

# Efecto de las bajas temperaturas en la selección por tolerancia para progenies híbridas de papa (*Solanum sp.*) con introgresión de *Solanum commersonii.*, en la Comunidad de Occopata, Cusco

## Effect of low temperatures on the selection by tolerance for hybrid progenies of potato (*Solanum sp.*) with introgression of *Solanum commersonii.*, in the community of Occopata, Cusco

Evelin Zarate Aller<sup>1</sup>, Luis Justino Lizárraga Valencia<sup>2</sup>, Christian Gamarra Cornejo<sup>3</sup>, Alfonso Hernán Del Río<sup>4</sup> y Raymundo O. Gutiérrez-Rosales<sup>5\*</sup>

### Resumen

La tolerancia a las heladas representa un factor de importancia en las comunidades rurales alto andinas, donde las papas nativas es su principal fuente de alimentación, y muchas de las cuales tiene adaptación a las bajas temperaturas, así como también, las especies de papas silvestres, que pueden conferir una mayor adaptación a las heladas. El objeto de investigación fue seleccionar las progenies con introgresión de *Solanum commersonii.*, que presenten tolerancia a heladas, y tengan buenas características agronómicas, bajo las condiciones de la comunidad de Occopata, distrito de Santiago, Cusco. La metodología consistió en evaluar las progenies en estudio durante tres campañas agrícolas, en una zona que presenta heladas frecuentemente. Se evaluaron: el grado de daño afectado por heladas, el nivel de recuperación y el rendimiento al final del periodo vegetativo. De los resultados obtenidos en la primera campaña agrícola, la progenie “Superior Haploid + cmm fus”, fue la más afectada por heladas, alcanzando un grado de daño del 75% de daño en el follaje, en tanto para la segunda campaña, se determinó que la progenie “Puno III gen (Puno cold breed)”, alcanzó un grado de daño en el 50% de hojas afectadas. Las progenies “cb adg 21 x cmm fus” y “cb adg 13 x cmm fus”, tuvieron el mejor nivel de potencial de recuperación y crecimiento medio. En tanto, el rendimiento fue mayor en la progenie “cb adg 21 x cmm fus”, con un promedio de 22 t/ha, para la tercera campaña.

**Palabras clave:** papa; tolerancia a heladas; papas nativas; papas silvestres, diversidad genética.

### Abstract

Frost tolerance represents an important factor in rural high Andean communities, where native potatoes are their main source of food, and many of which are adapted to low temperatures, as well as wild potato species, that can confer greater adaptation to frost. The object of investigation was to select the progenies with introgression of *Solanum commersonii.*, that present tolerance to frost, and have good agronomic characteristics, under the conditions of the community of Occopata, district of Santiago, Cusco. The methodology consisted of evaluating the progenies under study during three agricultural campaigns, in an area that frequently presents frosts. The degree of damage affected by frost, the level of recovery and the yield at the end of the vegetative period were evaluated. From the results obtained in the first agricultural campaign, the progeny “Superior Haploid + cmm fus” was the most affected by frost, reaching a degree of damage of 75% of damage to the foliage, while for the second campaign, it was determined that the progeny “Puno III gen (Puno cold breed)”, reached a degree of damage in 50% of affected leaves. The progenies “cb adg 21 x cmm fus” and “cb adg 13 x cmm fus” had the best level of recovery potential and average growth. Meanwhile, the yield was higher in the progeny “cb adg 21 x cmm fus”, with an average of 22 t/ha, for the third campaign.

**Keywords:** potato; frost tolerance; native potato; wild potato, genetic diversity.

**Recibido:** 23/12/2022

**Aceptado:** 07/03/2023

**Publicado:** 30/04/2023

**Sección:** Artículo original

\*Autor correspondiente: [raymundo.gutierrez.r@gmail.com](mailto:raymundo.gutierrez.r@gmail.com)

### Introducción

Los eventos climáticos como variaciones en las lluvias, granizadas y heladas han sido siempre limitaciones para la producción, habiendo empeorado los últimos 20 a 30 años (Cadima & López, 2018). En el año 2017, se tuvo una pérdida de 3.6 billones de US\$ por efecto de las heladas en Europa en diversos cultivos (Faust & Herbold, 2018).

En un estudio de investigación por pérdidas en cantidad y valor del producto de papa, para productores de Ecuador y Perú, se encontró que el 72%, declararon

<sup>1</sup>Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Facultad de Ciencias Agrarias. Cusco, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1213-3236>

<sup>2</sup>Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Facultad de Ciencias Agrarias. Cusco, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-7998>

<sup>3</sup>Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC). Facultad de Ciencias Agrarias. Cusco, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8719-1492>

<sup>4</sup>Department of Horticulture, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, USA.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8780-747X>

<sup>5</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, La Molina 15024, Lima, Perú.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9238-532>

**Cómo citar:** Zarate Aller, E., Lizárraga Valencia, L. J., Gamarra Cornejo, C., Hernán Del Río, A., & Gutiérrez-Rosales, R. O. (2023). Efecto de las bajas temperaturas en la selección por tolerancia para progenies híbridas de papa (*Solanum sp.*) con introgresión de *Solanum commersonii.*, en la Comunidad de Occopata, Cusco. *Revista De Investigaciones Altoandinas*, 25(2), 90–98. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.502>



tener pérdidas antes de la cosecha, asociado a factores climáticos, un 29% por heladas y sequía en el Ecuador y un 26% solo por heladas en Perú (Velasco, Ordinola, & Devaux, 2020). Cuando las temperaturas mínimas del suelo alcanzan los  $-2.0^{\circ}\text{C}$ , el tubérculo semilla de papa puede morir, inhibiéndose a emergencia del mismo (Boydston, Seymour, Brown, & Alva, 2006).

El desarrollo fenológico del cultivo de papa es controlado, por la sumatoria de temperatura diaria media del aire, menos la temperatura base umbral, siendo  $2.0^{\circ}\text{C}$  esta temperatura base umbral (Supit et al., 2012), por encima de la cual se estima que ocurren los procesos metabólicos, y por debajo de dicha temperatura base en la planta, dichos procesos son reducidos. La tolerancia a las heladas es particularmente afectada por la aclimatación al frío, previamente, pudiéndose mejorar esta capacidad de tolerancia a las heladas (Palta & Simon, 2018). Tanto la tolerancia a las heladas, se han usado como estrategia exitosa de mejoramiento genético, como la introgresión *S. commersonii*, hacia variedades de papas cultivadas (Aversano et al., 2015; Cardi, Puite, Ramulu, D'Ambrosio, & Frusciant, 1993; Carputo et al., 1997). Las respuestas adaptativas para las bajas temperaturas, están vinculada a la producción de proteínas protectoras y biosíntesis de metabolitos protectores (Guy, Kaplan, Kopka, Selbig, & Hinch, 2008).

Se han usado los progenitores *S. commersonii* y *S. cardiophyllum*, generándose un híbrido F1, luego, se volvió a realizar una retro cruce con ambos progenitores, encontrándose que *S. commersonii*, su progenie, y su retrocruce tuvieron una mayor tolerancia a las heladas, en plantas no aclimatadas, mientras que, para plantas aclimatadas, solo *S. commersonii* y su retrocruce tuvieron la capacidad de mejorar la tolerancia a las heladas (Stone, Palta, Bamberg, Weiss, & Harbage, 1993). La conservación y uso sostenible de cultivos silvestres de papa, ha sido siempre una prioridad, especialmente en respuesta a la búsqueda de fuentes de tolerancia (Jansky et al., 2013).

A partir de dos híbridos somáticos, generados por fusión de protoplastos entre *S. commersonii* y un clon haploide de *S. tuberosum*, se obtuvieron dos tipos de progenies, encontrándose tolerancia no aclimatada a las heladas y la capacidad de aclimatación a las heladas (Chen, Palta, & Bamberg, 1999).

En una evaluación de 15 genotipos de *S. acaule*, para la tolerancia a las heladas, se identificó, que las sembradas a mayor altitud, toleraban menores temperaturas bajo cero grados Celsius (Li, Palta, & Hawkes, 1980). Así también, evaluando 61 accesiones de *S. tuberosum spp. andigena*, 14 de *S. stenotomum* y 7 de *S. x juzepczukii*, habiéndose encontrado que *S. x*

*juzepczukii* tiene mayor tolerancia a heladas, (Gabriel, Magne, García, & Coca, 2009).

También, utilizando 87 especies y 1 646 accesiones de papas, se encontró que al menos 5 especies tienen más de 90% de tejido no dañado, después de haber sido sometidos a dos heladas de  $-2^{\circ}\text{C}$  y  $-5^{\circ}\text{C}$ . Como resultado, se encontró una fuerte asociación de la tolerancia a las heladas con las especies silvestres evaluadas (Hijmans, Jacobs, Bamberg, & Spooner, 2003). Del mismo modo, evaluaciones en 10 variedades de papas nativas bajo condiciones de heladas en campo, sobre 4 *S. chaucha*, 3 *S. goniocalix*, 1 *S. phureja*, 1 *S. stenotomum* y 1 *S. tuberosum spp. andigena*, resultó que se obtuvo más tolerancia a las heladas en *S. phureja*, *S. goniocalix* y *S. chaucha* (Marmolejo Gutarra & Ruiz Velásquez, 2018).

En la presente investigación, se evalúa el efecto de las bajas temperaturas en la selección por tolerancia a heladas, para ocho progenies híbridas de papa (*Solanum sp.*) con introgresión de (*Solanum commersonii*), en la Comunidad de Occopata, Cusco.

## Materiales y métodos

El origen de los materiales genéticos es la Universidad de Wisconsin, Madison EE. UU., que ha generado estos híbridos con introgresión de *Solanum comersonii*, y que fueron usados en las evaluaciones. Estos cruces se han generado con cultivares nativos de la región andina, y pertenecen a la especie *S. tuberosum spp. andigena*. El objetivo fue generar progenies con características morfológicas y agronómicas, similares a las papas nativas de los Andes; para ello se utilizaron cultivares nativos como “Ilhuaycu” (también mostrando buena tolerancia a sequías) e “Imilla Negra” una de las variedades más populares de la región sur andina de Perú, fueron usados en los cruces y producción de progenies, otro progenitor usado fue la especie silvestre *S. megistacrolobum* (mantenida como accesión PI 473361). Finalmente, variedades de la especie cultivada *S. phureja* que en conjunto son llamadas Papas Criollas también fueron incluidas en los cruces. Las familias segregantes F2 serán producidas a partir de cruces recíprocos entre genotipos de las familias F1.

La primera etapa consistió en sembrar 100 semillas botánicas de papa, de cada una de las ocho diferentes familias o progenies de papa con introgresión de *Solanum commersonii*, para obtener las plántulas, las cuales una vez adaptadas y después de cuatro semanas, se trasplantaron al campo definitivo. El lugar de ubicación del campo, fue una zona agrícola con ocurrencia frecuente de heladas, en las siguientes características, Coordenada Este: 246406.0 m E, Coordenada Norte: 8485399.0 m S, Altitud: 3900 msnm. En la comunidad

de Occopata, distrito de Santiago, provincia y región del Cusco, Perú. Las campañas agrícolas consideradas tuvieron las siguientes características:

1ra Campaña 2019-2020: Siembra, 1 de Febrero, 2020; Cosecha, 30 de Junio, 2020.

2da Campaña 2020-2021: Siembra, 10 de Noviembre, 2020; Cosecha, 28 de Mayo, 2021.

3ra Campaña 2021-2022: Siembra, 10 de Octubre, 2021; Cosecha, 16 de Abril, 2022.

Se considera helada a todo proceso atmosférico mediante el cual se tiene un registro de temperatura menor a 0°C, los registros en el campo se han realizado con un HOBO data logger (Onset Computer Corp., Pocasset, MA), que fue colocado en el campo desde el momento de la siembra, a una altura de 40 cm sobre el suelo. Las medidas que registraba el equipo son la Temperatura del aire, la Temperatura de rocío, la Humedad relativa, todo esto se registraba cada media hora, y se almacenaba en el dispositivo.

Para la 1ra campaña 2019-2020, ocurrieron ocho eventos naturales de heladas registrados el mes de Mayo del 2020, y un evento en el mes de Junio, la temperatura mínima alcanzada fue de -3.3 °C y -2.9 °C respectivamente en cada mes. En la 2da campaña 2020-2021, ocurrieron cinco eventos de heladas registrados en el mes de Enero, y dos en el mes de Abril, siendo de -2.7 °C y -0.7 °C respectivamente en cada mes. En la 3ra campaña 2021-2022, no hubo heladas que fueron registradas por el sensor de temperatura, sin embargo, la temperatura estuvo por debajo de los 2 °C, en diferentes periodos del cultivo, por lo cual representaba un estrés por bajas temperaturas para el caso de la papa.

La escala propuesta de evaluación de los genotipos para su respuesta inmediata y posterior a bajas temperaturas/heladas, fue realizada en la 1ra y 2da campaña, la cual fue denominada:

Grado de evaluación de daño en el follaje por efecto de una helada.

Score Observaciones en las plantas.

1. Ningún daño
2. Solo en la punta de las hojas (10% del follaje)
3. En la punta de las hojas y en el tallo principal (25% del follaje)
4. 50% del follaje
5. 75% del follaje
6. 100% del follaje, pérdida total de la planta

Fuente: Del Rio Alfonso - Universidad de Wisconsin, Madison EE.UU., comunicación personal

La evaluación del potencial de recuperación y crecimiento, se realizó posterior a la ocurrencia de heladas en las tres primeras semanas, posteriores a la ocurrencia de heladas, y consistió en evaluar semanas después del daño de una helada, observando la recuperación de la planta, durante la 1ra, 2da y 3ra semana después de ocurrida la helada, fue realizada en la 1ra y 2da campaña, donde ocurrieron los eventos.

Grado de evaluación del potencial de recuperación y crecimiento.

Score Nivel de recuperación de la helada por las plantas.

1. Pobre
2. Bajo
3. Medio
4. Bueno
5. Muy Bueno

Fuente: Del Rio Alfonso - Universidad de Wisconsin, Madison EE.UU., comunicación personal.

La evaluación de rendimiento, consistió en obtener datos de cada uno de las progenies, de acuerdo a la producción que tuvieron en el campo de observación, durante la etapa de instalación en campo definitivo. Esta actividad consistió en cosecha de manera individual cada planta, luego contar el número de tubérculos, hacer los pesos individualmente por cada planta, y finalmente llevar dicho peso a una expresión de relación peso por área cosechada, esto es llevado a t/ha, de acuerdo con el espaciamiento utilizado.

Las labores de campo fueron realizadas según lo requiera el cultivo, como los deshierbos, aporques, riegos, fertilización, así como las actividades de control de plagas y enfermedades, para lo cual se realizó aplicaciones preventivas, para el control del Tizón tardío (*Phytophthora infestans*), Chupadera (*Rhizoctonia solani*), Tizón temprano (*Alternaria solani*), Gorgojo de los andes (*Premnotrypes sp.*).

Las pruebas estadísticas que fueron realizadas son: prueba de normalidad Anderson-Darling y de Shapiro-Wilk, para establecer si los datos de las evaluaciones tienen una distribución normal. Debido a que los datos no tienen una distribución normal, se analizaron como datos no paramétricos, por lo cual, realizan las pruebas de Kruskal-Wallis, para encontrar si existen diferencias estadísticas entre los grupos de variables evaluadas.

Asimismo, se realizó la prueba de comparación múltiple, debido a que algunos de los datos son categóricos ordinales, se usó la prueba de Benjamini & Yekutieli, (2001), de acuerdo con el Método de ajuste en RStudio: “BY”. El software utilizado en todos los casos, fue R y RStudio como plataforma de análisis (R Core Team, 2022), asimismo se utilizó las librerías: ggplot2 (Wickham et al., 2022), nortest (Gross & Ligges, 2015), ggpubr (Kassambara, 2022), visStatistics (Schilling & Kauf, 2021).

## Resultados

A partir de la siembra de la semilla botánica de las progenies con introgresión de *Solanum comersonii*, se encontró que la progenie con menor porcentaje de germinación es la “Superior Haploid + cmm fus”, con el 30%, pero en general la mayoría de las progenies estaba en un rango de 63% a un 71% de germinación (ver Tabla 1).

Realizadas las pruebas de normalidad para la primera campaña agrícola 2019-2020, fueron no significativos para la prueba de Anderson-Darling y de Shapiro, por lo cual los datos no se ajustan a una distribución normal. Por otro lado, se realizaron las pruebas de Kruskal-Wallis, indica que encuentra diferencia altamente significativa de al menos dos grupos, en las 8 familias o progenies de papa evaluadas. En la evaluación de recuperación del daño de las heladas, para la 1ra, 2da y 3ra semana, se realizaron las pruebas de Kruskal-Wall, donde el Chi-cuadrado fue de 26.23, 13.77 y 13.22, respectivamente, para un p-value de: 0.0004575, 0.05535 y 0.06696, lo que indica solo hubo diferencias altamente significativas para la 1ra semana de evaluación de recuperación después de la helada, mientras que para la 2da y 3ra semana, las diferencias fueron no significativas.

Para identificar donde se encuentran estas diferencias, tenemos que proceder con el equivalente no paramétrico de las T-Student pareadas, que son las pruebas de ajuste de Benjamini & Yekutieli, (2001), como lo muestra la Tabla 2, que nos proporciona el valor de la Probabilidad de ocurrencia o P-value. Encontrándose, que se forman diferentes grupos de acuerdo con la Tabla 3, donde se muestra la mayor frecuencia y el grupo al que pertenece cada progenie de papa con introgresión de *Solanum comersonii*, habiendo al menos tres grupos para la variable nivel de daños por efecto de las heladas en la campaña 2019-2020, siendo la progenie “Superior Haploid + cmm fus” con mayor nivel de daño de “6”, y “cb adg 13 x cmm fus” con un menor nivel de daño de “3”. Del mismo modo, en la evaluación de la recuperación en las diferentes semanas (1ra, 2da y 3ra), que tiene que para la primera semana de evaluación se forman dos grupos,

a partir de las pruebas de ajuste de Benjamini-Yekutieli, teniendo las progenies “Superior Haploid + cmm fus” y “Puno III gen (Puno Cold Breed)”.

En la segunda campaña agrícola 2020-2021, la evaluación del nivel de daños por efecto de las heladas, no fue significativa para la prueba de Anderson-Darling y de Shapiro-Wilk, por lo cual los datos no presentan una distribución normal. Por otro lado, se realizaron las pruebas de Kruskal-Wallis, y se encuentran diferencias altamente significativas en al menos dos grupos. Asimismo, para la 1ra, 2da y 3ra semana de la evaluación de recuperación se realizaron las pruebas de Kruskal-Wall, donde el Chi-cuadrado fue de 28.8, 27.06 y 33.53, respectivamente, para un p-value de:  $6.636e^{-05}$ ,  $0.00014$  y  $8.281e^{-06}$ , lo que indica diferencias altamente significativas.

En la segunda campaña 2020-2021, para evaluar el nivel de daño y las diferencias entre las progenies, se realizan las pruebas de ajuste de Benjamini & Yekutieli, (2001). Del mismo modo, se forman dos grupos de acuerdo con la Tabla 5, donde se muestra la mayor frecuencia del nivel de daño, y el grupo al que pertenece cada progenie de papa con introgresión de *Solanum comersonii*, siendo la progenie “Puno III gen (Puno Cold Breed)” la que fue afectada con el mayor nivel de daño, y la progenie “cb adg 13 x cmm fus” con el menor nivel de daño, similar a lo ocurrido en la primera campaña. Para la evaluación de la recuperación en las siguientes semanas (1ra, 2da y 3ra), que tiene para todas ellas, se forman dos grupos, a partir de las pruebas de ajuste de Benjamini-Yekutieli, teniendo a la progenie “Superior Haploid + cmm fus”, como la de menor capacidad de recuperación con “1”.

Para las variables número de tubérculos, peso de un tubérculo (g) y el rendimiento (t/ha), en la segunda campaña 2020-2021, se tiene que estos datos no presentan una distribución normal. Por ello se analizaron con herramientas de la estadística no paramétrica, se realizaron las pruebas de Kruskal-Wallis, donde para la variable número de tubérculos, no se puede encontrar diferencias estadísticas significativas entre las progenies evaluadas, mientras que para las variables peso de un tubérculo y rendimiento, si es posible encontrar diferencias estadísticas significativas, entre al menos dos grupos de progenies.

Luego de las pruebas de ajuste de Benjamini & Yekutieli, (2001), para la variable evaluada, se tiene que para el número de tubérculos no existen diferencias estadísticas, ósea forma un solo grupo. En tanto para las variables peso de un tubérculo y rendimiento, se forman tres grupos tal como lo muestra la Tabla 4, siendo la progenie “cb adg 21 x cmm fus”, la que tiene un mayor

peso promedio de tubérculo (g) con 10.4 g, mientras que las progenies: “Puno III gen (Puno Cold Breed)” y “cb adg 18 x cmm fus” tienen el menor peso por tubérculo de 0.8 g en ambos casos. En la variable rendimiento de tubérculos (t/ha), se tiene que el mayor valor se obtiene en la progenie “cb adg 21 x cmm fus”, con 6.32 t/ha, para la segunda campaña del 2020-2021.

En la tercera campaña 2021-2022, en las variables número de tubérculos, peso de un tubérculo (g) y el rendimiento (t/ha), dichos datos no presentan una distribución normal, por lo cual se realizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis, donde si es posible encontrar diferencias estadísticas significativas, entre al menos dos grupos de progenies, para las tres variables.

Con la prueba de ajuste de Benjamini-Yekutieli, para la variable evaluada, se tiene que, para el número de tubérculos, el peso de un tubérculo y el rendimiento, se forman, uno, tres y tres grupos respectivamente, como lo muestra la Tabla 5. La progenie “cb adg 21 x cmm fus”, obtuvo el mayor peso promedio de tubérculo (g) con 19.6 g, en tanto las progenies: “Puno II gen (Puno 3 way bulk)” y “cb adg 18 x cmm fus” tienen el menor peso por tubérculo de 7.6 g para ambos casos. La variable rendimiento de tubérculos (t/ha), tiene el mayor valor la progenie “cb adg 21 x cmm fus”, con 22.73 t/ha.

## Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos, que, para evaluaciones de daño por helada en condiciones de campo o naturales, es también posible identificar progenies o genotipos de papa que sean tolerantes a este

factor abióticos, similar a lo encontrado por Y. K. H. Chen et al., (1999) y Requejo Mormotoy, (2018), quien tenía seis niveles de medición del daño (Visual, 0: no daño – 5: hojas y tallos muertos), sin embargo Choque et al., (2007), tenía hasta nueve niveles de medición (Visual, 1: no daño - 9: muerte total), lo cual hace un espectro más amplio. Por otro lado, Marmolejo Gutarra & Ruiz Velásquez, (2018), realizó evaluaciones también con escalas visuales, como el porcentaje de severidad, lo cual representa una escala de datos continuos, y no las escalas categóricas usadas en la presente investigación. Con referencia a los valores encontrados en campo de temperatura mínima, por Choque et al., (2007), de -2.0 °C, son cercanos a los -3.3 °C en la 1ra campaña 2019-2020, y a los -2.7 °C en la 2da campaña 2020-2021, Del mismo modo, Marmolejo Gutarra & Ruiz Velásquez, (2018), realizó evaluaciones de heladas en condiciones naturales alcanzando los -4.2 °C.

Con relación a las características genéticas de los materiales vegetales evaluados, se puede decir que existe atributos adecuados en las progenies evaluados, las que poseen introgresión de *Solanum comersonii*, sin embargo este atributo también lo tienen las propias especies de papas cultivadas, pues en una evaluación por Requejo Mormotoy, (2018), se tuvo que el 40% de las 114 variedades nativas evaluadas presentaban tolerancia a las heladas, bajo condiciones naturales. Similares resultados también obtuvieron Gabriel et al., (2009); Gabriel Ortega, Magne Calizaya, Angulo Fernández, & Veramendi Torrico, (2021), a partir de evaluar germoplasma de papas nativas, por lo que se advierte, que existe en dicha diversidad genética fuente de resistencia a las heladas.

**Tabla 1.** Porcentaje de germinación de semillas de progenies con introgresión de *Solanum commersonii*, primera campaña agrícola 2019-2020.

| Progenie                        | Numero de semillas sometidas a prueba de germinación | Numero de semillas germinadas | Porcentaje de germinación |
|---------------------------------|--|-------------------------------|---------------------------|
| (cb adg 21 x cmm fus) F2        | 100  | 71                            | 71%                       |
| (cb adg 41 x cmm fus) F2        | 100  | 78                            | 78%                       |
| (cb adg 13 x cmm fus) F2        | 100  | 67                            | 67%                       |
| Puno II gen (Puno 3 way bulk)   | 100  | 65                            | 65%                       |
| (cb adg 16 x cmm fus) F2        | 100  | 65                            | 65%                       |
| (cb adg 18 x cmm fus) F2        | 100  | 63                            | 63%                       |
| (Superior Haploid + cmm fus) F2 | 100  | 30                            | 30%                       |
| Puno III gen (Puno Cold Breed)  | 100  | 70                            | 70%                       |
| <b>Total evaluados</b>          | <b>800</b>   | <b>509</b>                    | <b>64%</b>                |

**Tabla 2.** Evaluación de nivel de daño por bajas temperaturas y recuperación, según prueba de Benjamini-Yekutieli, en Progenies con introgresión de *Solanum commersonii.*, primera campaña agrícola 2019-2020.

| Código | Progenie                        | Nivel de Daño | Evaluación de recuperación |    |          |   |          |   |
|--------|---------------------------------|---------------|----------------------------|----|----------|---|----------|---|
|        |                                 |               | 1ra Sem.                   |    | 2da Sem. |   | 3ra Sem. |   |
| PRO7   | (Superior Haploid + cmm fus) F2 | 6 a           | 1                          | a  | 1        | a | 1        | a |
| PRO8   | Puno III gen (Puno Cold Breed)  | 6 ab          | 1                          | ab | 1        | a | 1        | a |
| PRO5   | (cb adg 16 x cmm fus) F2        | 5 abc         | 3                          | ab | 2        | a | 1        | a |
| PRO6   | (cb adg 18 x cmm fus) F2        | 5 abc         | 3                          | ab | 1        | a | 1        | a |
| PRO1   | (cb adg 21 x cmm fus) F2        | 4 bc          | 3                          | b  | 2        | a | 1        | a |
| PRO4   | Puno II gen (Puno 3 way bulk)   | 4 bc          | 3                          | b  | 2        | a | 1        | a |
| PRO2   | (cb adg 41 x cmm fus) F2        | 4 c           | 3                          | b  | 2        | a | 1        | a |
| PRO3   | (cb adg 13 x cmm fus) F2        | 3 bc          | 2                          | b  | 1        | a | 1        | a |

**Tabla 3.** Evaluación de nivel de daño por bajas temperaturas y recuperación según prueba de Benjamini-Yekutieli, en Progenies con introgresión de *Solanum commersonii.*, segunda campaña agrícola 2020-2021.

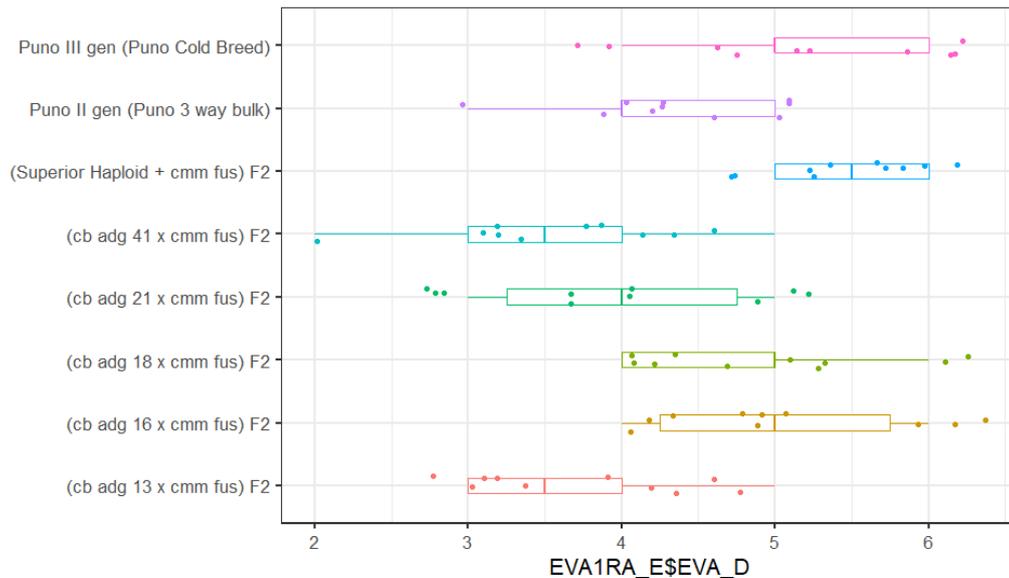
| Código | Progenie                       | Nivel de Daño | Evaluación de recuperación |   |          |   |          |   |
|--------|--------------------------------|---------------|----------------------------|---|----------|---|----------|---|
|        |                                |               | 1ra Sem.                   |   | 2da Sem. |   | 3ra Sem. |   |
| PRO8   | Puno III gen (Puno Cold Breed) | 5 a           | 1                          | a | 1        | a | 3        | a |
| PRO6   | (cb adg 18 x cmm fus) F2       | 5 a           | 2                          | b | 3        | b | 4        | b |
| PRO4   | Puno II gen (Puno 3 way bulk)  | 4 ab          | 3                          | b | 4        | b | 4        | b |
| PRO5   | (cb adg 16 x cmm fus) F2       | 4 ab          | 3                          | b | 4        | b | 4        | b |
| PRO2   | (cb adg 41 x cmm fus) F2       | 4 b           | 3                          | b | 4        | b | 5        | b |
| PRO1   | (cb adg 21 x cmm fus) F2       | 4 b           | 3                          | b | 4        | b | 5        | b |
| PRO3   | (cb adg 13 x cmm fus) F2       | 3 b           | 3                          | b | 4        | b | 4        | b |

**Tabla 4.** Evaluación de nivel del número de tubérculos por planta, peso de un tubérculo (g) y rendimiento (t/ha), según prueba de Benjamini-Yekutieli, en Progenies con introgresión de *Solanum commersonii.*, segunda campaña agrícola 2020-2021.

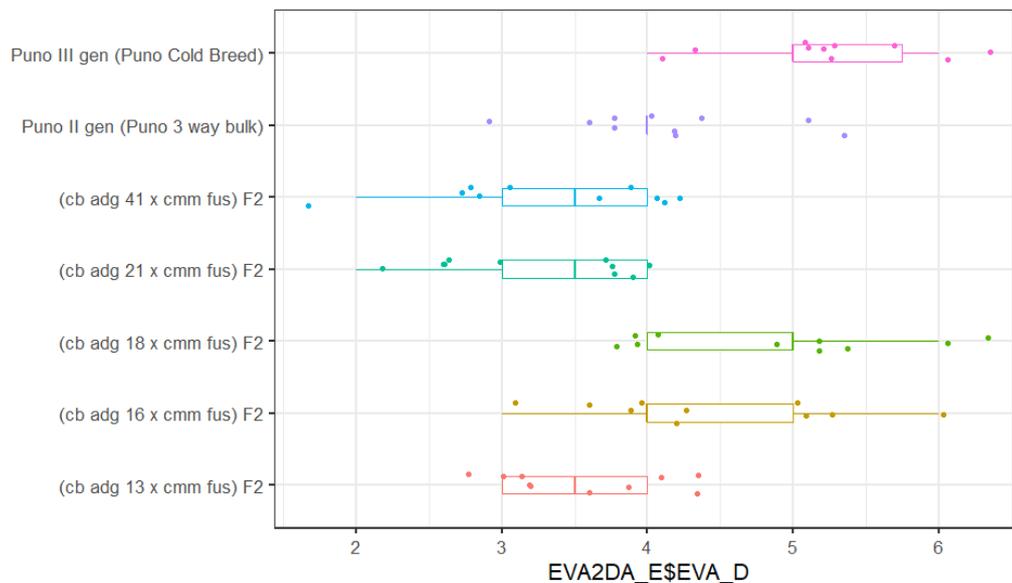
| Código | Progenie                       | Número de tubérculos | Peso de tubérculo (g) | Rendimiento (t / ha) |
|--------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| PRO1   | (cb adg 21 x cmm fus) F2       | 13 a                 | 10.4 a                | 6.32 a               |
| PRO2   | (cb adg 41 x cmm fus) F2       | 13 a                 | 8.4 ab                | 4.48 a               |
| PRO3   | (cb adg 13 x cmm fus) F2       | 12 a                 | 10.0 ab               | 4.08 a               |
| PRO5   | (cb adg 16 x cmm fus) F2       | 12 a                 | 5.6 ab                | 3.23 ab              |
| PRO4   | Puno II gen (Puno 3 way bulk)  | 8 a                  | 3.4 b                 | 1.10 bc              |
| PRO8   | Puno III gen (Puno Cold Breed) | 16 a                 | 0.8 c                 | 0.55 c               |
| PRO6   | (cb adg 18 x cmm fus) F2       | 14 a                 | 0.8 c                 | 0.48 c               |

**Tabla 5.** Evaluación de nivel del número de tubérculos por planta, peso de un tubérculo (g) y rendimiento (t/ha), según prueba de Benjamini-Yekutieli, en Progenies con introgresión de *Solanum commersonii.*, tercera campaña agrícola 2021-2022

| Código | Progenie                       | Número de tubérculos | Peso de tubérculo (g) | Rendimiento (t / ha) |
|--------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| PRO1   | (cb adg 21 x cmm fus) F2       | 28 a                 | 19.6 a                | 22.73 a              |
| PRO8   | Puno III gen (Puno Cold Breed) | 24 a                 | 15.0 abc              | 17.11 ab             |
| PRO3   | (cb adg 13 x cmm fus) F2       | 18 a                 | 15.4 ab               | 11.88 ab             |
| PRO2   | (cb adg 41 x cmm fus) F2       | 21 a                 | 13.8 ab               | 11.50 ab             |
| PRO5   | (cb adg 16 x cmm fus) F2       | 19 a                 | 9.4 abc               | 9.35 ab              |
| PRO4   | Puno II gen (Puno 3 way bulk)  | 13 a                 | 7.6 c                 | 3.62 bc              |
| PRO6   | (cb adg 18 x cmm fus) F2       | 9 a                  | 7.6 bc                | 2.13 c               |



**Figura 1.** Gráfico de cajas del grado de daño por heladas primera campaña agrícola 2019-2020.



**Figura 2.** Gráfico de cajas del grado de daño por heladas segunda campaña agrícola 2020-2021.

## Conclusiones

Se ha logrado seleccionar las progenies con introgresión de *Solanum commersonii.* que presentan tolerancia a bajos niveles de temperatura, en condiciones de la comunidad de Occopata, distrito de Santiago-Cusco. Asimismo, se ha logrado seleccionar algunas progenies que tienen buenas características agronómicas, a partir de las campañas 2020-2021 y 2021-2022.

Asimismo, se ha podido determinar el grado de daño de ocho progenies con introgresión de *Solanum commersonii.* afectadas por las heladas bajo condiciones de 3,950 msnm, siendo la más afectada, en la primera campaña agrícola 2019-2020, la progenie “Superior Haploid + cmm fus”, con un grado de daño 5, que significa

el 75% de daño en el follaje, y grado 6 que significa el 100% de daño en el follaje, que como consecuencia se considera una pérdida total. Para la segunda campaña agrícola 2020-2021, se logró determinar que la planta más afectada por el daño por heladas, fue la progenie “Puno III gen (Puno cold breed)”, la cual que tuvo daños de grado 4, que representa el 50 % de daño en el follaje de la planta.

El mejor rendimiento se obtuvo en la progenie “cb adg21 x cmm fus”, con un promedio de 22 t/ha, que fue el mejor de las ocho progenies con introgresión de *Solanum commersonii.* evaluadas, lo cual representa una alternativa para la resistencia a heladas, y que además tiene buenas características agronómicas, habiendo sido identificado en la tercera campaña agrícola 2021-2022.

## Agradecimientos

Se agradece al PROCENCIA y a la UNSAAC que a través del Proyecto Canon: Mejoramiento genético mediante introgresión de *S. commersonii* en papas nativas, para incrementar tolerancia a bajas temperaturas, como alternativa frente al Cambio Climático en la Región Andina y el Altiplano, por el financiamiento de esta investigación mediante el Contrato N°014-2018-UNSAAC.

## Referencias

- Aversano, R., Contaldi, F., Ercolano, M. R., Grosso, V., Iorizzo, M., Tatino, F., ... Carputo, D. (2015). The *Solanum commersonii* Genome Sequence Provides Insights into Adaptation to Stress Conditions and Genome Evolution of Wild Potato Relatives. *The Plant Cell*, 27, 954-968.
- Benjamini, Y., & Yekutieli, D. (2001). The control of the false discovery rate in multiple testing under dependency. *The Annals of Statistics*, 29, 1165-1188.
- Boydston, R. A., Seymour, M. D., Brown, C. R., & Alva, A. K. (2006). Freezing behavior of potato (*Solanum tuberosum*) tubers in soil. *American Journal of Potato Research*, 83, 305-315.
- Cadima, X., & López, I. (2018). Definición de repertorios de cultivares de papa para agricultores altoandinos en un contexto de cambio climático. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 22, 38-48.
- Cardi, T., Puite, K. J., Ramulu, K. S., D'Ambrosio, F., & Frusciante, L. (1993). Production of somatic hybrids between frost tolerant *Solanum commersonii* and *S. tuberosum*: Protoplast fusion, regeneration and isozyme analysis. *American Potato Journal*, 70, 753-764.
- Carputo, D., Barone, A., Cardi, T., Sebastiano, A., Frusciante, L., & Peloquin, S. J. (1997). Endosperm balance number manipulation for direct in vivo germplasm introgression to potato from a sexually isolated relative (*Solanum commersonii* Dun.). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94, 12013-12017.
- Chen, Y. K. H., Palta, J. P., & Bamberg, J. B. (1999). Freezing tolerance and tuber production in selfed and backcross progenies derived from somatic hybrids between *Solanum tuberosum* L. and *S. commersonii* Dun. *Theoretical and Applied Genetics*, 99, 100-107.
- Choque, E., Espinoza, R., Cadima, X., Zeballos, J., & Gabriel, J. (2007). Resistencia a helada en germoplasma de papa nativa de Bolivia. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14. <https://doi.org/10.37066/ralap.v14i1.141>
- Faust, E., & Herbold, J. (2018). Spring frost losses and climate change—not a contradiction in terms. *Munich Re*.
- Gabriel, J., Magne, J., García, R., & Coca, J. (2009). Variedades nativas de papa: Tecnología tangible para afrontar el efecto causado por la helada y la sequía. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 15. <https://doi.org/10.37066/ralap.v15i1.158>
- Gabriel Ortega, J., Magne Calizaya, J., Angulo Fernández, A., & Veramendi Torrico, S. (2021). Selección de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) resistentes a sequía y heladas en Bolivia. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 24. <https://doi.org/10.37066/ralap.v24i2.405>
- Gross, J., & Ligges, U. (2015). *nortest: Tests for Normality*. Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=nortest>
- Guy, C., Kaplan, F., Kopka, J., Selbig, J., & Hinch, D. K. (2008). Metabolomics of temperature stress. *Physiologia Plantarum*, 132, 220-235.
- Hijmans, R. J., Jacobs, M., Bamberg, J. B., & Spooner, D. M. (2003). Frost tolerance in wild potato species: Assessing the predictivity of taxonomic, geographic, and ecological factors. *Euphytica*, 130, 47-59.
- Jansky, S. H., Dempewolf, H., Camadro, E. L., Simon, R., Zimnoch-Guzowska, E., Bisognin, D. A., & Bonierbale, M. (2013). A Case for Crop Wild Relative Preservation and Use in Potato. *Crop Science*, 53, 746-754.
- Kassambara, A. (2022). *ggpubr: «ggplot2» Based Publication Ready Plots*. Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>
- Li, P. H., Palta, J. P., & Hawkes, J. G. (1980). A Scientific note: Interrelationship between frost hardiness and elevation of Genotype Origin. *American Potato Journal*, 57, 184-185.
- Marmolejo Gutarra, D., & Ruiz Velásquez, J. E. (2018). Tolerancia de papas nativas (*Solanum* spp.) a heladas en el contexto de cambio climático: Tolerance of native potatoes (*Solanum* spp.) to ice

- creams in the context of climate change. *Scientia Agropecuaria*, 9, 393-400.
- Palta, J. P., & Simon, G. (2018). Breeding Potential for Improvement of Freezing Stress Resistance: Genetic Separation of Freezing Tolerance, Freezing Avoidance, and Capacity to Cold Acclimate. En *Advances in plant cold hardiness* (pp. 299-310). CRC Press.
- R Core Team. (2022, noviembre 23). R: The R Project for Statistical Computing. Recuperado 23 de noviembre de 2022, de <https://www.r-project.org/>
- Requejo Mormotoy, F. S. (2018). *Evaluación de la incidencia de factores bióticos y abióticos en la producción de 114 entradas de papas nativas (Solanum spp) en la comunidad campesina de Lauramarca, distrito de Ocongate, provincia de Quispicanchi, región Cusco* (Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco). Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Schilling, S., & Kauf, P. (2021). *visStatistics: Automated Visualization of Statistical Tests*. Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=visStatistics>
- Stone, J. M., Palta, J. P., Bamberg, J. B., Weiss, L. S., & Harbage, J. F. (1993). Inheritance of freezing resistance in tuber-bearing *Solanum* species: Evidence for independent genetic control of nonacclimated freezing tolerance and cold acclimation capacity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90, 7869-7873.
- Supit, I., van Diepen, C. A., de Wit, A. J. W., Wolf, J., Kabat, P., Baruth, B., & Ludwig, F. (2012). Assessing climate change effects on European crop yields using the Crop Growth Monitoring System and a weather generator. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 96-111.
- Velasco, C., Ordinola, M., & Devaux, A. (2020). Una aproximación a la medición de pérdidas de alimento en la cadena de la papa en Ecuador y Perú. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 23. <https://doi.org/10.37066/ralap.v23i2.368>
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., ... Dunnington, D. (2022, noviembre 23). R: ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar... Recuperado 23 de noviembre de 2022, de <https://search.r-project.org/CRAN/refmans/ggplot2/html/ggplot2-package.html>