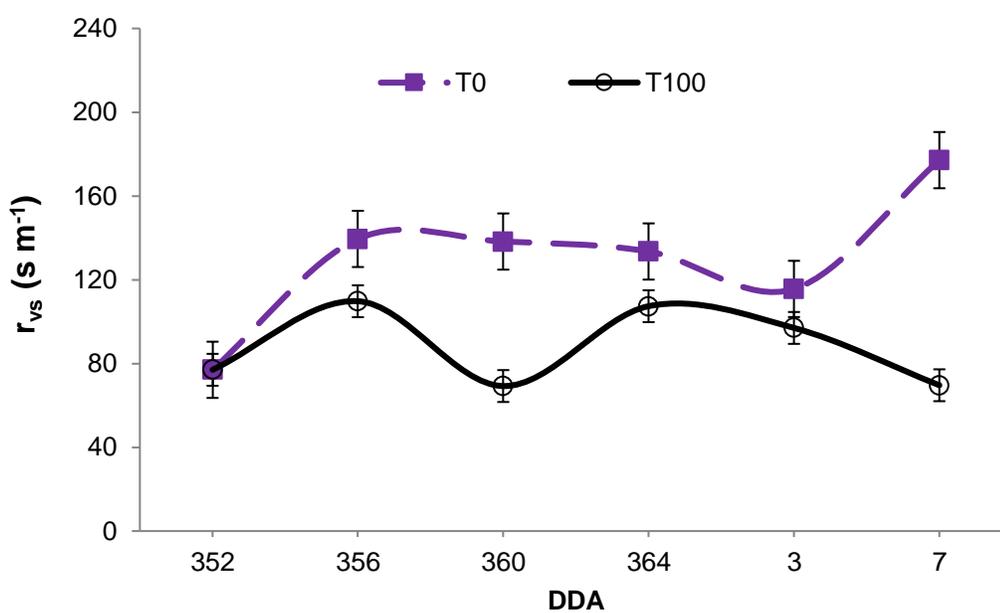


Figura 6. Evolución de la resistencia estomática (r_{vs}) al medio día solar en genotipo AG 2010, desde inicio de llenado de grano a madurez fisiológica, para los tratamientos T0 y T100 (T100 es el tratamiento con disponibilidad de agua (AW) igual a 100%, mientras que T0 es el tratamiento sin riego en el periodo de estudio). DDA corresponde a los días del año, temporada 2015-2016. Cada dato es un promedio de cuatro mediciones para cada tratamiento. Las barras verticales indican \pm una desviación estándar. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6 se observa que las plantas del tratamiento T0 aumentaron sus valores de r_{vs} , mostrando que al no recibir agua durante el periodo de estudio sus estomas fueron cerrándose al disminuir el agua aprovechable en el suelo (Figura 3). La menor diferencia de r_{vs} entre los dos tratamientos extremos analizados en DDA 364 y 3, se puede atribuir a las menores temperaturas del aire en dichos días producto de dos periodos de precipitaciones leves ocurridas a final de año (Figura 2). Por otro lado, las plantas de T100 muestran valores de resistencia estomática que se mantuvieron en el rango de 50 a 100 $s\ m^{-1}$, inferiores a los de tratamientos no regados. Valores de resistencia estomática derivados de González et al. (2011), para 10 variedades de quinoa creciendo en el altiplano en condiciones de campo, varían entre 40 $s\ m^{-1}$ y 220 $s\ m^{-1}$. Estos valores, comparados con los datos recopilados en el presente estudio, coinciden en que la resistencia estomática es mayor en condiciones de déficit hídrico.

Se destaca el aumento de la resistencia estomática para T0 a medida que avanzaron los días de estrés hídrico (Figura 6), mientras que el PHF (Figura 4) se fue estabilizando para todos los tratamientos. Lo anterior indicaría que la planta es flexible a la escasez hídrica, mostrando adaptabilidad del cultivo a ambientes extremos.

5.4. Rendimiento

En Tabla 2 se presentan los rendimientos en grano obtenidos del genotipo AG 2010 de la quinoa, en donde se observan rendimientos proporcionales al contenido de humedad de suelo al momento del riego, con una diferencia promedio de 0,54 ton ha⁻¹ entre los tratamientos T100 (tratamiento de control con humedad en el suelo al 100 % de AW) y T0 (tratamiento sin riego). El mayor rendimiento se obtuvo en el T100 con 2,61 ton ha⁻¹. Luego, para el T40 tenemos un rendimiento promedio de 2,60 ton ha⁻¹ con una desviación estándar de $\pm 0,12$. Lo anterior es interesante de considerar, ya que constituye un excelente rendimiento con respecto al obtenido en las mejores condiciones de T100. Luego, se alcanzó el tercer mejor rendimiento en el T70 con un valor de 2,43 ton ha⁻¹. Los menores rendimientos en grano de quinoa se encuentran en los tratamientos T0 y T20, con promedios iguales de 2,07 ton ha⁻¹.

Tabla 2. Rendimiento en grano de quinoa, genotipo AG 2010, para cinco tratamientos de riego (T0, T20, T40, T70 y T100) dentro del periodo fenológico de inicio de llenado de grano y madurez fisiológica.

Tratamiento	Rendimiento* (ton ha ⁻¹)
T0	2,07 \pm 0,11
T20	2,07 \pm 0,62
T40	2,60 \pm 0,12
T70	2,43 \pm 0,23
T100	2,61 \pm 0,41

* \pm una vez desviación estándar

La mayor diferencia en rendimiento entre tratamientos se observó entre T100 y T0 (0,54 ton ha⁻¹), un 21 % de reducción en rendimiento: A pesar del

contraste entre ambos tratamientos, este resultado se podría explicar en parte por la habilidad de la planta de quinoa de adaptarse a condiciones de menor disponibilidad de agua en el periodo estudiado y/o a la alta capacidad de retención de agua del suelo en el que se realizó el ensayo.

Delgado et al. (2009) evaluaron rendimientos de 16 genotipos de quinoa dulce no regadas en Colombia, logrando rendimientos máximos de 2,70 ton ha⁻¹, similar a los máximos obtenidos en el presente ensayo. Por otra parte, Urdanegui et al., (2021) obtienen rendimientos entre 1,4 y 3,0 ton ha⁻¹ en condiciones de temperaturas promedio de 20°C y una humedad relativa de 72 %, sin riego, logrando en algunos genotipos rendimientos más altos que los del presente ensayo. Por otra parte, Burin Díaz (2016) en un ensayo con las variedades de quinoa 415-Pasankalla, Altiplano-Inia, Salcedo-Inia, y Kancolla, con tratamiento de tres láminas de riego, obtuvieron resultados en sus rendimientos entre 2,86 ton ha⁻¹ y 0,30 ton ha⁻¹. Por tanto, podemos ver en el genotipo AG 2010 un rendimiento concordante a los datos estudiados. Finalmente, Valdivia-Cea et al., (2021) señala que el genotipo Cahuil, mantuvo altos contenidos de rendimiento en ambas temporadas en distintos tipos de suelo y condiciones de estrés hídrico, cuando había sólo el 40% de agua disponible y a 60 cm de profundidad entre el llenado de grano y madurez fisiológica, mismo período de estudio, aboga a condiciones de plasticidad del genotipo. Lo anterior refuerza la habilidad de adaptación de la quinoa a

diferentes zonas agroecológicas y la necesidad de continuar investigando las relaciones agua-rendimiento-clima en este cultivo.

6. CONCLUSIONES

Se evaluó el rendimiento, resistencia estomática y potencial de agua en la planta de quinoa (genotipo AG 2010) sometida a estrés hídrico con riego deficitario controlado, donde el mayor rendimiento en grano obtenido fue para las plantas sometidas al tratamiento T100 (100% de AW), con un valor promedio de 2,61 ton ha⁻¹, y el menor rendimiento se obtuvo en quinoa sometida al tratamiento T0 y T20, con el resultado promedio de 2,07 ton ha⁻¹ cada una, un 21 % inferior. En los demás tratamientos no se registraron diferencias significativas en rendimiento.

El potencial hídrico foliar (PHF) al medio día presentó diferencias significativas en cuatro de los ocho días donde se realizaron mediciones. Se observó, una tendencia a mayores PHF en el tratamiento T70 y T100, los cuales corresponden a los tratamientos con mayor disponibilidad de agua en el suelo para la planta en el periodo de estudio. Así mismo, el PHF evolucionó a lo largo del día con un comportamiento similar entre ambos tratamientos extremos, aún y cuando se observó una tendencia de valores mayores de PHF en T100 con respecto a T0. Además, la resistencia estomática entregó diferencias sólo entre los tratamientos T0 y T100, en donde a mayor disponibilidad de agua en el suelo, se obtiene una menor resistencia estomática.

Finalmente, el estudio entregó información de que el riego deficitario controlado para el genotipo AG 2010 de la quinoa, en el periodo fenológico

desde inicio de llenado de grano a madurez fisiológica, puede ser efectivo para un rendimiento cercano a un tratamiento de AW 100 %, como lo fue T40.

7. LITERATURA CITADA

1. Burin, Y. 2016. Rendimiento de cuatro variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo tres láminas de riego por goteo. Tesis, Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional Agraria la Molina. Lima, Perú.
2. Delgado, A.I., J.H. Palacios y C. Betancourt. 2009. Evaluación de 16 genotipos de quinua dulce (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el municipio de Iles, Nariño (Colombia). *Agron. Colomb.* 27(2): 159-167.
3. Ferreyra, R., G. Selles, L. Burgos, P. Villagra, P. Sepúlveda y G. Lemus. 2010. Manejo del riego en frutales en condiciones de restricción hídrica. Boletín INIA N°214. INIA La Platina. Santiago, Chile.
4. García, M., J.J. Vacher y J. Hidalgo. 1992. Estudio comparativo del comportamiento hídrico de dos variedades de quinua en el altiplano central. En: D. Morales y J.J. Vacher (Eds.). Actas del séptimo congreso internacional sobre cultivos andinos. 04-08 febrero, 1991. IBTA ORSTOM. CIID. La Paz, Bolivia.
5. González, J.A., M. Bruno, M. Valoy and F.E. Prado. 2011. Genotypic variation of gas exchange parameters and leaf stable carbon and nitrogen isotopes in ten quinoa cultivars grown under drought. *J. Agron. Crop Sci.* 197(2): 81-93.
6. Howell, T.A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron J.* 93(2): 281-289.

7. Lawlor, D.W., G. Cornic. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant Cell Environ.* 25(2): 275-294.
8. Martínez-Retureta, R., M. Aguayo, N.J. Abreu, A. Stehr, I. Duran-Llacer, L. Rodríguez-López, S. Sauvage and J.-M. Sánchez-Pérez. 2021. Estimation of the climate change impact on the hydrological balance in basins of south-central Chile [en línea]. *Water* 13(6): 794(Art. N°). <<https://doi.org/10.3390/w13060794>>. [Consulta: 22 marzo 2022].
9. Mujica, A., S.-E. Jacobsen y J. Izquierdo. 2001. Resistencia a factores adversos de la quinua. pp: 162-183. En: Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.): Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. FAO. Santiago, Chile.
10. Pozo, A. del, P. del Canto. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Serie Quilamapu N°113. INIA Quilamapu. Chillán, Chile.
11. PROINPA (Bolivia). 2011. Contexto general. pp: 3-6. En: La quinua: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. FAO. Roma, Italia.
12. Urdanegui, P., Á. Pérez-Ávila, R. Estrada-Zúñiga, E. Neyra, Á Mujica y F.-A. Corredor. 2021. Rendimiento y evaluación agromorfológica de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Wild.) en Huancayo, Perú. *Agroind. Sci.* 11(1): 63-71.

13. Valdivia-Cea, W., L. Bustamante, J. Jara, S. Fisher, E. Holzapfel and R. Wilckens. 2021. Effect of soil water availability on physiological parameters, yield, and seed quality in four quinoa genotypes (*Chenopodium quinoa* Willd) [en línea]. *Agronomy* 11(5): 1012(Art. N°). <<https://doi.org/10.3390/agronomy11051012>>. [Consulta: 22 marzo 2022].