



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**GENÉTICA**

**VARIABILIDAD GENÉTICA DEL  
RENDIMIENTO DE QUINUA  
(*Chenopodium Quinoa Willd.*), SUS  
COMPONENTES Y CRITERIOS DE  
SELECCIÓN**

**MIRIAM GABRIELA VALVERDE RAMOS**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

**2021**

La presente tesis titulada: **VARIABILIDAD GENÉTICA DEL RENDIMIENTO DE QUINUA (*Chenopodium Quinoa* Willd.), SUS COMPONENTES Y CRITERIOS DE SELECCIÓN** realizada por la alumna: MIRIAM GABRIELA VALVERDE RAMOS bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

## **MAESTRA EN CIENCIAS**

RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GENÉTICA

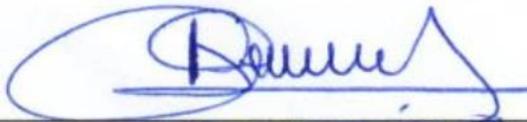
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Ignacio Benítez Riquelme

ASESOR



Dr. Eduardo Espitia Rangel

ASESOR



Dr. Salvador Miranda Colín

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2021

# VARIABILIDAD GENÉTICA DEL RENDIMIENTO DE QUINUA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD.), SUS COMPONENTES Y CRITERIOS DE SELECCIÓN

Miriam Gabriela Valverde Ramos, M.C.

Colegio de Posgraduados, 2021

## RESUMEN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo que crece en condiciones de estrés ambiental, con un alto potencial nutritivo y agronómico. En México ya se comercializa y se cultiva a pequeña escala, sin embargo, no se cuenta con tecnología para su producción, ni variedades mejoradas. Con el fin de sentar las bases del mejoramiento genético se evaluaron 16 genotipos de diferentes orígenes y características, en seis ambientes que representan la variabilidad ambiental de los Valles Altos Centrales de México. Se encontraron diferencias significativas para genotipos; en la comparación de genotipos, los genotipos tardíos Suyana, Suma, Pata de venado, Blanca Ayacucho y Huauzontle tienen mayor rendimiento de grano (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7 y 2967.2 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). De los genotipos intermedios Tokio rosa y Pasankalla reventona mostraron mayor rendimiento de grano (2858.4 y 2118.4 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente). Mientras que en los genotipos precoces CP-forraje presentó mayor rendimiento de grano (3005.8 kg ha<sup>-1</sup>). En cuanto a diámetro de semilla solo Huauzontle y Quinoa negra presentaron un tamaño igual o menor a 1.8 mm, el resto de los genotipos puede ser comercializado graneado por su tamaño de semilla. De los ambientes evaluados los menos favorables fueron Nanacamilpa 2019 con y sin fungicida, mientras que Santa Lucía de Prías 2019 con y sin fungicida son los ambientes más favorables. También, se determinó la proporción de las fuentes de variación: genética (G), ambiental (A) y la interacción (G x A), la heredabilidad, la respuesta a la selección y las correlaciones fenotípicas entre caracteres morfológicos, el rendimiento y sus componentes. Entre las tres fuentes de variación, los efectos genéticos fueron mayores en peso de mil granos y periodo de llenado de grano (53 y 50 %, respectivamente); y los efectos ambientales fueron más importantes en altura de planta a la floración (84 %). Las características con mayor variabilidad genética fueron granos por m<sup>2</sup> (31.18 %) y rendimiento (24.51 %); el peso de mil granos (0.528), periodo de llenado de grano (0.508) y emergencia de panoja (0.425) presentaron las heredabilidades más altas. Granos por m<sup>2</sup>, rendimiento de grano, peso de mil granos y días a emergencia de la panoja mostraron la mayor respuesta a la selección; mientras que diámetro de tallo, altura de planta a la madurez, granos por m<sup>2</sup> y rendimiento por día presentaron la mayor asociación con el rendimiento. La altura de planta, granos por m<sup>2</sup>, rendimiento por día, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja pueden emplearse como criterios de selección indirecta del rendimiento.

**Palabras clave:** *Chenopodium quinoa*, variedades, rendimientos, correlaciones fenotípicas, heredabilidad, variabilidad genética, respuesta a la selección.

# GENETIC VARIABILITY OF THE YIELD OF QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD.), ITS COMPONENTS AND SELECTION CRITERIA.

Miriam Gabriela Valverde Ramos, M.C.  
Colegio de Posgraduados, 2021

## ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Is a crop that grows under conditions of environmental stress, with a high nutritional and agronomic potential. In Mexico it is already commercialized and cultivated on a small scale, however, there is no technology for its production, nor improved varieties. In order to lay the foundations for genetic improvement, 16 genotypes of different origins and characteristics were evaluated in six environments that represent the environmental variability of the Central High Valleys of Mexico. Significant differences were found for genotypes; In the comparison of genotypes, the late genotypes Suyana, Suma, Pata de venado, Blanca Ayacucho and Huauzontle have higher grain yields (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7 and 2967.2 kg ha<sup>-1</sup>, respectively). Of the intermediate genotypes Tokio rosa and Pasankalla reventona showed higher grain yield (2858.4 and 2118.4 kg ha<sup>-1</sup> respectively). While in the early CP-forage genotypes it presented higher grain yield (3005.8 kg ha<sup>-1</sup>). Regarding seed diameter, only Huauzontle and Black Quinoa had a size equal to or less than 1.8 mm, the rest of the genotypes can be marketed grained by their seed size. Of the environments evaluated, the least favorable were Nanacamilpa 2019 with and without fungicide, while Santa Lucía de Prías 2019 with and without fungicide are the most favorable environments. Also, the proportion of the sources of variation was determined: genetic (G), environmental (A) and interaction (G x A), heritability, response to selection and phenotypic correlations between morphological characters, performance and their components. Among the three sources of variation, the genetic effects were greater in weight of thousand grains and grain filling period (53 and 50%, respectively); and the environmental effects were more important in plant height at flowering (84%). The characteristics with the greatest genetic variability were grains per m<sup>2</sup> (31.18%) and yield (24.51%); the thousand grain weight (0.528), grain filling period (0.508) and panicle emergence (0.425) presented the highest heritabilities. Grains per m<sup>2</sup>, grain yield, thousand grain weight and days to panicle emergence showed the greatest response to selection; while stem diameter, plant height at maturity, grains per m<sup>2</sup> and yield per day showed the highest association with yield. Plant height, grains per m<sup>2</sup>, yield per day, grain filling period and panicle emergence can be used as indirect selection criteria for yield.

**Keywords:** *Chenopodium quinoa*, varieties, yields, phenotypic correlation, heritability, genetic variability, selection criteria.

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por darme la vida y permitirme conocer grandes personas que me han ayudado en mi formación personal y profesional.

Al colegio de postgraduados (**COLPOS**) por la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría, en especial al posgrado de **GENÉTICA**, por todo el apoyo brindado durante mi estancia.

A los millones de mexicanos que a través del consejo nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) han financiado mis estudios de Maestría.

Al programa de Mejoramiento Genético de Amaranto del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (**INIFAP**) con sede en el Campo Experimental Valle de México (**CEVAMEX**) por el apoyo brindado en la realización de la investigación.

A mi consejo particular: *Dr. Ignacio Benítez Riquelme, Dr. Eduardo Espitia Rangel y Dr. Salvador Miranda Colín* por su apoyo incondicional, valiosas enseñanzas y ejecución del presente estudio, tanto a nivel profesional, científico y personal.

A **mis profesores** del Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad- Genética por las enseñanzas, experiencias y conocimiento brindado

*Miriam Gabriela Valverde Ramos*

## DEDICATORIA

A mis padres *Miriam Magdalena Ramos Gómez* y *Enrique Gabriel Valverde Ramos* por su amor, confianza, consejos y sobre todo por mi formación como persona.

A mi abuelita *Elvia Gómez Romero* y a mi tío *Adolfo Manuel Ramos Gómez* por su amor y apoyo invaluable.

A mis hermanos *Erick Enrique Valverde Ramos*, *Cristian Gabriel Valverde Ramos* y *Carmen Aneth Valverde Ramos* por su amistad y su apoyo incondicional, por las risas y por tener una personalidad única.

A mi prometido *Irving Paul Velazco García* por su amor, por estar a mi lado en cada paso y en todas mis locuras.

A los niños que alegran mi vida y me llenan de felicidad *Misael*, *Alexander*, *Ian*, *Azalea*, *Dylan*, *Paola*, *Yuren* y la más pequeñuela *Fátima*.

Al *Nonillo de Guanajuato* por su cariño, su apoyo incondicional y las valiosas enseñanzas.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
OBJETIVO E HIPÓTESIS .....	6
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos .....	6
Hipótesis.....	6
Literatura citada .....	7
CAPÍTULO 1. VARIABILIDAD GENÉTICA Y CRITERIOS DE SELECCIÓN EN QUINUA ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) .....	10
1.1. RESUMEN.....	10
1.2. ABSTRACT.....	11
1.3. INTRODUCCIÓN .....	12
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	17
1.6. CONCLUSIONES .....	24
1.7. LITERATURA CITADA.....	25
CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA DE QUINUA ( <i>Chenopodium quinoa</i> willd.) EN LOS VALLES ALTOS DEL CENTRO DE MÉXICO .....	28
2.1. RESUMEN.....	28
2.2. ABSTRACT.....	29
2.3. INTRODUCCIÓN .....	30
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
2.6. CONCLUSIONES .....	43
2.7. LITERATURA CITADA.....	44
CONCLUSIONES GENERALES.....	47

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1 Genotipos de <i>Chenopodium</i> utilizadas en el estudio.....	14
Cuadro 1.2 Parámetros genéticos de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central P-V 2018-2019.....	20
Cuadro 1.3 Medias (M), desviación estándar (DS) y valores máximos (Ma) y mínimos (Mi) de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central P-V 2018-2019.....	21
Cuadro 1.4 Correlaciones de Pearson de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central.....	22
Cuadro 2.1 Genotipos de <i>Chenopodium</i> utilizadas en el estudio.....	32
Cuadro 2.2 Tipo de suelo y precipitación de los seis ambientes de evaluación. P-V 2018-2019.....	33
Cuadro 2.3 Cuadrados medios para las variables estudiadas de 16 genotipos de quinua, en seis ambientes de secano en la Mesa Central. P-V 2018-2019.....	36
Cuadro 2.4 Comparación de medias de 10 variables evaluadas en seis ambientes de secano en la Mesa Central. P-V 2018-2019.....	37
Cuadro 2.5 Comparación de medias de 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central. P-V 2018-2019.....	40

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1. Proporción de la variabilidad debida a las fuentes de variación en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central. EPA: Emergencia de panoja, MAD: Días a madurez, PLLG: Periodo de llenado de grano, LPA: Longitud de panoja, DIT: Diámetro de tallo, APF: Altura de planta a la floración, ALM: Altura de planta a la madurez, DIS: Diámetro de semilla, RPD: Rendimiento por día, PHE: Peso hectolítrico, IC: Índice de cosecha, PMC: Panojas por m<sup>2</sup>, PMG: Peso de mil granos, GMC: Granos por m<sup>2</sup> y REN: Rendimiento de grano. .... 18
- Figura 2.1. Interacción genotipo\*ambiente para rendimiento de 11 genotipos agrupados por ciclo Tardíos (1 Huauzontle, 2 Suma, 4 Blanca Ayacucho, 7 Pata de venado, 8 Suyana, 11 Roja ku y 12 Rojita), Intermedios (3 Tokio rosa, 13 Pasankalla lila, 14 Quinoa negra, 15 Pasankalla reventona y 16 Pasankalla plomo) y Precoces (5 Choclo, 6 C.P. forraje, 9 Maranganí y 10 Misa amarilla), evaluados en seis ambientes (1 Nanacamilpa 2018 CON, 2 Nanacamilpa 2108 SIN, 3 Nanacamilpa 2019 CON, 4 Nanacamilpa 2019 SIN, 5 Santa Lucía de Prías 2019 CON y 6 Santa Lucía de Prías 2019 SIN). .... 42

## INTRODUCCIÓN GENERAL

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudocereal de la región andina de Sudamérica, con centro de origen en los Andes de Perú y Bolivia, domesticada hace más de 9000 años (Brazile *et al.*, 2016). Es un cultivo de temporal, anual, pertenece la familia Amaranthaceae, es una especie dicotiledónea y principalmente autógama (Bhargava y Srivastava, 2013). La quinua tiene una gran variabilidad genética y una amplia distribución mundial, con cerca de 250 especies y aproximadamente 40 genotipos comerciales en los países andinos. Tiene una variabilidad en el color de las plantas, inflorescencia y semillas, tipo de inflorescencia y contenido de proteínas y saponinas (Giusti, 1970; Bhargava y Ohri 2016; Zurita-Silva *et al.*, 2014). Se han observado tres colores básicos de las plantas: verde, rojo y púrpura; mientras que el color de la semilla son: blancas, amarillas, rojas, púrpuras, cafés y negras; y depende de la combinación del pericarpio y endospermo. La raíz de la quinua es pivotante, profusamente, ramificada y profunda. Las hojas son alternas, pecioladas, con lámina romboidal, triangular o lanceolada, bordes dentados y lisos; y pueden medir hasta 15 cm de largo por 12 cm de ancho, también presentan vesículas pubescentes que contienen oxalato de calcio tanto en el haz como en el envés, las cuales son higroscópicas y controlan la excesiva transpiración (Fuentes 1972, Mujica, 1977 y Mujica, 1988). La inflorescencia es una panoja que puede ser amarantiforme o glomerulada, la longitud de la panoja varía entre 17 a 70 cm. El diámetro de la panoja varía entre 2.83 a 5.13 cm (Chambi, 1978; Grandarillas, 1979; Mujica, 1983). La comercialización y el uso de la quinua depende el tamaño de la semilla, por lo que son relevantes las variables que expresan en tamaño y peso de la semilla. El fruto es un aquenio, cubierto por las envolturas florales, las cuales tienen que ser eliminadas durante la trilla, la semilla puede ser cónica, cilíndrica, elíptica y de tamaño variable. Se reportan diámetro de semillas de 1.2 a 2.5 mm y peso de mil semillas de 2.09 a 3.8 g., las cuales están

forradas por el pericarpio que puede ser de color traslucido, blanco, amarillo, naranja, rosa, rojo, café, gris o negro; el episperma, el endosperma y el embrión, constituyendo este último cerca del 60 % del volumen total. (Chura *et al.*, 2019; Mujica 1988; Zurita-Silva *et al.*, 2014). El principal objetivo del cultivo de quinua es la producción de semilla para su utilización directa como alimento. Gómez y Aguilar (2016) reportan rendimiento de quinua que va de 1200 a 3500 kg ha<sup>-1</sup> en su centro de origen y DGPA (2021) reporta rendimientos de 740 a 3632 kg ha<sup>-1</sup>. En relación al potencial que tienen la quinua en países donde no se siembra, se reportan rendimientos de 200 hasta 2050 kg ha<sup>-1</sup> (Bazile *et al.*, 2016), mientras que Chura *et al.*, (2019) reportan 2836.55 a 5099.18 kg ha<sup>-1</sup>. El estrés por un agente biótico puede modificar los componentes del rendimiento, pero en particular puede reducir el número de flores fértiles por unidad de área y el número de granos por espiga o inflorescencia (Abayomi y Wright 1999), mientras que el grano es negativamente influenciado por altas temperaturas y sequía durante la maduración (Chmielewski y Kohn 2000).

La quinua crece en una amplia gama de ambientes tropicales y templados que va de cero hasta los 4000 msnm, tiene un período vegetativo varía desde los 90 hasta los 240 días y alcanza alturas variables desde 30 a 300 cm, estas variables dependen del tipo de quinua, de las condiciones ambientales donde crece, de la fertilidad de los suelos. Las quinuas del valle tienen mayor altura que las que crecen por encima de los 4000 msnm y de zonas frías, su coloración varía con los genotipos y fases fenológicas. Crece con precipitaciones desde 200 a 2600 mm anuales, está clasificada como planta C3 (Curti *et al.*, 2016; García *et al.*, 2003; Mujica, 1983; Mujica, 1988). Esta variabilidad refleja su amplia adaptación de la especie a diferentes condiciones de estrés, tiene resistencia a la sequía, aunado a suelos pobres en nutrientes, teniendo resistencia tanto al frío como a la salinidad y ambientes ricos en radiación ultravioleta (González *et al.*, 2011; Jacobsen,

2003). La quinua es un cultivo importante en los Andes Sudamericanos y puede desempeñar un papel importante para el mundo, esto se debe a su alto valor nutraceutico; tiene un contenido alto de proteínas y un balance adecuado de los aminoácidos esenciales escasos en los cereales de consumo popular. Se reporta que provee todos los aminoácidos esenciales para los humanos, además de su contenido de grasa y fibra dietética (Gonzales *et al.*, 2012; Nowak *et al.*, 2016). La quinua contiene ácidos grasos, vitaminas y minerales que la hace un complemento nutricional para el desarrollo y múltiples funciones del organismo humano; también se le atribuyen propiedades medicinales, como cicatrizante, desinflamatorias, analgésica y desinfectantes (Mujica y Jellen, 2006). La quinua en México puede utilizarse para ser una alternativa en la producción de alimentos de alta calidad alimenticia y contribuir a resolver problemas nutricionales de la población; por lo que debe estudiarse agronómica y genéticamente.

Tanto para el mejoramiento genético por selección como por hibridación, el fitomejorador, además de conocer los aspectos agronómicos de la especie en que trabaja, debe conocer las características genéticas de las poblaciones objeto del mejoramiento. En el mejoramiento de los cultivos, es importante estimar los parámetros genéticos asociados al rendimiento, esto facilita para determinar los esquemas de selección a utilizar en el mejoramiento genético (Ligarreto y Ospina, 2009). El rendimiento de los cultivos se analiza a menudo en términos de componentes del rendimiento (espigas por área, granos por espiga o tamaño de grano) (Chmielewski y Kohn, 1999).

Dentro de las estrategias de selección se menciona el estudio de los componentes del rendimiento para la implementación de esquemas de selección múltiple o selección indirecta del rendimiento. Para ello se requiere un conocimiento amplio de los componentes del rendimiento, de la variabilidad genética, heredabilidad de los materiales o poblaciones base, pues de ello depende la respuesta a la selección. Dicha variabilidad es expresada en medidas de dispersión como puede ser

varianzas fenotípica y genotípica; sin embargo, el coeficiente de variación genética es el mejor parámetro para tal propósito (Ehdaie y Waines, 1989).

La acción combinada del ambiente y la segregación simultánea de muchos alelos en muchos loci produce la distribución continua (normal o cercana a la normal) de los rasgos cuantitativos. La forma de estudiar la variación continua que exhibe una población es analizando su varianza y particionándola en sus componentes. Una vez que se ha logrado esto, la genética de un rasgo se puede entender y explotar desde el punto de vista productivo. (Castañeda y Rodríguez, 2018). Las componentes en que se descompone la varianza total o fenotípica son: la varianza genotípica, que es la varianza de los valores genotípicos, y la varianza ambiental, que es la varianza de las desviaciones ambientales. La varianza fenotípica es la suma de los diferentes componentes (Falconer, 1983). La varianza genética ( $V_G$  o  $\sigma^2_G$ ) es el parámetro de mayor interés, se origina por las diferencias que existen entre genotipos, el objetivo de cualquier programa de mejoramiento es explotar esta varianza, cambiando así la estructura genética de la población con el fin de mejorar su productividad. Para explotar la varianza genética se debe subdividir en sus otros componentes. La varianza genética ( $V_G$  o  $\sigma^2_G$ ) es la suma de la varianza genética aditiva ( $V_A$  o  $\sigma^2_A$ ), la varianza genética de dominancia ( $V_D$  o  $\sigma^2_D$ ) y la varianza genética epistática o de interacción ( $V_I$  o  $\sigma^2_I$ ) (Moreno-Maldonado *et al.*, 2002). Varianza ambiental es el componente de la varianza fenotípica debido a las diferencias entre los efectos de los ambientes y gran parte de ésta se encuentra fuera del control del investigador. La interacción genético-ambiental se interpreta como la medida en que los valores fenotípicos relativos de los genotipos cambian cuando se pasa de un ambiente a otro. Este aspecto se reconoce como el factor que más dificultan una evaluación genotípica, como consecuencia del enmascaramiento que ejercen sobre el verdadero valor de los genotipos. La interacción origina una componente de varianza adicional, la cual puede aislarse y medirse

únicamente bajo circunstancias altamente controladas (artificiales), lo que implica que bajo condiciones normales la varianza debida a la interacción se considere como una parte de la varianza ambiental (Falconer, 1983; Molina, 1992; Sahagún 1992).

La heredabilidad es una medida de importancia relativa de la herencia y el ambiente, su valor depende de la magnitud de las varianzas genética y fenotípica, un cambio en cualquiera de ellas afecta la heredabilidad directamente (Robinson, 1951). La heredabilidad en sentido estricto ( $h^2$ ) es la relación entre la varianza aditiva y la fenotípica, este parámetro es de gran importancia por su valor predictivo a la respuesta de selección (Falconer, 1983; Nyquist, 1991).

## OBJETIVO E HIPÓTESIS

### Objetivo general

- Determinar el comportamiento agronómico y genético en 16 genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) para evaluar su adaptabilidad, su variabilidad genética del rendimiento y sus componentes en la región de los valles altos del centro de México.

### Objetivos específicos

- Estimar la variabilidad genética, heredabilidad y la respuesta a la selección del rendimiento y sus componentes en germoplasma introducido de (*Chenopodium quinoa* Willd) en México.
- Determinar qué criterios de selección son los más adecuados para el establecimiento de esquemas de mejoramiento genético en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en la región de los Valles Altos del Centro de México.

### Hipótesis

- Los genotipos de *Chenopodium quinoa* Willd evaluados en la región de los Valles Altos del Centro de México, expresan una amplia variabilidad genética entre ellos tanto en rendimiento de grano como en características morfológicas, muchas de las cuales están correlacionadas con el rendimiento, lo que permite definir criterios de selección.

## LITERATURA CITADA

- Abayomi, Y. A., y D. Wright. 1999. Osmotic potential and temperature effects on germination of spring wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.). *Trop. Agric.* 76:114-119.
- Bazile, D., S. Jacobsen, and A. Verniau. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Front. Plant Sci.* 7: 1-6. DOI:10.3389/fpls.2016.00622.
- Bhargava, A. y D. Ohri. 2016. Origin of Genetic Variability and Improvement of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Chapter 8. Springer International Publishing Switzerland 2016 V.R. Rajpal *et al.* (eds.), Gene Pool Diversity and Crop Improvement, Sustainable Development and Biodiversity 10, Pp. 241-217. DOI 10.1007/978-3-319-27096-8\_8.
- Bhargava, A. y S. Srivastava 2013. Quinoa botany, production and uses. CAB International, Oxfordshire.
- Castañeda S., A. N. y R. Rodríguez A. 2018. Problemas de genética: cuaderno de ejercicios. 1a edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias. Ciudad de México 400 p.
- Chambi, P. 1978. Comportamiento y variabilidad de 36 líneas de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en la primera generación de selección. Tesis Ing. Agr. UNTA. Prog. Ingen. Puno, Perú.
- Chmielewski, F. M., y W. Kohn. 1999. Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agric. Forest. Meteorol.* 96: 49-58. DOI: 10.1016/s0168-1923(99)00047-7.
- Chura, E., A. Mujica, B. Haussmann, K. Smith, S. Flores y A. L. Flores. 2019. Agronomic characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) progeny from close and distant self-fertilized simple crosses. *Cien. Inv. Agr.* 46:154-165. DOI 10.7764/rcia.v46i2.2142.
- Curti, R. N., A. J. de la Vega, A. J. Andrade, S. J. Bramardi, y H. D. Bertero. 2016. Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in north west Argentina. *Field Crops Res.* 189: 10–18. DOI:10.1016/j.fcr.2016.01.014.
- DGPA (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego Viceministerio de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario Dirección General De Políticas Agrarias). 2021. Observatorio de las Siembras y Perspectivas de la Producción Quinoa. Perú. pp. 17-37.
- Ehdaie, B., y J. G. Waines. 1989. Genetic variation, heritability and path-analysis in landraces of bread wheat from southwestern Iran. *Euphytica* 41:183-190. DOI:10.1007/BF00021584.
- Falconer, D. S., 1983. Introducción a la genética cuantitativa. Traducción en español de la primera edición en inglés por Fidel Márquez S. Ed. Continental, S. A. México.
- Fuentes, E. 1972. Importancia de la Quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) en la solución del problema de las proteínas en la alimentación Chilena. *Simiente*, Chile. 42: 15-20.
- García, M., D. Raes, y S. Jacobsen. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agric. Water Manage.* 60: 119-134. DOI: 10.1016/S0378-3774(02)00162-2.

- Giusti, L. 1970. El género *Chenopodium* en Argentina. I Número de Cromosomas. Darwiniana. 16: 98-105.
- Gómez P., L. y E., Aguilar C. 2016. Guía de Cultivo de la Quinoa. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. pp 31-33.
- González, J. A., y. Konishi, M. Bruno, M. Valoy and F. E. Prado. 2011. Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions J Sci Food Agric. 92: 1222–1229 Pp. DOI 10.1002/jsfa.4686.
- González, J A., Y. Konishi, M. Bruno, M. Valoy, y F. E. Prado. 2012. Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. Journal of the Science of Food and Agriculture. 92(6):1222-1229.
- Grandarillas, H. 1979. Mejoramiento Genético. En: Quinoa y Cañihua. Cultivos Andinos. Serie de libros y materiales educativos No. 49. CIID - IICA. Bogotá, Colombia. Pp 65-82.
- Jacobsen, S. 2003. The Worldwide Potential for Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Food Res. Int. 19: 167–177.
- Ligarreto, M., G A., y A. R. Ospina H. 2009. Analysis of heritable parameters associated to yield and precocity in Santa Isabel type climbing pea (*Pisum sativum* L.). Agron. Colomb. 27: 333-339.
- Molina G, J. D. 1992. Introducción a la Genética de Poblaciones y Cuantitativa (algunas implicaciones en genotecnia). AGT Editor. México, D. F. 349 p.
- Moreno-Maldonado, M., A. Peña-Lomelí, J. Sahagún-Castellanos, J. E. Rodríguez-Pérez y R. Mora-Aguilar. 2002. Varianza Aditiva, Heredabilidad y Correlaciones en la Variedad M1-Fitotecnia de Tomate de Cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot). Rev. Fitotec. Mex. 25: 231-237.
- Mujica, A. 1977. Cultivo de quinoa. Universidad Nacional del Altiplano. Prog. Ing. Agron. Perú, 93 p.
- Mujica S., A. M. H. 1983. Selección de Variedades de Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.) en Chapingo, México. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. 110 p.
- Mujica S., A. M. H. 1988. Parámetros Genéticos e Índices de Selección en Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Tesis M.D. Colegio de Postgraduados. 122 p.
- MUJICA, A.; JELLEN, S. 2006. La quinoa *Chenopodium* sp y sus parientes silvestres. La Paz: Universidad Mayor de San Andres. p.1-22
- Nowak, V., J. Du, & U. R. Charrondière. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Food Chem. 193: 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>.

- Nyquist, W. E. 1991. Estimation of heritability and prediction of selection response in plant populations. *Critical Reviews in Plant Science*. 10(3):235-322.
- Robinson H F, R E Comstock, P H Harvey. 1951. Genotypic and phenotypic correlations in corn and their implications in selection. *Agron. J.* 43:282-287.
- Sahagún, C. J. 1992. El ambiente, el genotipo y su interacción. *Rev.Chapingo* 79-80:5-12.
- Zurita-Silva, A., F. Fuentes, P. Zamora, S. E. Jacobsen, y A. R. Schwember. 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Mol. Breed.* 34: 13-30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023>.

# CAPÍTULO 1. VARIABILIDAD GENÉTICA Y CRITERIOS DE SELECCIÓN EN QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.)

## 1.1. RESUMEN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo con un alto potencial nutritivo y agronómico, que se puede producir en condiciones de estrés ambiental. En México se cultiva en pequeña escala y no se dispone de variedades mejoradas. Con el fin de sentar las bases para enfocar su mejoramiento genético en México, se evaluaron 16 genotipos de diferentes orígenes y características, en seis ambientes que representan la variabilidad ambiental de los Valles Altos Centrales de México. Se determinó la proporción de las fuentes de variación: genética, ambiental y la interacción genotipo x ambiente. La heredabilidad, la respuesta a la selección y las correlaciones fenotípicas entre caracteres morfológicos, el rendimiento y sus componentes también fueron estimados. De 15 variables evaluadas en efectos peso de mil granos y periodo de llenado de grano, los efectos genéticos fueron los más importantes; mientras que, para altura de planta a la floración, índice de cosecha, diámetro de tallo los efectos ambientales fueron los de mayor relevancia. En interacción genotipo x ambiente no supero el 20 % en las 15 variables. La mayor varianza aditiva, heredabilidad y respuesta a la selección, fueron altas para granos por metro cuadrado, rendimiento, peso de mil granos, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja; y la mayor asociación de variables con el rendimiento de grano se tuvo con el diámetro de tallo, altura de planta a la madurez, granos por metro cuadrado y el rendimiento por día, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja, por lo que pueden emplearse como criterios de selección indirecta del rendimiento.

**Palabras clave:** *Chenopodium quinoa*, correlaciones fenotípicas, heredabilidad, variabilidad genética, respuesta a la selección.

## CHAPTER 1. GENETIC VARIABILITY AND SELECTION CRITERIA IN QUINOA

(*Chenopodium quinoa* Willd.)

### 1.2. ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a crop with a high nutritional and agronomic potential, it can be sown under conditions of environmental stress. Nowadays quinoa is cultivated on a small scale in Mexico, however, production technology and improved varieties are available yet. In order to establish the foundations for selection and genetic improvement in Mexico, 16 genotypes of different origins were evaluated and characteristics, in six environments that represent the environmental variability of the Central High Valleys of Mexico. Proportion of the different sources of variation was determined: genetic, environmental and genotype interaction x environment, heritability, response to selection and phenotypic correlations between morphological characters, yield and its components were determined. Of 15 variables evaluated in thousand grain weight effects and grain filling period, the genetic effects were the most important; while, for plant height at flowering, harvest rate, stem diameter the environmental effects were the most relevant. In interaction genotype x environment did not exceed 20% in the 15 variables. The highest additive variance, heritability and selection criteria were high for grains per square meter, yield, weight of thousand grains, grain filling period and panicle emergence; and the greatest association of variables with grain yield was had with stem diameter, plant height at maturity, grains per square meter and yield per day, grain filling period and panicle emergence, so they can be used as indirect selection criteria for performance.

**Keywords:** *Chenopodium quinoa*, phenotypic correlations, heritability, genetic variability, selection criteria.

### 1.3. INTRODUCCIÓN

El incremento de la población mundial y el cambio climático son factores que influyen en la búsqueda de nuevas especies vegetales o de genotipos capaces de producir en condiciones de estrés ambiental (Howell, 2001). La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es una especie anual, dicotiledónea, de la familia Amaranthaceae (Bazile *et al.*, 2016), adaptada a ambientes hídricamente restrictivos (García *et al.*, 2003).

La mayor diversidad de genotipos y progenitores silvestres se reportan en los alrededores del lago Titicaca, en Perú y Bolivia (Apaza *et al.*, 2013). En sus centros de origen, la quinua se desarrolla en una amplia gama de ambientes: desde zonas desérticas hasta regiones con altas precipitaciones; su ciclo a madurez fisiológica del grano es de 4 a 6 meses (Curti *et al.*, 2016; Mujica *et al.*, 2001; Rojas *et al.*, 2014), el color de las plantas, inflorescencia y semillas, tipo de inflorescencia y contenido de proteínas y saponinas es variable (Zurita-Silva *et al.*, 2014). Esta variabilidad refleja la adaptación de la especie a diferentes condiciones agroecológicas de suelo, precipitación, nutrientes, temperatura, altitud, sequía, salinidad y ambientes ricos en radiación ultravioleta (González *et al.*, 2015), lo que implica una alta plasticidad genética del cultivo (Ayala *et al.*, 2004).

El grano de quinua provee al hombre de todos los aminoácidos esenciales (FAO, 2011); tiene un alto contenido de proteínas, grasa y fibra dietética (Nowak *et al.*, 2016), así como ácidos grasos, vitaminas y minerales; también se le atribuyen propiedades medicinales (Valenzuela *et al.*, 2015).

En el mejoramiento genético de los cultivos, se requiere estimar los parámetros genéticos asociados con el rendimiento para definir los esquemas de selección (Fuentes *et al.*, 2009; Ligarreto y Ospina, 2009). El rendimiento de los cultivos se analiza a menudo en términos de sus componentes del rendimiento y una alta asociación entre estos componentes es una ventaja para incrementar las ganancias de la selección (Ligarreto y Ospina, 2009; Slafer *et al.*, 2014). El estrés

abiótico puede modificar los componentes del rendimiento, al reducir el número de flores fértiles por unidad de área y el número de granos por espiga (Abayomi y Wright, 1999), mientras que altas temperaturas y sequía en la floración afectan el grano (Chmielewski y Kohn, 1999).

Para definir la respuesta genética a la selección, se requiere cuantificar los componentes del rendimiento, la variabilidad genética y la heredabilidad de los caracteres de los materiales o población a mejorar. Esta variabilidad se registra en valores de dispersión; rango, varianzas fenotípica y genotípica; sin embargo, el coeficiente de variación genética es el mejor parámetro para tal propósito (Ehdaie y Waines, 1989).

En México la quinua es un cultivo de pequeña escala del que no se dispone de variedades mejoradas (Espitia *et al.*, 2019). En consecuencia, en el año 2018 se inició un programa de mejoramiento genético mediante la selección de 16 genotipos introducidos a través de la Red Amaranto (SADER), proveniente de Ecuador, Perú y Bolivia<sup>3</sup>. El objetivo del presente estudio fue determinar la variabilidad genética, la heredabilidad, y las interrelaciones del rendimiento y sus componentes en 16 genotipos de quinua.

---

<sup>3</sup>Reuniones Nacionales de Investigación e Innovación Pecuaria, Agrícola, Forestal y Acuícola Pesquera, Estado de México, México. 2019. Evaluación de Germoplasma de Quinua (*Chenopodium quinoa willd.*) en los Valles Altos del Centro de México. <http://reunionesnacionales.inifap.gob.mx> (consulta: Abril 2021).

#### **1.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se evaluaron 16 genotipos de diferentes orígenes y características de color de fruto y grano

(Cuadro 1).

**Cuadro 1.1 Genotipos de *Chenopodium* utilizadas en el estudio**

No.	Nombre	Color		Origen
		Fruto	Grano	
1	Huauzontle	Amarillo	Blanco	México
2	Tunkahuan	Blanco	Blanco	Ecuador
3	Tokio rosa	Blanco	Blanco	Japón
4	Blanca Ayacucho	Blanco	Blanco	Perú
5	Choclo	Blanco	Blanco	Perú
6	CP-forraje	Blanco	Blanco	México
7	Pata de venado	Blanco	Blanco	Ecuador
8	Amarilla	Amarillo	Blanco	Perú
9	Misa amarilla	Amarillo	Blanco	Perú
10	Marangani	Amarillo	Blanco	Perú
11	Roja ku	Rojo	Blanco	Perú
12	Rojita	Rojo	Blanca	Perú
13	Pasankalla lila	Gris	Café	Perú
14	Quinoa negra	Verde	Negro	Perú
15	Pasankalla reventona	Gris	Café	Perú
16	Pasankalla plomo	Gris	Café	Perú

## **Ambientes de evaluación**

Los genotipos se evaluaron en tres ambientes: Santa Lucía de Prías, Texcoco, Estado de México, en el año 2019; y Nanacamilpa, Tlaxcala, en los años 2018 y 2019. En cada ambiente se establecieron dos experimentos: uno en el que se aplicó fungicida y otro sin fungicida. En los tres ambientes la textura del suelo era franco arenoso. Los valores respectivos de precipitación pluvial en el ciclo del cultivo fueron 264 mm en Sta. Lucía; 300 mm en Nanacamilpa 2018 y 364 mm en Nanacamilpa 2019.

## **Diseño experimental y Manejo del cultivo**

En cada experimento los genotipos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones; la parcela experimental consistió en tres surcos con 0.8 m de separación y 5 m de largo. El cultivo se condujo en condiciones de secano (temporal), sin fertilización química, ni control de plagas; en todos los experimentos se aplicaron dos deshierbes manuales 25 y 45 días después de la siembra (dds). En los ambientes con fungicida, antes de la siembra se aplicó Carboxin y Captan (producto comercial: Vitavax 300)  $1\text{ g kg}^{-1}$  de semilla; además, a los 30 y 50 días de emergencia la planta se aplicó Metalaxil (producto comercial: Ridomil Gold)  $1\text{ l ha}^{-1}$  y Mancozeb (producto comercial: Manzate)  $1.5\text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente.

## **Variables**

Se registraron las siguientes variables: días a emergencia de la panoja (EPA), días a madurez (MAD) y periodo de llenado de grano (PLLG = MAD-EPA, días), las dos primeras cuando el 50% de las plantas de cada parcela presentaron el primordio de la inflorescencia o la madurez fisiológica del grano, respectivamente. En 10 plantas representativas por parcela, en la floración se midió el diámetro de tallo (DIT, cm) y la altura de planta (ALF, cm); a la madurez del grano se registró la altura de planta a la madurez (ALM, cm) y la longitud de panoja (LPA, cm). El rendimiento

biológico (RB) se obtuvo de una muestra representativa de la biomasa aérea (500 g), la cual se secó a 60 °C hasta llegar a un peso constante y se extrapoló a 3 m<sup>2</sup> de la parcela útil. El diámetro de semilla (DIS, cm), se obtuvo de 10 grupos de 10 semillas de cada parcela, con un vernier digital (Stainless Hardened); el peso hectolítrico (PEH, kg/hl) se determinó mediante el peso de un volumen conocido de semilla y se extrapoló al peso de 100 litros; el número de panojas por m<sup>2</sup> (PMC) correspondió a las panojas primarias; el peso de mil granos (PMG, g) se basó en el peso de cinco grupos de 100 granos de cada parcela y el número de granos por m<sup>2</sup> (GMC) se estimó a partir del rendimiento por parcela; el rendimiento de grano (rendimiento económico, RE) (KGH, kg ha<sup>-1</sup>) se determinó en 3 m del surco central, y se extrapoló a una hectárea. Con las variables anteriores se estimó el rendimiento por día (RPD, g) mediante el cociente del rendimiento de grano entre días a madurez. El índice de cosecha (IC) se estimó mediante la relación del rendimiento económico y el rendimiento biológico.

### **Estimación de parámetros genéticos y análisis de datos**

En los modelos de los análisis estadísticos se consideró a los genotipos y los ambientes como de efectos aleatorios. Las varianzas para la estimación de parámetros genéticos se obtuvieron al utilizar el procedimiento VARCOM del SAS mediante el método REML (SAS 9.4 2012). Se realizó un análisis de correlación del rendimiento y sus componentes mediante el procedimiento CORR del SAS (SAS 9.4, 2012). El coeficiente de variación genética se calculó mediante el cociente de la desviación estándar genética entre la media. Coeficientes mayores a 20 se clasificaron como de variabilidad genética alta, de 12 a 20, intermedia y menores de 10, baja (Villaseñor Mir *et al.*, 2017). Siendo la quinua planta autógama, la varianza genética del material evaluado es entre genotipos homocigóticos, por lo que la heredabilidad es en sentido estrecho, la

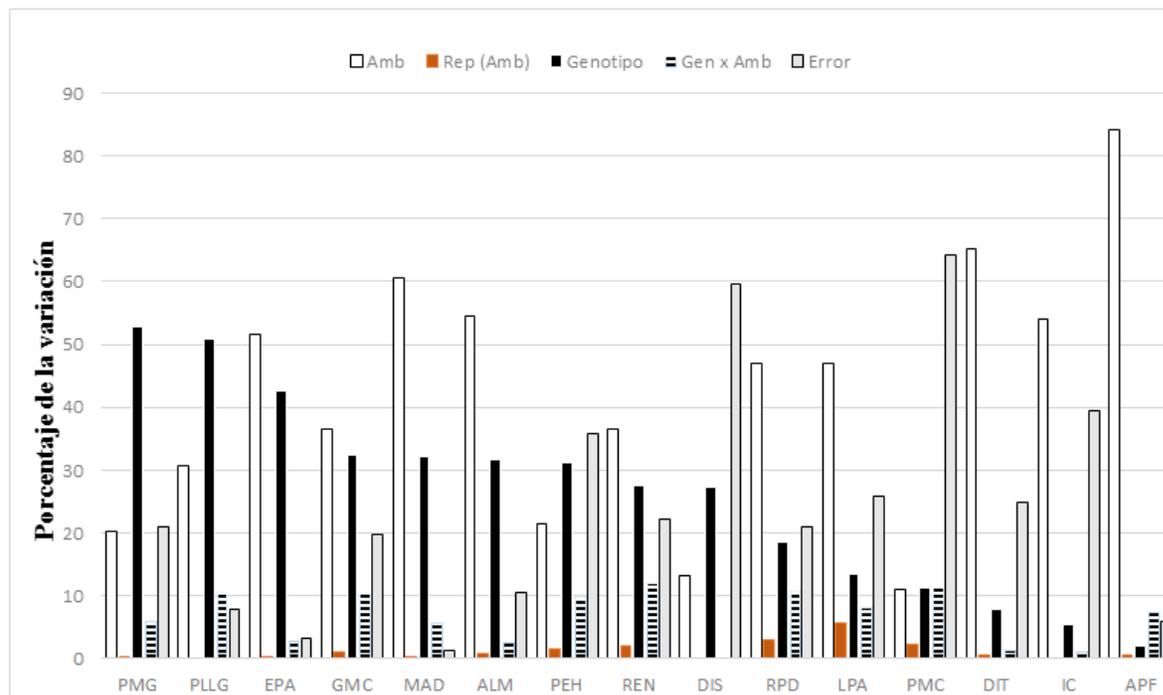
cual se obtuvo al dividir la varianza genética aditiva entre la varianza fenotípica y la respuesta a la selección al multiplicar el diferencial de selección estandarizado (5 %) por la heredabilidad.

La heredabilidad se obtuvo al dividir la varianza genética entre la varianza fenotípica y la respuesta a la selección al multiplicar el diferencial de selección estandarizado (5%) por la heredabilidad.

## **1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Origen de la variación**

La variación debida a efectos ambientales fue la principal fuente de variabilidad en 10 de las 15 variables (Figura 1.1), de las cuales altura de planta a la floración fue la que presentó los mayores efectos (84 %). Entre el 51 al 60 % de los efectos del ambiente estuvieron: el diámetro de tallo, días a madurez, altura de planta a la madurez, índice de cosecha y emergencia de la panoja; en el intervalo de 30 y 50 %, están longitud de panoja, rendimiento por día, granos por m<sup>2</sup> y rendimiento de grano. Es importante mencionar que el rendimiento de grano y sus componentes próximos, presentaron los menores efectos del ambiente, contrario a lo encontrado en Garrido *et al.*, (2013) quienes señalaron que para estos caracteres, la variación más relevante, fue provocada por el ambiente.



**Figura 1.1. Proporción de la variabilidad debida a las fuentes de variación en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central. EPA: Emergencia de panoja, MAD: Días a madurez, PLLG: Periodo de llenado de grano, LPA: Longitud de panoja, DIT: Diámetro de tallo, APF: Altura de planta a la floración, ALM: Altura de planta a la madurez, DIS: Diámetro de semilla, RPD: Rendimiento por día, PHE: Peso hectolítrico, IC: Índice de cosecha, PMC: Panojas por m<sup>2</sup>, PMG: Peso de mil granos, GMC: Granos por m<sup>2</sup> y REN: Rendimiento de grano.**

La variación debida a genotipos fue de mayor relevancia que la variación atribuida al ambiente en el peso de mil granos y periodo de llenado de grano (53 y 50 %, respectivamente), mientras que, para diámetro de semilla y peso hectolítrico la variación genotípica fue de 42 y 32 % respecto al total, respectivamente. La variación debida a genotipos fue mayor en dos de 15 variables en este estudio contrario con lo reportado por Espitia *et al.*, (1992) donde en 22 de 25 variables la variación atribuida a genotipos fue la más importante, al evaluar 60 genotipos de amaranto en dos ambientes.

La variación debida a la interacción genotipo x ambiente, en general fue menor que la de las dos fuentes principales y menor al 20 %; aquí, la presencia de paralelismo en el comportamiento

de los genotipos al cambiar de ambiente, es lo destacable, ya que se puede trabajar con el promedio de ambientes para establecer conclusiones, particularmente para caracteres del rendimiento y sus componentes. En quinua y para la mayoría de los cultivos de temporal, la poca variabilidad de la interacción genotipo por ambiente, incluso menor que la genotípica, no es lo común. La literatura en general, indica lo contrario, una mayor variación debida a la interacción genotipo x ambiente que la debida a genotipos, particularmente para rendimiento, índice de cosecha, granos por m<sup>2</sup> y peso de mil granos en quinua Garrido *et al.*, (2013). La similitud en los ambientes, caracterizado casi por la misma precipitación y la inclusión de sólo localidades de Valles Altos de México con poca variación longitudinal, altitud y latitud, podría ser la causa para entender la baja variación de la interacción genotipo por ambiente.

La importancia de identificar el origen de la variabilidad radica en que el fitomejorador conozca qué proporción de la misma podrá capitalizar en el mejoramiento genético. Por ejemplo, en este estudio el rendimiento de grano presentó 27.4 % de variabilidad debida al efecto de genotipo, en contraste, el índice de cosecha presentó 5.2 %, por lo que será más fácil para el genotecnista incrementar el rendimiento de grano que el índice de cosecha.

Los coeficientes de variación genética (CVG), que resumen esta intención, fueron altos para GMC (31.18) y REN (24.51) (Cuadro 2). En un segundo grupo están RPD, EPA, ALM y PLLG con valores respectivos de 10.99 a 19.62, o sea, su variabilidad genética es media. Las demás variables presentaron valores menores a 10 %, lo que indica que son las variables con menor variabilidad genética. En estos últimos y en programas de mejoramiento genético, poca ganancia genética se generaría; una vertiente para enriquecer esta variabilidad sería introducir nuevo germoplasma para mejorar estas características (Villaseñor *et al.*, 2017), o cruzamientos dirigidos

entre germoplasma con grandes distancias genéticas para generar recombinantes nuevas (Chura *et al.*, 2019).

Los CVG se asocian a una media de la expresión del carácter presentada en el Cuadro 3. Dentro de cada grupo de CVG, hubo variación en las medias de los caracteres evaluados, lo que posibilita elegir no sólo caracteres con alto CVG, sino también a genotipos con mejor media para su uso como germoplasma base y con ellos iniciar un programas de mejoramiento genético por selección.

**Cuadro 1.2 Parámetros genéticos de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central P-V 2018-2019.**

VARIABLES	$\sigma^2_P$	$\sigma^2_G$	CVG	$h^2$	R %
Emergencia de panoja (días)	126.41	53.7	14.219	0.425	19.1
Días a madurez	258	83	6.718	0.322	7.8
Periodo de llenado de grano (días)	126.6	64.27	10.994	0.508	16.1
Longitud de panoja (cm)	61.51	8.26	6.945	0.134	5.2
Diámetro de tallo (cm)	8.72	0.68	6.937	0.079	4.0
Altura de planta a la floración (cm)	1265.7	24.65	5.545	0.019	1.5
Altura de planta a la madurez (cm)	1405	443.48	14.03	0.316	16.2
Diámetro de semilla (mm)	0.058	0.016	6.122	0.273	6.5
Rendimiento por día (kg)	80.24	14.77	19.629	0.184	17.3
Peso hectolítrico (kg l <sup>-1</sup> )	8.16	2.55	2.357	0.313	2.7
Índice de cosecha	0.015	0.001	8.469	0.053	4.0
Panojas por metro cuadrado	12.53	1.42	7.63	0.113	5.2
Peso de mil granos (g)	0.25	0.131	12.884	0.528	19.3
Granos por metro cuadrado	2.8E+09	908971332	31.186	0.325	36.6
Rendimiento de grano (kg ha <sup>-1</sup> )	1493901.5	410372.1	24.516	0.275	26.5

$\sigma^2_P$ : Varianza fenotípica,  $\sigma^2_G$ : Varianza genotípica, CVG: Coeficiente de variación genética,  $h^2$ : heredabilidad en sentido estricto, R: respuesta a la selección.

**Cuadro 1.3 Medias (M), desviación estándar (DS) y valores máximos (Ma) y mínimos (Mi) de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central P-V 2018-2019.**

Variabes	M	DS	Mi	Ma
Emergencia de panoja (días)	51	10.61	34	85
Días a madurez	135	15.08	101	168
Periodo de llenado de grano (días)	73	11	48	97
Longitud de panoja (cm)	41.3	7.49	26.4	57.7
Diámetro de tallo (cm)	11.9	2.78	6.3	19.6
Altura de planta a la floración (cm)	89.5	33	31	159
Altura de planta a la madurez (cm)	150	35.39	78	240
Diámetro de semilla (mm)	2	0.24	2	4
Rendimiento por día (kg)	19.58	8.55	2.4	53.9
Peso hectolítrico (kg l <sup>-1</sup> )	67	2.78	59	75
Índice de cosecha	0.33	0.12	0.05	0.77
Panojas por metro cuadrado	15.6	3.49	7.5	30
Peso de mil granos (g)	2.81	0.48	1.59	4.38
Granos por metro cuadrado	96676	50749	8833	301877
Rendimiento de grano (kg ha <sup>-1</sup> )	2613	1174	325	7979

Las heredabilidades más altas las presentó PMG, PLLG y EPA (mayores a .04) (Cuadro 2), lo cual sugiere que estos caracteres pueden mejorarse fácilmente ya que su variación se debe principalmente a efectos genéticos. En contraste, APF, IC, DIT, PMC, LPA y RPD presentaron heredabilidades bajas (menores a 0.25), por lo que estas características serán difíciles de mejorar al tener influencia ambiental considerable. En un grupo intermedio se encuentran GMC, MAD, ALM, PHE, REN y DIS, con valores de heredabilidad de 0.27 a 0.32. Los valores del presente estudio difieren, en lo general, de Benlhabib *et al.*, (2016), quienes reportan valores altos de heredabilidad para ALM, LPA, DIS, MAD y REN que van de .42 a .89, quizás debido a que estos autores evaluaron 72 líneas recombinantes en un solo ambiente, por lo que sus valores sobre-representan los efectos genéticos respecto a los efectos ambientales. En contraste, De Santis *et al.*,

(2016) encontraron heredabilidades para altura de planta a la madurez, peso de mil granos, índice de cosecha y rendimiento de grano que van de .33 a .86, al estudiar 25 genotipos en dos ambientes. Lo anterior evidentemente es resultado de las diferencias debidas al germoplasma estudiado y, sobre todo, a los ambientes de evaluación.

En cuanto a la respuesta a la selección con base en una presión de selección de 5 %, granos por metro cuadrado y rendimiento de grano, correspondería a más del 25 % de la media (Cuadro 2). Con valores medios de respuesta a la selección se ubican rendimiento por día, altura de planta a la madurez, periodo de llenado de grano, peso de mil granos y días a emergencia de la panoja, pues su respuesta a la selección correspondería a un 15 a 20 % de la media de cada variable. El resto de las variables presentaron una respuesta a la selección baja. Las respuestas a la selección encontradas en este estudio son menores a las reportadas por De Santis *et al.*, (2016).

**Cuadro 1.4 Correlaciones de Pearson de 15 variables en 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central**

Variables	MAD	PLLG	LPA	DIT	ALF	ALM	DIS	RPD	PEH	IC	PMC	PMG	GMC	REN
EPA	0.69**	-0.07	-0.37**	-0.34**	≥0.00	-0.07	-0.21**	-0.28**	0.43**	0.17**	0.07	-0.37**	0.056	-0.11
MAD		0.65**	-0.063	-0.17**	0.31**	0.13 *	-0.32**	-0.24**	0.44**	-0.13**	0.20**	-0.44**	0.17**	0.03
PLLG			0.29**	0.10	0.43**	0.21**	-0.26**	-0.07	0.22**	-0.33**	0.22**	-0.24**	0.15 *	0.12**
LPA				0.57**	0.47**	0.62**	-0.23**	0.47**	-0.06	-0.38**	-0.11	-0.32**	0.52**	0.49**
DIT					0.55**	0.76**	-0.021	0.67**	-0.11	-0.56**	-0.27**	-0.04	0.59**	0.65**
ALF						0.63**	-0.28**	0.32**	0.24**	-0.63**	-0.07	-0.38**	0.53**	0.44**
ALM							-0.13**	0.66**	0.01	-0.57**	-0.18**	-0.23**	0.70**	0.73**
DIS								0.02	-0.37**	0.11	-0.12**	0.53**	-0.28**	-0.08
RPD									-0.182**	-0.19**	-0.11	0.05	0.82**	0.95**
PEH										-0.04	-0.10	-0.44**	0.09	-0.08
IC											0.14**	0.23**	-0.30**	-0.23**
PMC												-0.02	-0.03	-0.06
PMG													-0.45**	-0.09
GMC														0.91**

EPA: Emergencia de panoja, MAD: Días a madurez, PLLG: Periodo de llenado de grano, LPA: Longitud de panoja, DIT: Diámetro de tallo, ALF: Altura de planta a la floración, ALM: Altura de planta a la madurez, DIS: Diámetro de semilla, RPD: Rendimiento por día, PHE: Peso hectolítrico, IC: Índice de cosecha, PMC: Panojas por m<sup>2</sup>, PMG: Peso de mil granos, GMC: Granos por m<sup>2</sup> y REN: Rendimiento de grano. \*, \*\* Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente.

**Correlaciones entre variables**

El REN presentó las correlaciones más altas ( $r$  entre 0.65\*\* y 0.91\*\*) con DIT, ALM, GMC y RPD, y correlaciones medias con ALF y LPA (0.44\*\* y 0.49\*\*, respectivamente) (Cuadro 4), lo cual concuerda en parte con Bhargava *et al.*, (2006) quienes encontraron correlaciones para longitud de panoja (0.60\*\*), altura de planta a la madurez (0.50\*\*) y peso de mil granos (0.49\*\*). Se encontraron también correlaciones significativas, aunque bajas del REN con PLLG e IC (0.12\*\* y 0.23\*\* respectivamente); algunos autores reportan correlaciones altas de índice de cosecha con rendimiento de grano (0.78 \*\*) (De Santis *et al.*, 2016; Murphy *et al.*, 2019). En el presente estudio no se encontró asociación de EPA, MAD, PMC y PMC con el REN, lo que coincide con los resultados de Madrid *et al.*, (2018) quienes reportaron ausencia de asociación del rendimiento de grano con peso de mil granos y De Santis *et al.*, (2019) y Benlhabib *et al.*, (2016) para rendimiento con días a madurez.

GMC presentó una de las correlaciones más altas con REN ( $r=0.91$  \*\*), además presentó asociación alta con RPD ( $r=0.82$ \*\* ) y ALM ( $r=0.70$ \*\*). Otro componente importante del rendimiento es el PMG la cual en el presente estudio no presentó asociación con el REN, mostró asociación media negativa con MAD, PHE, APF, EPA, y LPA con valores entre ( $r=-0.32$ \*\* y -0.44\*\*), presentó además asociación media y positiva con DIS ( $r=0.53$ \*\*). Esto difiere de los resultados reportados por Madrid *et al.*, (2019) quienes no encontraron asociación del peso de mil granos y diámetro de semilla con ninguna de las variables en quinuas chilenas.

### **Criterios de selección**

De las ganancias genéticas de los métodos de selección depende de la variabilidad genética, la heredabilidad y de la asociación del carácter de interés con otras variables. En los genotipos del presente estudio, para incrementar el rendimiento de quinua se tendrá que seleccionar plantas con mayor longitud de panoja, diámetro de tallo, altura de planta a la floración, altura de planta a la

madurez, rendimiento por día y granos por metro cuadrado. Sin embargo, los bajos coeficientes de variación genética de longitud de panoja, diámetro de tallo, y altura de planta a la floración sugieren la necesidad de introducir germoplasma con estas características. La altura de planta a la madurez y granos por metro cuadrado presentaron variabilidad, heredabilidad y correlación apropiados para seleccionar indirectamente el rendimiento. Es necesario mejorar el tamaño de semilla ya que es fundamental en la comercialización y forma de consumo de la quinua, pues las que producen grano grande se prefieren para consumo directo y las de grano pequeño para harinas (Bonifacio *et al.*, 2013). Si el objetivo fuera incrementar el tamaño de semilla se deberán seleccionar plantas con mayor peso de mil granos, panojas por metro cuadrado, peso hectolítrico, altura de planta a la madurez, altura de planta a la floración, longitud de panoja, periodo de llenado de grano, días a madurez y emergencia de panoja.

El rendimiento de grano presenta una variabilidad alta en las poblaciones de quinua del presente estudio, pero tiene una heredabilidad baja por lo que se esperaría una respuesta a la selección moderada. Para mejorar el rendimiento de grano de estas poblaciones, sería recomendable introducir más germoplasma a fin de mejorar no solo el rendimiento sino otras características como diámetro de semilla, peso de mil granos, madurez y altura de planta.

## **1.6. CONCLUSIONES**

La variación debida a ambientes fue la de mayor relevancia para 10 de las 15 variables estudiadas, resaltando la altura de planta a la floración y el diámetro de tallo (84 y 65 %), respectivamente; mientras que la debida a genotipos, fue para el peso de mil granos y periodo de llenado de grano (53 y 50 %), respectivamente. En todas las variables, la variación debida a la interacción genotipo por ambiente fue menor al 20 %. Se presentó alta variabilidad genética aditiva para granos por metro cuadrado y rendimiento de grano y las heredabilidades y respuestas a la selección más altas fueron para peso de mil granos, periodo de llenado de grano, emergencia de

panoja, granos por metro cuadrado, rendimiento de grano, y días a emergencia de la panoja. La mayor asociación de variables con el rendimiento de grano se tuvo con el diámetro de tallo, altura de planta a la madurez, granos por metro cuadrado y el rendimiento por día, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja, por lo que pueden emplearse como criterios de selección indirecta del rendimiento.

### 1.7. LITERATURA CITADA

- Abayomi, Y. A., y D. Wright. 1999. Osmotic potential and temperature effects on germination of spring wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.). *Trop. Agric.* 76:114-119.
- Apaza, V., G. Cáceres, R. Estrada, y R. Pinedo. 2013. Catálogo de variedades comerciales de quinua en el Perú. INIA. pp: 15-82.
- Ayala, G., L. Ortega, y C. Morón. 2004. Valor nutritivo y usos de la quinua. *In*: A. Mujica, S. Jacobsen, J. Izquierdo, y J. P. Marathe (eds). *Quinoa: Ancestral Cultivo Andino, Alimento del Presente y Futuro*. Santiago, Chile. FAO. UNA. CIP. pp: 215-253.
- Bazile, D., S. Jacobsen, y A. Verniau. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Front. Plant Sci.* 7: 1-6. DOI:10.3389/fpls.2016.00622.
- Benlhabib, O., N. Boujartani, P. J. Maughan, S. E. Jacobsen, y E. N. Jellen. 2016. Elevated genetic diversity in an  $f_{2:6}$  population of quinoa (*Chenopodium quinoa*) developed through an inter-ecotype cross. *Front. Plant Sci.* 7: 1-9. DOI:10.3389/fpls.2016.01222.
- Bhargava, A., S. Shukla, y D. Ohri. 2006. Genetic variability and interrelationship among various morphological and quality traits in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Field Crops Res.* 101: 104–116. DOI: 10.1016/j.fcr.2006.10.001.
- Bonifacio, A., L. Gomez-Pando, y W. Rojas. 2015. Quinoa breeding and modern variety development. FAO & CIRAD. pp: 172-190.
- Chmielewski, F. M., y W. Kohn. 1999. Impact of weather on yield components of spring cereals over 30 years. *Agric. Forest. Meteorol.* 96: 49-58. DOI: 10.1016/s0168-1923(99)00047-7.
- Chura, E., A. Mujica, B. Haussmann, K. Smith, S. Flores y A. L. Flores. 2019. Agronomic characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) progeny from close and distant self-fertilized  $s_5$  simple crosses. *Cien. Inv. Agr.* 46:154-165. <http://dx.doi.org/10.7764/rcia.v46i2.2142>
- Curti, R. N., A. J. de la Vega, A. J. Andrade, S. J. Bramardi, y H. D. Bertero. 2016. Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in north west Argentina. *Field Crops Res.* 189: 10–18. DOI:10.1016/j.fcr.2016.01.014.
- De Santis, G., T. D'Ambrosio, M. Rinaldi, y A. Rascio. 2016. Heritabilities of morphological and quality traits and interrelationships with yield in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)

- genotypes in the Mediterranean environment. *J. Cereal Sci.* 70: 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.06.003>.
- Ehdaie, B., y J. G. Waines. 1989. Genetic variation, heritability and path-analysis in landraces of bread wheat from southwestern Iran. *Euphytica* 41:183-190. DOI:10.1007/BF00021584.
- Espitia R., E., M. G. Valverde R., L. F. Sesma H., P. Rivas V., y A. V. Ayala G. 2019. Caracterización de germoplasma de *Chenopodium* spp. en México *in*: Ministerio de agricultura, INDAP, Pontificia Universidad Católica de Chile y ODEPA (eds). VII Congreso mundial de quinua y otros granos andinos. Génesis impresiones Santiago-Chile. p. 19.
- Espitia R., E., S. Miranda C., y F. Castillo G. 1992. Variabilidad genética e interrelaciones del rendimiento y sus componentes en alegría (*Amaranthus* spp). *Agrociencia Ser. Fitociencia* 3: 83-98.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. La Quinoa: Cultivo Milenario para Contribuir a la Seguridad Alimentaria Mundial. Conferencia de la FAO para Proponer la Declaración del “Año Internacional de la Quinoa”. Bolivia. pp: 7-15.
- Fuentes, F. F., P. J. Maughan, y E. R. Pellen. 2009. Diversidad genética y recursos genéticos para el mejoramiento a quinoa (*Chenopodium quinua* Willd). *Rev. Geo. Valp.* 42: 20-33.
- García, M., D. Raes, y S. Jacobsen. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agric. Water Manage.* 60: 119-134. DOI: 10.1016/S0378-3774(02)00162-2.
- Garrido, M., P. Silva, H. Silva, R. Muñoz, C. Baginsky, y E. Acevedo. 2013. Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* willd.) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *IDESIA* 31: 69-76. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200010>.
- González, J. A., S. S. S. Eisa., S. A. S. Hussin, y F. E. Prado. 2015. Quinoa: an incan crop to face global changes in agriculture *in*: Kevin M., and J. Matanguihan (eds). Quinoa: Improvement and Sustainable Production. Canada. WILEY-Blackwell. pp: 1–18. DOI:10.1002/9781118628041.ch1.
- Howell, T. 2001: Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agron. J.* 93: 281-289. DOI:10.2134/agronj2001.932281x.
- Ligarreto, M., G A., y A. R. Ospina H. 2009. Analysis of heritable parameters associated to yield and precocity in Santa Isabel type climbing pea (*Pisum sativum* L.). *Agron. Colomb.* 27: 333-339.
- Madrid, D., E. Salgado, G. Verdugo, P. Olguín, D. Bilalis, y F. Fuentes. 2018. Morphological traits defining breeding criteria for coastal quinoa in Chile. *Not. Bot. Horti. Agrobo.* 46: 190-196. DOI:10.15835/nbha46110788.

- Mujica, A., J. Izquierdo, y J. Pierre M. 2001. Origen y descripción de la quinua *in*: Mujica, A., S. Jacobsen, J. Izquierdo y J. Pierre M. (eds). Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro, FAO, Santiago, Chile. pp: 1-8.
- Murphy, K. M, J. B. Matanguihan, F. F. Fuentes, L. R. Gómez-Pando, E. N. Jellen, P. J. Maughan, y D. E. Jarvis. 2019. Quinoa breeding and genomics. *Plant Breed.* 42: 25-320. DOI: 10.1002/9781119521358.
- Nowak, V., J. Du. y U. R. Charrondièrre. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chem.* 193: 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>.
- Rojas, W., M. Pinto, C. Alanoca, L. Gómez P., P. León-Lobos, A. Alercia, S. Diulgheroff, S. Padulosi, y D. Bazile. 2014. Estado de la conservación ex situ de los recursos genéticos de Quinoa *in*: Bazile, D. *et al.* (eds) Estado del Arte de la Quinoa en el Mundo en 2013. Capítulo N° 1.5. FAO (Santiago de Chile) y CIRAD, (Montpellier, Francia). pp: 65-93.
- Slafer, G. A., R. Savin, y V. O. Sandras. 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. 157: 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>.
- Valenzuela A., R. N., G. Mita T., F. E. Zapana Y., D. Quilla C, R. Miranda A., y U. J. Mita. C. 2015. Efecto de la germinación y cocción en las propiedades nutricionales de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *Rev. Investig. Altoandín.* 17: 169-172. DOI: 10.18271/ria.2015.109.
- Villaseñor M., H. E., E. Martínez C., R. Hortelano S. R., M. González G., A. Zamudio C., J. Huerta E., y E. Espitia R. 2017. Variabilidad genética y criterios de selección para calidad industrial de trigos introducidos en condiciones de secano. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4: 661-672. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.39>.
- Zurita-Silva, A., F. Fuentes, P. Zamora, S. E. Jacobsen, y A. R. Schwember. 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Mol. Breed.* 34: 13-30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023>.

## **CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE GERMOPLASMA DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* willd.) EN LOS VALLES ALTOS DEL CENTRO DE MÉXICO**

### **2.1.RESUMEN**

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo que crece en condiciones de estrés ambiental, tiene un alto valor nutritivo y un alto potencial agronómico. En México ya se comercializa y se cultiva a pequeña escala, sin embargo, no se cuenta con variedades, ni tecnología para su producción. Con el fin de sentar bases para la producción del cultivo en México se evaluaron 16 genotipos de diferentes orígenes y características, en seis ambientes que representan la variación ambiental de los Valles Altos del centro de México. Se encontraron diferencias significativas para genotipos; en la comparación de genotipos, los genotipos tardíos Suyana, Suma, Pata de venado, Blanca Ayacucho y Huauzontle tienen mayor rendimiento de grano (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7 y 2967.2 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). De los genotipos intermedios Tokio rosa y Pasankalla reventona mostraron mayor rendimiento de grano (2858.4 y 2118.4 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente). Mientras que en los genotipos precoces CP-forraje presentó mayor rendimiento de grano (3005.8 kg ha<sup>-1</sup>). En cuanto a diámetro de semilla solo Huauzontle y Quinoa negra presentaron un tamaño igual o menor a 1.8 mm, el resto de los genotipos puede ser comercializado graneado por su tamaño de semilla. De los ambientes evaluados los menos favorables fueron Nanacamilpa 2019 con y sin fungicida, mientras que Santa Lucía de Prías 2019 con y sin fungicida son los ambientes más favorables.

**Palabras clave:** *Chenopodium quinoa*, variedades, rendimientos, tamaño de grano, adaptación.

## CHAPTER 2. QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd.) GEROPLASM ASSESSMENT IN THE HIGH VALLEYS OF CENTRAL MEXICO

### 2.2.ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Is a crop that grows under conditions of environmental stress, has a high nutritional value and a high agronomic potential. In Mexico it is already commercialized and cultivated on a small scale, however, there are no varieties or technology for its production. In order to lay the foundations for the production of the crop in Mexico, 16 genotypes of different origins and characteristics were evaluated in six environments that represent the environmental variation of the High Valleys of central Mexico. Significant differences were found for genotypes; In the comparison of genotypes, the late genotypes Suyana, Suma, Pata de venado, Blanca Ayacucho and Huauzontle have higher grain yields (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7 and 2967.2 kg ha<sup>-1</sup>, respectively). Of the intermediate genotypes Tokio rosa and Pasankalla reventona showed higher grain yield (2858.4 and 2118.4 kg ha<sup>-1</sup> respectively). While in the early CP-forage genotypes it presented higher grain yield (3005.8 kg ha<sup>-1</sup>). Regarding seed diameter, only Huauzontle and Black Quinoa had a size equal to or less than 1.8 mm, the rest of the genotypes can be marketed grained by their seed size. Of the environments evaluated, the least favorable were Nanacamilpa 2019 with and without fungicide, while Santa Lucía de Prías 2019 with and without fungicide are the most favorable environments.

**Keywords:** *Chenopodium quinoa*, varieties, yields, grain size, adaptation.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

El cambio climático está afectando las condiciones para la producción agrícola (Hasegawa, 2013). La sequía y salinidad del suelo son uno de los mayores problemas (Zeglin *et al.*, 2013). Aunado al continuo incremento de la población los agricultores necesitan explorar nuevas alternativas para adaptarse a los cambios. La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es uno de los cultivos más antiguos de la región andina de Sudamérica domesticada hace más de 7000 años en su centro de origen (Perú y Bolivia). Es una especie anual, dicotiledónea, de la familia Amaranthaceae (Bazile *et al.*, 2016). La quinua tiene una gran variabilidad genética, se cultiva en condiciones de sequía severa, lo que refleja la adaptación a condiciones agroecológicas de estrés, tales como suelos marginales, baja fertilidad, temperatura baja, sequía, salinidad y ambientes ricos en radiación ultravioleta (Bosque *et al.*, 2000; Tapia, 1997). Se conocen aproximadamente 40 genotipos comerciales en los países andinos, las cuales tienen amplia variabilidad en el color de plantas, inflorescencia y semillas. Las plantas se caracterizan por tener un hábito de crecimiento ramificado hasta el segundo tercio, con alrededor de 1 a 2 metros altura, su ciclo vegetativo y maduración fisiológica es de 4 a 6 meses y se considera una especie preponderantemente autógama (Curti *et al.*, 2016; Mujica *et al.*, 2001; Zurita-Silva *et al.*, 2014) Esto hace posible seleccionar, adaptar y cultivar variedades para una amplia gama de condiciones ambientales (Jacobsen, 2003). La quinua es un cultivo en expansión, puede ser utilizado para alimentos humanos y en materias primas para animales debido a su alto valor nutritivo. Tiene un alto contenido de vitaminas, proteínas y minerales, y se reporta que provee todos los aminoácidos esenciales para los humanos (FAO, 2011; Rojas *et al.*, 2013). También se le atribuyen propiedades medicinales, como cicatrizantes, desinflamatorias, analgésicas y desinfectantes (Nowak *et al.*, 2016; Valenzuela *et*

*al.*, 2015). Otros aspectos de la quinua son las saponinas que se encuentran en la cáscara de la semilla y la falta de gluten. (Jacobsen *et al.*, 2005).

Se han desarrollado varios cultivares y algunas variedades se han introducido en América del Norte, Europa, China y el Medio Este (Jacobsen, 2017; Katwal y Bazile, 2020). Gómez y Aguilar (2016) reportan que donde se siembra la quinua (su centro de origen) el rendimiento va de 1200 a 3500 kg ha<sup>-1</sup> y DGPA (2021) reporta rendimientos de 740 a 3632 kg ha<sup>-1</sup>. En relación al potencial que tienen la quinua en países donde no se siembra, se reportan rendimientos de 200 hasta 2050 kg ha<sup>-1</sup> (Bazile *et al.*, 2016), mientras que Chura *et al.*, (2019) reportan 2836.55 a 5099.18 kg ha<sup>-1</sup>. La comercialización y el uso de la quinua depende el tamaño de la semilla, por lo que son relevantes las variables que expresan en tamaño y peso de la semilla; se reportan diámetro de semilla desde 1.2 a 2.5 mm y peso de mil semillas de 2.09 a 3.8 g (Chura *et al.* 2019; Zurita-Silva *et al.*, 2014).

En México ya se comercializa, pero, en general es un cultivo de pequeña escala y no se cuenta con variedades, ni tecnología para su producción (Espitia *et al.*, 2019). El objetivo del presente estudio fue determinar el comportamiento agronómico en 16 genotipos de quinua para ver su adaptabilidad en la región de los valles altos del centro de México.

#### **2.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se evaluaron 15 genotipos que fueron introducidos recientemente de Perú, Ecuador y Bolivia, y un Huauzontle (también conocido como la quinua mexicana). Estos materiales fueron seleccionados a partir de una evaluación de 100 colectas y fueron los que presentaron mejor comportamiento y adaptación a las condiciones de México (Cuadro 1).

**Cuadro 2.1 Genotipos de *Chenopodium* utilizadas en el estudio**

No.	Nombre	Color del fruto	Región ecológica de	
			Dulce - Amarga	Origen
1	Huauzontle	Amarillo	Amarga	Valles altos
2	Suma	Verde	Dulce	Altiplano
3	Tokio rosa	Verde	Amarga	Altiplano
4	Blanca Ayacucho	Verde	Blanco	Valles interandinos
5	Choclo	Verde	Dulce	Valles altoandinos
6	CP-forraje	Verde	Amarga	Valles interandinos
7	Pata de venado	Verde	Dulce	Valles interandinos
8	Suyana	Amarillo	Amarga	Valles interandinos
9	Misa amarilla	Amarillo	Amarga	Valles interandinos
10	Maranganí	Amarillo	Amarga	Valles interandinos
11	Roja ku	Rojo	Amarga	Altiplano
12	Rojita	Rojo	Blanca	Altiplano
13	Pasankalla lila	Gris	Dulce	Altiplano
V14	Quinoa negra	Gris	Dulce	Altiplano
15	Pasankalla reventona	Gris	Dulce	Altiplano
16	Pasankalla plomo	Gris	Dulce	Altiplano

**Ambientes de evaluación**

Los genotipos se evaluaron en: Nanacamilpa 2018 con fecha de siembra del 25 de julio, en Nanacamilpa 2019 el 18 de junio y en Santa Lucía de práas el 28 de junio (cuadro 2). En las tres

localidades se sembró el experimento con y sin fungicida para simular ambientes con diferente severidad de mildiu (*Peronospora variabilis*), sin el propósito de evaluar su efecto.

**Cuadro 2.2 Tipo de suelo y precipitación de los seis ambientes de evaluación. P-V 2018-2019.**

<b>Localidad</b>	<b>msnm</b>	<b>Fungicida</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b>Precipitación en el ciclo (mm)</b>
Nanacamilpa, Tlax. 2018	2829	Con	Franco-Arenoso	299.6
		Sin		
Nanacamilpa, Tlax. 2019	2829	Con	Franco-Arenoso	364.05
		Sin		
Santa Lucía de Prías, 2019	2250	Con	Franco-Arenoso	263.6
		Sin		

### **Diseño experimental y manejo del cultivo**

En cada experimento los genotipos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones; la parcela experimental consistió en tres surcos a 0.8 m de separación y 5 m de largo. El cultivo se condujo en condiciones de secano (temporal), sin fertilización, ni control de plagas; en todos los experimentos se aplicaron dos deshierbes manuales 25 y 45 días después de la siembra (dds). En los ambientes con fungicida, antes de la siembra se aplicó Carboxin y Captan (producto comercial: Vitavax 300) 1g kg<sup>-1</sup> de semilla; además, a los 30 y 50 días de emergida la planta se aplicó Metalaxil (producto comercial: Ridomil Gold) 1 l ha<sup>-1</sup> y Mancozeb (producto comercial: Manzate) 1.5 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

## **Variables estudiadas**

Se registraron las siguientes variables: días a emergencia de la panoja (EPA), días a madurez (MAD) y periodo de llenado de grano (PLLG = (Floración-EPA, días), las dos primeras cuando el 50% de las plantas de cada parcela presentaron el primordio de la inflorescencia o la madurez fisiológica del grano, respectivamente. En 10 plantas representativas por parcela, en la floración se midió el diámetro de tallo (DIT, cm); a la madurez del grano se registró la altura de planta a la madurez (ALM, cm). El rendimiento biológico (RB) se obtuvo de una muestra representativa de la biomasa aérea (500 g), la cual se secó a 60°C hasta llegar a un peso constante y se extrapolo a 3 m<sup>2</sup> de la parcela útil. El diámetro de semilla (DIS, cm), se obtuvo de 10 grupos de 10 semillas de cada parcela, con un vernier digital (Stainless Hardened); el peso hectolítrico (PEH, kg/hl) se determinó mediante el peso de un volumen conocido de semilla y se extrapolo al peso de 100 litros; el peso de mil granos (PMG, g) se basó en el peso de cinco grupos de 100 granos de cada parcela y el rendimiento de grano (rendimiento económico, RE) (KGH, kg ha<sup>-1</sup>) se determinó en 3 m del surco central, y se extrapolo a una hectárea. El índice de cosecha (IC) se estimó mediante la relación del rendimiento económico y el rendimiento biológico.

## **Análisis de datos**

Los datos se analizaron mediante GLM del SAS (SAS 9.4 2012). Se realizó un análisis de varianza para ambientes y genotipos, se realizaron pruebas de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para la comparación de medias entre genotipos y ambientes.

## **2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En ambientes al igual que en genotipos se encontraron diferencias significativas en todas las variables (cuadro 3). Para la interacción genotipo x ambiente, se obtuvieron diferencias significativas para la mayoría las variables excepto para diámetro de tallo y diámetro de semilla. Lo que indica una respuesta diferencial de los genotipos y los ambientes evaluados; así como una variación en la respuesta de los genotipos al cambiar de ambiente. Thiam *et al.*, (2018) reporta significancia en diámetro de tallo contrario a lo encontrado en este estudio y concuerda que las variables de altura de planta, rendimiento, peso de mil granos, índice de cosecha y diámetro de semilla las cuales son significativas; lo que coincide también con lo reportado por Tan y Temel (2018), los cuales encontraron que en ambientes, genotipos e interacción genotipo por ambiente hay diferencia altamente significativa en rendimiento, peso de mil granos, días a madurez, índice de cosecha y altura de la planta. En la comparación de medias por ambiente (cuadro 4).

En las variables fenológicas los ambientes Nanacamilpa 2019 con y sin se obtuvo mayor emergencia de panoja y días a madurez, mientras que Nanacamilpa 2018 con y sin se presentó menor emergencia de panoja, días a madurez y llenado de grano. En Santa Lucía de Prías con y sin se tuvo mayor periodo de llenado de grano. En Perú la quinua madura hasta en más 190 días, con mayor periodo de llenado de grano (Gómez y Aguilar, 2016), debido a que ahí crece a 3900 msnm, mientras que en México se sembró a 2250 y 2829 msnm. Präger *et al.*, (2018) menciona que el periodo de crecimiento varía entre 122 y 154 días lo que concuerda con lo mencionado en este estudio. En las variables de tamaño en Santa Lucía de Prías con y sin se presentaron mayor altura de planta a madurez y diámetro de tallo, mientras que, en Nanacamilpa 2019 con y sin se obtuvieron los valores más bajos en las estas variables. Chura *et al.*, (2019) reporta valores de 9.70 a 14.49 mm de diámetro de tallo, lo que coincide con lo reportado en este estudio. González *et al.*, (2011) reportan de 61.4 a 98.6 cm de altura de la planta a la madurez lo que difiere con lo reportado

en el presente estudio. En las variables de semilla, en Nanacamilpa 2018 con y sin se tuvo mayor peso de mil granos y diámetro de semilla, sin embargo, se obtuvo el menor peso hectolítrico. Nanacamilpa 2019 sin y Santa Lucía de Prías sin reportan mayor peso hectolítrico. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Altuner *et al.*, (2019). En los ambientes de Santa Lucía de Prías con y sin se obtuvieron los valores más bajos para peso de mil granos y diámetro de semilla. Chura *et al.*, (2019) reporta diámetro de semilla y peso de mil granos que coincide con los reportados en este estudio. Todos los ambientes de Nanacamilpa tuvieron mayor índice de cosecha, seguidos de los ambientes de Santa Lucía de Prías, estos valores son mayores a lo reportado por Tan y Temel (2017). En los ambientes de Santa Lucía de Prías con y sin se tuvo mayor rendimiento, estos resultados concuerdan con lo reportado por Chura *et al.*, (2019). Mientras que, en Nanacamilpa 2019 con y sin se tuvieron los rendimientos más bajos, lo que concuerda con lo mencionado por González (2011) y Tan y Temel (2017).

**Cuadro 2.3 Cuadrados medios para las variables estudiadas de 16 genotipos de quinua, en seis ambientes de secano en la Mesa Central. P-V 2018-2019.**

Fuente	Ambiente	REP(AMB)	Genotipos	GEN*AMB	Error
<u>GI</u>	5	12	15	75	180
Emergencia de panoja (días)	15733.40**	68.50	14712.43**	1074.48**	3.92
Días a madurez	7564.78**	4.87	1541.75**	48.42**	3.32
Llenado de grano (días)	1916.78**	6.45	1207.45**	50.55**	10.12
Diámetro de tallo (cm)	276.72**	3.07	14.84**	2.51ns	2.17
Altura de planta (cm)	37193.56**	345.66	8238.28**	255.50**	147.83
Diámetro de semilla (mm)	0.396**	0.033	0.318**	0.03ns	0.035
Peso hectolítrico (c)	91.25**	4.80	51.33**	5.37**	2.93
Índice de cosecha	0.395**	0.005	0.021**	0.006ns	0.006
Peso de mil granos (g)	2.51**	0.06	2.46**	0.09**	0.05
Rendimiento de grano kg ha <sup>-1</sup> )	27468465**	811814	8253981**	867282**	330269

\*\* , NS diferencias significativas y no significativas.

**Cuadro 2.4 Comparación de medias de 10 variables evaluadas en seis ambientes de secano en la Mesa Central. P-V 2018-2019.**

Variable /Ambiente	Nanacamilpa 2018 CON	Nanacamilpa 2018 SIN	Nanacamilpa 2019 CON	Nanacamilpa 2019 SIN	Santa Lucía de Prías 2019 CON	Santa Lucía de Prías 2019 SIN
Emergencia de panoja (días)	44.83c	43.39c	61.60a	61.56a	49.56b	48.25b
Días a madurez	120.97c	119.18d	147.58a	147.21a	139.33b	139.14b
Llenado de grano (días)	65.56c	65.25c	74.18b	73.79b	78.66a	80.08a
Diámetro de tallo (cm)	11.71b	12.88b	9.26c	8.97c	14.32a	14.43a
Altura de planta (cm)	145.34b	151.76b	123.40c	116.61c	184.35a	179.10a
Diámetro de semilla (mm)	2.14ab	2.16a	2.03bc	2.04bc	1.95c	1.95c
Peso hectolítrico (kg l <sup>-1</sup> )	66.41c	66.21c	67.51bc	69.88a	68.17b	68.51ab
Índice de cosecha	0.38a	0.365a	0.401a	0.405a	0.223b	0.209b
Peso de mil granos (g)	3.11a	3.04a	2.79b	2.77bc	2.54d	2.61cd
Rendimiento de grano kg ha <sup>-1</sup> )	2576.4b	2910.8ab	1930.5c	1538.8c	3231.5a	3489.9a

Ambientes con la misma letra en hileras son estadísticamente iguales.

En la comparación de medias por genotipo (Cuadro 5), en las variables fenológicas, los genotipos Suma, Blanca, Ayacucho, Suyana, Huauzontle, Pata de venado, Rojita, Roja ku presentan un periodo de crecimiento más tardío que va de 140 a 149 días. Los materiales más precoces son CP-forraje, Choclo, Maranganí y Misa amarilla (116, 124 y 125 días, respectivamente). El resto de los genotipos tienen un periodo intermedio de crecimiento que va de los 129 a los 139 días. Los genotipos precoces mostraron el menor periodo de llenado de grano 61 a 64 días, excepto Huauzontle que es un genotipo tardío y tiene un periodo de llenado de grano de 60 días, el resto de los genotipos tardíos fueron de 72 a 83 días al igual que los genotipos intermedios. Huauzontle y Suma presentaron mayor emergencia de panoja (71 y 62 días, respectivamente) y los demás ejemplares tardíos mostraron de 46 a 57 días. Choclo tienen menores días de emergencia (41 días), mientras que los demás genotipos precoces tuvieron 50 y 53 días. La emergencia de panoja de los genotipos intermedios fue de 45 a 49 días. Mujica (1983) realizó un estudio en México en el cual evaluó 36 variedades de quinoa las cuales tienen de 148 a 203 días a madurez. En su centro de origen la quinoa tiene un periodo de crecimiento entre 90 a 210 días

(Gómez y Aguilar, 2016; Zurita-Silva *et al.*, 2014). En las variables de tamaño, los genotipos precoces tienen un diámetro de tallo que va de 11.2 a 12.3mm, mientras que los genotipos tardíos fueron de 11.3 a 13.7 y los genotipos intermedios presentaron un diámetro de tallo que va de 10.7 a 12.7. Los valores encontrados en este estudio concuerdan con los encontrados por Chura *et al.*, (2019). Pata de venado, Rojita y Roja ku son los genotipos tardíos con menor altura a la madurez (142, 149 y 150 cm). Seguidos de Huauzontle, Suyana y Blanca Ayacucho (160, 173 y 175 cm), mientras que Suma es el genotipo con más altura, 206 cm a la madurez. Choclo es el genotipo precoz con menos altura (117 cm), mientras que los demás genotipos precoces mostraron de 138 a 152 cm. Los genotipos intermedios, Quinoa negra, Pasankalla plomo y Pasankalla reventona exhibieron una altura de 131cm, mientras que Pasankalla lila y Tokio rosa tuvieron una altura de 140 y 160 cm respectivamente. En su centro de origen la quinua va de 70 a 200 cm de altura (DGPA, 2021; Mujica *et al.*, 2001), en México se han realizado estudios donde la quinua tiene una altura de 110 a 280 cm (Mujica 1983). En las variables de semilla, todos los genotipos van de 2.0 a 2.2 mm de diámetro de semilla, excepto Huauzontle, Pata de venado (tardíos) y Quinoa negra (precoz), que tienen 1.7, 1.9 y 1.8 mm respectivamente. El tamaño de semilla es una de las variables más importantes ya que la quinua se comercializa de acuerdo a su tamaño de grano, los granos mayores a 1.8 mm de diámetro son los que se comercializan para graneado (INDECOPI, 2014) que es la forma más importante en la que se comercializa la quinua a nivel mundial. Los genotipos tardíos tuvieron un peso mil granos de 2.5 a 2.9 g, excepto Huauzontle (1.9 g), mientras que los materiales precoces exhibieron un peso de 2.8 a 3.0 g. Los genotipos intermedios tuvieron el mayor peso de mil granos que fue de 2.9 a 3.3, excepto Quinoa negra la cual tuvo un peso de 2.3 g. Todos los genotipos tienen un peso hectolítrico de 64.9 a 69, excepto Huauzontle (tardío) y Quinoa negra (intermedio) que reportan mayor peso hectolítrico. Los resultados de este estudio

concuerdan con lo reportado por Altuner *et al.*, (2019). Chura *et al.*, (2019) reportan diámetro de semilla y peso de mil granos que coincide con los reportados en este estudio. 10 de los 16 genotipos tienen un índice de cosecha de 0.3, mientras que Huauzontle, Roja ku (tardíos), Quinoa negra, Pasankalla plomo (intermedios), CP-forraje y Choclo (precoces) tienen mayor índice de cosecha. Tan y Temel (2018) reportan que los materiales más precoces y de alto rendimiento tienen más alto índice de cosecha lo que difiere con lo encontrado en este estudio. En los genotipos tardíos Suyana, Suma, Pata de venado, Blanca Ayacucho y Huauzontle mostraron mayor rendimiento de grano (4004.9, 3888.3, 3091.1, 2999.7 y 2967.2 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), mientras que Rojita y Roja ku tuvieron un rendimiento de 1930.9 y 2498.2 kg ha<sup>-1</sup>. Suyana y Suma se derivaron ecotipos que en su lugar de origen son tardíos, para los que se reportan rendimientos de 3500 y 2000 kg ha<sup>-1</sup>, menores a los reportados en este estudio. (Gómez y Aguilar, 2016). De los genotipos intermedios Tokio rosa tuvo mayor rendimiento de grano (2858.4 kg ha<sup>-1</sup>), mientras que el resto de genotipos rindieron de 1960.2 a 2118.4 kg ha<sup>-1</sup>. En los genotipos precoces CP-forraje tuvo mayor rendimiento de grano 3005.8 kg ha<sup>-1</sup>. El resto de los genotipos precoces fue de 1964.7 a 2381.9 kg ha<sup>-1</sup>. El rendimiento reportado en este estudio es mayor a los reportados en la región andina de Sudamérica que oscilan entre 1000 a 2000 kg ha<sup>-1</sup> (DGPA, 2021) y menores a lo reportado en Chura *et al.*, (2019) (2836.55 a 5099.28 kg ha<sup>-1</sup>). Los genotipos Suyana y Suma del grupo de los tardíos, Tokio rosa intermedio y CP-forraje del grupo precoz pueden constituir un patrón varietal para siembras comerciales de quinua de grano blanco en México. Los genotipos Pasankalla reventona y Quinoa negra son una buena alternativa para la producción de quinua de color y el genotipo Choclo es una opción para zonas de estación corta de crecimiento o como fuente de precocidad para un programa de mejoramiento.

**Cuadro 2.5 Comparación de medias de 16 genotipos de quinua evaluados en seis ambientes de secano en la Mesa Central. P-V 2018-2019.**

Variables/ Genotipo	EPA	MAD	LLG	DIT	ALM	DIS	PEH	IC	PMG	REN
<b>Tardíos</b>										
Suma	62b	149a	73bcd	13.7a	206a	2.1ac	66.7cde	0.3d	2.7cd	3888.3a
Blanca Ayacucho	50def	146ab	83a	13.0abc	175b	2.0cd	67.5cde	0.3cd	2.8cd	2999.7acd
Suyana	57c	143abc	72cd	13.5ab	173b	2.1ac	67.4cde	0.3acd	2.9ac	4004.9a
Huauzontle	71a	142abcd	60e	12.0abcde	160bc	1.7e	71.8a	0.4ac	1.9g	2967.2acd
Pata de venado	49efg	142abcd	81ab	11.0de	150cde	1.9cde	68.9c	0.3acd	2.5c	3091.1ac
Rojita	53cd	141bcd	76abc	11.1cde	149cdef	2.1ac	67.7cde	0.3c	2.6cd	1930.9d
Roja ku	46fgh	140bcd	83a	11.3cde	142cdef	2.0ac	67.8cd	0.4acd	2.7df	2498.2cd
<b>Intermedios</b>										
Tokio rosa	49efgh	139bcd	80ab	12.7abcd	160bc	2.2a	69.0c	0.3acd	2.9acd	2858.4cd
Pasankalla lila	48efgh	135cde	76abc	10.7e	140def	2.2ac	67.4cde	0.3acd	2.9a	1960.2d
Quinua negra	45hil	135de	80abc	11.1de	131efg	1.8de	69.9a	0.4acd	2.3a	2087.6cd
Pasankalla plomo	46gh	130ef	74bc	11.6cde	131fg	2.1ac	66.5cde	0.4acd	3.3a	2084.9cd
Pasankalla reventona	46gh	129ef	73bc	11.7bcde	131efg	2.1ac	67.0cde	0.3acd	3.3a	2118.4cd
<b>Precoces</b>										
CP-forraje	53ced	125f	63e	12.1abcde	152cd	2.2a	68.3c	0.4a	3.0a	3005.8acd
Misa amarilla	50defg	125f	62e	12.0abcde	138def	2.2a	64.9e	0.3acd	3.0a	1965.8d
Marangani	53de	124fg	61e	12.3abcde	149cdef	2.2a	68.5c	0.3acd	3.0acd	2381.9cd
Choclo	41i	116g	64de	11.2cde	117g	2.0acd	65.2de	0.4a	2.8cd	1964.7d

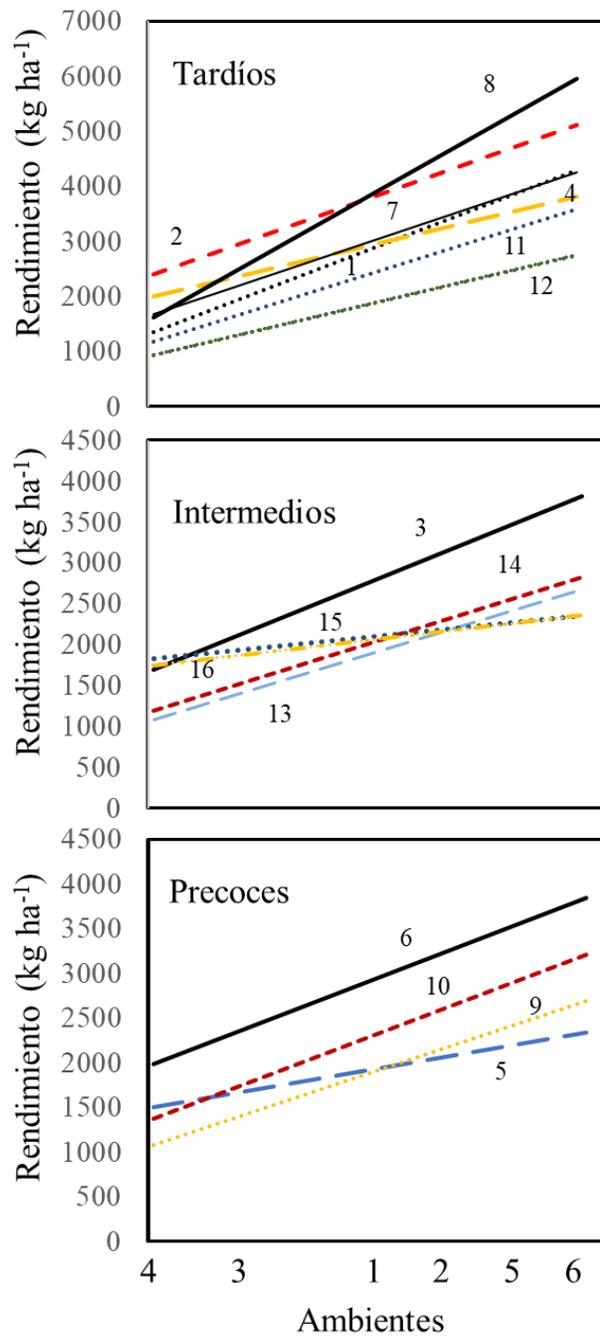
EPA: Emergencia de panoja, MAD: Días a madurez, LLG: Llenado de grano, DIT: Diámetro de tallo, ALM: Altura de planta, DIS: Diámetro de semilla, PHE: Peso hectolítrico, IC: Índice de cosecha, PMC: Panojas por metro cuadrado, PMG: Peso de mil granos y REN: Rendimiento de grano. Genotipos con la misma letra en columnas son estadísticamente iguales.

Los ambientes menos favorables fueron: Nana 3 y Nana 4; Nana 1 y Nana 2 son ambientes intermedios, mientras que SL1y SL2 son los ambientes más favorables. En los tres grupos se presentaron cambios de magnitud y de orden, esto indica que los genotipos cambian su comportamiento al cambiar de ambiente, es decir hay interacción (Figura 1). Esto coincide con lo reportado anteriormente (Tan y Temel, 2018; Ali *et al.*, 2018) quienes mencionan que los genotipos de quinua interaccionan con el ambiente.

En los genotipos tardíos (Figura 1). Suyana tiene el mejor rendimiento en los ambientes favorables, seguido de Suma, que es el genotipo que tiene el mayor rendimiento en los ambientes menos favorables, seguido de Pata de Venado. En todos los ambientes, los genotipos: Blanca

Ayacucho, Pata de venado y Huauzontle tiene rendimiento intermedio, mientras que Roja ku y Rojita tienen el menor rendimiento. Resulta normal que dentro de este grupo estén los genotipos con más rendimiento pues su ciclo largo y porte de planta permiten mayor producción de fotoasimilados y por ende mayor cantidad de grano (Curti *et al.*, 2016). Los genotipos de este grupo son de origen interandino, ambiente muy parecido a las condiciones de esta investigación (Gómez y Aguilar, 2016), lo que podría influir también en el buen comportamiento de los mismos. En este grupo también se incluyó el Huauzontle el cual presentó un rendimiento comparable a las mejores quinuas, esto le da un potencial de utilizarse en la producción de grano, además de su uso como verdura.

En los genotipos intermedios (Figura 2.1). Tokio rosa tiene el mejor rendimiento en los ambientes favorables, seguido de Quinoa negra y Pasankalla lila, mientras que Pasankalla plomo y Pasankalla reventona tienen el menor rendimiento. En los ambientes intermedios Tokio rosa presenta mayor rendimiento por encima de los demás genotipos. Pasankalla reventona es el genotipo que tiene el mayor rendimiento en los ambientes menos favorables, seguido de Pasankalla plomo, Tokio rosa y Quinoa negra, mientras que Pasankalla lila tienen el menor rendimiento en estas condiciones.



**Figura 2.1. Interacción genotipo\*ambiente para rendimiento de 11 genotipos agrupados por ciclo Tardíos (1 Huauzontle, 2 Suma, 4 Blanca Ayacucho, 7 Pata de venado, 8 Suyana, 11 Roja ku y 12 Rojita), Intermedios (3 Tokio rosa, 13 Pasankalla lila, 14 Quinua negra, 15 Pasankalla reventona y 16 Pasankalla plomo) y Precoces (5 Choclo, 6 C.P. forraje, 9 Maranganí y 10 Misa amarilla), evaluados en seis ambientes (1 Nanacamilpa 2018 CON, 2 Nanacamilpa 2108 SIN, 3 Nanacamilpa 2019 CON, 4 Nanacamilpa 2019 SIN, 5 Santa Lucía de Prías 2019 CON y 6 Santa Lucía de Prías 2019 SIN).**

En los genotipos precoces (Figura 2.1). CP-forraje tiene el mejor rendimiento en los ambientes favorables y en los ambientes intermedios, seguida de Maranganí, Misa amarilla y Choclo. En los ambientes menos favorables CP-forraje tiene el mejor rendimiento, seguida de lo genotipo Choclo, Maranganí y Misa amarilla, respectivamente.

Con los datos encontrados se puede establecer que seleccionando los genotipos adecuados se pueden tener buenos rendimientos en diferentes ambientes.

Los genotipos Suyana, Suma, Tokio rosa y C. P. forraje por su manera de interactuar con el ambiente, además de su alto rendimiento en su respectivo grupo de madurez y tamaños de semilla, son una buena opción para producir quinua en los ambientes evaluados.

## **2.6.CONCLUSIONES**

Los ambientes Santa Lucía de Prías, Estado de México con y sin aplicación de fungicida fueron favorables, Nanacamilpa, Tlax. 2018 con y sin fungicida fueron los menos favorables.

Dentro del grupo tardío Suyana y Suma fueron los genotipos que presentaron mayor rendimiento de grano. En el grupo intermedio los mejores genotipos fueron Tokio rosa y Pasankalla reventona, mientras que en el grupo de precoces C.P. forraje.

Los genotipos C.P. forraje, Misa amarilla, Maranganí, Tokio rosa y Pasankalla lila fueron los que presentaron mayor diámetro y peso de semilla.

Por su rendimiento, tamaños de semilla y los genotipos, Suyana, Suma, Tokio rosa y C.P. forraje pueden conformar un patrón varietal para la producción de grano blanco. Mientras que, Pasankalla reventona y quinua negra son buena opción para la producción de quinua de colores. El genotipo Choclo por su precocidad es una buena alternativa para zonas de estación de crecimiento corta.

## 2.7.LITERATURA CITADA

- Ali M., A. Elsadek y E. M. Salem. 2018. Stability Parameters and AMMI Analysis of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Egypt. J. Agron.* 40: 59 -74.
- Altuner, F., E. Oral y H. Kulaz. 2019. The Impact of Different Sowing-Times of The Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and its varieties on the yield and yield components in Turkey-Mardin ecology condition. *J. of App. Ecol. is J Appl Ecol.* 17:10105-10117. DOI: [http://dx.doi.org/10.15666/aer/1704\\_1010510117](http://dx.doi.org/10.15666/aer/1704_1010510117).
- Bazile, D., S. Jacobsen, y A. Verniau. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Front. Plant Sci.* 7: 1-6. DOI:10.3389/fpls.2016.00622.
- Bosques S., H., R. Lemeur, y P. Van D. 2000. Análisis ecofisiológico del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones de estrés de la sequía y la salinidad. *Tropicultura.*18: 198-202.
- Chura, E., A. Mujica, B. Haussmann, K. Smith, S. Flores y A. L. Flores. 2019. Agronomic characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa* Wild.) progeny from close and distant self-fertilized simple crosses. *Cien. Inv. Agr.* 46:154-165. DOI 10.7764/rcia.v46i2.2142.
- Curti, R. N., A. J. de la Vega, A. J. Andrade, S. J. Bramardi, y H. D. Bertero. 2016. Adaptive responses of quinoa to diverse agro-ecological environments along an altitudinal gradient in north west Argentina. *Field Crops Res.* 189: 10–18. DOI:10.1016/j.fcr.2016.01.014.
- DGPA (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego Viceministerio de Políticas y Supervisión del Desarrollo Agrario Dirección General De Políticas Agrarias). 2021. Observatorio de las Siembras y Perspectivas de la Producción Quinoa. Perú. pp. 17-37.
- Espitia R., E., M. G. Valverde R., L. F. Sesma H., P. Rivas V., y A. V. Ayala G. 2019. Caracterización de germoplasma de *Chenopodium* spp. en México *in:* Ministerio de agricultura, INDAP, Pontificia Universidad Católica de Chile y ODEPA (eds). VII Congreso mundial de quinua y otros granos andinos. Génesis impresiones Santiago-Chile. p. 19.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2011. La Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Conferencia de la FAO para Proponer la Declaración del “Año Internacional de la Quinoa”. Bolivia. pp: 7-15.
- Gómez P., L. y E., Aguilar C. 2016. Guía de Cultivo de la Quinoa. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. pp 31-33.
- Gonzalez, J. A., Y. Konishi, M. Bruno, M. Valoy y F. E. Prado. 2011. Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten quinoa (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions. *J Sci Food Agric.* 92: 1222–1229 Pp. DOI 10.1002/jsfa.4686.

- Hasegawa, P. M. 2013. Sodium (Na<sup>+</sup>) homeostasis and salt tolerance of plants. *Environ Exp. Bot.* 92:19–31. doi:10.1016/j.envexpbot.2013.03.001.
- INDECOPI. 2014. Compendio de normas técnicas peruanas: Quinoa y Cañihua. NTP 205.062.2014. 1- 25 pp.
- Jacobsen, S. E. 2017. El alcance de la adaptación de la quinoa en el norte de Tudes de Europa. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203: 603–613.
- Jacobsen, S. 2003. The Worldwide Potential for Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Res. Int.* 19: 167–177.
- Jacobsen, S. E, C. Monteros, J.L. Christiansen, L.A. Bravo, L.J. Corcuera, A. Mujica. 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *Eur. J. Agron.* 22:131-139.
- Katwal, T. B., D. Bazile. 2020. First adaptation of quinoa in the Bhutanese mountain agriculture systems. *Plos One*, 15:18 p. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0219804>
- Mujica S., A. M. H. 1983 SELECCIÓN DE VARIEDADES DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* Willd.) EN CHAPINGO, MÉXICO. Colegio de Postgraduados. Pp 110
- Mujica, A., J. Izquierdo, y J. Pierre M. 2001. Origen y descripción de la quinoa *in*: Mujica, A., S. Jacobsen, J. Izquierdo y J. Pierre M. (eds.). Ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. FAO, Santiago, Chile. pp: 1-8. Nowak, V., J. Du, & U. R. Charrondière. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa
- Nowak, V., J. Du, y U. R. Charrondière. 2016. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Chem.* 193: 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.02.111>.
- Präger, A., S. Munz, P. M. Nkebiwe, B. Mast y S. Graeff-Hönninger. 2018. Yield and quality characteristics of different quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars grown under field conditions in Southwestern Germany. *Agronomy.* 8: 197 p. DOI:10.3390/agronomy8100197.
- Rojas, W., M. Pinto, C. Alanoca, L. Gómez P., P. León-Lobos, A. Alercia, S. Diulgheroff, S. Padulosi, y D. Bazile. 2014. Estado de la conservación ex situ de los recursos genéticos de Quinoa *in*: Bazile, D. *et al.* (eds.) Estado del Arte de la Quinoa en el Mundo en 2013. Capítulo N° 1.5. FAO (Santiago de Chile) y CIRAD, (Montpellier, Francia). pp: 65-93.
- Tan, M. y S. Temel. 2017. Studies on the adaptation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to eastern Anatolia Region of Turkey. *AGROFOR Int. J.* 2: 33-39 Pp.
- Tan, M. y S. Temel. 2018. Performance of some quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) genotypes grown in different climate conditions. *Turk J. Field Crops.* 23:180-186. DOI: 10.17557/tjfc.485617.

- Tan, M. y S. Temel. 2018. Performance of some quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) genotypes grown in different climate conditions. *Turk J Field Crops*, 23(2), 180-186 DOI: 10.17557/tjfc.485617.
- Tapia, M. 1997. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. Santiago, Chile: FAO-RLAC.
- Thiam, E., A. Allaoui y O. Benlhabib. 2021. Quinoa productivity and stability evaluation through varietal and environmental interaction. *Plants*. 10. 714 p. <https://doi.org/10.3390/plants10040714>.
- Valenzuela A., R. N., G. Mita T., F. E. Zapana Y., D. Quilla C, R. Miranda A., y U. J. Mita. C. 2015. Efecto de la germinación y cocción en las propiedades nutricionales de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinua* Willd). *Rev. Investig. Altoandin*. 17: 169-172. DOI: 10.18271/ria.2015.109.
- Zeglin, L. H., P. Bottomley, A. Jumpponen, C. W. Rice, M. Arango, A. Lindsley, A. McGowan, P. Mfombep, D. D. Myrold. 2013. Altered precipitation regime affects the function and composition of soil microbial communities on multiple time scales. *Ecology*.94: 2334-2345. DOI: 10.1890/12-2018.1.
- Zurita-Silva, A., F. Fuentes, P. Zamora, S. E. Jacobsen, y A. R. Schwember. 2014. Breeding quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): potential and perspectives. *Mol. Breed*. 34: 13-30. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0023>.

## CONCLUSIONES GENERALES

Los ambientes Santa Lucía de Prías, Estado de México con y sin aplicación de fungicida fueron favorables, Nanacamilpa, Tlax. 2018 con y sin fungicida fueron los menos favorables. Dentro del grupo tardío Suyana y Suma fueron los genotipos que presentaron mayor rendimiento de grano. En el grupo intermedio los mejores genotipos fueron Tokio rosa y Pasankalla reventona, mientras que en el grupo de precoces C.P. forraje. Por su rendimiento, tamaños de semilla y los genotipos, Suyana, Suma, Tokio rosa y C.P. forraje pueden conformar un patrón varietal para la producción de grano blanco. Mientras que, Pasankalla reventona y quinua negra son buena opción para la producción de quinua de colores. El genotipo Choclo por su precocidad es una buena alternativa para zonas de estación de crecimiento corta.

La variación debida a ambientes fue la de mayor relevancia para 10 de las 15 variables estudiadas, resaltando la altura de planta a la floración y el diámetro de tallo (84 y 65 %), respectivamente; mientras que la debida a genotipos, fue para el peso de mil granos y periodo de llenado de grano (53 y 50 %), respectivamente. En todas las variables, la variación debida a la interacción genotipo por ambiente fue menor al 20 %. Se presentó alta variabilidad genética aditiva para granos por metro cuadrado y rendimiento de grano y las heredabilidades y respuestas a la selección más altas fueron para peso de mil granos, periodo de llenado de grano, emergencia de panoja, granos por metro cuadrado, rendimiento de grano, y días a emergencia de la panoja. La mayor asociación de variables con el rendimiento de grano se tuvo con el diámetro de tallo, altura de planta a la madurez, granos por metro cuadrado y el rendimiento por día, periodo de llenado de grano y emergencia de panoja, por lo que pueden emplearse como criterios de selección indirecta del rendimiento.