



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
FACULTAD DE AGRONOMÍA E INGENIERIA FORESTAL
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
MAGISTER EN FISIOLÓGÍA Y PRODUCCIÓN VEGETAL

Efecto de la fecha de siembra en los componentes de
rendimiento en genotipos contrastantes de quinoa
(*Chenopodium quinoa Willd.*)

Tesis presentada como requisito para optar al grado de

Magister en Fisiología y Producción vegetal

Por:

Gonzalo Ignacio Maturana Mendoza

Comité de Tesis

Profesor Guía: Úrsula Steinfert Needham

Profesor Informante: Samuel Contreras Escobar

Agradecimientos

En primera instancia quisiera agradecer el apoyo incondicional que me ha entregado mi familia a lo largo de mi carrera y de toda mi vida, son y serán mi pilar fundamental. Agradecer a mi padre y madre por estar presentes y apoyarme en cada momento en estos años. A Jael por siempre estar conmigo y a pesar de la distancia siempre ha estado para ayudarme en cada momento que lo necesite.

Mis sinceros agradecimiento a la profesora Úrsula Steinfert por su apoyo, sus conocimientos entregados durante este período tan importante en mi formación profesional, y su preocupación durante la realización de este trabajo. Además por permitirme realizar mi tesis junto a ella.

Agradecer a Alejandra y Javier, por todo el apoyo, ayuda y comprensión entregado durante esta etapa, así como buenos momentos. Agradecer de manera particular al profesor Samuel Contreras por su siempre buena disposición a enseñar y entregar conocimiento.

A mis amigos y compañeros de agronomía e ingeniería forestal, quienes estuvieron presente alentando y apoyando y siempre dispuestos a prestar su ayuda o compartir un grato momento.

Índice

Abstract.....	4
Introducción.....	6
Materiales y métodos	9
Material vegetal	9
Condiciones experimentales y diseño.....	9
Altura, tiempo térmico entre siembra-yema floral visible y entre yema floral visible-floración.....	11
Altura de plantas, biomasa total, rendimiento, peso de 1000 semillas (TKW) e índice de cosecha (IH)	12
Análisis de datos.....	12
Resultados	14
Fenología	14
Altura, biomasa total, rendimiento, IH y TKW.....	17
Biomasa y rendimiento en kg ha ⁻¹ en T2	21
Asociación entre respuestas.....	21
Discusión	23
Conclusión	26
Resumen.....	27
Referencias.....	28
Anexos.....	33

Effect of sowing date on yield components in ten contrasting quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes.

Gonzalo Maturana Mendoza

Laboratorio de Flores y Ornamentales. Departamento de Ciencias Vegetales,
Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de
Chile. Santiago, Chile.

Abstract

Gonzalo Ignacio Maturana Mendoza. Effect of sowing date on yield components in ten contrasting quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes. Tesis, *Magister* en Fisiología y Producción Vegetal, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 33 pp.

The quinoa crop (*Chenopodium quinoa* Willd.) Has stood out for its high nutritional quality and its great adaptation to various abiotic conditions, such as soils with high salinity or low water availability. Despite its great adaptability, quinoa in latitudes other than its area of origin generates variations in its potential yield. The objective of this work was to measure the effect of sowing dates in ten quinoa genotypes with different latitudes of origin and how it affects the duration of the development stages and their performance components. The trial was carried out in two seasons, with ten quinoa genotypes of different origin, on two contrasting sowing dates. A randomized complete block design was used, and the treatments are the combinations of seasons, sowing dates and genotypes. The thermal time (°Cd) from sowing to the beginning of the first visible flower bud and flowering was calculated. Height, biomass, yield, harvest index and weight of one thousand seeds were also measured. The results show that genotypes from the same group tend to behave in a similar way. In the second season, on days with the longest photoperiod, the appearance of the first flower bud is early but not the flowering. With the increase in the photoperiod, it was observed that the height in genotypes of the salar group was also higher. A positive correlation between biomass and yield was observed, the harvest index was the only variable that was not affected by the sowing date and was slightly negatively correlated with height. The TKW was higher in the second sowing dates for both seasons. In quinoa, a higher harvest index cannot be directly associated with a higher yield since it was not a trend for all genotypes.

Keywords:

Latitude, *Chenopodium quinoa* Willd., Yield, date of sowing.

Introducción

La quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) es una planta anual herbácea perteneciente a la familia Amaranthaceae (Mendoza, 2012; Rodríguez, 2017). Es originaria de Sudamérica y se cree que su domesticación comenzó en la zona andina hace unos 7000 años (Bazile, Jacobsen, & Verniau, 2016). Se cultiva desde Colombia (2° latitud N) hasta Chile (40° latitud S) y a distintas altitudes, desde cero hasta los 4000 metros sobre el nivel de mar (González, Bruno, Valoy, & Prado, 2011). Existen distintos ecotipos de quinoa de distintas latitudes adaptados a condiciones de sequía, alta salinidad (Bendevis et al., 2014), bajas temperaturas (Bertero, De La Vega, Correa, Jacobsen, & Mujica, 2004) y rangos de pH que van desde los 4,8 a los 9,5 (Zurita-Silva, Fuentes, Zamora, Jacobsen, & Schwember, 2014). La quinoa tiene una amplia diversidad genética y plasticidad fenotípica, donde las interacciones genotipo-ambiente afectan el rendimiento y el tamaño del grano al evaluar diferentes cultivares en ambientes distintos al de origen (Bertero et al., 2004).

La quinoa se clasifica como especie de día corto (Bertero, King, & Hall, 1999) sin embargo, al poseer una amplia distribución geográfica, se cree que existe una adaptación latitudinal al largo del día. En invernadero la duración de la fase vegetativa (BVP) y la sensibilidad al fotoperiodo (PPS) en genotipos de bajas latitudes, cercanos a la línea del Ecuador, tienen un BVP más largo y un PPS mayor, retrasando su floración en días con 16 horas de luz (700°Cd) comparados con los del sur de Chile (380°Cd) (Bertero, 2003). Días cortos anticipan la floración, mientras que un fotoperiodo extendido aumenta la acumulación de biomasa en antesis y disminuye el índice de cosecha y el rendimiento, ya que la asimilación de fotosintatos hacia los granos es menor (Mendoza, 2012). En invernadero, el rendimiento (mg pla^{-1}) y el llenado de granos son inhibidos en los genotipos bolivianos, altiplánicos y de valles que después de antesis son sometidos a 28°C y 16 horas de luz o más (Bertero, 2003; Jacobsen, 2006).

Existe evidencia de que el largo del día no solo afecta al cultivo de quínoa, sino que también a otros cultivos de importancia agronómica. Los cultivares de arroz de menor latitud (*indica*) son más sensibles al fotoperiodo, mientras que los de mayores latitudes (*japónica*) son menos sensibles (Summerfield, Collinson, Ellis, Roberts, & De Vries, 1992). En Pakistán, registraron que la altura de variedades de arroz Basmati sembradas en fechas tempranas (16/05) con 14:12 horas luz (Weather spark, s.f.a), fue mayor que las sembradas en fechas tardías (01/08) con 13:40 horas

de luz (Wheather spark, s.f.b)(Akhter, Ahmad, & Ramzan, 2007). En el Nagina Rice Research Station ensayos en arroz que fueron sometidos a 10 horas de luz natural por 30 días desde siembra aumentaron su rendimiento un 16,6% en todas las variedades (T.136, T.N.22 (Rajbhog), T.N.27 (Banki) y Ch.10 (Tandwa White)). En cambio, una exposición prolongada a día corto, hasta la emisión de hoja bandera, disminuyó en un 62% en el rendimiento (Misra, 1965). En día corto extendido, el peso de mil semillas disminuyó un 13%, mientras que aquellos sometidos a 30 días a día corto, no se vieron afectados (Misra, 1965). En días de 24 horas de luz continua, el rendimiento no se ve afectado y tampoco los componentes de rendimiento, como el largo de panícula, el número de espiguillas, número de granos y peso de mil semillas (Misra, 1965).

En quínoa la sensibilidad al largo del día aumentaría la altura de la planta. En el genotipo Q52 "Titicaca" la altura y el incremento del largo de día tienen una relación lineal, pasando desde los 42,8 cm en día corto a 57,9 cm en día largo (Christiansen, Jacobsen, & Jørgensen, 2010). En genotipos provenientes de zonas costeras como NL-6, Baer, Cajón y Cauquenes, el largo del día no afecta el peso de las semillas (Isobe *et al.*, 2016). En día corto y alta irradiancia aumenta la proporción de la biomasa aérea, incluyendo semillas, por sobre la biomasa de raíz, en comparación con días largos, en los cuales esta relación es menor, de esta manera, la sensibilidad al fotoperiodo afectará el rendimiento (Schlick & Bubenheim, 1996).

El fotoperiodo y temperatura actúan sobre la fenología y los componentes de rendimiento de quinoa (Bertero *et al.*, 2004, 1999; Curti, de la Vega, Andrade, Bramardi, & Bertero, 2016). Incluso en genotipos que provienen de una misma zona y que al cultivarlos en un lugar diferente, la respuesta difiere (Bertero *et al.*, 1999). El objetivo general de esta tesis es cuantificar el efecto del largo del día, en la fenología y los componentes de rendimiento de diez genotipos de quinoa contrastantes, en dos temporadas y fechas de siembra. Los objetivos específicos son (i) Determinar la duración de las etapas fenológicas hasta antes de la cosecha de genotipos contrastantes de quinoa en dos fechas de siembra, (ii) Determinar la acumulación de biomasa en cosecha y componentes de rendimiento de genotipos contrastantes de quinoa en dos fechas de siembra y (iii) Comparar el efecto de la duración de las etapas fenológicas en la acumulación de biomasa y los componentes de rendimiento de genotipos contrastantes de quinoa en dos fechas de siembra. La hipótesis planteada corresponde a que fechas tardías de siembra alargan la duración de las etapas fenológicas, generando una mayor acumulación de biomasa y componentes de

rendimiento de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*), afectando principalmente a genotipos de bajas latitudes.

Materiales y métodos

Material vegetal

En los ensayos se utilizaron 10 genotipos contrastantes de quinoa, entre los cuales se contó con variedades comerciales y ecotipos. Al hablar de ecotipos nos referimos a subpoblaciones genéticamente diferentes y que se encuentran asociadas a una zona geográfica específica (González Monroy & Rojas Martínez, 2014), mientras que una variedad comercial, corresponde a una población genéticamente similar, estable en el tiempo y con características agrícolas o económicas propias (FAO, 2008). El material vegetal utilizado proviene desde Bolivia hasta el sur de Chile (Cuadro 1).

Condiciones experimentales y diseño

Dos ensayos fueron llevados a cabo en temporadas consecutivas: 2018-2019 (T1) y 2019-2020 (T2), en la estación experimental de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Pirque (33° 40' S Lat., 70° 36' E Long.), Región Metropolitana, Chile. El clima de la zona es templado con lluvias invernales (Csb) según la clasificación de Köppen Geiger (di Castri y Hajek, 1976). En T1 se fertilizó en presembrado con 50 kg de nitrato de potasio, alcanzando 6,5 kg de N, 0 kg de P y 22 kg de K en suelo y se utilizó un sistema de riego por surco. Mientras tanto, en T2 la fertilización de presembrado fue con 118 kg de nitrato de potasio, alcanzando 15,3 kg de N, 0 kg de P y 51,9 kg de K en el suelo, además el sistema de riego fue por cinta con un caudal de 1 L h⁻¹, con una distancia entre goteros de 10 cm.

Cuadro 1. Genotipos de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) utilizados en los ensayos. Se especifica el centro de origen, latitud y la clasificación

Genotipos	Acrónimo	Centro de origen	Grupos	Latitud	Clasificación	Referencia
Pasankalla	PA	Altiplano peruano	Altiplano	15'50 °S	Variedad Comercial	(Apaza, Cáceres, Estrada, & Pinedo, 2013)
INIA salcedo	IN	Altiplano peruano	Altiplano	15'50 °S	Variedad Comercial	(Apaza <i>et al.</i> , 2013)
Negra Collana	NE	Altiplano peruano	Altiplano	15'50 °S	Variedad Comercial	(Apaza <i>et al.</i> , 2013)
Rojo	RO	Salares de Bolivia	Salares	20'60 °S	Ecotipo	(Bonifacio, Aroni, & Villca, 2012)
Ancovinto Roja	AR	Salares de Chile	Salares	19'4 °S	Ecotipo	(Fuentes, Maughan, & Jellen, 2009)
Ancovinto Amarilla	AN	Salares de Chile	Salares	19'4 °S	Ecotipo	(F Fuentes <i>et al.</i> , 2009)
G1	G1	Costa central Chile	Costa	35 °S	Ecotipo	(Bazile, Martínez, & Fuentes, 2014)
G2	G2	Costa central Chile	Costa	35 °S	Ecotipo	(Bazile <i>et al.</i> , 2014)
Regalona	RE	Costa sur Chile	Costa	38'5 °S	Variedad Comercial	(Von Baer, Bazile, & Martinez, 2009)
Chiloé	CH	Costa sur Chile	Costa	43 °S	Ecotipo	(Ahumada <i>et al.</i> , 2019).

Los genotipos se sembraron en dos fechas contrastantes: temprana (S1) y tardía (S2) (Cuadro 2). En estos ensayos la unidad experimental corresponde a la parcela con cinco hileras cada una, con distancias de 0,5 m entre hilera y 0,07 m sobre hilera. En la segunda temporada (T2) se realizó un raleo de plantas con el fin de dejar una cantidad de 28 plantas por metro cuadrado. Los ensayos fueron diseñados en bloques completos al azar, los tratamientos corresponden a la combinación de año, fecha de siembra y genotipo. Para ambas temporadas se hizo un control manual de malezas, además de mantenerse libre de plagas y enfermedades

Cuadro 2. Características de los ensayos. Se especifican los genotipos utilizados en las parcelas, en los bordes y fechas de siembra para S1 y S2 para ambas temporadas (T1 y T2).

	T1	T2
Año	2018-2019	2019-2020
Siembra temprana (S1)	17 agosto	03 septiembre
Siembra tardía (S2)	09 noviembre	19 noviembre
Superficie parcela S1	12,5 m ²	12,5 m ²
Superficie parcela S2	8,75 m ²	12,5 m ²
Genotipos en parcela	AN, AR, CH, IN, G1, G2, NE, PA, RO y RE	AN, AR, CH, IN, G1, NE, PA, RO y RE
Genotipos bordes	G3, G4 y G5	G2

Fuente: Osorio, 2020

Altura, tiempo térmico entre siembra-yema floral visible y entre yema floral visible-floración

En ambas temporadas se seleccionó al azar 1 m² por parcela, en el que se marcaron 10 plantas aleatoriamente. Utilizando la escala de Sosa-Zuñiga *et al.*, (2017) se realizó un seguimiento dos veces por semana del estado fenológico de las plantas marcadas entre siembra hasta inicios de floración (DC61) y luego semanalmente hasta madurez (DC91). La duración de las etapas fenológicas entre siembra y primera yema floral visible (DC51) y entre DC51 y DC61, se calculó mediante el tiempo térmico, utilizando la suma de la temperatura media diaria que fue medida cada 15 minutos con data loggers HOBO® Pro v2 (U23-00x), a la cual se restó una temperatura base de 0 °C.

Altura de plantas, biomasa total, rendimiento, peso de 1000 semillas (TKW) e índice de cosecha (IH)

En DC91 y en ambas temporadas, se midió la altura de cada una de las 10 plantas marcadas. La biomasa total de la parte aérea fue medida en DC91 en ambas temporadas, en un metro cuadrado por parcela. Las plantas cosechadas fueron secadas en una estufa a 60 °C por tres días o hasta obtener un peso estable por dos días consecutivos, con el fin de eliminar la humedad restante del grano, obteniendo así el valor de biomasa seca y rendimiento. Durante T2, la biomasa total y el peso de granos por metro cuadrado fueron extrapolados a kg ha^{-1} para compararlo con rendimientos obtenidos en otros ensayos.

Una vez que las plantas llegaron a un estado de madurez (DC91) y los granos fueron secados en la estufa, se separaron de manera aleatoria 300 granos para ser pesados, este valor fue extrapolado a 1000 granos (TKW) para compararlo con valores obtenidos en otros ensayos. Finalmente, el índice de cosecha (IH) se calculó como el cociente entre el peso de granos y el peso seco total de biomasa aérea por planta en DC91 en T1, mientras que en T2 se calculó por metro cuadrado y por planta.

Análisis de datos

Se calculó el tiempo térmico acumulado para alcanzar los estados de DC51 y DC61, así como la altura, la biomasa total, el rendimiento, el TKW e IH. Se utilizó un modelo mixto lineal para analizar la interacción entre la temporada, la fecha de siembra y el genotipo para fenología y altura, mientras que para los datos de biomasa, se analizó la interacción entre fechas de siembra y genotipo. Los genotipos se propusieron como factores fijos, ya que se comparó directamente el comportamiento individual con el resto. Para comprobar la significancia de estos factores se realizaron pruebas de máxima probabilidad. El modelo fue ajustado mediante la comparación de los valores del criterio de Akaike con pruebas de Chi cuadrado ($\alpha = 0,05$) (Akaike, 1974). Los modelos utilizados y sus funciones se detallan en el cuadro 3. Para ello se hizo uso del paquete *lme4* de R (Bates, Maechler y Dai, 2009).

Cuadro 3. Modelos generalizados mixtos. Se especifican los modelos utilizados para cada respuesta, la distribución a la que pertenecen y la función enlace utilizada en el análisis. T (Temporada), S (Fecha de siembra), G (Genotipo), x (Interacción) y B (Bloque).

Respuesta	Modelo	Distribución	Función enlace
Fenología			
DC51	T + S + G + TxS + TxG + SxG + TxSxG + B + TxB	Gamma	Recíproco
DC51-61			Recíproco
DC61			Recíproco
Altura	T + S + G + TxS + TxG + SxG + TxSxG + B + TxB	Gamma	Recíproco
Biomasa			
Total	S + G + SxG + B + SxB	Gamma	Logaritmo natural
Rendimiento	S + G + SxG + B + SxB	Gamma	Logaritmo natural
TKW	S + G + SxG + B + SxB	Gamma	Logaritmo natural
IH	S + G + SxG + B + SxB	Gamma	Logaritmo natural

Se realizó una comparación de las medias de las respuestas de cada temporada y fecha de siembra con pruebas de Tukey ($\alpha = 0,05$) y se hizo un ajuste de valores de p según el método de Bonferroni (Dunn, 1961) para minimizar el error tipo I (Armstrong, 2014). Las medias se ajustaron con el método de mínimos cuadrados, ya que permite calcular el error respecto del total propuesto por el modelo, aun cuando se cuente con datos incompletos o dispares, además se utilizó el paquete de R *emmeans* (Lenth, 2015).

Para cuantificar la asociación de altura-IH y biomasa-rendimiento, se estimó el coeficiente de correlación de Pearson (r). Se consideró como baja o débil correlación cuando el valor de r es menor a 0,35; moderada cuando el valor de r es mayor a 0,35 y menor a 0,70, alta cuando es mayor a 0,70 y muy alta cuando el valor de r supera 0,90 (Taylor 1990).

Resultados

Fenología

El efecto de la temporada, genotipo y de su interacción fueron significativos sobre el tiempo térmico desde siembra a DC51 ($p < 0,05$). El tiempo térmico promedio en T2 (622 ± 4 °Cd) fue superior en un 7% en comparación con T1 (576 ± 4 °Cd).

En T1, el genotipo que más demoró entre siembra y primera yema floral fue PA con 656 ± 10 °Cd, mientras que aquel que más rápido llegó a DC51 fue AN con 528 ± 8 °Cd. La duración entre siembra a primera yema floral visible (DC51) fue mayor en los genotipos (CH, G1, G2 y RE) con 611 ± 9 °Cd provenientes del grupo costero, seguido de los genotipos del altiplano (IN, NE y PA) y de salares (AN, AR y RO), los cuales alcanzaron esta fase con 4 y 12% menos grados día.

En la segunda temporada, el genotipo que más tardó de siembra a DC51 fue PA con 776 ± 9 °Cd, el que menos demoró entre siembra y primera yema floral es AR con 531 ± 6 °Cd. Esta duración de siembra a DC51 fue mayor en los genotipos provenientes del grupo altiplánico con 654 ± 12 °Cd, los genotipos del grupo costa alcanzaron DC51 en un 1% menos grados día, en cambio en los genotipos de salar el tiempo de siembra a primera yema flora fue un 13% menor.

El efecto de la temporada, fecha de siembra, genotipo, la interacción fecha de siembra-genotipo, fecha de siembra-temporada y temporada-genotipo fueron significativos sobre el tiempo térmico acumulado a DC61 ($p < 0,05$). El tiempo acumulado en T2 (1112 ± 7 °Cd) fue mayor a T1 (1010 ± 6 °Cd) en un 9%. En S1, la duración entre siembra y DC61 fue un 6% mayor en T2 (1065 ± 39 °Cd), comparado con T1 (1004 ± 26 °Cd). En S2, la floración ocurrió más tarde en T2 (1202 ± 41 °Cd) demorando un 14% que T1 (1028 ± 15 °Cd)

El tiempo térmico acumulado de siembra a DC61 en S2, fue mayor en todos los genotipos en T2 comparado con T1 ($p < 0,05$). En T1S2 (Cuadro 4), el genotipo que floreció más tarde fue PA con 1297 ± 25 °Cd y el que alcanzó esta etapa más rápido fue RE con 920 ± 18 °Cd. El grupo que en promedio demora más en alcanzar floración fue altiplano con 1227 °Cd, los genotipos costeros fueron un 23% menor y salar un 24% menor.

En T2S2 (Cuadro 4) el genotipo que necesitó más tiempo térmico para florecer fue PA con 1908 ± 37 °Cd y AR con 987 ± 19 °Cd floreció más temprano que el resto de

los genotipos. A nivel de grupo, los altiplánicos requirieron de más tiempo entre siembra y DC61 con 1538 °Cd, el grupo costa es un 32% menor y salar un 33% menor.

En la primera fecha de siembra de T1 (Cuadro 4), el genotipo que más demoro entre siembra y floración fue IN (1147 ± 22 °Cd). Mientras quien menos entre siembra y floración es AR (869 ± 17 °Cd). El grupo que necesitó más tiempo para florecer fue el altiplánico con un promedio de 1113 °Cd, seguido del grupo costa con un 10% menos y salar un 19% menor que el altiplánico.

En la temporada siguiente (Cuadro 4) el genotipo que más tarde floreció fue PA con 1371 ± 27 °Cd y el que lo hizo de manera más precoz fue AR con 883 ± 17 °Cd. En esta ocasión, el grupo que necesitó de más tiempo entre siembra y DC61 fue el altiplánico con 1264 °Cd, los genotipos del grupo costa fueron un 21% menor y el salar un 26% menor.

Cuadro 4. Tiempo térmico de etapas fenológicas en dos fechas de siembra de quinoa. Tiempo térmico acumulado (TT °Cd) en 10 ecotipos a DC51 y DC61 para ambas fechas de siembra (S1 y S2) y en ambas temporadas (T1 y T2). Letras minúsculas diferentes indican diferencias de medias de TxG de acuerdo con la prueba de Tuckey ($p < 0,05$). Letras mayúsculas indican diferencias de media de TxSxG de acuerdo con la prueba de Tuckey ($p < 0,05$). Temporada (T), fecha de siembra (S), Temporada (T) y las interacciones entre ellas(x).

Tiempo Térmico (°Cd)											
T1						T2					
S1			S2			S1			S2		
Genotipo	DC51	DC61	DC51	DC61		DC51	DC61		DC51	DC61	
AN	527 ± 10 e	871 ± 17 eR	529 ± 10 c	937 ± 18 cOP		588 ± 11 c	960 ± 19 dMNOP		587 ± 11 b	1016 ± 20 eJKL	
AR	546 ± 10 de	869 ± 17 eR	529 ± 10 c	924 ± 18 cOPQ		545 ± 10 d	883 ± 17 eQR		517 ± 10 c	987 ± 19 eLMN	
CH	573 ± 11 bcd	941 ± 18 dNOP	632 ± 12 b	924 ± 18 cOPQ		715 ± 14 ab	977 ± 19 dLMN		620 ± 12 b	1007 ± 20 eKLM	
G1	606 ± 12 a	1055 ± 21 cIJK	637 ± 12 b	959 ± 19 cMNOP		689 ± 13 ab	1106 ± 21 cGHI		612 ± 12 b	1125 ± 22 cdGH	
G2	586 ± 27 abc	1038 ± 26 c	705 ± 38 a	979 ± 9 c							
IN	580 ± 11 abc	1147 ± 22 aFG	531 ± 12 c	1093 ± 26 bGHI		592 ± 11 c	1195 ± 23 bcEF		586 ± 11 b	1189 ± 23 cEF	
NE	556 ± 11 cd	1124 ± 22 abGH	544 ± 10 c	1295 ± 25 aD		606 ± 12 c	1224 ± 24 bE		586 ± 11 b	1516 ± 29 bB	
PA	548 ± 10 d	1069 ± 21 bcHIJ	786 ± 15 c	1297 ± 25 aD		744 ± 14 a	1371 ± 27 aC		810 ± 15 a	1908 ± 37 aA	
RE	587 ± 11 ab	959 ± 19 dMNOP	633 ± 12 b	920 ± 18 cOPQ		667 ± 13 b	910 ± 18 dePQR		622 ± 12 b	1005 ± 20 eKLM	
RO	556 ± 11 cd	971 ± 19 dLMNO	529 ± 10 c	960 ± 19 cMNOP		586 ± 11 cd	962 ± 19 dMNO		587 ± 11 b	1063 ± 21 deIJ	

Valor P	T	S	G	TxS	TxG	SxG	TxSxG
DC51	< 0,0001	0,7652	< 0,0001	-	< 0,0001	-	-
DC61	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,0704

Altura, biomasa total, rendimiento, IH y TKW

En la primera temporada la altura de las plantas es determinada por el efecto de la fecha de siembra, genotipo y la interacción entre ambas ($p < 0,05$). Los genotipos de mayor y menor altura en S1(Cuadro 5) son IN con 223 ± 7 cm y RE con 91 ± 3 cm. Mientras tanto en S2 el genotipo más alto es PA con 233 ± 7 cm y el más bajo es RE 128 ± 4 cm. A nivel de grupo en S1 el grupo más alto es altiplano, siendo un 39% mayor que los genotipos de salar y 42% más que los genotipos costeros. En la S2, el grupo altiplánico fue 29% más alto que el grupo costa y 31% más que salar.

En T1, la biomasa es determinada por el efecto de la fecha de siembra, genotipo y la interacción entre ambos ($p < 0,05$). La biomasa total obtenida por planta en T1 fue de 243 ± 63 gr pl^{-1} , el peso alcanzado en S1 (246 ± 21 gr pl^{-1}) fue un 39 % mayor a la biomasa en S2 (149 ± 13 gr pl^{-1}), alcanzando a diferenciarse entre ellas ($p < 0,05$).

En S1 de la primera temporada, el genotipo de mayor biomasa (Cuadro 5) es PA con 619 ± 101 gr pl^{-1} y el menor es RE con 69 ± 11 gr pl^{-1} . En la siguiente fecha de siembra, los genotipos de mayor y menor biomasa son NE (415 ± 83 gr pl^{-1}) y RE (56 ± 9 gr pl^{-1}). En S1 el grupo de altiplano alcanzó un peso de 511 ± 84 gr pl^{-1} , siendo el de mayor biomasa superando al grupo salar en un 52% y en un 66% a costa. En S2, la biomasa del grupo altiplánico alcanzó los 345 ± 74 gr pl^{-1} superando en un 64% a los de costa y por un 82% a salar.

En la misma temporada, el efecto de la fecha de siembra, genotipo y la interacción entre ambos determinan el rendimiento de las plantas ($p < 0,05$). El rendimiento en T1 (Cuadro 5) fue de 71 ± 5 gr pl^{-1} , el promedio del rendimiento en S1 fue de 88 ± 6 gr pl^{-1} , superando por un 40% mayor a S2 que alcanzó un rendimiento de 53 ± 4 gr pl^{-1} . El genotipo con mayor rendimiento en S1 es IN con 173 ± 26 gr pl^{-1} y el menor es RE con 36 ± 5 gr pl^{-1} . En S2, los genotipos de mayor y menor rendimiento son IN (101 ± 18 gr pl^{-1}) y AN (25 ± 4 gr pl^{-1}). Los genotipos del grupo altiplánico alcanzaron el mayor rendimiento en S1 con 127 ± 19 gr pl^{-1} , superando en un 32% a salar y en un 37% costa. En S2 los genotipos del altiplano alcanzaron un rendimiento de 90 ± 15 gr pl^{-1} , superando al grupo salar por un 36% y por un 64% a costa.

En T1 el índice de cosecha se determina por el efecto de los genotipos (Cuadro 5). En esta temporada el genotipo con mayor índice de cosecha es CH con $0,54 \pm 0,02$, mientras que los de menor índice es NE con $0,21 \pm 0,1$. El comportamiento a nivel de grupo indica que los genotipos de costa ($0,48 \pm 0,02$) fueron 27% mayor que los de salar y 46% mayor que altiplano.

En T1, el efecto de la fecha de siembra, genotipo y la interacción entre ambos es significativo en el TKW de las plantas ($p < 0,05$). El TKW de S2 alcanzó un valor de $7,73 \pm 0,12 \text{ gr pl}^{-1}$ siendo un 5% superior comparado con S1, que alcanzó los $7,34 \pm 0,11 \text{ gr pl}^{-1}$. En S1 el genotipo con mayor TKW es RO con $8,89 \pm 0,44 \text{ gr pl}^{-1}$, mientras que el menor es NE con $5,93 \pm 0,29 \text{ gr pl}^{-1}$. En S2 el genotipo de mayor peso es RO con $9,63 \pm 0,47 \text{ gr pl}^{-1}$ y el menor es NE con un TKW de $4,81 \pm 0,24 \text{ gr pl}^{-1}$. En la S1 los genotipos del grupo salar ($8,15 \pm 0,65 \text{ gr pl}^{-1}$) fueron mayores que costa y altiplano por un 6% y 24% respectivamente. En la siguiente fecha el grupo salar ($8,77 \pm 0,52 \text{ gr pl}^{-1}$) volvió a ser superior que costa en un 7% y un 30% que altiplano.

En T2 (Cuadro 5), el efecto del genotipo determina la altura de las plantas ($p < 0,05$). El genotipo de mayor altura es IN con $168 \pm 10 \text{ cm}$ y el más bajo es RE con $106 \pm 6 \text{ cm}$. El grupo de mayor altura fue el altiplánico con un promedio de $159 \pm 10 \text{ cm}$, siendo un 24% y 19% más alto que los genotipos del grupo costa y salar.

En T2, el efecto del genotipo es lo que determina la biomasa ($p < 0,05$). En esta temporada los genotipos con mayor y menor biomasa son IN ($68 \pm 8 \text{ gr m}^{-2}$) y RE ($26 \pm 3 \text{ gr m}^{-2}$). El comportamiento de los grupos muestra que los genotipos del grupo altiplánico tienen la mayor biomasa ($62 \pm 7 \text{ gr m}^{-2}$), siendo un 27% mayor que salar y un 53% más que costa.

En la segunda temporada, el rendimiento se determina por el efecto del genotipo (Cuadro 5). En T2 los genotipos de mayor y menor rendimiento son IN ($22 \pm 3 \text{ gr m}^{-2}$) y RE ($8 \pm 1 \text{ gr m}^{-2}$). El rendimiento del grupo salar fue de $17 \pm 3 \text{ gr m}^{-2}$ siendo un 12% superior que los de altiplano y un 41% mayor que costa.

En T2, el índice de cosecha se determina por el efecto de los genotipos, el cual es significativo ($p < 0,05$). El genotipo con mayor índice de cosecha es CH con un valor de $0,39 \pm 0,03$ y el menor es PA con un índice de $0,2 \pm 0,01$. En esta temporada los genotipos del grupo costa alcanzaron en promedio un mayor índice ($0,35 \pm 0,02$), superando a salar por un 6% y en un 37% a altiplano.

En T2, el efecto de la fecha de siembra, genotipo y la interacción entre ambos determinan el TKW ($p < 0,5$). En S1 el promedio de TKW (Cuadro 5) fue $7,01 \pm 0,13 \text{ gr m}^{-2}$, el genotipo que alcanzó un mayor valor fue AN con $7,41 \pm 0,4 \text{ gr m}^{-2}$ y el menor es IN con $4,44 \pm 0,24 \text{ gr m}^{-2}$. En S2 el promedio de TKW fue $5,98 \pm 0,11 \text{ gr m}^{-2}$, el genotipo con mayor valor es AN con $7,41 \pm 0,4 \text{ gr m}^{-2}$, de manera opuesta el genotipo con menor TKW fue IN con $4,44 \pm 0,24 \text{ gr m}^{-2}$. En S1 el grupo costa fue el mayor de TKW ($7,65 \pm 0,5 \text{ gr m}^{-2}$), superando al grupo salar por un 14% y por un 29% a altiplano. En S2 los del

grupo costa($8,15 \pm 0,4 \text{ gr m}^{-2}$) fueron mayor por un 20% que el grupo salar y por un 21% que altiplano.

Cuadro 5. Altura de plantas de quinoa, biomasa, rendimiento, IH y TKW. Promedio de altura del tallo principal (cm), biomasa total en final de DC91, rendimiento en 10 ecotipos de quinoa en DC91 en dos fechas de siembra (S1 y S2) en la temporada 2018-2019(T1) en g pl⁻¹ y 2019-2020(S2) en g m⁻². Letras minúsculas diferentes indican diferencias de medias entre los genotipos acuerdo con la prueba de Tuckey respecto a cada parámetro (p < 0,05). Letras mayúsculas indican diferencias de media de SxG de acuerdo con la prueba de Tuckey (p < 0,05). Temporada (T), fecha de siembra (S), Temporada (T) y las interacciones entre ellas(x). Temporada (T), fecha de siembra (S) y las interacciones entre ellas(x)

Temporada	T1			T2			T1			T2			T1			T2			T1			T2						
	S1																											
Genotipo	Altura (cm)				Biomasa (gr pl ⁻¹)				Biomasa (gr m ⁻²)				Rendimiento (gr pl ⁻¹)				Rendimiento (gr m ⁻²)				IH				TKW (gr pl ⁻¹)			
AN	126,57 ± 3,75	cdHI	118,28 ± 10,05	def	238,19 ± 38,9	bcdCDEFG	36,29 ± 6,07	bc	97,07 ± 14,3	abcBCDE	14,18 ± 3	d	0,41 ± 0,02	c	0,39 ± 0,04	ab	8,15 ± 0,52	abBC	7,41 ± 0,52	aA								
AR	112,76 ± 3,34	eJ	113,31 ± 9,62	ef	154,22 ± 25,2	cdGH	55,11 ± 9,21	abc	58,58 ± 8,59	deFGH	23,03 ± 5	a	0,38 ± 0,02	d	0,42 ± 0,04	a	7,41 ± 0,52	abcCDE	5,56 ± 0,30	abD								
CH	137,16 ± 4,06	cG	157,63 ± 13,38	abc	147,43 ± 24,1	dGH	33,66 ± 5,62	bc	81,84 ± 12	cdCDEF	11,27 ± 2	e	0,56 ± 0,02	a	0,33 ± 0,03	ab	6,67 ± 0,00	bcdEFG	5,93 ± 0,32	abCD								
G1	122,23 ± 3,62	del	130,02 ± 11,06	cde	220,54 ± 36	bcdDEFG	32,24 ± 5,39	bc	91,95 ± 13,5	abcCDEF	11,98 ± 3	e	0,41 ± 0,02	c	0,38 ± 0,04	ab	7,78 ± 0,91	abcBCD	6,30 ± 0,34	abBCD								
G2	126,24 ± 3,74	cdeHI			246,96 ± 40	bcdCDEF			106,3 ± 15,6	abcBC		0	0,43	0,02	bc		8,15	1,39	abBC									
IN	223,21 ± 6,62	aABC	192,84 ± 16,37	a	574,73 ± 93,8	aA	70,71 ± 11,8	a	173,26 ± 25,5	aA	21,04 ± 5	b	0,3 ± 0,01	ef	0,3 ± 0,03	ab	6,30 ± 0,52	cdFG	4,44 ± 0,24	cE								
NE	178,17 ± 5,28	bDE	157,57 ± 13,39	abc	339,31 ± 55,4	abBC	57,58 ± 9,66	ab	68,11 ± 9,99	deEFG	15,97 ± 4	c	0,2 ± 0,01	f	0,27 ± 0,03	b	5,93 ± 0,52	dG	6,30 ± 0,34	abBCD								
PA	210,57 ± 6,24	aBC	180,56 ± 15,33	ab	618,49 ± 102	aA	54,09 ± 9,05	abc	139,27 ± 20,5	abAB	8,2 ± 2	f	0,25 ± 0,01	g	0,15 ± 0,01	c	6,30 ± 0,52	cdfg	5,56 ± 0,30	abD								
RE	90,79 ± 2,69	bK	114,15 ± 9,69	ed	69,19 ± 11,3	eJK	29,51 ± 4,91	c	36,04 ± 5,29	eIJ	9,7 ± 2	e	0,52 ± 0,02	ab	0,33 ± 0,03	ab	8,52 ± 0,52	aABC	6,11 ± 0,41	abBCD								
RO	135,54 ± 4,02	cdGH	136,14 ± 11,56	cde	324,91 ± 53,3	abcBCDE	44,89 ± 7,5	abc	101,75 ± 15	abcBCD	14,74 ± 3	d	0,32 ± 0,01	de	0,33 ± 0,03	ab	8,89 ± 0,91	aAB	6,67 ± 0,36	abABC								
	S2																											
AN	155,66 ± 4,61	cF	140,85 ± 11,96	cde	84,31 ± 23,5	deJK	48 ± 7,97	a	25,42 ± 3,73	cJ	16,39 ± 4	ab	0,3 ± 0,01	b	0,33 ± 0,03	ab	8,52 ± 0,52	abABC	6,67 ± 0,36	abABC								
AR	134,97 ± 3,99	dGH	134,49 ± 11,42	cde	78,45 ± 20,7	deJK	48,5 ± 8,05	a	27,75 ± 4,07	cJ	13,62 ± 3	b	0,35 ± 0,02	b	0,28 ± 0,03	ab	8,15 ± 0,52	abcBCD	5,93 ± 0,32	bCD								
CH	190,82 ± 5,65	bDE	138,95 ± 11,8	cde	193,81 ± 39,1	abcEFGH	38,05 ± 7,24	ab	100,08 ± 18,4	abBCDE	17,38 ± 4	c	0,52 ± 0,03	a	0,45 ± 0,05	a	7,04 ± 0,52	bcdDEF	7,78 ± 0,43	aA								
G1	161,04 ± 4,76	cF	86,74 ± 7,36	g	90,58 ± 14,8	deHIJ	21,36 ± 3,55	c	41,72 ± 6,14	bcHI	7,91 ± 2	d	0,46 ± 0,02	a	0,37 ± 0,03	a	8,89 ± 0,00	aAB	6,67 ± 0,36	abABC								
G2	156,08 ± 4,62	cF			156,7 ± 25,5	abcFGH			69,66 ± 10,2	abDEF			0,45	0,02	a		6,67	0,91	cefg									
IN	229,09 ± 8,04	aAB	146,22 ± 12,43	bcd	288,97 ± 56,8	abBCDE	64,76 ± 10,8	a	100,46 ± 17,9	aBCDE	22,92 ± 5	a	0,35 ± 0,02	b	0,34 ± 0,03	ab	5,19 ± 3,67	abcBCDE	6,30 ± 0,34	abBCD								
NE	208,49 ± 6,17	abC	136,03 ± 11,56	cde	416,46 ± 82,6	aAB	54,18 ± 9,01	a	95,65 ± 17,2	abBCDE	14,21 ± 3	b	0,23 ± 0,01	c	0,26 ± 0,02	b	4,81 ± 0,52	dH	5,19 ± 0,52	abA								
PA	232,74 ± 6,89	aA	148,16 ± 12,58	bc	329,45 ± 82,6	aBCD	72,09 ± 15,6	a	72,9 ± 10,8	abCDEF	19,59 ± 4	a	0,22 ± 0,01	c	0,27 ± 0,02	b	8,52 ± 0,52	abABC	7,78 ± 0,43	aA								
RE	127,71 ± 3,78	eGHI	98,31 ± 8,36	fg	55,69 ± 12,2	eK	23,26 ± 4,42	bc	27,29 ± 4	cJ	5,76 ± 2	e	0,49 ± 0,02	a	0,25 ± 0,03	b	8,52 ± 0,52	abABC	7,41 ± 0,40	abA								
RO	166,71 ± 4,93	cEF	135,76 ± 11,53	cde	134,17 ± 21,9	cdHI	40,49 ± 6,75	abc	46,02 ± 6,74	abcGHI	11,23 ± 2	bc	0,34 ± 0,02	b	0,27 ± 0,03	a	9,63 ± 0,52	abA	7,04 ± 0,38	abAB								
VALOR P																												
S	< 0,0001			0,1522	0,0002			0,823	< 0,0001			0,8637	0,5322			0,8289	0,0262			< 0,0001								
G	< 0,0001			< 0,0001	< 0,0001			< 0,0001	< 0,0001			0,0001	< 0,0001			< 0,0001	< 0,0001			0,0001								
SXG	< 0,0001			0,0035	0,0001			-	< 0,0001			-	-			-	0,0001			0,0026								

Biomasa y rendimiento en kg ha⁻¹ en T2

El promedio de biomasa durante S1 fue de 13.007 ± 2.242 kg ha⁻¹, el genotipo que obtuvo un mayor peso fue IN con 19.799 ± 1126 kg ha⁻¹ y el de menor peso fue RE con 8.455 ± 2063 kg ha⁻¹. En S2 la biomasa promedio alcanzada fue de 12.881 ± 3386 kg ha⁻¹, el genotipo con mayor peso es PA con 20.520 ± 4353 kg ha⁻¹. Mientras que el genotipo de menor biomasa es RE con 5.995 ± 574 kg ha⁻¹. En S1 el grupo altiplano fue mayor que el grupo costa un 47%, mientras que del grupo salar un 26%. En S2 el grupo altiplano fue mayor que salar por un 26% y un 58% mayor que costa.

En S1 el rendimiento promedio fue de 4056 ± 879 kg ha⁻¹, el genotipo de mayor rendimiento en esta fecha de siembra fue AR 5.841 ± 350 kg ha⁻¹ y el de menor rendimiento es PA con 2.179 ± 471 kg ha⁻¹. En S2 el promedio del rendimiento entre genotipos fue de 4.066 ± 1792 kg ha⁻¹, el genotipo de mayor rendimiento es IN con 6.384 ± 3231 kg ha⁻¹ y el menor es G1 con un valor de 2.114 ± 480 kg ha⁻¹. En la primera fecha de siembra el grupo salar fue un 13% mayor que altiplano y un 36% mayor que costa. En S2 el grupo altiplano fue mayor que el salar por un 25% y mayor que costa por un 47%.

Asociación entre respuestas

En T1, el rendimiento por planta aumenta en la medida que aumenta la biomasa por planta, se encontró una correlación lineal (Anexo 1), con un valor de r fue de 0,71 siendo un valor alto y significativo, mientras que en T2 (Anexo 2) esta relación fue de 0,69 considerándose una relación significativa entre la biomasa y el rendimiento. Por otro lado, en T1 (Anexo 1) y T2 (Anexo 2) no existe una relación significativa entre altura y el IH.

Cuadro 6. Biomasa total y Rendimiento. Biomasa total seca de plantas de quinoa (kg ha⁻¹) y rendimiento de plantas de quinoa (kg ha⁻¹) en 10 ecotipos de quinoa en dos fechas de siembra (S1 y S2) en la temporada 2019-2020(T2).

Temporada			T2		
			S1		
Genotipo	Biomasa (Kg ha-1)		Rendimiento (Kg ha-1)		
AN	10206	± 1919	3991	± 1133	
AR	15575	± 1770	6484	± 931	
CH	9510	± 1074	3169	± 646	
G1	9247	± 2207	3388	± 1227	
G2					
IN	19799	± 1126	5842	± 350	
NE	16629	± 6347	4664	± 2017	
PA	15144	± 3023	2179	± 471	
RE	8456	± 2063	2742	± 793	
RO	12498	± 652	4044	± 343	
			S2		
AN	13879	± 3821	4813	± 1998	
AR	13903	± 3126	3883	± 979	
CH	10513	± 677	3599	± 1148	
G1	5989	± 1872	2114	± 480	
G2					
IN	18248	± 6812	6384	± 3231	
NE	15057	± 3973	4017	± 1907	
PA	20520	± 4353	5712	± 2727	
RE	5995	± 574	2742	± 1883	
RO	11819	± 5265	3332	± 1772	

Discusión

Las diferencias encontradas entre temporadas, fechas de siembra, altura entre genotipos en la altura, fenología, biomasa, rendimiento, IH y TKW son a causa de las condiciones ambientales a las cuales fueron sometidos los ensayos, además de la respuesta particular que cada genotipo posee. Uno de los principales factores abióticos que afectan al rendimiento son el fotoperíodo (Curti, de la Vega, Andrade, Bramardi, & Bertero, 2016) y temperatura (Bertero, King, & Hall, 2000).

El tiempo térmico requerido para alcanzar ambas etapas (DC51 y DC61) fue superior en la segunda temporada. A nivel de genotipo aquellos que pertenecen al grupo salar, en todas las oportunidades fueron los primeros en alcanzar la etapa de DC51, seguido de altiplano y finalmente el grupo costa. Para DC61 ocurre algo similar, el grupo salar fue el primero en todos los casos, en el segundo lugar se encuentran los de costa y al último los de altiplano. Como se ha reportado los genotipos con mayor sensibilidad al fotoperíodo son los de menor latitud de origen (Bertero et al., 1999; Jacobsen, 2006; Mendoza, 2012), en este caso los genotipos con un origen más al sur (CH, G1, G2 y RE) requieren de una mayor acumulación de grados día para alcanzar DC51. Esto se debe en parte a que la respuesta del fotoperíodo que es afectada por la temperatura (Bhargava, Shukla, & Ohri, 2007; Jacobsen, 2006), esta fue cuantificada y se sabe que sobre los 16°C, incluso genotipos como G1 o G2 se vuelven más sensibles al fotoperíodo (Bertero et al., 1999). Lo anterior permite explicar porque los genotipos requirieron de una menor acumulación de grados días.

La diferencia de altura entre las fechas de siembra para las dos temporadas se asocia a las temperaturas a las cuales se desarrollaron las plantas, coincidente con lo dicho por Yang *et al.* (2016), quien establece que el genotipo Titicaca a 25°C es significativamente más alto en comparación con aquellas sometidas a 18°C. La interacción ambiente-genotipo es el principal influyente en la característica de la altura alcanzada en plantas de quinoa (Uquillas et al., 2019). En T1, la altura de todos los genotipos en S2 fue mayor debido a mayores temperaturas durante este período de tiempo (más cercano al verano).

En la biomasa a nivel de genotipos se logra apreciar que aquellos que son más insensibles al fotoperíodo como los provenientes del sur de Chile se adaptan mejor a las condiciones del largo del día, manteniendo una mejor distribución de fotoasimilados

hacia las yemas tanto en día corto como en día largo, en cambio, las plantas sensibles al largo del día (día corto), para mantener un buen crecimiento reproductivo requieren de días cortos (Bendavis et al., 2014). En T1 los genotipos del altiplano alcanzan los valores más altos de biomasa en ambas fechas de siembra, pero esto no se ve reflejado en el peso de granos alcanzando valores aproximados del 20-30% de la biomasa total. Mientras tanto, en la misma temporada los genotipos de origen más al sur (RE y CH) esta relación alcanza aproximadamente un 45%. En tomate y trigo genotipos sensibles a fotoperíodos de día corto son ineficientes al ajustar la traslocación de asimilados adicionales hacia los sumideros en un fotoperíodo extendido (Bertero et al., 2004; Cruz-Aguado, Rodés, Ortega, Pérez, & Dorado, 2001; Dorais, Yelle, & Gosselin, 1996). Se ha registrado una débil correlación positiva entre biomasa y altura (Herrera, 2018), durante la primera temporada PA obtuvo la mayor altura y biomasa con 221,7 cm y 474,7 gr pl⁻¹, mientras que RE es el más bajo y con menor biomasa con 109,2 cm y 62,5 gr pl⁻¹.

Para las dos temporadas existió una relación lineal entre la biomasa y el peso de granos (Anexo 1; Anexo 2), que también se ve en la tesis de Franco (2019), quien usando el genotipo O3 en sus distintos tratamientos de eficiencia del uso de nitrógeno, se observa que si aumenta o disminuye su biomasa, el peso de granos seguirá la misma tendencia.

En el índice de cosecha se aprecia que las comparaciones entre fechas de siembra no muestran diferencias entre ellas. En las comparaciones mencionadas se puede observar mayores valores en T1, esto principalmente asociado a la obtención de mayores valores de biomasa y, a la vez de peso de granos. Se logra apreciar una relación entre la altura de las plantas y el índice de cosecha, los genotipos de mayor altura como NE y PA tienen un menor índice de cosecha, sin embargo esta relación no alcanza a ser significativa. Según Bendavis et al. (2014) los genotipos con mayor sensibilidad al fotoperíodo distribuyen menos asimilados hacia las yemas en condiciones de día largo. En este ensayo los genotipos de mayor latitud son los pertenecientes al grupo altiplano (IN, NE y PA) y son quienes presentan un menor índice de cosecha en ambas temporadas.

Para ambas temporadas el peso de mil granos fue mayor en las segundas fechas de siembra, a pesar de que el rendimiento en estas fechas fue menor. De Bhargava et al. (2007) se puede deducir que el peso de 1000 semillas (TKW) e índice de cosecha se correlacionan positivamente. Esta relación se puede observar mejor en la segunda temporada del ensayo, los genotipos CH, IN y PA aumentan su IH y TKW entre fechas de siembra. Los valores obtenidos de TKW se encuentran en el rango de 1,6 a 2,1 gr en

promedio, siendo que el promedio de esta variable para el cultivo de quinoa varía de 1,5 a 3 gr (Melorose, J., Perroy, R., y Careas, 2016).

Los rendimientos obtenidos por genotipo son 4402 kg ha⁻¹ para AN, 5184 kg ha⁻¹ para AR y 3384 kg ha⁻¹ para CH, para estos tres genotipos se registran rendimientos en campo de 1261 kg ha⁻¹, 1565 kg ha⁻¹ y 4000 kg ha⁻¹ respectivamente (Fuentes, 2019). De las tres genotipos solo CH obtuvo valores cercanos a los resultado reportados, mientras que AR y AN fueron notoriamente superiores a su zona de origen. Por otra parte Rivas (2018), registra rendimientos entre los 1012-2264 kg ha⁻¹ para Regalona (RE), que en esta ocasión alcanzó un rendimiento de 2742 kg ha⁻¹, el cual es superior a lo registrado. En el caso de G1, el valor obtenido fue de 2750 kg ha⁻¹ mientras que Argentina en la provincia de Buenos Aires se registró un rendimiento de 1033 kg ha⁻¹ (Herrera, 2018), en este caso G1 superó notoriamente el valor obtenido en el país vecino. En el caso de los genotipos que pertenecen al grupo de altiplano se han registrado valores para el rendimiento de 2500 kg ha⁻¹, 3000 kg ha⁻¹ y 3000 kg ha⁻¹ para IN, PA y NE (Melorose, J., Perroy, R., y Careas, 2016), en el ensayo en Pirque los valores obtenidos para los tres genotipos fueron mayores, alcanzando los 6113 kg ha⁻¹, 3946 kg ha⁻¹ y 4340 kg ha⁻¹ respectivamente.

Se logra apreciar que aquellos genotipos que obtienen un mayor índice de cosecha no necesariamente son los de mayor rendimiento, como es el caso de CH y G1, quienes en la segunda temporada tienen un IH promedio de 0,39 y 0,38, y un rendimiento promedio de 3384 kg ha⁻¹ y 2751 kg ha⁻¹ respectivamente. Mientras que aquellos genotipos con un menor IH como IN y PA con índice de 0,32 y 0,21 para cada uno, obtuvieron rendimientos de 6113 kg ha⁻¹ y 3946 kg ha⁻¹ respectivamente. Esto no indica que exista una relación inversa entre ambas variables, en RE se tiene un bajo índice de cosecha (0,29) y a la vez un bajo rendimiento (2742 kg ha⁻¹), coincidente con los explicado por Herrera (2018), quien mediante un análisis de correlación de Pearson demostró que no existe una correlación significativa entre el rendimiento en grano y el índice de cosecha.

Conclusión

En el presente trabajo se logra distinguir la importancia de las fechas de siembra y la correcta selección de genotipo en los componentes de rendimiento de quinoa, al elegir las condiciones de campos a las que las plantas serán expuestas. Además, el efecto de la temporada es otro factor a considerar que afecta en el ciclo de las plantas, influyendo en los distintos componentes. Se comprobó que en fechas de siembra tardías (inicios de noviembre) en la zona central del país, en promedio se requirió de un menor tiempo entre siembra a primera yema floral, extendiendo la fase reproductiva, y no así con la floración, que demoró más en alcanzarla. Los genotipos de quinoa de un mismo grupo de origen tienden a comportarse de manera similar, teniendo un mayor efecto en genotipos que tienen una menor latitud de origen (altiplano y salar) que aquellos que provienen de una mayor latitud (costa). Sin embargo, estos comportamientos no son para todos por igual, por ejemplo, el genotipo de Regalona se comporta diferente a Chiloé, en la relación altura e índice de cosecha en la segunda temporada ($p > 0,05$). La altura de las plantas se comportó de manera diferente entre temporadas, en la segunda siembra de la primera temporada se observó que todos los genotipos aumentaron su longitud, caso contrario en la misma siembra pero en la siguiente temporada que la altura de todos los genotipos disminuyó, a excepción del grupo salar que aumentó. Se identificó una leve correlación negativa entre la altura y el índice de cosecha ($r = 0,42$ en T1 y $r = 0,19$ en T2; Anexo 1). La biomasa total no se vio afectada por las fechas de siembra en casi todos los genotipos, con excepción de CH que en ambas temporadas su biomasa aumentó pero no de manera significativa ($p > 0,05$). El rendimiento siguió la misma tendencia de la biomasa. Entre biomasa y peso de granos se identificó una correlación positiva en ambas temporadas ($r = 0,71$ en T1 y $r = 0,69$ en T2; Anexo 2). El índice de cosecha no se vio afectado por la fecha de siembra en ambas temporadas. El TKW se vio afectado por la fecha de siembra ($p > 0,05$). Los genotipos que presentan un mayor índice de cosecha no necesariamente son los que obtienen un mayor rendimiento, por ejemplo CH con un HI de 0,39 y un rendimiento de 3384 kg ha⁻¹, mientras que PA tiene un HI de 0,29 y un rendimiento de 3946 kg ha⁻¹.

Resumen

Gonzalo Ignacio Maturana Mendoza. Efecto de la fecha de siembra en los componentes de rendimiento en diez genotipos contrastantes de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Tesis, *Magister* en Fisiología y Producción Vegetal, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 33 pp.

El cultivo quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) ha destacado por su alta calidad nutricional y su gran adaptación a variadas condiciones abióticas, como suelos con alta salinidad o con baja disponibilidad hídrica. A pesar de su gran adaptabilidad, la quinoa en latitudes diferentes a su zona de origen genera variaciones en su potencial rendimiento. El objetivo de este trabajo fue medir el efecto de las fechas de siembra en diez genotipos de quinoa con diferentes latitudes de origen y como afecta la duración de las etapas de desarrollo y sus componentes de rendimiento. El ensayo se realizó en dos temporadas, con diez genotipos de quinoa de diferente origen, en dos fechas contrastantes de siembra. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar y los tratamientos son las combinaciones de temporadas, fechas de siembra y genotipos. Se calculó el tiempo térmico (°Cd) de siembra a inicio de primera yema floral visible y floración. También se midió altura, biomasa, rendimiento, índice de cosecha y peso de mil semillas. Los resultados muestran que genotipos del mismo grupo tienden a comportarse de manera similar. En la segunda temporada en días de mayor fotoperiodo, la aparición de la primera yema floral es temprana mas no así la floración. Con el aumento del fotoperiodo se observó que la altura en genotipos del grupo salares también fue mayor. Se observó una correlación positiva entre biomasa y rendimiento, el índice de cosecha fue la única variable que no se vio afectada por la fecha de siembra y se correlacionó levemente de manera negativa con la altura. El TKW fue mayor en las segundas fechas de siembra para ambas temporadas. En quinoa un mayor índice de cosecha no se puede asociar directamente con un mayor rendimiento, ya que no fue una tendencia para todos los genotipos.

Palabras clave:

Latitud, *Chenopodium quinoa* Willd., rendimiento, fecha de siembra.

Referencias

- Ahumada, I., Olguín, P., Ayala, C., Rojas, C., Chorbadian, R., Rosales, M., Contreras, S., Sosa, V., Fuentes, F., Steinfort, U. y Madrid, D. (2019). La Quinoa Chilota (F. Fuentes (ed.)). Chile, CL: Ediciones UC.
- Akaike H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. doi:10.1109/tac.1974.1100705
- Akhter, M., Ahmad, M., & Ramzan, M. (2007). Effect of Photoperiod sensitivity on yield and other economic trait of new strains of Basmati rice (*Oryza Sativa* L.) (Vol. 17). Kala Shah Kaku.
- Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). Variedades comerciales de quinua en el Perú. *Catálogo De Variedades Comerciales De Quinua En El Perú* (Vol. 1st). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-as890s.pdf>
- Armstrong R. (2014). When to use the Bonferroni correction. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 34(5), 502–508. doi:10.1111/opo.12131
- Bates D., Maechler M., Dai D. (2009). lme4: linear mixed effects models using S4 classes. Paquete de R versión 0.999375-31. Recuperado de <http://cran.r-project.org/web/packages/lme4>
- Bazile, D., Jacobsen, S.-E., & Verniau, A. (2016). The Global Expansion of Quinoa: Trends and Limits. *Frontiers in Plant Science*, 7(May). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>
- Bazile, D., Martínez, E. A., & Fuentes, F. (2014). Diversity of Quinoa in a Biogeographical Island: a Review of Constraints and Potential from Arid to Temperate Regions of Chile. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 42(2), 289–298. <https://doi.org/10.15835/nbha.42.2.9733>
- Bendevis, M. A., Sun, Y., Rosenqvist, E., Shabala, S., Liu, F., & Jacobsen, S. E. (2014). Photoperiodic effects on short-pulse ¹⁴C assimilation and overall carbon and nitrogen allocation patterns in contrasting quinoa cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, 104, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.03.002>
- Bertero, H. D., King, R. W., & Hall, A. J. (2000). Photoperiod and temperature effects on the rate of leaf appearance in quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Australian Journal of Plant Physiology*, 27(4), 349–356. <https://doi.org/10.1071/PP99134>

Bertero. (2003). Response of developmental processes to temperature and photoperiod in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1–2), 87–97. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018870>

Bertero, De La Vega, A. J., Correa, G., Jacobsen, S. E., & Mujica, A. (2004). Genotype and genotype-by-environment interaction effects for grain yield and grain size of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as revealed by pattern analysis of international multi-environment trials. *Field Crops Research*, 89(2–3), 299–318. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.02.006>

Bertero, King, R. W., & Hall, A. J. (1999). Modelling photoperiod and temperature responses of flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 63(1), 19–34. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00024-6).

Bhargava, A., Shukla, S., & Ohri, D. (2007). Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 101(1), 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.10.001>

Bonifacio, A., Aroni, G., & Villca, M. (2012). Catálogo etnobotánico de la Quinoa Real.

Christiansen, J. L., Jacobsen, S. E., & Jørgensen, S. T. (2010). Photoperiodic effect on flowering and seed development in quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.). *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 60(6), 539–544. <https://doi.org/10.1080/09064710903295184>

Collinson, S. T., Ellis, R. H., Summerfield, R. J., & Roberts, E. H. (1992). Durations of the photoperiod-sensitive and photoperiod-insensitive phases of development to flowering in four cultivars of rice (*Oryza sativa* L). *Annals of Botany*, 70(4), 339–349. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088483>

Cruz-Aguado, J. A., Rodés, R., Ortega, E., Pérez, I. P., & Dorado, M. (2001). Partitioning and conversion of ¹⁴C-photoassimilates in developing grains of wheat plants grown under field conditions in Cuba. *Field Crops Research*, 69(3), 191–199. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00133-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00133-7)

Curti, R. N., de la Vega, A. J., Andrade, A. J., Bramardi, S. J., & Bertero, H. D. (2016). Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in North West Argentina. *Field Crops Research*, 189, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.014>

di Castri F. y Hajek E. (1976). *Biometeorología de Chile*, Santiago, Chile: Editorial Universidad Católica de Chile.

Dorais, M., Yelle, S., & Gosselin, A. (1996). Influence of extended photoperiod on photosynthate partitioning and export in tomato and pepper plants. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24(1), 29–37. <https://doi.org/10.1080/01140671.1996.9513932>

Dunn O. (1961). Multiple Comparisons Among Means. *Journal of the American Statistical Association*, 56(293), 52. doi:10.2307/2282330

Erazzú, L. E., González, J. A., Buedo, S. E., & Prado, F. E. (2016). Efectos de la densidad de siembra sobre *Chenopodium quinoa* (quinoa). Incidencia sobre variables morfológicas y rendimiento de grano en la variedad CICA cultivada en Amaicha del Valle (Tucumán, Argentina). *Lilloa*, 53(August), 12–22.

FAO. (2008). Consulta de expertos sobre indicadores de nutrición para la biodiversidad. *BMC Public Health* (Vol. 5). Recuperado de <https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298%0Ahttp://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005%0Ahttp://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58%0Ahttp://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=refe>

Fuentes, F. (2019). Agrobiodiversidad de la Quínoa en Chile: Un Recurso para la Agricultura y la Alimentación.

Fuentes, F., Maughan, P. J., & Jellen, E. R. (2009). Diversidad genética y recursos genéticos para el mejoramiento de la quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) (Genetic diversity and genetic resources for quinoa breeding). *Revista Geográfica de Valparaíso*, 42, 20–33. Recuperado de http://www.rgv.ucv.cl/Articulo_42-3.pdf

Gómez, M. B., Castro, P. A., Mignone, C., & Bertero, H. D. (2011). Can yield potential be increased by manipulation of reproductive partitioning in quinoa (*Chenopodium quinoa*)? Evidence from gibberellic acid synthesis inhibition using Paclobutrazol. *Functional Plant Biology*, 38(5), 420–430. <https://doi.org/10.1071/FP10168>

González, J. A., Bruno, M., Valoy, M., & Prado, F. E. (2011). Genotypic Variation of Gas Exchange Parameters and Leaf Stable Carbon and Nitrogen Isotopes in Ten Quinoa Cultivars Grown under Drought. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(2), 81–93. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00446.x>

Herrera, S. (2018). Adaptación del cultivo de quinua a las condiciones agroecológicas de la región agrícola del partido de azul. Universidad nacional del centro.

González Monroy, R. M., & Rojas Martínez, A. E. (2014). La relevancia evolutiva de los ecotipos. *Elementos*, 21(95), 49–54. Retrieved from <http://www.elementos.buap.mx/num95/htm/49.htm>

Intriago, D., & Torres, J. (2018). Efecto de la densidad y arreglo de siembra en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del maíz (*Zea mays* L.), (L), 24. Retrieved from <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/6323/1/CPA-2018-T047.pdf>

Isobe, K., Sugiyama, H., Okuda, D., Murase, Y., Harada, H., Miyamoto, M., ... Torigoe, Y. (2016). Effects of Sowing Time on the Seed Yield of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) in South Kanto, Japan. *Agricultural Sciences*, 7(March), 146–153.

Jacobsen, S. (2006). The Worldwide Potential for Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19(1–2), 167–177. <https://doi.org/10.1081/FRI-120018883>.

Lenth R. (2015). emmeans: Estimated marginal means, also known as least squares means. Paquete de R versión 1.4.8. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/>

Lenth R. (2015). Least-Squares Means: The R Package lsmeans. *Journal of Statistical Software*, 69(1), 1–33. <http://dx.doi.org/10.18637/jss.v069.i01>

Melrose, J., Perroy, R., y Careas, S. (2016). Guía del cultivo de la quinoa. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Mendoza, M. (2012). Efecto del fotoperíodo sobre la duración de la fase vegetativa en tres accesiones chilenas de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) MARIO. Dirección General Académica, números. Universidad de Chile. Retrieved from <http://www.sye.uchile.cl/index.php/ANUC/article/download/27307/28920>

Milford, G. F. J., & Lenton, J. R. (1976). Effect of photoperiod on growth of sugar beet. *Annals of Botany*, 40(6), 1309–1315. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a085251>

Misra, G. (1965). Photoperiodic response of four early varieties of rice of Uttar Pradesh. *Environment Control in Biology*, 2(2), 75–87. <https://doi.org/10.2525/ecb1963.2.75>

Osorio, J. (2020). Efecto de la fecha de siembra en el desarrollo y fenología de diez genotipos contrastantes de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Pontificia Universidad Católica de Chile.

Rodríguez, A. (2017). *Chenopodium quinoa* Willd. ¿Por qué nos interesa conocerla? Facultad de Ciencias de la Salud. Sección Farmacia Universidad de La Laguna.

Taylor R. (1990). Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 6(1), 35–39. doi:10.1177/875647939000600106

Uquillas, C., Claderón, K., Alava, J., Zamora, D., Vásconez, G., Fernández-García, N., & Olmos, E. (2019). Evaluación agronómica de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones agroclimáticas en la zona de Mocache. *Agricultural Sciences*, 12(1), 19–30.

Von Baer, I., Bazile, D., & Martinez, E. (2009). Cuarenta años de mejoramiento de quínoa (*Chenopodium quinoa* willd.) en la Araucanía: Origen de “La Regalona-B.” *Revista Geográfica de Valparaíso*, 42, 34–44.

Wheather Spark (s.f.)a. Tiempo histórico el miércoles, 16 de junio de 2004 en Aeropuerto Internacional Allama Iqbal, Pakistán. Recuperado de <https://es.weatherspark.com/h/d/148981/2004/6/16/Tiempo-histórico-el-miércoles-16-de-junio-de-2004-en-Aeropuerto-Internacional-Allama-Iqbal-Pakistán#Sections-Sun>

Wheather Spark (s.f.)b. Tiempo histórico en agosto de 2004 en Aeropuerto Internacional Allama Iqbal, Pakistán. Recuperado de <https://es.weatherspark.com/h/m/148981/2004/8/Tiempo-histórico-en-agosto-de-2004-en-Aeropuerto-Internacional-Allama-Iqbal-Pakistán#Figures-Daylight>

Yin, X., & Kropff, M. J. (1998). The effect of photoperiod on interval between panicle initiation and flowering in rice. *Field Crops Research*, 57(3), 301–307. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00074-4)

Yang, A., Akhtar, S. S., Amjad, M., Iqbal, S., & Jacobsen, S. E. (2016). Growth and Physiological Responses of Quinoa to Drought and Temperature Stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(6), 445–453. <https://doi.org/10.1111/jac.12167>

Zúñiga, V. S. (2016). Efecto del fotoperíodo en la fenología y el desarrollo de dos líneas contrastantes de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Pontificia Universidad Católica de Chile.

Zurita-Silva, A., Fuentes, F., Zamora, P., Jacobsen, S. E., & Schwember, A. R. (2014). Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Potential and perspectives. *Molecular Breeding*, 34(1), 13–30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023-5>

Anexos

T1	Altura	Biomasa	Rendimiento	IH	TKW	DC51	DC61
Altura	1						
Biomasa	0,7	1					
Rendimiento	0,81	0,7	1				
IH	-0,4	-0,43	-0,13	1			
TKW	-0,47	-0,2	-0,4	0,12	1		
DC51	0,2	0,2	0,13	0,01	0	1	
DC61	0,65	0,55	0,32	-0,51	-0,24	0,48	1

Anexo 1. Coeficientes de correlación entre las variables. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura, biomasa, rendimiento, IH, TKW y tiempo térmico (DC51 y DC61) en la primera temporada. Los coeficientes en negrita son aquellos que presentan una correlación significativa ($p < 0,05$).

T2	Altura	Biomasa	Rendimiento	IH	TKW	DC51	DC61
Altura	1						
Biomasa	0,72	1					
Rendimiento	0,47	0,65	1				
IH	-0,15	-0,26	0,01	1			
TKW	-0,12	-0,39	-0,46	0,1	1		
DC51	0,07	0	-0,17	-0,21	0,18	1	
DC61	0,39	0,38	0,01	-0,59	-0,04	0,43	1

Anexo 2. Coeficientes de correlación entre las variables. Coeficientes de correlación de Pearson entre altura, biomasa, rendimiento, IH, TKW y tiempo térmico (DC51 y DC61) en la segunda temporada. Los coeficientes en negrita son aquellos que presentan una correlación significativa ($p < 0,05$).

