



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
FACULTAD DE AGRONOMIA E INGENIERIA FORESTAL
DIRECCION DE INVESTIGACION Y POSTGRADO
MAGISTER EN FISIOLÓGIA Y PRODUCCIÓN VEGETAL

**GERMINACIÓN Y LONGEVIDAD EN SEMILLAS DE NUEVE GENOTIPOS
DE QUINOA CULTIVADOS EN CHILE**

Tesis presentada como requisito para optar al grado de

Magister en Fisiología y Producción Vegetal

por:

Carolina Ayala Pérez

Comité de Tesis

Profesor Guía: Samuel Contreras

Profesor Informante: Francisco Fuentes

Noviembre 2018

Santiago-Chile

Índice

.Abstract.....	4
Introducción.....	5
Materiales y métodos.....	9
Material vegetal.....	9
Determinación de contenido de humedad de semilla.....	9
Peso de mil semillas (TSW).....	10
Estudio de potencial de almacenamiento.....	10
Almacenamiento.....	11
Análisis estadístico.....	11
Resultados.....	12
Peso de mil semillas (TSW) y contenido de humedad (MC).....	12
Determinación de temperaturas cardinales para germinación.....	13
Estudio de potencial de almacenamiento.....	17
Almacenamiento.....	19
Discusión.....	21
Conclusiones.....	26
Resumen.....	27
Referencias.....	28

Germination and Longevity in quinoa seeds of nine genotypes cultivated in Chile

Carolina Ayala Pérez

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

Abstract

Carolina Ayala. Germination and Longevity in quinoa seeds of nine genotypes cultivated in Chile. Tesis, *Magister* en Fisiología y Producción Vegetal, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 35 pp. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a pseudo cereal origin of Andean and a crop of great potential due to its nutritional characteristics. There are different ecotypes with adaptations according to geographical area (FAO, 2011; Fuentes, 2008), in Chile two of these (ecotypes of southern Altiplano and of the coast) are cultivated in three macrozones: north, center and south, where the study on the quality of the seed is incipient. The objectives of this study were to determine the germination cardinal temperatures, the longevity evaluation and its storage potential of nine genotypes grown in three macrozones of the country. The physiological germination of seeds was counted at 6 and 12 hours and then daily in a temperature range between 11 to 42°C for the estimation of the minimum temperatures (T_b), optimum (T_o) and maximum (T_m). For the determination of longevity, accelerated aging was carried at 35°C and 75% relative humidity. In addition, seeds were stored at 20°C in hermetic containers to evaluate storage capacity in different periods of time. Physiological germination (GP) and germination index (GI) were measured. The germination rate of the genotypes was estimated between 27.7-30°C. Accelerated aging tests showed that the genotypes of the ecotype of the coast were the longest compared to those of the southern Altiplano. After 15 months of storage all the genotypes showed high seed quality with germination percentages between 94.5 and 100%, but there was a slight dormancy in some genotypes of the ecotype of the coast represented in an increase of GI between 0 and 7 months of storage.

Key words:

Chenopodium quinoa, Cardinal temperatures, Seed storage, Seed dormancy.

Introducción

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudo cereal de la familia Amaranthaceae nativa de la zona andina de Suramérica, cultivada hace 5000-7000 años (Vega-Gálvez et al, 2010). Fue muy importante para las culturas precolombinas de Latinoamérica llegando a ser llamada por los Incas “el grano madre”, pero con la llegada de los españoles su producción y consumo se fue eliminando permaneciendo sólo en la tradición de algunos agricultores (Abugoch, 2009). Con el tiempo su demanda e interés, tanto de la población, investigación y agricultores, fue aumentando debido a las características de la planta y a las propiedades nutricionales del grano, de alto contenido proteico, reportándose desde 12,9 a 16,5% de proteína (Wright et al, 2002; Koziol, 1992; De Bruin, 1963), carbohidratos (maltosa y xylosa), vitaminas (A, B₂, E) y minerales (Ca, Fe, Cu, Mg, Zn), además de la ausencia de gluten, lo que pone en evidencia el potencial del cultivo para su desarrollo comercial.

Existen más de tres mil genotipos de quinoa, los que corresponden a variedades cultivadas o accesiones conservadas en bancos de germoplasma de la zona andina y se clasifican dentro de cinco ecotipos (Fuentes, 2008): 1) quinoa de los valles interandinos (Colombia, Ecuador y Perú), 2) quinoa del altiplano norte (Perú y Bolivia), 3) quinoa de las Yungas (Bolivia), 4) quinoa de los salares o altiplano sur (Bolivia, Chile y Argentina), y 5) quinoa de la costa o de nivel del mar (Chile centro y sur, al menos hasta Chiloé).

Actualmente la quinoa se cultiva en más de 70 países. Bolivia es el principal productor, concentrando más del 60% de la superficie total sembrada, seguido por Perú (poco más del 30% de la superficie cultivada) y Ecuador (ODEPA, 2018). Otros países sudamericanos, como Argentina, Chile y Colombia, tienen superficies muy por debajo de los tres productores líderes. En Chile se cultivan dos ecotipos, el del altiplano sur y el de la costa, que se producen principalmente en tres zonas del país: la **zona norte**, mayormente en el altiplano de la región de Tarapacá (comunas de Colchane y Pica); la **zona centro**, radicada en la zona costera de la región de O'Higgins (en las comunas de Pichilemu y Paredones), y la **zona sur**, en las regiones de La Araucanía (asociada a las comunidades mapuches), y Los Lagos (en la Isla de Chiloé). En la temporada 2015/2016 se estimaron 706 hectáreas cultivadas con quinoa en Chile, concentrándose

en las regiones de Tarapacá (31%) y de O'Higgins (53%) (ODEPA, 2018). Si bien esta superficie representa solo un 0,5% del total cultivado en el mundo, va en aumento y se proyecta que siga creciendo. En los últimos años, en Chile se ha incrementado el estudio de esta especie con el fin de potenciar su desarrollo y mejorar así sus competencias productivas y comerciales.

La calidad de semilla es un componente esencial en la producción de cultivos y la seguridad alimentaria (Finch-Savage y Bassel, 2016), y es la razón de que hoy exista una enorme industria asociada al mejoramiento genético, producción y comercialización de semillas en especies de importancia agrícola como por ejemplo maíz, soya, arroz y trigo. Sin embargo, en el caso de quinoa no es común la producción o comercialización formal de semillas, utilizándose, en general, parte de la producción de grano como semilla para establecer el cultivo. Por consecuencia, tampoco se han creado los protocolos oficiales de determinación de calidad de semilla de esta especie, habiendo además pocos estudios sobre sus componentes o atributos, tales como germinación, vigor y capacidad de almacenamiento o longevidad.

La germinación es un complejo proceso biológico, influenciado por varios factores del ambiente y genéticos. Uno de ellos es la temperatura, siendo la base de los modelos predictivos de germinación. Es más, cuando el contenido de humedad es el adecuado, la temperatura es el mayor factor que regula la germinación (Shaffi y Price, 2001). Para cada especie existe un rango de temperaturas en que los individuos crecen y se desarrollan, dando origen a lo que se conoce como temperaturas cardinales. En el caso de la germinación, las temperaturas cardinales contemplan una temperatura mínima o base (T_b), que es la menor temperatura donde ocurre germinación, una temperatura óptima (T_o) donde ocurre la germinación a mayor velocidad y una temperatura máxima (T_m), que es la temperatura más alta donde ocurre germinación (Bewley *et al.*, 2013). En quinoa existen algunos estudios que han aportado información relevante, con diversos resultados. Sigstad y Prado (1999) estudiaron la temperatura óptima de germinación de dos cultivares de quinoa, y determinaron mediante calorimetría una temperatura de 25°C para ambos cultivares. Por otro lado, Souza *et al.* (2017) trabajaron en la determinación de una metodología para evaluar germinación de semillas de quinoa de un cultivar producido en Brasil, concluyendo que la temperatura óptima de germinación era una alternancia entre 20 y 30°C, donde se

alcanzó el mayor porcentaje de germinación estándar. Asimismo, Mamedi *et al.* (2017) estimaron las temperaturas cardinales de tres cultivares a través de diferentes modelos matemáticos, donde el rango obtenido fue de 1 a 54°C y temperaturas óptimas que van desde 18 a 36°C, dependiendo del cultivar.

Si bien existen estudios sobre requerimientos de germinación en quinoa, la ISTA (“International Seed Testing Association”, por sus siglas en inglés) organismo que determina los protocolos estándar de testeo de semillas, actualmente no incluye el cultivo de la quinoa. Por lo tanto, el conocimiento de las temperaturas cardinales para germinación de los distintos genotipos utilizados en Chile aportaría al desarrollo de protocolos para evaluación de germinación estándar en esta especie. Además, permitiría mejorar la información que se tiene de los genotipos actualmente cultivados en diferentes zonas productivas del país, determinando similitudes y/o diferencias entre ellos.

Otro atributo importante de calidad de semillas que ha sido poco estudiado en quinoa es el potencial de almacenamiento o longevidad, la que se define como la capacidad de un lote de semillas para mantenerse viables durante almacenamiento (Walters, 2005). La longevidad se ve afectada por el genotipo (Copeland y McDonald, 2001; Ponquett *et al.*, 1992), calidad inicial del lote de semillas (Ellis y Roberts, 1980) y el ambiente de almacenamiento, principalmente por la humedad relativa y temperatura (Ellis y Roberts, 1980a; Bewley *et al.*, 2013). El nivel de humedad relativa afecta directamente al contenido de agua de las semillas el que, al aumentar, al igual que la temperatura, acelera procesos metabólicos conducentes a pérdida de vigor y viabilidad, tales como la respiración y el deterioro de tejidos por reacciones de oxidación, (Bewley y Black, 1972; Marcos, 2005). Estos factores han sido incorporados en modelos predictivos de longevidad. Uno de ellos es el propuesto por Harrington (1972) que describe los efectos relativos del contenido de humedad y temperatura indicando que “el tiempo en que mueren el 50% de las semillas (P50) se duplica por cada reducción de la temperatura en 5°C o del 1% del contenido de humedad de la semilla”, como también los modelos propuestos por Ellis y Roberts (1980b) para cuantificar longevidad.

Las semillas de quinoa tienen un comportamiento ortodoxo (Ellis *et al.*, 1988) y semillas maduras y secas pueden ser almacenadas por un tiempo relativo a una temperatura y

humedad relativa apropiada sin perder viabilidad. Souza *et al.* (2016) observaron que diferentes permeabilidades de contenedores afectan el potencial de almacenamiento de la semilla de quinoa, manteniendo su calidad 300 días en condiciones de impermeabilidad y temperaturas bajas ($4\pm 2^{\circ}\text{C}$) y un potencial de 180 días en condiciones no controladas de laboratorio (no especificadas). Matiacevich *et al.* (2006) estudiaron los estados del agua dentro del embrión y su relación con la temperatura y el daño que provocaría en almacenamiento, llegando a la conclusión de que el componente esencial relacionado con deterioro es la proteína, que estaría vinculada al contenido de humedad en la semilla por lo que condiciones óptimas de almacenamiento serían a 0°C sobre humedades relativas de 59%.

A pesar de que existen estudios de longevidad en quinoa, es poco el conocimiento generado, sobre todo a nivel de ecotipo utilizado en Chile. Es común que los productores de este cultivo utilicen como semilla parte de su cosecha de la temporada anterior, o incluso de dos temporadas atrás, la que ha sido almacenada en condiciones no controladas de temperatura y humedad relativa. Dado que no hay claridad en el potencial de almacenamiento de los distintos materiales usados en el país, estudiar la longevidad de los distintos genotipos cultivados en Chile, permitiría no solo desarrollar mejores prácticas de almacenamiento y uso de las semillas, sino también establecer similitudes y diferencias entre ecotipos.

Los objetivos de este estudio fueron determinar las temperaturas cardinales para la germinación y estudiar la longevidad en semillas de distintos genotipos de quinoa cultivados en Chile.

Materiales y métodos

Material vegetal. Semillas de nueve genotipos de quinoa, provenientes de diferentes macrozonas de Chile, fueron utilizadas en el presente estudio (Cuadro 1): dos de la zona norte (Colchane, Región de Tarapacá. 19°S), cinco de la zona centro (Pichilemu, Región de O'Higgins. 34°S), uno de la zona sur (Chiloé, Región de los Lagos. 41°-43°S), y el cultivar comercial 'Regalona' (Semillas Baer), recomendado para su cultivo entre las regiones del Bío Bío y La Araucanía (39°S). En todos los genotipos la semilla correspondió a cosecha del mismo año (febrero-marzo 2017), las que una vez obtenidas fueron guardadas cinco días en un desecador con gel de sílice y luego almacenadas a 20°C en contenedores herméticos hasta el montaje de los experimentos.

Cuadro 1. Material vegetal utilizado según zona de procedencia

Zona de origen	Denominación
Norte	CoR
	CoA
Centro	RO1
	RO2
	RO3
	RO4
	RO5
Sur	Chi
Variedad comercial	Reg

Determinación de contenido de humedad de semilla. Se realizó a 130°C por una hora y luego 15 minutos en desecador. Calculado en base del protocolo de ISTA (Capítulo 9, 2011) a través de la siguiente ecuación:

$$MC (\%) = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso inicial}} * 100 = \frac{M_2 - M_3}{M_2 - M_1} * 100 \quad \text{Eq. [1]}$$

Donde M_1 es el peso en gramos (g) del contenedor con su tapa, M_2 es el peso en gramos del contenedor, su tapa y las semillas antes de secar, y M_3 es el peso en

gramos del contenedor, su tapa y el contenido de semillas después de secar. Se realizaron 3 repeticiones de 1 g de semilla por genotipo.

Peso de mil semillas (TSW). Calculado en base del protocolo de ISTA (Capítulo 10, 2011). Se contaron y pesaron 8 sub-muestras de 100 semillas de cada genotipo, y se aplicó la siguiente fórmula:

$$TSW = \mu * 10 \quad \text{Eq. [2]}$$

Donde μ es el promedio del peso de las 8 sub-muestras de 100 semillas.

Determinación de temperaturas cardinales para germinación (Exp. 1). Se evaluó germinación en una mesa termogradiante a 10 temperaturas entre 11 y 42°C. La siembra se realizó en placas de Petri (9 cm de diámetro) con dos papeles filtro saturados en agua destilada y 50 semillas por placa. Para cada genotipo, se montaron 4 repeticiones por temperatura. Se evaluó germinación fisiológica (emergencia de radícula igual o mayor a 2 mm de largo) a las 6, 12, 24 horas y luego diariamente hasta completar siete días después de siembra. Estos valores se expresaron en porcentaje de germinación fisiológica (%) al final de los siete días e índice de germinación (IG), calculado mediante la siguiente ecuación:

$$IG = \frac{G_1}{N_1} + \frac{G_2}{N_2} + \dots + \frac{G_n}{N_n} \quad \text{Eq. [3]}$$

Donde: G_1 , G_2 y G_n = proporción de semillas germinadas en el primer conteo (G_1 : semillas germinadas primer conteo/ semillas sembradas en placa de Petri), segundo conteo (G_2) y último conteo (G_n). N_1 , N_2 y N_n = número de días al primer conteo (N_1), al segundo conteo (N_2) y al último conteo (N_n); considerándose como 0,25 y 0,5 los dos primeros conteos.

Las temperaturas cardinales se estimaron ajustando una regresión polinomial a los datos de IG de cada repetición en cada genotipo. De esta forma, los valores de temperatura mínima (T_b) y máxima (T_m) correspondieron a los puntos de intersección de la curva ajustada con el eje "X", mientras que la temperatura óptima (T_o) se estimó como el punto de inflexión de cada curva.

Estudio de potencial de almacenamiento (Exp. 2). El envejecimiento acelerado (EA) se realizó durante 27 días en contenedores herméticos plásticos de 330 mL de volumen con 60 mL de solución saturada con cloruro de sodio (NaCl), logrando entre 75 y 76%

de humedad relativa (Winston y Bates, 1960) a $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ en una incubadora húmeda (modelo 3015, Sheldon Manufacturing, USA). Cada contenedor poseía las semillas respectivas de cada repetición, situadas sobre una estructura circular aislándolas de la solución saturada con sal.

Almacenamiento (Exp. 3). Semillas con diferentes condiciones de almacenamiento; 7 meses a 20°C en envase de vidrio hermético y a temperatura ambiente en bolsas de papel, fueron sembradas para la evaluación de germinación.

La germinación fisiológica se realizó cada tres días en el caso del Exp. 2, y a los 7 y 15 meses de almacenamiento en el Exp. 3 en placas de Petri (9 cm de diámetro) con dos papeles filtro en cámara de crecimiento a una temperatura de 20°C , con luz blanca fluorescente constante. Se montaron cuatro repeticiones con 50 semillas cada una. El conteo se realizó diariamente hasta los siete días después de siembra. Semillas consideradas germinadas fueron las que presentaron radícula igual o mayor a 2 mm de largo. Estos valores se expresaron en porcentaje de germinación fisiológica e índice de germinación (IG), a través de la [Eq.1] donde (N_n) considera los números del 1 al 7.

Análisis estadístico. Los resultados de la evaluación fueron analizados con ANOVA y comparación de medias utilizando el programa Infostat. Las diferencias significativas ($p < 0,05$ y $p < 0,01$) se analizaron con el test de comparaciones múltiples LSD (“*Least significant difference*”) de Fisher. Para ser analizados estadísticamente los datos, se realizó una transformación angular a los valores de germinación (%), correspondiente al cálculo del arcoseno de la raíz de la proporción del número.

Resultados

Peso de mil semillas (TSW) y contenido de humedad (MC)

El Cuadro 2. contiene los resultados de las mediciones del peso de mil semillas (TSW) y contenido de humedad (MC) de cada genotipo, mostrando diferencias entre ellos.

Cuadro 2. Peso de mil semillas (TSW) y contenido de humedad en almacenamiento (A MC) y a envejecimiento acelerado (EA MC).

Genotipo ^z	TSW (g)	A MC (%)	EA MC (%)
CoR	5,2163 ^y a ^v	10,1 ^w b ^v	14,6 ^w a ^v
CoA	5,0788 b	10,1 b	14,9 a
RO1	3,2000 d	8,8 de	13,5 c
RO2	3,1125 cd	8,7 e	13,6 bc
RO3	3,1963 d	8,5 f	13,6 bc
RO4	3,0400 cd	8,9 d	13,9 b
RO5	3,1963 d	9,3 c	13,8 bc
Chi	2,5688 e	10,6 a	13,7 a
Reg	2,5838 e	9,2 c	14,7 bc

^zLos genotipos CoR y CoA corresponden a genotipos cultivados en la zona norte (Colchane, región de Tarapacá), RO1 al RO5 provienen de la zona centro (Pichilemu, región de O'Higgins), Chi de la zona sur (Isla de Chiloé, región de Los Lagos), y Reg corresponde al cultivar comercial 'Regalona'.

^yValor promedio de ocho repeticiones de 100 semillas multiplicado diez veces.

^wValor promedio de tres repeticiones.

^vAnálisis estadístico LSD ("*Least significant difference*") de Fisher, letras diferentes dentro de una misma columna representan diferencias significativas ($p < 0,05$).

Respecto al TSW, en general los genotipos pertenecientes al ecotipo del altiplano sur fueron los que presentan semillas más pesadas y los del ecotipo de la costa los de menor peso. Dentro de ellos, CoR y CoA tienen las semillas con mayores valores de TSW y Chi y Reg los menores. Entre los genotipos de la Región de O'Higgins no hubo diferencias en cuanto a TSW. En relación con el MC, los genotipos CoA, CoR y Chi

poseen las humedades más altas. Por otro lado, los genotipos RO2 y RO3 fueron los que presentaron menor contenido de humedad en la semilla. Considerando lo anterior, no se distinguiría un rango determinado de MC según ecotipos.

Determinación de temperaturas cardinales para germinación

En la Fig. 1 se observan los resultados del Exp. 1 de germinación fisiológica a distintas temperaturas y sus respectivos índices de germinación (IG) en el Cuadro 3.

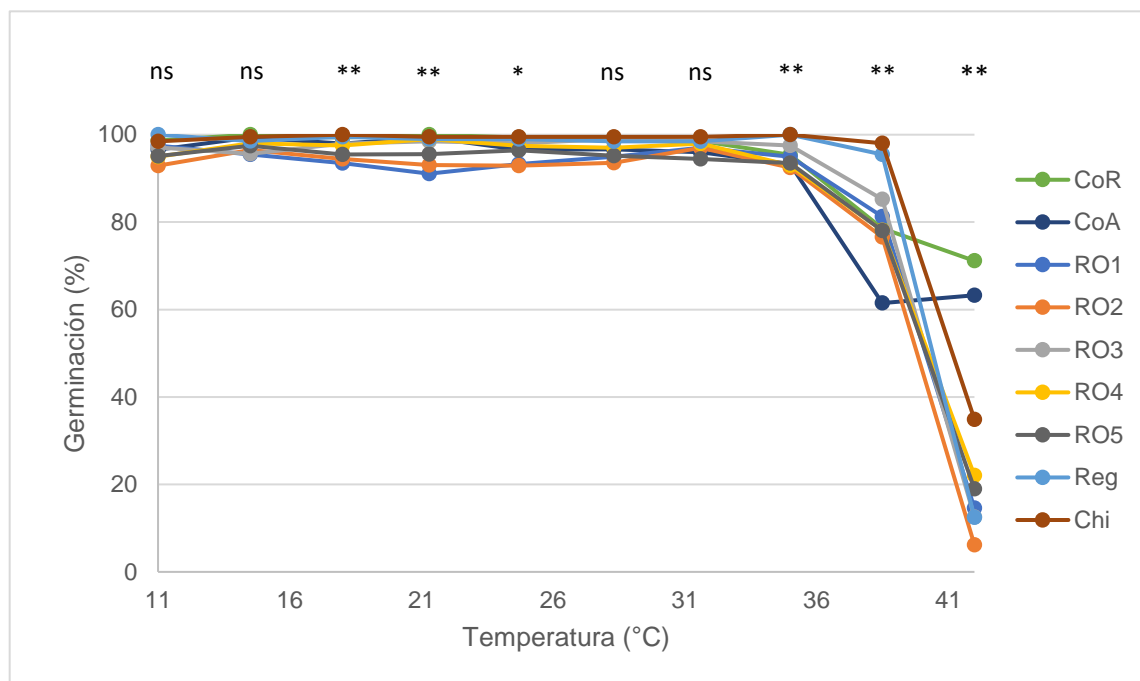


Fig. 1. Germinación fisiológica (%) de distintos genotipos de quinoa a diferentes temperaturas (°C). (ns: no significativo, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$). CoR y CoA: genotipos de la zona norte, RO1 a RO5: genotipos de la zona centro, Chi: genotipo de la zona sur, Reg: cultivar 'Regalona'.

Los resultados indican un alto porcentaje de germinación (de 90 a 100%) entre 11,0 a 35,1°C en todos los genotipos evaluados, disminuyendo levemente los valores a 38,6°C, temperatura a la que el menor valor lo obtuvo el genotipo CoA con 61,5% de germinación fisiológica, y siendo los genotipos menos afectados Chi y Reg con 98 y 96% de germinación fisiológica respectivamente. Ya a 42°C se presenta una mayor

caída en la germinación para todos los genotipos y las diferencias entre ellos es más evidente. Los mayores valores fueron los de la zona norte CoA y CoR, los que corresponden al ecotipo Altiplano sur, seguidos del genotipo de Chiloé Chi y finalmente los genotipos de la zona centro y el cultivar 'Regalona' o Reg, que son clasificados como ecotipos de la costa, presentaron los porcentajes de germinación menores.

Si bien todos los genotipos presentaron alta germinación en un amplio rango de temperaturas (11 a 35°C), existieron diferencias en la velocidad de germinación que se reflejan en los resultados de IG (Cuadro 3). El IG corresponde a un índice que considera velocidad y porcentaje de germinación, por lo que valores mayores significan una alta germinación en menor tiempo; por ejemplo, en este caso un valor de 4 indicaría un 100% de germinación al primer conteo (6 h o 0,25 días), mientras que con 100% de germinación al segundo conteo (12 h) se obtendría un valor de 2.

Los resultados muestran que las semillas de los genotipos de la zona centro (RO1 a RO5), del cultivar 'Regalona' (Reg) y de la zona sur (Chi), los que corresponden a ecotipos de la costa, fueron más lentos en germinar en todas las temperaturas, presentando los valores relativamente menores de IG. Sin embargo, dentro este grupo existen diferencias significativas en velocidad de germinación, Reg posee en la mayoría de las temperaturas el IG más bajo, es decir, su velocidad de germinación para todos los casos fue la más lenta. En contraste, los genotipos RO1, RO2 y RO5 presentaron los IG más altos entre los ecotipos de la costa.

Por otro lado, los genotipos de la zona norte (CoA y CoR), que corresponden al ecotipo del altiplano sur mostraron ser los más rápidos con IG mayores, siendo el genotipo CoR aún más rápido que CoA en la mayoría de las temperaturas.

Además, para todos los genotipos existe una tendencia de aumento del valor de IG a medida que la temperatura es mayor, alcanzando un máximo entre 25 y 35°C, y luego decreciendo hacia las temperaturas más altas.

En base a los IG obtenidos se estimaron las temperaturas cardinales (Cuadro 3) de cada genotipo. Los valores presentados en el Cuadro 4, corresponden al promedio de los valores obtenidos de la curva ajustada a los datos de cada una de las cuatro repeticiones realizadas en cada genotipo.

Cuadro 3. Índice de germinación (IG) de distintos genotipos de quinoa (Exp. 1).

Genotipo ^z	Índice de germinación (IG) por temperatura (°C)										LSD ^y (p<0,05)
	11,0	14,4	17,9	21,2	24,8	28,2	31,7	35,1	38,6	42,0	
CoR	0,66	0,97	1,56	1,89	2,29	2,63	3,20	2,85	1,85	1,69	0,376
CoA	0,55	0,95	1,32	1,81	2,36	2,58	2,58	2,38	1,38	1,65	0,212
RO1	0,44	0,70	0,92	1,22	1,80	1,91	2,03	1,80	1,32	0,12	0,241
RO2	0,39	0,74	0,94	1,16	1,80	1,87	1,92	1,93	1,29	0,05	0,211
RO3	0,39	0,67	0,97	1,2	1,69	1,91	1,94	1,99	1,38	0,11	0,268
RO4	0,34	0,53	0,84	1,02	1,22	1,72	1,64	1,56	0,82	0,20	0,221
RO5	0,42	0,69	0,94	1,26	1,82	1,94	1,87	1,82	1,29	0,16	0,257
Chi	0,33	0,50	0,82	0,94	1,19	1,52	1,68	1,52	1,04	0,22	0,177
Reg	0,28	0,46	0,78	0,97	1,18	1,55	1,37	1,15	0,95	0,08	0,140
LSD ^y (p<0,05)	0,073	0,16	0,12	0,17	0,23	0,24	0,23	0,28	0,43	0,26	

^zLos genotipos RO1 al RO5 provienen de la Región de O'Higgins (Pichilemu, secano costero), Reg corresponde a la cultivar comercial 'Regalona', CoR y CoA corresponden a genotipos cultivados en la región de Tarapacá y el genotipo Chi es original de la Isla de Chiloé.

^yValor de LSD ("*Least significant difference*") de Fisher (p<0,05).

*En negrita los valores asociados a temperaturas óptimas por genotipo, es decir con mayores valores de IG y sin diferencias significativas.

Cuadro 4. Temperaturas cardinales (°C) estimadas para distintos genotipos de quinoa.

Genotipo ^z	Temperaturas cardinales (°C)					
	Mínima		Óptima		Máxima	
	T_b		T_o		T_m	
CoR	9,6 ^y	a ^w	30,2	a	50,8	a
CoA	9,2	a	29,8	a	50,4	a
RO1	10,6	b	27,7	b	44,8	b
RO2	10,6	b	27,6	b	44,6	b
RO3	10,7	b	28,1	b	45,5	b
RO4	10,6	b	27,7	b	44,7	b
RO5	10,5	b	27,7	b	44,9	b
Chi	10,5	b	28,1	b	45,7	b
Reg	10,6	b	27,5	b	44,4	b

^zLos genotipos CoR y CoA corresponden a genotipos cultivados en la zona norte (Colchane, región de Tarapacá), RO1 al RO5 provienen de la zona centro (Pichilemu, región de O'Higgins), Chi de la zona sur (Isla de Chiloé, región de Los Lagos), y Reg corresponde al cultivar comercial 'Regalona'.

^yPromedio de cuatro repeticiones.

^wLetras diferentes dentro de una misma columna indican diferencia significativa, según análisis de LSD ("*Least significant difference*") de Fisher ($p < 0,05$).

Para cada una de las temperaturas cardinales, el análisis de varianza indicó la existencia de diferencias significativas ($p < 0,05$) entre genotipos. De la prueba de comparaciones múltiples, se distinguen dos grupos con respuestas distintas (Cuadro 4), por un lado, los del ecotipo de la costa (Reg, RO1 a RO5 y Chi) y por otro los del altiplano sur (CoA y CoR). Respecto a T_b , en general se presentó un rango entre 9,2 a 10,7°C, siendo los menores valores alcanzados por los genotipos del ecotipo del altiplano sur. En contraste, se observó un rango de T_o entre 27,5 a 30,2°C, donde fueron los genotipos del ecotipo del altiplano sur los que presentaron los mayores resultados. En el caso de T_m , el rango fue de 44,4 a 50,8°C, donde nuevamente los genotipos del ecotipo del altiplano sur tuvieron las temperaturas más altas.

Estudio de potencial de almacenamiento

De manera general todos los genotipos mostraron una caída en germinación fisiológica durante su envejecimiento (Exp. 2), pero con tasas diferentes de pérdida de calidad, lo que representa diferencias en sus longevidades (Figura 2).

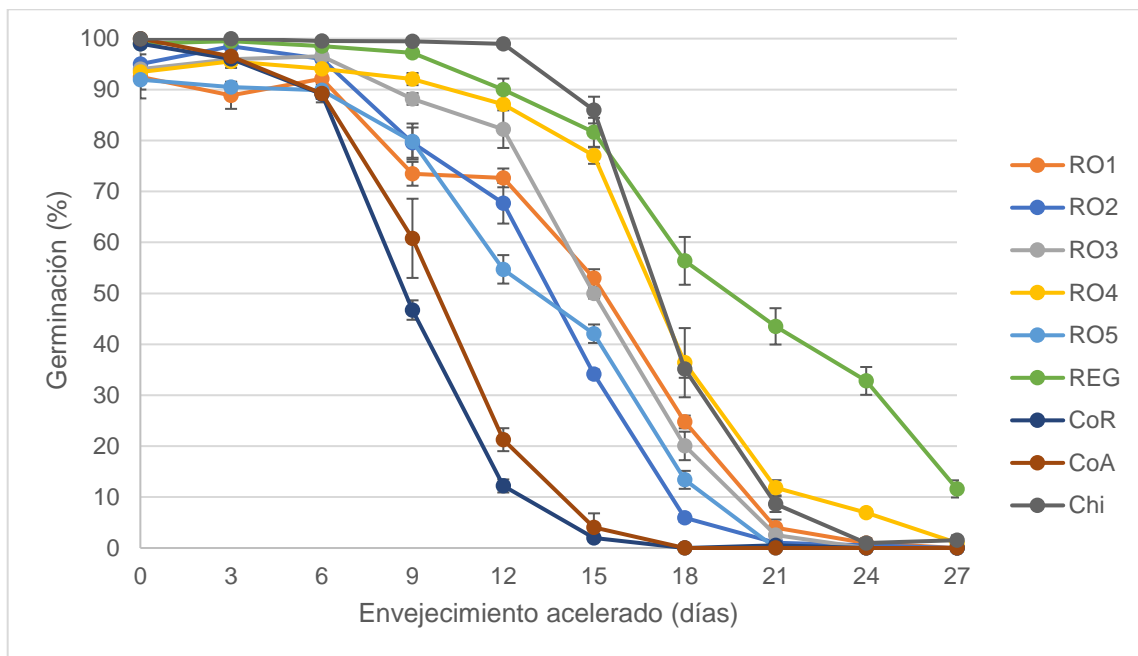


Fig. 2. Germinación fisiológica (%) de ecotipos de quinoa después de diferentes períodos de envejecimiento acelerado (días) a $35\pm 0,5C$ y 75% humedad relativa. Cada punto es el promedio de cuatro repeticiones de 50 semillas cada una \pm EE (error estándar). CoR y CoA: ecotipos de la zona norte, RO1 a RO5: ecotipos de la zona centro, Chi: ecotipo de la zona sur, Reg: cultivar comercial 'Regalona'.

Todos los genotipos presentaron altos porcentajes de germinación (sobre 90%) a los 0 días de EA pero se observan diferentes comportamientos de su deterioro ante envejecimiento. Los genotipos de CoR y CoA, provenientes de la zona norte, fueron los que con mayor rapidez perdieron su viabilidad, mientras que los genotipos Reg y Chi, de la zona sur, junto con el genotipo RO4 de la zona centro, son los que presentaron mayor longevidad. En el Cuadro 5 se presenta el IG de cada genotipo en cada período de envejecimiento.

Cuadro 5. Índice de germinación de nueve genotipos de quinoa después de diferentes períodos de envejecimiento acelerado a 35°C y 75% humedad relativa.

Genotipo ^z	Días de envejecimiento acelerado									
	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
CoR	0,97 ^y	0,92	0,78	0,26	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
CoA	1,00	0,95	0,78	0,38	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
RO1	0,90	0,83	0,79	0,52	0,34	0,19	0,07	0,01	0,01	0,00
RO2	0,93	0,95	0,83	0,52	0,30	0,11	0,01	0,00	0,01	0,00
RO3	0,93	0,93	0,92	0,62	0,41	0,17	0,05	0,01	0,00	0,00
RO4	0,90	0,87	0,80	0,60	0,40	0,27	0,09	0,04	0,02	0,01
RO5	0,91	0,86	0,75	0,45	0,23	0,14	0,04	0,00	0,00	0,00
Chi	0,87	0,82	0,83	0,63	0,47	0,30	0,09	0,02	0,01	0,01
Reg	0,85	0,74	0,68	0,50	0,38	0,36	0,18	0,12	0,08	0,03
LSD										
(p<0,05)	0,058	0,053	0,054	0,081	0,049	0,024	0,023	0,014	0,008	0,004

^zLos genotipos RO1 al RO5 provienen de la zona centro (Pichilemu, región de O'Higgins), Reg corresponde al cultivar comercial 'Regalona', CoR y CoA corresponden a genotipos cultivados en la zona norte (Colchane, región de Tarapacá) y el genotipo Chi de la zona sur (Isla de Chiloé, región de Los Lagos).

^yValores obtenidos del conteo semanal de cuatro repeticiones de 50 semillas.

De manera general, el IG de todos los genotipos disminuye a mayor tiempo de EA, es decir, mientras más tiempo en envejecimiento las semillas además de germinar menos lo hacen más lento. El genotipo Reg es el que se mantiene primeramente como el más lento, seguido del genotipo Chi, lo que se revierte a mayor tiempo de EA, siendo junto con RO4 los genotipos más longevos y que por lo tanto presentaron mayores valores de IG. Si se comparan los valores de IG a los 0 y 15 días de EA, se observa una

correlación negativa y significativa ($r = -0,95$; $p = 0,0001$), indicando que los genotipos de mayor IG a cosecha son los que pierden calidad antes, mientras que los de menor IG serían los que envejecen más lento.

Almacenamiento

El Cuadro 6 muestra la germinación (%) e índices de germinación (IG) de los distintos genotipos de quinoa luego de siete meses en dos condiciones de almacenamiento (Exp. 3).

Cuadro 6. Germinación fisiológica (%) e índice de germinación (IG) de nueve genotipos de quinoa evaluados a 20°C, antes y después de almacenamiento a 20°C.

Genotipo ^z	Germinación fisiológica (%)			IG		
	0 meses	7 meses	15 meses	0 meses	7 meses	15 meses
CoR	99,0 ^w	100,0	98,5	0,97 ^w	1,00	0,96
CoA	100,0 b ^y	99,5 ab	98,0 a	1,00 b	0,99 b	0,96 a
RO1	92,5	97,5	94,5	0,90 a	0,97 b	0,93 ab
RO2	95,0	97,0	98,0	0,93 a	0,97 b	0,97 b
RO3	94,0	98,0	96,4	0,93	0,98	0,95
RO4	93,4	97,5	97,0	0,90 a	0,97 b	0,92 a
RO5	91,9	94,0	94,5	0,91	0,93	0,93
Chi	100,0	100,0	100,0	0,87 a	0,93 b	0,93 b
Reg	99,0	99,0	98,5	0,85 a	0,99 b	0,89 a

^zLos genotipos CoR y CoA corresponden a genotipos cultivados en la zona norte (Colchane, región de Tarapacá), RO1 al RO5 provienen de la zona centro (Pichilemu, región de O'Higgins), el genotipo Chi de la zona sur (Isla de Chiloé, región de Los Lagos) y Reg corresponde al cultivar comercial 'Regalona'.

^y7 y 15 meses de almacenamiento. Condiciones: 20°C, envase hermético

^wValores obtenidos del conteo diario de cuatro repeticiones de 50 semillas.

^vEn cada variable, valores de un mismo genotipo (fila) que presentan letras diferentes difieren estadísticamente de acuerdo a análisis de LSD ("Least significant difference") de Fisher ($p < 0,05$).

Solo uno de los genotipos (CoA) presentó menor germinación fisiológica luego de 15 meses de almacenamiento, en el resto no se observaron diferencias significativas. La mayoría de los genotipos del ecotipo “de la costa” presentaron un aumento de IG entre los periodos de 0 y 7 meses de almacenamiento. A los 15 meses de almacenamiento se observa que solo uno de los genotipos (CoA) disminuyó su IG, dos lo aumentaron (RO2 y Chi) y el resto no presentó diferencias respecto al valor previo a almacenamiento.

Discusión

La temperatura afecta el porcentaje y la tasa de germinación (Roberts, 1988), provocando respuestas distintas según genotipo estudiado. Se produjo un alto porcentaje de germinación en los nueve genotipos de quinoa entre el rango de 11 y 39°C, y dentro de ellos, dos genotipos con germinación relativamente alta a 42°C. Lo anterior sugiere una alta tolerancia a la temperatura y una capacidad de la especie de sobrevivir bajo ambientes fríos y cálidos en contraste con la mayoría de los cultivos que alcanzan los valores más altos de germinación entre 20° y 30°C (González et al, 2017). Sin embargo, existen diferencias de IG entre genotipos, siendo menor en temperaturas más extremas y ajustándose a la dinámica de las temperaturas cardinales (Bewley *et al.*, 2013). Temperaturas bajas ralentizarían los procesos metabólicos durante la germinación, mientras que temperaturas muy altas (por sobre la temperatura máxima " T_m ") provocarían desnaturalización e inactivación de proteínas, además de deterioro de organelos celulares, afectando así la tasa de los procesos metabólicos (Schulte, 2015). Los óptimos de germinación *observados* directamente (mayor germinación, mayor velocidad) fueron entre 25° y 35°C, lo que coincide con otros estudios. Sigstad y Prado (1999) y Strenske *et. al* (2017) sugieren 25°C como óptimo, mientras que Boero *et al.* (2000) reportan como óptimo observado para quinoa un rango entre 20-30°C. Souza *et al.* (2017) determinaron que temperaturas alternas de 20/30°C fueron las óptimas, por otro lado, Bois *et al.* (2006) reportaron 20°C como temperatura óptima para germinación de semillas de quinoa. Estas diferencias probablemente se asocian de manera importante al origen de los genotipos evaluados en cada estudio, lo que debiese ser considerado al momento de establecer protocolos oficiales para evaluación de germinación estándar en semillas de quinoa.

Con respecto a las temperaturas cardinales; óptimas (T_o), mínimas (T_b) y máximas (T_m) *estimadas*, se distinguieron dos grupos con comportamientos distintos entre sí. Los ecotipos de la costa mostraron un rango de temperaturas cardinales más acotado (T_b : 10,5°C y T_m : 45°C) y una temperatura óptima de 27,7°C, en contraste con los ecotipos del altiplano sur, los que tuvieron un rango de temperaturas cardinales más amplio (T_b : 9,4°C y T_m : 50,6°C) y una mayor temperatura óptima de 30°C. Jacobsen y Bach (1998) estimaron una T_o de 30-35°C y T_m de 50°C en una variedad del ecotipo de

la costa y Boero *et al.* (2000) calcularon T_o entre 28-30°C en ecotipos altiplano norte y sur. *C. quinoa* posee una gran diversidad genética (Jarvis *et al.*, 2017; Fuentes *et al.*, 2009a; Fuentes *et al.*, 2009b) lo que define características morfológicas y químicas de semillas, y además permite su cultivo en distintas condiciones ambientales, y los ecotipos presentan diferentes adaptaciones a factores bióticos y abióticos (Bazile *et al.*, 2014). Los ecotipos producidos en mayores latitudes (altiplano norte y sur, interandinos, yungas) crecen bajo condiciones extremas, una de ellas son temperaturas fluctuantes, y plantas que crecen bajo este tipo de situaciones han debido desarrollar estrategias para sobrevivir (Jacobsen *et al.*, 2005), lo que explicaría la capacidad de germinar ante un amplio rango de temperatura. Las temperaturas cardinales para germinación de la mayoría de los cultivos tienden a ser similares a las de crecimiento y desarrollo, no obstante, para algunas especies difieren por lo que, ante la posibilidad o interés de cultivar los distintos ecotipos en otras zonas que no sea del lugar de origen hay que considerar factores asociados a dormancia, sensibilidad de fotoperiodo, tiempo termal, y aspectos de fenología asociados a filocrono y plastocrono, etc. de cada ecotipo, ya que se han observado diferencias entre ellos (Bois *et al.*, 2006; Bertero, 2003; Bertero *et al.*, 1999).

Luego de las pruebas de envejecimiento acelerado, los genotipos más longevos fueron Chi y Reg, cultivados en la zona sur del país y que corresponden al ecotipo de la costa. En contraste, los que perdieron su viabilidad tempranamente fueron los ecotipos del altiplano sur CoA y CoR. Esto coincide con lo observado por Castellión *et al.*, (2010), en cuanto a que un cultivar de la costa preservó la calidad de sus semillas por un mayor período que uno del altiplano sur. Es sabido que la longevidad depende de varios factores, existiendo diferencias entre genotipos de una misma especie (Ross y Davidson, 1992) y según el ambiente al que estuvo expuesta la planta madre (factores de precosecha) de un lote de semillas (Contreras *et al.*, 2009a; 2009b; 2008; Sanhewe and Ellis, 1996). Las temperaturas promedio altas, medias y bajas en las zonas de producción de quinoa del norte, centro y sur difieren, siendo mayores en la zona centro y sur (Bazile *et al.*, 2014) donde se producen los genotipos Reg y Chi respectivamente. Contreras *et al.* (2009) observaron que semillas de lechuga desarrolladas a mayor temperatura fueron más longevas y de menor peso que las producidas a bajas temperaturas. Esto último también coincide con los genotipos Reg y Chi que son los que tienen menor peso de semillas (TSW, Cuadro 2), relación entre peso y longevidad

que a su vez ha sido reportada por Satyantil *et al.* (2018) pero en semillas nativas australianas. La altitud en que se producen las semillas es otro factor que puede afectar su longevidad, por ejemplo, semillas producidas a bajas altitudes fueron más longevas que aquellas producidas a mayores altitudes en *Deschampsia antarctica* (Vera *et al.*, 2017). De hecho, hay estudios que sugieren que la altitud sería un factor determinante afectando la longevidad de semillas en especies alpina, incluso más que variables climáticas (Mondoni *et al.*, 2011; Satyantil *et al.* (2018).

Por otro lado, el contenido de agua es una variable importante en el deterioro de semilla (Ellis *et al.*, 1991; Roberts, 1973) y ocurriría desde un contenido de humedad de 5% en quinoa y dependiendo del contenido nutricional (Matiacevich *et al.*, 2006) que puede diferir entre variedades de quinoa (Miranda *et al.*, 2012). Considerando lo anterior, durante el experimento las semillas estuvieron a una humedad relativa de 75-76% (NaCl), llegando a tener un contenido de humedad entre 13,5 a 14,9%, similar a los observado por Pumacahua-Ramos *et al.* (2016) en dos variedades de quinoa (14,7-15,7%). Si bien las semillas que alcanzaron mayor contenido de humedad (CoA y CoR) fueron las menos longevas y las semillas con menor contenido de humedad (Reg) resultaron ser las más longevas, este parámetro no sería un buen indicador de longevidad ya que semillas de Chiloé (Chi), que también alcanzaron valores de humedad altos, fueron más longevas que otros genotipos que presentaron menor humedad en las semillas.

Si se analiza el contenido nutricional, en relación con los lípidos la quinoa posee mayormente ácidos grasos insaturados tales como oleicos, linoleicos, entre otros (Miranda *et al.*, 2012; Ng *et al.*, 2006), moléculas que son estables y de oxidación lenta (Ng *et al.*, 2006), por lo que no serían relevantes en el deterioro producido en almacenamiento (Matiacevich *et al.*, 2006). Además, el contenido de lípidos se relaciona de manera inversa con la humedad en equilibrio de la semilla, por su propiedad de hidrofobicidad, permitiendo una mayor viscosidad celular y una menor movilidad molecular (Buitink, 1998). Por otro lado, el principal componente de la semilla y que la hace atractiva nutricionalmente es el contenido proteico, el que sería genotipo-dependiente (Miranda *et al.*, 2013) y el que se ha propuesto como el que tiene mayor relación con deterioro en almacenamiento (Matiacevich *et al.*, 2006). Se ha observado que cultivares correspondientes a ecotipos del altiplano sur tendrían menor resistencia a la desnaturalización de proteínas a alta temperatura que un cv. del ecotipo de la

costa (Matiacevich et. al, 2006) y además una acumulación mayor de productos finales de glicación (“AGEs”, siglas en inglés) durante almacenamiento (Castellón *et al.*, 2010), lo que se correlacionaría negativamente con longevidad, alterando las funciones de proteínas y reduciendo la habilidad del metabolismo para limitar el daño de especies reactivas de oxígeno (“ROS”, siglas en inglés) y de reparar el mismo durante la germinación (Murthy *et al.*, 2002). Sumado a lo anterior, mayores actividades antioxidantes fueron reportadas en un cultivar del ecotipo de la costa en comparación a uno del altiplano (Miranda *et al.*, 2012).

Las semillas almacenadas por distintos períodos de tiempo en general no presentaron una caída notoria de germinación (sobre 90% de germinación fisiológica) luego de 15 meses (450 días aprox.), en contraste con otros estudios donde semillas de quinoa (variedad no informada) declinaban su germinación completamente en 300 a 400 días (Souza *et al.*, 2016; Strenske *et al.*, 2017). La humedad de las semillas durante almacenamiento varió entre genotipos y estuvo en un rango de 8,5 a 10,6%. Según Ellis *et al.* (1998), quinoa presenta un contenido de humedad crítico de 4%, valor en que la longevidad sería máxima. Por lo tanto, es probable que si en los cultivares evaluados en este estudio se controlara la humedad de las semillas entre 4 y 5%, la calidad de estas podría mantenerse alta por un par de años de almacenamiento, incluso a temperatura ambiente.

Si bien la mayoría de los genotipos cultivados de quinoa no poseen dormancia (Ceccato *et al.*, 2011), en este estudio se observó un aumento del IG en los genotipos correspondientes al ecotipo de la costa con respecto a los del altiplano sur. Este aumento de IG durante almacenamiento de la semilla seca indicaría presencia de una dormancia fisiológica leve que habría sido liberada por posmaduración o “*after ripening*” de la semilla (Bewley *et al.*, 2013). Seguido a lo anterior, se observó una disminución en germinación e IG entre los 7 y 15 meses de almacenamiento, lo que estaría asociado al deterioro por envejecimiento de la semilla. Esta leve “dormancia” no afectaría la calidad de semilla ya que se perdería antes de la época de la siembra siguiente. Algo similar se observó en semillas de la variedad “Chadmo” de Chiloé, la que mostró aumento de la velocidad y porcentaje de germinación luego de permanecer un tiempo en almacenamiento (Ceccato *et al.*, 2011). Los ecotipos de la costa (cultivado en la zona centro-sur), y del altiplano sur (cultivado en zona norte) tienen distintas ventanas de siembra y cosecha, con condiciones diferentes de cultivo (Bazile

et al., 2014). Se ha observado que a mayor fotoperiodo (sin especificar calidad de luz) y/o temperatura durante el llenado de semilla se promueve la dormancia en quinoa (Ceccato *et al.*, 2011; Fenner, 1991; Karssen, 1970), lo que sucede en los ecotipos de la costa, donde esta etapa ocurre durante el verano a mayor temperatura promedio y fotoperiodo (34°-43°S) que los del altiplano sur (19°S), entre verano-otoño (Bazile *et al.*, 2014). Otros aspectos como el espesor de la testa de semillas de *C. bonus-henicus* también podría tener efecto en dormancia (Dorne, 1981), mientras que Ceccato *et al.*, (2015) plantea que es el grosor de la testa en *C. quinoa* estaría relacionado con dormancia, donde semillas del cultivar Chadmo (Chiloé) presentaron el episperma más grueso y coincidentemente más dormante. Lo anterior podría ir asociado al color de la semilla, donde días largos provocarían semillas más oscuras, como en caso de las semillas del genotipo Chi, y dormantes en *C. album* (Karssen, 1970). Por último, temperaturas más altas observadas, cercanas a 25°C, provocarían liberación de dormancia (Ceccato *et al.*, 2011). Considerando lo anterior, la determinación de presencia de dormancia y diferencias entre lotes de semilla de quinoa podrían deberse al genotipo, al ambiente de producción o a la interacción de ambos, quedando la interrogante pendiente a responder por nuevas investigaciones.

Si bien no existe mucha información de los mecanismos que envuelven la inducción de dormancia en semillas de quinoa y la influencia del almacenamiento en su liberación, en este estudio la dormancia observada no se presentó como baja germinación, sino que menor IG en semilla recién cosechada, por lo que los genotipos que presentaron dormancia serían buenos candidatos para el mejoramiento de cultivares con resistencia a pre-brotación de grano antes de cosecha, por ejemplo en ambientes con alta humedad relativa en los meses de cosecha. Algunos autores han relacionado dormancia y longevidad, indicando que mecanismos de dormancia pueden estar involucrados en el retraso del deterioro de semilla (Bentsink *et al.*, 2006), en este estudio los ecotipos más longevos fueron los que presentaron una dormancia fisiológica leve, siendo un primer precedente en la materia, concordando con trabajos de Górski *et al.* (2013), donde la inducción de dormancia en semillas silvestres provocaba una mayor longevidad en las mismas.

Conclusiones

Actualmente existe mucha información sobre el estudio de la calidad del grano de quinoa desde un punto de vista nutricional y escasa sobre los requerimientos de germinación de los genotipos utilizados en Chile. Considerando que no existe el cultivo de la especie para producción de semilla y se utiliza el grano destinado a consumo para el establecimiento de este, el presente trabajo de investigación aporta al estudio de estos materiales. Se determinaron las temperaturas cardinales de germinación de los genotipos estudiados, observando diferencias entre ellos. Los correspondientes al ecotipo del altiplano sur presentaron un rango de temperaturas estimadas más amplio, es decir, las temperaturas mínimas más bajas y las óptimas y máximas más altas en comparación a los del ecotipo de la costa. Esta información ayuda a la elaboración de protocolos de germinación y a considerar distinciones entre ecotipos. Sin embargo, de las temperaturas observadas todos los genotipos coinciden en una máxima germinación entre 11 y 35°C, una temperatura óptima entre 28 y 30°C.

Con respecto a longevidad, los genotipos del altiplano sur fueron los menos longevos luego de someterlos a envejecimiento acelerado. Estas diferencias encontradas se podrían atribuir a factores genéticos, que condicionan a características físico-estructurales de la semilla, como también ambientales relacionados a la zona de producción de cada material estudiado, lo que merece nuevas pruebas para su determinación. Con respecto al potencial de almacenamiento, todos los genotipos conservaron su alta capacidad de germinación luego de 15 meses, siendo un importante antecedente de calidad de la semilla. Se observó la presencia de una dormancia fisiológica leve en algunos de los genotipos de la costa, lo que no entorpecería el establecimiento del cultivo en una temporada siguiente ya que la misma se perdería antes de la época de siembra. Sin embargo, contribuye a la interrogante de una posible relación causal entre dormancia y longevidad, la que merece abordarse en futuras investigaciones.

Resumen

Carolina Ayala. Germination and Longevity in quinoa seeds of nine genotypes cultivated in Chile. Tesis, *Magister* en Fisiología y Producción Vegetal, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 35 pp.

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudo cereal de origen andino y un cultivo de gran potencial por sus características nutricionales. Existen diferentes ecotipos con adaptaciones según zona geográfica (FAO, 2011; Fuentes, 2008), y en Chile se cultivan dos de estos (del altiplano sur y de la costa) en sus tres macrozonas: norte, centro y sur, donde el estudio sobre la calidad de la semilla utilizada es incipiente. Los objetivos de este estudio fueron determinar las temperaturas cardinales de germinación, la evaluación de longevidad y su potencial de almacenamiento de nueve genotipos cultivados en las tres macrozonas del país. La germinación fisiológica de semillas fue contabilizada a las 6 y 12 horas y luego diariamente en un rango de temperaturas entre 11 a 42°C para la estimación de las temperaturas mínimas (T_b), óptimas (T_o) y máximas (T_m). Para la determinación longevidad se realizó envejecimiento acelerado a 35°C y 75% de humedad relativa. Además, se almacenó semilla a 20°C en contenedores herméticos para evaluar capacidad de almacenamiento en distintos períodos de tiempo. Se midió germinación fisiológica (GF) e índice de germinación (IG). La T_o de germinación de los genotipos se estimó entre 27,7-30°C. Las pruebas de envejecimiento acelerado mostraron que los genotipos del ecotipo de la costa fueron los más longevos en comparación a los del altiplano sur. Luego de 15 meses de almacenamiento todos los genotipos mostraron alta calidad de semilla con porcentajes de germinación entre 94,5 y 100%, pero hubo presencia de una leve dormancia en algunos genotipos del ecotipo de la costa reflejado en un aumento de IG entre los 0 y 7 meses de almacenamiento.

Palabras clave:

Chenopodium quinoa Willd., temperaturas cardinales, almacenamiento de semilla, dormancia de semilla.

Referencias

Revistas:

- Abugoch L. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, Chemistry, Nutritional, and Functional Properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 58: Chapter 1.
- Bazile D., E.A. Martínez and F. Fuentes. (2014). Diversity of Quinoa in a Biogeographical Island: A review of Constraints and Potential from Arid to Temperature Regions of Chile. *Not Bot Horti Agrobi*, 42 (2): 289-298.
- Bentsink L., J. Jowett, C.J. Hanhart and Koornneef. (2000). Cloning of DOG1, a quantitative trait locus controlling seed dormancy in *Arabidopsis*, *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 103: 17042-17047.
- Bertero H.D., R.W. King and A.J. Hall. (1999). Modelling photoperiod and temperature responses of flowering in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Research*, 63: 19-34.
- Bertero H.D. (2003). Response of Developmental Processes to Temperature and Photoperiod in Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Reviews International*, 19: 87-97.
- Boero C., J.A. González and F.E. Prado. (2000). Efecto de la temperatura sobre la germinación de diferentes variedades de "quinoa" (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Lilloa*, 40 (1): 103-108.
- Bois J.F., T. Winkel, J.O. Lhomme, J.P. Raffailac, A. Rocheteau. (2006). Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *Europ. J. Agronomy*, 25: 299-308.
- Buitink J., M.M.A.E. Claessens, M.A. Hemminga and F.A. Hoekstra. (1998). *Plant Physiol.*, 118: 531-541.

- Castelli3n M., S. Matiacevich, P. Buera and S. Maldonado. (2010). Protein deterioration and longevity of quinoa seeds during long-term storage. *Food Chemistry*, 121: 952-958.
- Ceccato D., D. Bertero and D. Batlla. (2011). Environmental control of dormancy in quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds: two potential genetic resources for pre-harvest sprouting tolerance. *Seed Science Research*, 21:133-141.
- Ceccato D., D. Bertero, D. Batlla and B. Galati. (2015). Structural aspects of dormancy in quinoa (*Chenopodium quinoa*): importance and possible action mechanisms of the seed coat. *Seed Science Research*, May pp. 1-9.
- Contreras S., M.A. Bennet, D. Tay, and J.D. Metzger. (2008). Maternal light environment during seed development affects lettuce seed weight, germinability and storability. *HortScience*, 43(3):845-852.
- Contreras S., M.A. Bennet, D. Tay, J.D Metzger, and H. Nerson. (2009a). Red to far-red ratio during seed development affects lettuce seed germinability and longevity. *HortScience*, 44(1):130-134.
- Contreras S., M.A. Bennett, and D. Tay. (2009b). Temperature during seed development affects weight, germinability and storability of lettuce seeds. *Seed Science and Technology*, 37:398-412.
- De Bruin A. (1963). Investigation of the food value of quinoa and cañihua seed. *J. Food Sci.*, 29: 872-876.
- Dorne A.-J. (1981). Variation in seed germination inhibition of *Chenopodium bonus-henricus* in relation to altitude of plant growth. *Can. J. Bot.*, 59: 1893-1901.
- Ellis R.H. and E. H. Roberts. (1980a). The Influence of Temperature and Moisture on Seed Viability Period in Barley (*Hordeum distichum* L.). *Annals of Botany*, 45 (1): 31-37
- Ellis R.H. and E.H. Roberts (1980b). Improved equations for the prediction of seed longevity. *Annals of Botany*, 45:13-30.

- Ellis, R.H., T.D. Hong and E.H. Roberts. (1988). A Low-Moisture-Content Limit to Logarithmic Relations Between Seed Moisture Content and Longevity. *Annals of Botany* 61, 405-408.
- Ellis, R.H., T.D. Hong and E.H. Roberts. (1991). Seed moisture content, storage, viability and vigour. *Seed Science Research*, 1: 275-279.
- Fenner M. (1991). The effects of the parent environment on seed germinability. *Seed Science Research*, 1 (2): 75 – 84.
- Fuentes F. (2008). Genetic Improvement of quinoa. (Original title: Mejoramiento Genético de la Quinoa). *Agricultura del Desierto*, 4: 71-89.
- Fuentes F., E.A. Martinez, P.V. Hinrichsen, E.N. Jellen, and P.J. Maughan. (2009a). Assessment of genetic diversity patterns in Chilean quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germplasm using multiplex fluorescent microsatellite markers. *Conservation Genetics*, 10 (2): 369-377.
- Fuentes F., P.J. Maughan and E.R. Jellen. (2009b). Genetic diversity and genetic resources for quinoa breeding (Original title: Diversidad genética y recursos genéticos para el mejoramiento de la quinoa, *Chenopodium quinoa* Willd.). *Revista Geográfica de Valparaíso*, 42: 20-33.
- Finch-Savage W.E. and G.W. Bassel. (2016). Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, 67(3):567-91.
- González J.A., S.E. Buedo, M. Bruno and F.E. Prado. (2017). Quantifying Cardinal Temperatures in Quinoa (*Chenopodium quinoa*) Cultivars. *Lilloa*, 54 (2): 179-194.
- Górski T., K. Górka and H. Stasiak. (2013). Inhibition of seed germination by far red radiation transmitted through leaf canopies. *Polish Journal of Agronomy* 13:10-38.
- Harrington J.F. (1972). Seed storage and longevity, p. 145-245. In: Kozłowski TT, ed. *Seed biology*, Vol. III. New York, London: Academic Press.
- Jacobsen S.E. and A.P. Bach. (1998). The influence on seed germination rate in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Seed Science and Technology (Switzerland)*, 26 (2): 515-523.

- Jacobsen S.E., C. Montero, J.L. Christiansen, L.A. Bravo, L.J. Corcuera, and A. Mujica. (2005). Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*, 22:131-139.
- Jarvis D.E., D. Lightfoot, S. Schöckel, B. Li, T. Borm, H. Ohyanagi, K. Mineta, C. Michell, N. Saber, N. Kharbatia, R. Rupper, A. Sharp, N. Dally, B. Boughton, Y. Woo, G. Gao, E. Schijlen, X. Guo, A. Momin, S. Negrão, S. Al-Babili, C. Gehring, U. Roessner, C. Jung, K. Murphy, S. Arold, T. Gojobori, C. van der Linden, E. van Loo, E. Jellen, P. Maughan and M. Tester. (2017). The genome of *Chenopodium quinoa*. *Nature*, 542: 307–312.
- Karssen C.M. (1970). The light promoted germination of the seeds of *Chenopodium album* L. III. Effect of the photoperiod during growth and development of the plants on the dormancy. *Acta Bot. Neerl.*, 19: 81-94.
- Koziol M. (1992). Chemical composition and nutritional evaluation of Quinoa. (*Chenopodium quinoa* Willd.). *J. Food Comp. Anal.*, 5:35-68.
- Mamedi A., R. Afshari and M. Oveisi. (2017). Cardinal temperatures for seed germination of three Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *Iranian Journal of Field Crop Science, Special Issue* pp. 89-100.
- Matiacevich S.B., M.L. Castellión, S.B. Maldonado and M.P. Buera. (2006). Water-dependent thermal transitions in quinoa embryos. *Thermochimica Acta* 488: 117-122.
- Miranda M., A. Vega-Gálvez, E. Martínez, J. López, M. Rodríguez, K. Henríquez and F. Fuentes. (2012). Genetic diversity and comparison of physicochemical and nutritional characteristics of six quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) genotypes cultivated in Chile. *Ciênc. Tecnol. Aliment, Campinas* 32 (4): 835-843.
- Miranda M., A. Vega-Gálvez, E. Martínez, J. López, R. Marín, M. Aranda and F. Fuentes. (2013). Influence of contrasting environments on seed composition of two quinoa genotypes: nutritional and functional properties. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72(2): 108-116.

- Mondoni A, R.J. Probert, G. Rossi, E. Vegini and F.R. Hay. (2011). Seeds of alpine plants are short lived: implications for long-term conservation. *Annals of Botany* 107, 171–179.
- Murthy U.M.N., Y. Liang, P.P. Kumar and W.Q. Sun. (2002). Non-enzymatic protein modification by the Maillard reaction reduces the activities of scavenging enzymes in *Vigna radiata*. *Physiologia Plantarum*, 115: 213-220.
- Ng S., A. Anderson, J. Coker and M. Ondrus. (2007). Characterization of lipid oxidation products in quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Food Chemistry* 101: 185-192.
- Ponquett R.T., M.T. Smith and G. Ross. (1992). Lipid autoxidation and seed ageing: putative relationships between seed longevity and lipid stability. *Seed Science Research* 2:51-54.
- Pumacahua-Ramos A., J.A. Gomez, J. Telis- Romero, H.A. Villa-Vélez and J.F Lopes. (2016). Isotherms and isosteric heat of sorption of two varieties of Peruvian quinoa. *Scientia Agropecuaria* 7 (4): 409 – 417.
- Roberts E.H. (1973). Predicting the storage life of seeds. *Seed Sci. Technol.* 1:499-514.
- Roberts E.H. (1988). Temperature and seed germination. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 42:109-32.
- Ross E.E. and D.A. Davidson. (1992). Record Longevities of Vegetable Seeds in Storage. *HortScience* 27 (5): 393-396.
- Sanhewe A.J. and R.H. Ellis. (1996). Seed development and maturation in *Phaseolus vulgaris*. *Journal of Experimental Botany* 47: 959-965.
- Satyanti A., A. Nicotra, T. Merklung and L. Guja. (2018). Seed mass and elevation explain variation in seed longevity of Australian alpine species. *Seed Science Research*, 1-13 <https://doi.org/10.1017/S0960258518000090>.
- Schulte P.M. (2015). The effects of temperature on aerobic metabolism: towards a mechanistic understanding of the responses of ectotherms to a changing environment. *The Journal of Experimental Biology* 218: 1856-1866.

- Souza F., I. Devilla, R. Souza, I. Teixeria and C. Spehar. (2016). Physiological quality of quinoa seeds submitted to different storage conditions. *African Journal of Agricultural Research* 11(15): 1299-1308.
- Souza F., J. Souza, N. Souza, R. Spehar and T. Jesus. (2017). Standardizing germination tests for quinoa seeds. *African Journal of Agricultural Research*, 12(3): 155-160.
- Shaffi B. and W.J. Price. (2001). Estimation of cardinal temperatures in germination data analysis. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 6: 356-366.
- Sigstad E.E. and F.E. Prado. (1999). A microcalorimetric study of *Chenopodium quinoa* Willd. seed germination. *Thermochimica Acta* 326 pp. 159-164.
- Strenske A., E. Vasconcelos, V. Egewarth, N. Herzog and M. Malavasi. (2017). Response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seed stored under different germination temperatures. *Acta Scientiarum* 39 (1): 83-88.
- Vega-Gálvez A., M. Miranda., J. Vergara, E. Uribe, L. Puente and E.A. Martínez. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain; a review. 2010. *J. Sci. Food Agric.* Publicado online in Wiley Online Library: wileyonlinelibrary.com
- Walters C., M. L.M. Wheeler and J. M. Grotenhuis. (2005). Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics. *Seed Science Research* 15:1-20.
- Wright K.H., O.A. Pike, D.J. Fairbanks and S.C. Huber. (2002). Composition of *Atriplex hortensis*, sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds. *Food Chem. Toxicol*, 67:1383-1385.
- Vera, M.L. (2017). Factors affecting germination of *Deschampsia antarctica* and *Colobanthus quitensis* seeds from an altitudinal gradient on Livingston Island (South Shetland Islands, Antarctica). Repositorio Institucional, Universidad de Oviedo. Disponible en: <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/40759>.

Libros:

Bewley, J.D. and M. Black. (1972). The biochemical basis of deterioration of orthodox seeds, pp. 110-113. In *Seeds. Physiology of development and germination*. Plenum Press. New York and London.

Bewley, D., H. Hilhorst, K. Bradford, y H. Nogogaki. (2013). Environmental Control of Germination, pp. 299-339; Longevity, Storage and Deterioration, pp. 341-376. In *Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy*, Third Edition. Springer NY Press.

Copeland, L.O. and M.B. McDonald. (2001). Seed storage and deterioration, pp. 192-230. In *Seed Science and Technology*, KAP (ed.) Fourth edition. Michigan State University and Ohio State University, USA.

International Seed Testing Association (ISTA). (2011). *International rules for seed testing*. Bassersdorf, Switzerland.

Boletines:

FAO. (2011). *Quinoa: Un superalimento para Chile y el mundo. La dinámica de la expansión mundial de la Quinoa*. p. 18-21.

Oficina de estudios y políticas agrarias (ODEPA). (2018). *La quinoa en Chile, el despegue de un grano ancestral: enero del 2018*. Disponible en https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/quinoa_final2018.pdf.

