

## EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS Y RESILIENCIA SOCIOECOLÓGICA DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE QUINUA EN SICA SICA, LA PAZ, BOLIVIA

### Extreme climatic events and socioecological resilience of quinoa production systems in Sica Sica, La Paz, Bolivia

Marco A. Patiño Fernández<sup>1</sup>, Natty Marianela Pari Machaca<sup>2</sup>, Eleodoro Baldiviezo Estrada<sup>3</sup>

#### RESUMEN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria; sin embargo, en el Altiplano boliviano enfrenta una creciente variabilidad climática que afecta su estabilidad productiva. El presente estudio tuvo como objetivo analizar la relación entre los eventos climáticos extremos y la resiliencia socioecológica de sistemas productivos de quinua en el municipio de Sica Sica durante la campaña 2022–2023. Se empleó un enfoque cuantitativo–analítico que integró variables climáticas (temperatura y precipitación), productivas (rendimiento y daño) y socioecológicas. Se analizaron parcelas agrícolas y se aplicaron encuestas a 106 familias clasificadas en formación (n=9), consolidación (n=21) y reestructuración (n=76). La resiliencia fue evaluada mediante indicadores sociales, económico-productivos y ambientales en escala de 1 a 5. Los resultados evidencian un retraso de hasta 60 días en el inicio de lluvias y déficits hídricos en la fase de emergencia (<60 mm), así como una alta frecuencia de eventos de helada (hasta 40 eventos) durante la maduración, configurando un patrón de riesgo climático diferenciado por fase fenológica. El rendimiento mostró una relación inversa con el daño, con colapso productivo en condiciones de daño superiores al 80%. No obstante, la respuesta del sistema fue modulada por factores como la diversidad varietal y el manejo agronómico. La resiliencia socioecológica presentó diferencias según el tipo de familia, siendo mayor en consolidación (≈3.8), intermedia en reestructuración (≈2.9) y baja en formación (≈2.2). Se concluye que la resiliencia actúa como un factor modulador del impacto de los eventos climáticos extremos, determinando la capacidad del sistema para amortiguar perturbaciones y sostener la producción.

**Palabras clave:** quinua, resiliencia socioecológica, variabilidad climática, eventos climáticos extremos, agricultura familiar, Altiplano.

#### ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a strategic crop for food security; however, in the Bolivian Altiplano it faces increasing climate variability that affects its productive stability. The aim of this study was to analyze the relationship between extreme climate events and the socio-ecological resilience of quinoa production systems in the municipality of Sica Sica during the 2022–2023 cropping season. A quantitative–analytical approach was applied, integrating climatic variables (temperature and precipitation), productive variables (yield and damage), and socio-ecological variables. Agricultural plots were analyzed, and 106 families were surveyed, classified into formation (n=9), consolidation (n=21), and restructuring (n=76). Resilience was evaluated using social, economic–productive, and environmental indicators on a scale from 1 to 5. The results show delays of up to 60 days in the onset of the rainy season and water deficits during the emergence stage (<60 mm), as well as a high frequency of frost events (up to 40 events) during the maturation phase, configuring a climate risk pattern differentiated by phenological stage. Yield showed an inverse relationship with damage, with productive collapse under damage levels above 80%. However, system response was modulated by factors such as varietal diversity and agronomic management. Socio-ecological resilience differed according to family type, being higher in consolidation systems (≈3.8), intermediate in restructuring systems (≈2.9), and lower in formation systems (≈2.2). It is concluded that resilience acts as a key modulating factor in the impact of extreme climate events, determining the system's capacity to buffer disturbances and sustain production.

**Keywords:** quinoa, socio-ecological resilience, climate variability, extreme climate events, family farming, Altiplano

<sup>1</sup> Docente Investigador, Facultad de Agronomía. Doctorante en Ciencias Agrarias, mención en sistemas y políticas agroalimentarias, UMSA, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0582-8478>. E.mail: [mapatino1@umsa.bo](mailto:mapatino1@umsa.bo)

<sup>2</sup> Docente Investigadora y Tutora de tesis doctoral, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8531-2086>. E.mail: [nattypani@gmail.com](mailto:nattypani@gmail.com)

<sup>3</sup> Responsable de Planificación y Gestión, PROSUCO, La Paz, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7864-6086>. E.mail: [prosuco.elio@gmail.com](mailto:prosuco.elio@gmail.com)

## INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria debido a su alto valor nutricional y su capacidad de adaptación a condiciones adversas, como sequía, salinidad y bajas temperaturas. Estas características han permitido su expansión a nivel global (Bazile et al., 2016); sin embargo, en su centro de origen, particularmente en el Altiplano boliviano, su producción enfrenta desafíos asociados a la variabilidad climática (Geerts et al., 2006).

En Bolivia, la producción de quinua se desarrolla principalmente bajo sistemas de agricultura familiar (Jacobsen, 2012), caracterizados por una alta dependencia de las condiciones climáticas y un limitado acceso a recursos productivos. En este contexto, la variabilidad en la precipitación y la ocurrencia de eventos extremos, como sequías y heladas, constituyen factores determinantes en la dinámica productiva del cultivo, afectando tanto el establecimiento como el desarrollo fenológico (Liuhto et al., 2016).

En el Altiplano central, estas condiciones se expresan en una marcada irregularidad en la distribución de lluvias y en la ocurrencia recurrente de heladas, especialmente en fases críticas del cultivo (Alavi et al., 2015). La coincidencia de estos eventos con etapas como la emergencia y la maduración genera impactos directos en el rendimiento, evidenciando una alta sensibilidad del sistema productivo frente a perturbaciones climáticas.

Sin embargo, la respuesta de los sistemas productivos no es homogénea. Factores como el manejo agronómico, la diversidad varietal, las condiciones del suelo y las características socioeconómicas de las familias productoras influyen en la capacidad de adaptación frente a estos eventos. En este sentido, se ha señalado que los agroecosistemas altamente especializados presentan mayores niveles de vulnerabilidad frente a perturbaciones climáticas, debido a su menor capacidad de respuesta ante cambios en el entorno,

en contraste con sistemas diversificados que tienden a ser más estables (Samper, 2020). En este sentido, el enfoque de resiliencia socioecológica permite comprender cómo los sistemas productivos integran componentes biofísicos y sociales para enfrentar condiciones adversas.

A pesar de la importancia de este enfoque, en el contexto del Altiplano central boliviano existe una limitada integración de análisis que vinculen de manera conjunta las variables climáticas, productivas y socioecológicas en sistemas de producción de quinua. La mayoría de los estudios abordan estos componentes de forma aislada, lo que dificulta una comprensión integral del comportamiento del sistema productivo.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo analizar la relación entre los eventos climáticos extremos y la resiliencia socioecológica en sistemas productivos de quinua en el municipio de Sica Sica, departamento de La Paz, considerando la interacción entre variables climáticas, productivas y del sistema.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se desarrolló en el municipio de Sica Sica, provincia Aroma del departamento de La Paz, Bolivia, ubicado en el Altiplano central, con un rango altitudinal entre 3 100 y 4 700 m s.n.m. La zona presenta condiciones climáticas caracterizadas por alta variabilidad térmica, ocurrencia frecuente de heladas y precipitación concentrada en los meses de verano, lo que condiciona la producción de quinua.

### Diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo-analítico, integrando variables climáticas, productivas y socioecológicas, con el objetivo de evaluar la interacción entre eventos climáticos extremos y la resiliencia de los sistemas productivos familiares.

## Unidad de análisis y muestreo

Se trabajó con parcelas agrícolas monitoreadas durante la campaña agrícola 2022-2023 y con 106 familias productoras de quinua, clasificadas en tres categorías: formación (n = 9), consolidación (n = 21) y reestructuración (n = 76).

La selección de las familias encuestadas se realizó mediante un muestreo aleatorio dentro del universo de productores del área de estudio. La distribución observada en la muestra refleja la estructura poblacional local, caracterizada por una menor proporción de familias en formación y una mayor presencia de familias en proceso de reestructuración.

La clasificación de las familias se realizó en función del ciclo de vida del sistema productivo familiar, considerando criterios como: disponibilidad de recursos productivos (principalmente acceso a tierra), nivel de consolidación de la actividad agrícola, grado de diversificación productiva, experiencia en el manejo del cultivo y nivel de articulación organizativa. Las familias en formación corresponden a unidades productivas en etapas iniciales con limitaciones de recursos: las familias en consolidación presentan mayor estabilidad productiva e integración organizativa; mientras que las familias en reestructuración se caracterizan por procesos de fragmentación productiva y debilitamiento de su base socioeconómica.

El monitoreo productivo se realizó en 7 parcelas agrícolas, seleccionadas mediante un muestreo intencional dirigido a representar las condiciones productivas predominantes en la zona de estudio.

## Recolección de datos

La recolección de datos se realizó durante la campaña agrícola 2022-2023 mediante el uso de múltiples fuentes de información:

- Instalación de dos equipos meteorológicos móviles en campo implementados por PROSUCO, que registraron variables

climáticas con frecuencia diaria durante el periodo agrícola.

- Uso de datos climáticos satelitales provenientes de la plataforma NASA POWER (Prediction Of Worldwide Energy Resources), correspondientes al periodo 2013-2023, con resolución temporal diaria.
- Monitoreo de parcelas mediante códigos QR, permitiendo el registro sistémico de variables productivas.
- Aplicación de encuestas estructuradas a 106 familias mediante la plataforma KoboToolbox, orientadas a la recopilación de información social, económico-productivo y ambiental.

## Análisis climático

Se analizaron variables de temperatura mínima, media y máxima, frecuencia de heladas ( $T \leq 0^\circ\text{C}$ ) y precipitación acumulada. Los datos climáticos correspondieron a registros diarios, obtenidos tanto de estaciones meteorológicas en campo como de la base de datos satelital NASA POWER.

A partir de estos datos se construyó el envelope térmico (2013–2023) y se evaluó la dinámica de la precipitación en función de las fases fenológicas del cultivo.

## Evaluación del rendimiento

El rendimiento del cultivo se estimó mediante el peso de panoja (kg/panoja) y la estimación del porcentaje de daño. Para ello, se realizó un muestreo en campo en las 7 parcelas seleccionadas, considerando 233 plantas muestra, mediante un muestro sistemático.

## Evaluación de la resiliencia socioecológica

La resiliencia socioecológica fue evaluada mediante un sistema de indicadores agrupados en los ámbitos social, económico-productivo y ambiental, considerando la capacidad de los sistemas

productivos para absorber, adaptarse y responder frente a perturbaciones climáticas. Este enfoque se sustenta en el marco conceptual de resiliencia de sistemas socioecológicos (Folke, 2006), así como en enfoques aplicados a sistemas agroecológicos que destacan la importancia del capital social, la diversificación productiva y el manejo de recursos

como componentes importantes de la resiliencia (Altieri et al., 2015; Casimiro-Rodríguez et al., 2020). Los indicadores utilizados se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Variables e indicadores utilizados en la evaluación de la resiliencia socioecológica*

Ámbito	Indicador	Descripción operativa
Social	Participación organizativa	Nivel de participación en organizaciones productivas
Social	Percepción de beneficios	Beneficios percibidos de la organización
Social	Reciprocidad	Prácticas de apoyo comunitario
Social	Acceso a salud	Condiciones de salud familiar
Económico-Productivo	Acceso a tierra	Superficie agrícola disponible (ha)
Económico-Productivo	Diversidad varietal	Número de variedades cultivadas
Económico-Productivo	Manejo agronómico	Prácticas de manejo (rotación, descanso, etc.)
Económico-Productivo	Diversificación productiva	Número de actividades productivas
Ambiental	Manejo de suelos	Uso de puruma y prácticas de conservación
Ambiental	Manejo de agua	Estrategias de conservación de humedad
Ambiental	Diversidad del sistema	Complejidad del sistema productivo

**Nota.** Fuente: Elaborado con base a Folke (2006); Altieri et al. (2015); Casimiro-Rodríguez et al. (2020).

Para cada ámbito se empleó una escala ordinal de 1 a 5 (1 = Muy bajo; 2 = Bajo; 3 = Medio; 4 = Alto y 5 = Muy alto). Los valores de cada ámbito fueron obtenidos mediante el promedio de los indicadores correspondientes, permitiendo una evaluación integrada de la resiliencia de los sistemas productivos familiares.

### Clasificación de la resiliencia

Los valores obtenidos fueron interpretados según la siguiente escala: 1.0 – 2.0: Resiliencia baja; 2.1 – 3.0: Resiliencia media y 3.1 – 5.0: Resiliencia alta. Esta clasificación permitió comparar los niveles de resiliencia entre los diferentes tipos de familias.

### Análisis estadístico

El procesamiento de datos se realizó en el software R, empleando estadística descriptiva, análisis de dispersión y comparación entre grupos con el objetivo de identificar patrones y relaciones entre variables climáticas, productivas y socioecológicas.

### Esquema metodológico

El procedimiento metodológico general del estudio se presenta en la Figura 1.

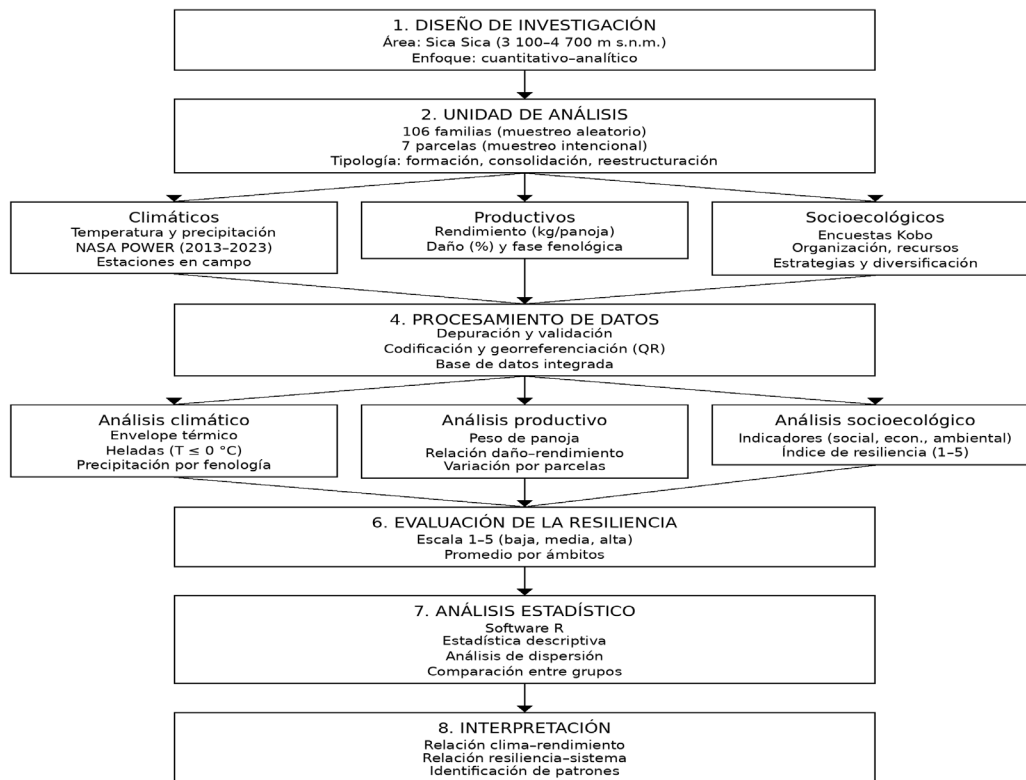
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comportamiento de la temperatura en el ciclo del cultivo

El análisis térmico del periodo 2013–2023, basado en registros diarios de temperatura mínima y máxima, permitió caracterizar el comportamiento del sistema mediante la construcción del envelope térmico para el ciclo agrícola de la quinua (octubre–mayo), como se observa en la Figura 2.

Los resultados evidencian una alta amplitud térmica, con diferencias marcadas entre temperaturas mínimas y máximas a lo largo del ciclo, lo que refleja la fuerte variabilidad térmica característica de los sistemas altoandinos, donde las oscilaciones diarias de temperatura constituyen un rasgo estructural del clima (Geerts et al., 2006; Del Castillo et al., 2013).

**Figura 1.**  
Esquema metodológico de la investigación



Las temperaturas mínimas alcanzaron valores críticos inferiores a 0 °C, registrándose eventos de helada con descensos de hasta aproximadamente -4.0 °C a -4.35 °C, particularmente en los meses de abril y mayo, coincidiendo con la fase de maduración del cultivo.

En contraste, las temperaturas máximas diarias se mantuvieron en rangos típicos del Altiplano central, generando una amplitud térmica diaria elevada que en varios periodos supera los 15 °C, condición ampliamente reportada en ambientes altoandinos y asociada a una alta radiación solar y baja cobertura nubosa (Geerts et al., 2006).

La temperatura media, si bien se mantuvo dentro de rangos favorables para el desarrollo de la quinua, no refleja adecuadamente el riesgo climático del sistema. El análisis del envelope térmico muestra una tendencia a la expansión hacia valores mínimos más bajos en campañas recientes, lo que implica un incremento en la frecuencia e intensidad de eventos de helada, fenómeno vinculado a la creciente

variabilidad climática en la región andina (Liuhto et al., 2016).

Desde el punto de vista productivo, estos resultados evidencian que el principal factor de riesgo térmico no está asociado a la temperatura media, sino a la ocurrencia de eventos extremos. En particular, la coincidencia de temperaturas inferiores a 0 °C con la fase de maduración incrementa significativamente la probabilidad de afectación en el llenado de grano, constituyéndose en un factor crítico para la estabilidad del rendimiento, tal como ha sido reportado en estudios sobre estrés térmico en cultivos andinos (Conde et al., 2024; Del Castillo et al., 2013).

### Dinámica de la precipitación y disponibilidad hídrica

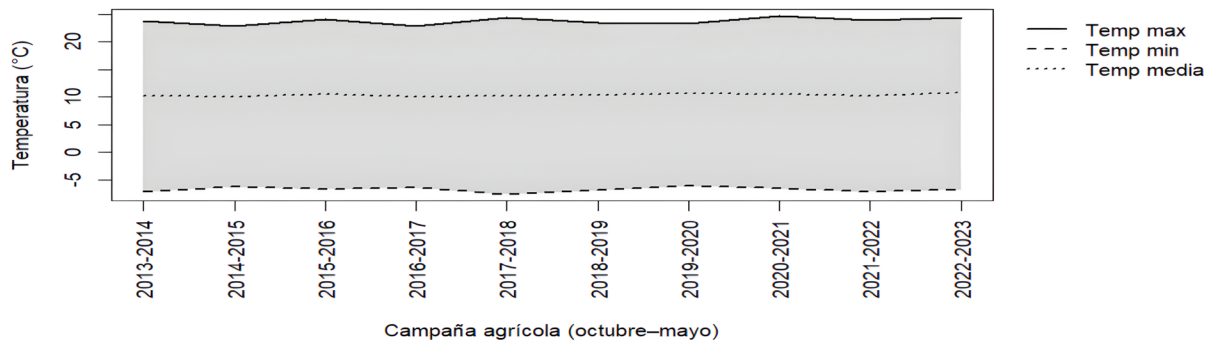
El análisis de la precipitación correspondiente al periodo 2013–2023 evidencia una alta variabilidad interanual tanto en la magnitud como en la distribución temporal de las lluvias, con implicaciones directas sobre la dinámica productiva

del cultivo de quinua en el Altiplano central. Considerando como referencia el 1 de octubre para el inicio del ciclo agrícola, se identificó que en la mayoría de las campañas el inicio de la temporada de lluvias presenta retrasos moderados inferiores a 15 días; sin embargo, como se muestra en la Figura 3, la campaña 2022–2023 se constituye en un caso extremo, con un retraso cercano a 60 días, lo que representa una ruptura del patrón agroclimático observado en años anteriores, en concordancia con la variabilidad climática reportada para la región andina (Liuhto et al., 2016; Benique y Ojeda, 2024).

Durante los meses iniciales del ciclo (octubre–diciembre), la precipitación presenta valores bajos e irregulares, como se observa en la Figura 4,

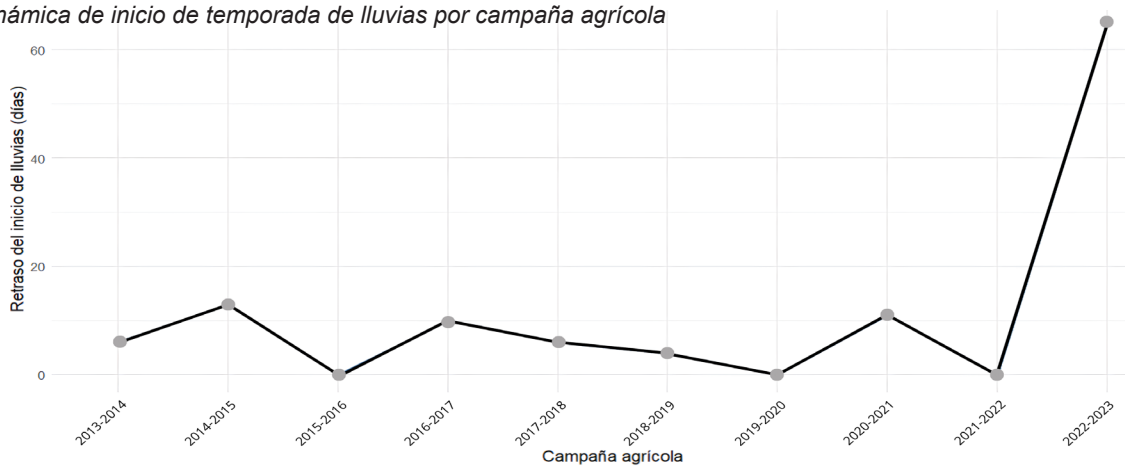
siendo octubre el mes más crítico, con acumulados generalmente inferiores a 50 mm e incluso cercanos a 4.83 mm en campañas específicas. En noviembre, los valores se mantienen alrededor de 9.97 mm, insuficientes para garantizar condiciones adecuadas de germinación y emergencia del cultivo. En contraste, diciembre concentra los mayores aportes de precipitación, alcanzando en varias campañas valores superiores a 100–150 mm, lo que evidencia un desplazamiento del inicio efectivo de la temporada lluviosa hacia fases más avanzadas del ciclo agrícola, patrón característico de sistemas altoandinos con alta irregularidad en la distribución intra-anual de las lluvias (Geerts et al., 2006).

**Figura 2.** Envelope térmico del ciclo agrícola de la quinua (2013–2023). Temperaturas mínimas, máximas y medias.



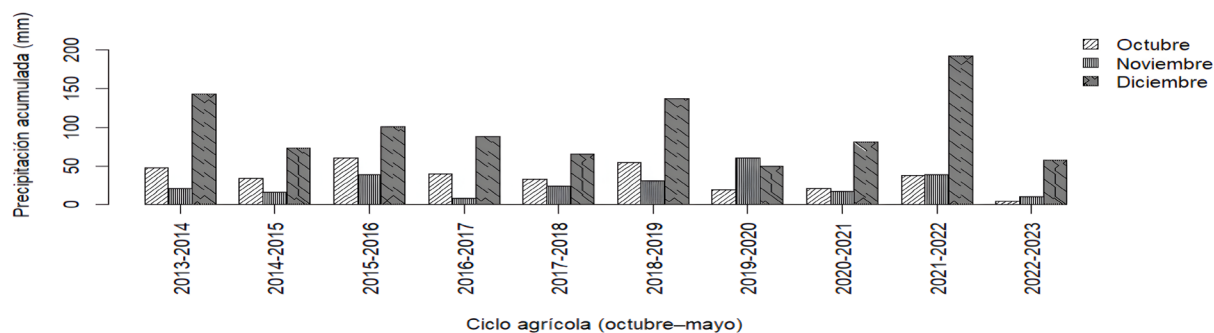
**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos NASA POWER (2013-2023)

**Figura 3.** Dinámica de inicio de temporada de lluvias por campaña agrícola



**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos NASA POWER (2013-2023)

**Figura 4.**  
Precipitación de octubre, noviembre y diciembre por ciclo agrícola (2013-2023)



**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos NASA POWER (2013-2023)

Este patrón pluviométrico explica la tendencia observada hacia siembras tardías, práctica adoptada por los productores para reducir el riesgo de fallas en la emergencia, aunque con implicaciones en la exposición del cultivo a eventos de helada en etapas posteriores, fenómeno asociado a la interacción entre variabilidad climática y decisiones de manejo en sistemas de producción de quinua (Liuhto et al., 2016).

Como se observa en la Figura 5, en términos de disponibilidad hídrica por fases fenológicas, el análisis comparativo entre la precipitación observada y los requerimientos del cultivo muestra diferencias marcadas a lo largo del ciclo. Durante la fase de emergencia, la precipitación registrada fluctúa entre 40 y 90 mm, evidenciando condiciones adecuadas en algunas campañas, pero déficits claros en otras, particularmente en años secos donde los valores descienden a rangos de 40–50 mm, por debajo de los reportados como adecuados para el establecimiento del cultivo (Geerts et al., 2006). En la fase de desarrollo vegetativo, la mayoría de los ciclos presenta valores entre 120 y 180 mm, mientras que en campañas menos favorables los valores se sitúan entre 70 y 90 mm, indicando déficit parcial.

La fase de floración y llenado de grano, es la mejor abastecida, registrando valores entre 150 y 250 mm en la mayoría de los ciclos analizados. En contraste, la fase de maduración presenta una tendencia a la

reducción de la precipitación, con valores entre 40 y 100 mm, siendo frecuentes los déficits por debajo del umbral de 80 mm, especialmente en campañas secas como 2022–2023. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se señala que la quinua presenta requerimientos hídricos relativamente bajos, entre 96 y 262 mm durante su ciclo vegetativo, y que tanto el déficit como el exceso de agua pueden afectar el rendimiento. En particular, niveles de exceso hídrico entre 100 y 200 mm pueden generar pérdidas de entre 30% y 90% de la producción, evidenciando la sensibilidad del cultivo a condiciones de saturación (Conde et al., 2024).

La campaña agrícola 2022–2023 sintetiza este comportamiento, mostrando un patrón de déficit hídrico en fases iniciales ( $\approx 50$  mm en emergencia), condiciones subóptimas en el desarrollo vegetativo (70–80 mm), adecuada disponibilidad durante la floración (160–180 mm) y nuevamente déficit en la maduración ( $< 60$  mm). Este patrón evidencia una distribución no uniforme de la precipitación, caracterizada por una concentración en fases intermedias del ciclo.

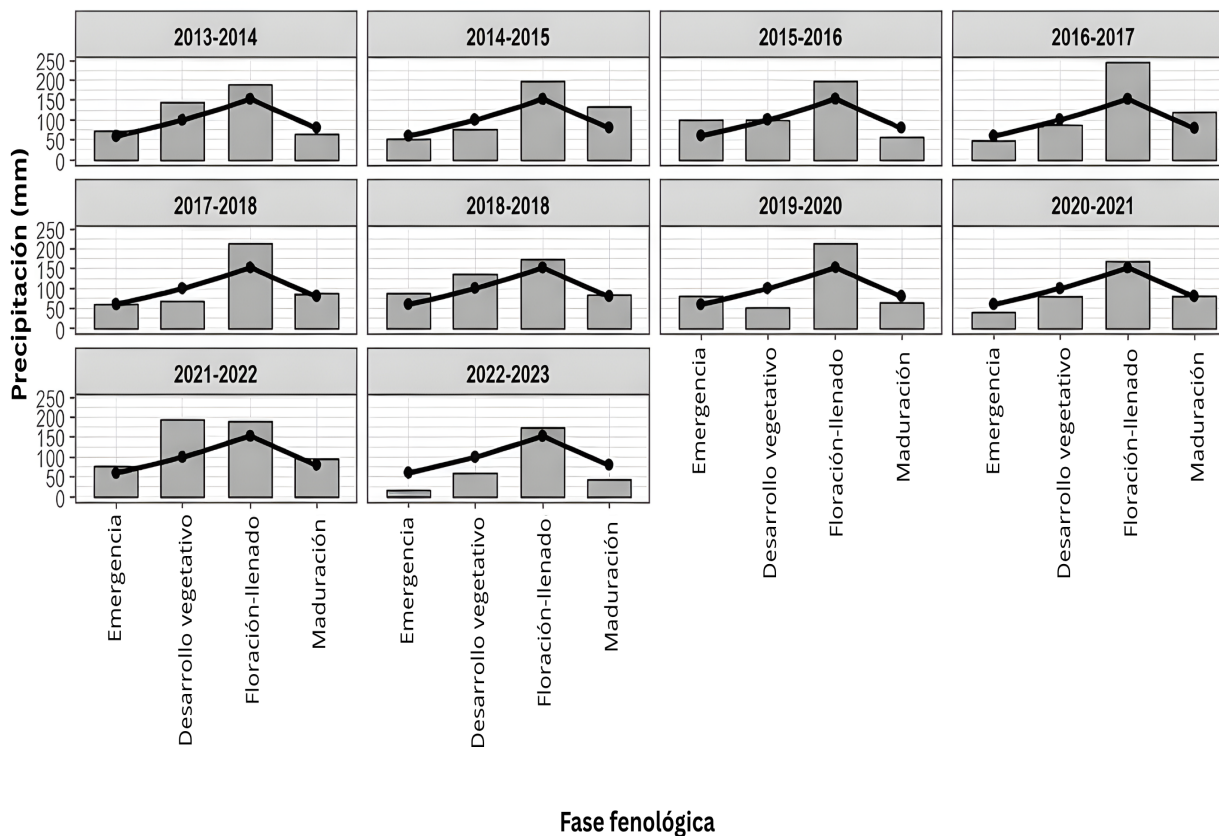
Desde el punto de vista agronómico, estos resultados confirman que la limitación hídrica en la fase de emergencia afecta la uniformidad del establecimiento del cultivo, mientras que el déficit en la fase de maduración compromete el llenado de grano, generando un efecto acumulativo sobre

el rendimiento. Asimismo, el desplazamiento del inicio de lluvias hacia diciembre induce una reconfiguración del calendario agrícola, incrementando la probabilidad de coincidencia entre fases reproductivas y eventos de helada, lo que ha sido documentado en sistemas altoandinos (Geerts et al., 2008).

### Interacción clima – fases fenológicas

La integración de las variables climáticas (temperatura y precipitación) con las fases fenológicas del cultivo de quinua evidencia que la respuesta productiva del sistema está determinada por la sincronía entre las condiciones ambientales y los requerimientos del cultivo a lo largo de su ciclo. Los resultados muestran una diferenciación

**Figura 5.**  
*Precipitación registrada vs requerimiento hídrico mínimo por fase fenológica*



**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos NASA POWER (2013-2023)

clara en la exposición a eventos de helada y en la disponibilidad hídrica entre las distintas fases fenológicas, configurando un patrón de riesgo no homogéneo, tal como ha sido reportado en sistemas agrícolas andinos donde la respuesta del cultivo depende de la interacción entre clima y desarrollo fenológico (Geerts et al., 2006; Del Castillo et al., 2013).

Durante la fase de emergencia, la precipitación presenta alta variabilidad, con valores entre 40 y

90 mm, frente a un requerimiento mínimo de 60 mm, lo que implica condiciones deficitarias en campañas críticas. A esta limitación hídrica se suma la ocurrencia de eventos de helada, con una frecuencia promedio de 9 eventos, lo que incrementa el riesgo de fallas en la germinación y establecimiento del cultivo. Este comportamiento evidencia que el estrés en etapas iniciales no es únicamente hídrico, sino combinado, afectando la uniformidad del sistema productivo, condición

observada en sistemas de producción bajo variabilidad climática (Liuhto et al., 2016).

En la fase de desarrollo vegetativo, las condiciones climáticas tienden a estabilizarse. La precipitación alcanza valores entre 120 y 180 mm, superando el requerimiento mínimo de 100 mm, mientras que la ocurrencia de heladas se reduce a un promedio de 1 evento, configurando una etapa relativamente favorable para el crecimiento del cultivo. De manera similar, en la fase de floración y llenado de grano, la disponibilidad hídrica se mantiene en rangos entre 150 y 250 mm, cumpliendo con el requerimiento mínimo de 150 mm, y la incidencia de heladas es baja, con un promedio de 1.8 eventos, lo que favorece el desarrollo reproductivo.

En contraste, como se evidencia en la Tabla 2, la fase de maduración concentra la mayor exposición a eventos térmicos extremos. La precipitación

disminuye a rangos entre 40 y 100 mm, mientras que la frecuencia de heladas alcanza un promedio de 27 eventos, con un rango entre 17 y 40 eventos, evidenciando una presión climática elevada sobre el cultivo.

Los resultados sintetizados en la Tabla 2 evidencian que la fase de maduración presenta un riesgo térmico estructural, donde la recurrencia de eventos de helada incrementa significativamente la probabilidad de afectación productiva, fenómeno ampliamente reportado en cultivos andinos (Conde et al., 2024; Del Castillo et al., 2013).

La Figura 6 permite visualizar de manera integrada la concentración de eventos de helada en la fase de maduración, en contraste con la baja incidencia en fases intermedias del cultivo. Este patrón confirma que el impacto de las heladas no depende únicamente de su ocurrencia, sino de su

**Tabla 2.**

*Frecuencia de eventos de helada por fase fenológica del cultivo de quinua (2013–2023).*

Fase fenológica	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Emergencia	9	6,06	0	18
Desarrollo vegetativo	1	1,76	0	5
Floración-llenado	1,8	1,81	0	5
Maduración	27	6,32	17	40

**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos NASA POWER (2013-2023)

coincidencia con fases fenológicas críticas, como se ha documentado en cultivos andinos donde las heladas en etapas sensibles comprometen el rendimiento, la calidad y la estabilidad de la producción (IPDRS, 2025).

Desde el punto de vista agronómico, la alta frecuencia de heladas durante la maduración afecta directamente procesos fisiológicos clave como el llenado de grano, la acumulación de biomasa y la calidad del producto final, fenómeno reportado en sistemas productivos del altiplano donde el estrés térmico en fases reproductivas reduce significativamente el rendimiento (Liuhto et al., 2016; Conde et al., 2024). Este comportamiento explica las pérdidas productivas observadas en campo, particularmente en sistemas donde el ciclo

del cultivo se extiende hacia periodos de mayor riesgo térmico.

Asimismo, los resultados evidencian que la interacción clima-fenología está fuertemente condicionada por la dinámica de la precipitación. El retraso en el inicio de las lluvias induce la realización de siembras tardías, desplazando el ciclo del cultivo hacia meses en los que la probabilidad de ocurrencia de heladas es mayor. Este proceso genera una desincronización fenológica, en la cual las fases críticas del cultivo coinciden con condiciones climáticas adversas, amplificando el riesgo productivo, en concordancia con estudios sobre variabilidad climática y rendimiento en sistemas de quinua (Geerts et al., 2008; Liuhto et al., 2016).

Este comportamiento ha sido documentado en sistemas agrícolas del Altiplano, donde la variabilidad climática no solo afecta la magnitud del rendimiento, sino su estabilidad interanual (Geerts et al., 2008; IPDRS, 2025). En este contexto, los resultados del presente estudio confirman que el principal factor de vulnerabilidad del cultivo de quinua no radica en las condiciones promedio, sino en la interacción entre eventos extremos y fases críticas del ciclo.

Desde la perspectiva de la resiliencia socioecológica, estos hallazgos evidencian que la capacidad de adaptación de los sistemas productivos depende de la interacción entre factores biofísicos y sociales, así como de la capacidad de los productores para ajustar sus prácticas frente a perturbaciones climáticas (Casimiro-Rodríguez et al., 2020; Borràs-Escayola et al., 2021). En este contexto, el ajuste de fechas de siembra emerge como una estrategia clave para reducir la coincidencia entre la fase de maduración y los periodos de mayor frecuencia de

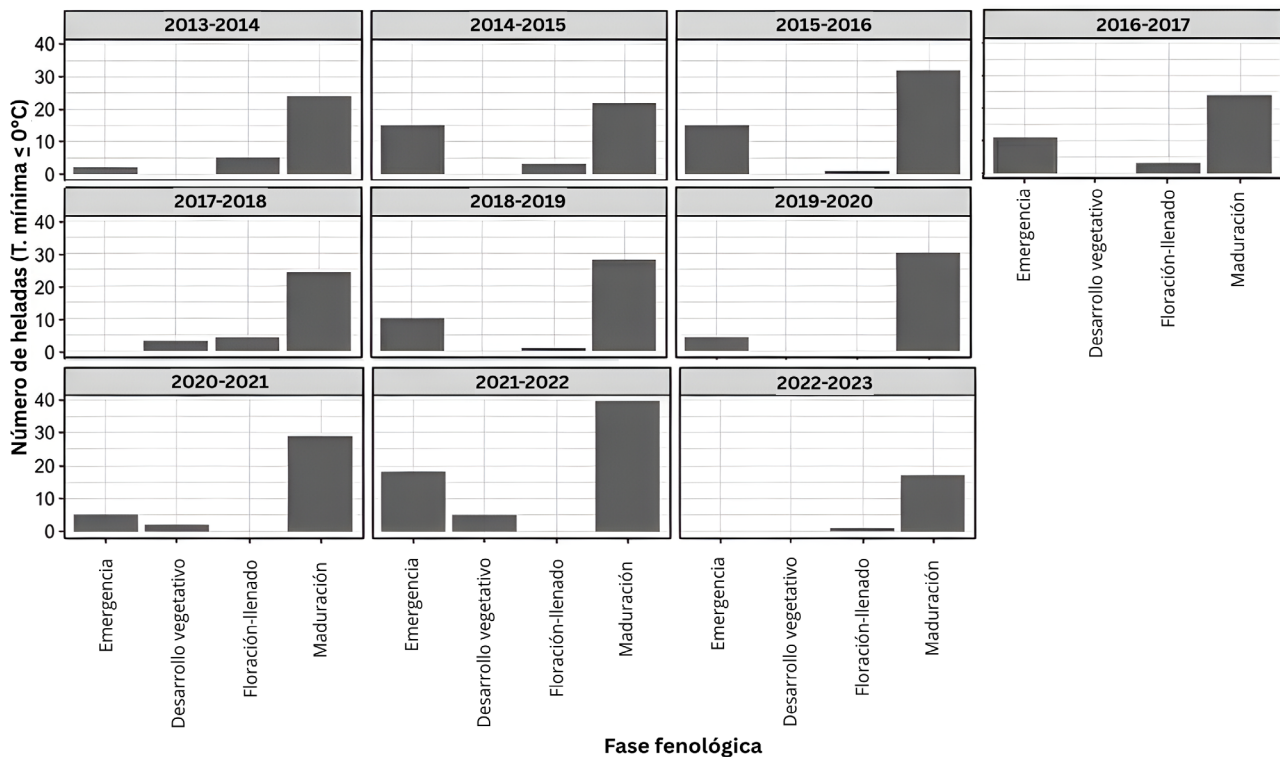
heladas, disminuyendo así la exposición al riesgo.

### Efecto del daño en el rendimiento del cultivo de quinua

El análisis del rendimiento del cultivo de quinua, evaluado a partir del peso de panoja, evidencia una relación inversa entre el nivel de daño total y la productividad, reflejando el efecto combinado de factores bióticos y abióticos sobre el sistema productivo, como se muestra en la Figura 7. Los resultados muestran una alta variabilidad en la respuesta del cultivo, particularmente en niveles bajos y moderados de daño, lo que indica que el rendimiento no está determinado exclusivamente por el estrés, sino por la interacción con otros factores del sistema, condición ampliamente reportada en sistemas agrícolas bajo variabilidad climática (Liuhto et al., 2016).

En condiciones de bajo daño (0–40%), el rendimiento presenta una amplia dispersión, con valores que

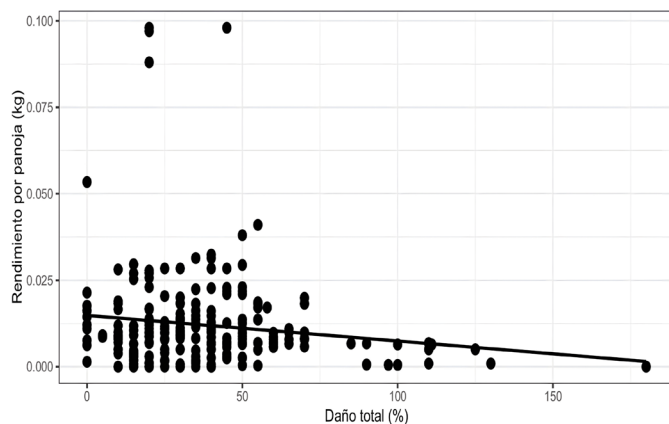
**Figura 6.** Distribución de eventos de helada por fase fenológica del cultivo. Ciclos agrícolas 2013–2023.



**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos NASA POWER (2013-2023)

**Figura 7.**

Relación entre daño total (%) y rendimiento por panoja del cultivo de quinua. 2022-2023



**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos de campo (2022-2023)

oscilan entre 0.005 y 0.10 kg por panoja, lo que evidencia que el cultivo puede expresar su potencial productivo. Sin embargo, esta variabilidad sugiere la influencia de factores adicionales asociados al sistema productivo.

En niveles intermedios de daño (40–80%), los rendimientos tienden a concentrarse en valores más bajos, principalmente entre 0.005 y 0.03 kg, evidenciando una disminución progresiva de la capacidad productiva. En condiciones de alto daño (>80%), el rendimiento se reduce drásticamente, alcanzando valores cercanos a 0 kg, lo que evidencia un colapso productivo, comportamiento consistente con estudios que reportan reducciones significativas del rendimiento bajo condiciones de estrés combinado en el cultivo de quinua (Conde et al., 2024).

No obstante, se identificaron casos particulares en los que, bajo niveles intermedios de daño (30–50%), se registraron rendimientos relativamente altos (0.09–0.10 kg por panoja), lo que sugiere la presencia de mecanismos de amortiguamiento dentro del sistema productivo. Este comportamiento indica que el efecto del daño no es uniforme, sino que puede ser modulado por factores propios del sistema, lo que coincide con enfoques que destacan la capacidad de los sistemas agrícolas para

mantener niveles de producción bajo condiciones de perturbación (Casimiro-Rodríguez et al., 2020).

En conjunto, los resultados evidencian que el impacto del daño sobre el rendimiento no es estrictamente lineal, sino que presenta una alta variabilidad, particularmente en niveles bajos e intermedios. Este comportamiento sugiere que el sistema productivo de quinua posee cierta capacidad de respuesta frente a condiciones adversas, lo que explica la presencia de rendimientos relativamente altos incluso bajo niveles moderados de estrés, característica asociada a sistemas con mayor resiliencia socioecológica (Borrás-Escayola et al., 2021).

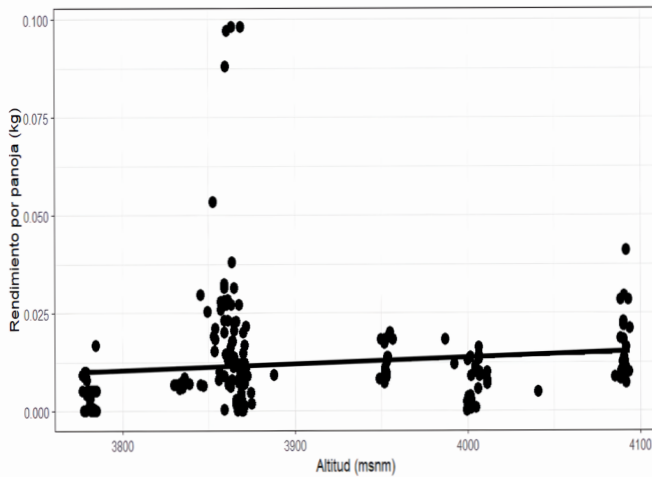
Asimismo, la reducción drástica del rendimiento en niveles elevados de daño confirma la existencia de umbrales críticos a partir de los cuales el sistema pierde su funcionalidad. En este contexto, el daño constituye un factor determinante en la productividad, aunque su efecto depende de la interacción con otros componentes del sistema productivo, tal como ha sido documentado en sistemas agrícolas del Altiplano donde la variabilidad climática influye en la estabilidad productiva (Geerts et al., 2008).

### Influencia de factores del sistema productivo en el rendimiento

El análisis del sistema productivo evidencia que el rendimiento del cultivo de quinua no depende exclusivamente del nivel de daño, sino de la interacción entre factores ambientales, biológicos y de manejo que modulan la respuesta del cultivo frente a condiciones de estrés, comportamiento característico de sistemas agrícolas complejos en contextos de variabilidad climática (Liuhto et al., 2016).

Uno de los factores relevantes es la altitud. Como se observa en la Figura 8, se identifica una tendencia positiva con el rendimiento; sin embargo, esta relación presenta una alta dispersión, lo que indica un efecto débil y condicionado por otros factores. Este comportamiento sugiere que la altitud puede

**Figura 8.**  
*Relación entre altitud y rendimiento por panoja del cultivo de quinua*

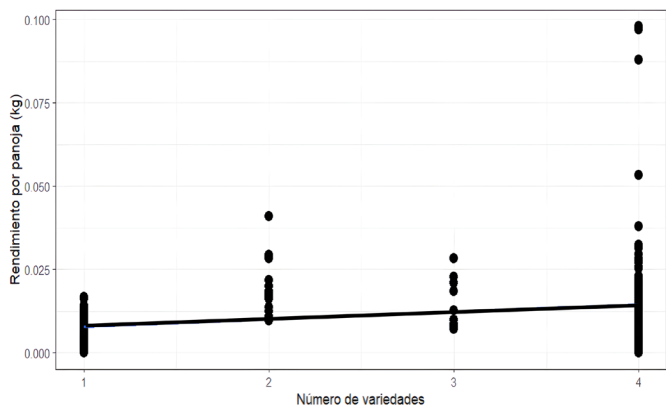


**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos de campo (2022-2023)

influir indirectamente en la productividad, a través de la variación en condiciones microclimáticas y en la incidencia de factores de estrés, tal como ha sido reportado en sistemas productivos del Altiplano (Geerts et al., 2008).

Por otra parte, la diversidad varietal emerge como un factor clave en la dinámica del sistema productivo. Como se observa en la Figura 9, se identifica una tendencia positiva entre el número de variedades presentes en las parcelas y el rendimiento máximo alcanzado, aunque con alta dispersión de los datos.

**Figura 9.**  
*Relación entre número de variedades y rendimiento por panojo y por parcela.*



**Nota.** Fuente: Elaborado con base a datos de campo (2022-2023)

Este comportamiento indica que la diversificación no necesariamente incrementa el rendimiento promedio, pero sí amplía la capacidad del sistema para responder frente a condiciones adversas, lo que coincide con enfoques que destacan el rol de la diversidad como mecanismo de estabilidad productiva (Casimiro-Rodríguez et al., 2020).

Asimismo, el manejo del sistema productivo, particularmente prácticas como el uso de suelos en descanso (puruma) y la implementación de estrategias de conservación de humedad, contribuye a mejorar la respuesta del cultivo frente a condiciones de estrés, evidenciando la importancia del manejo agronómico en la estabilidad productiva bajo condiciones de variabilidad climática (Conde et al., 2024).

Los resultados confirman que el rendimiento del cultivo de quinua debe ser entendido como el resultado de un sistema complejo, en el cual interactúan factores de estrés (daño biótico y abiótico), condiciones ambientales (altitud) y mecanismos de regulación asociados al manejo y la diversidad biológica.

La débil relación entre altitud y rendimiento evidencia que los factores ambientales por sí solos no explican la productividad del sistema, sino que su efecto está mediado por la capacidad del sistema productivo para adaptarse a dichas condiciones. En este contexto, la diversidad varietal emerge como un componente central de resiliencia, al permitir respuestas diferenciadas frente a condiciones adversas y reducir el riesgo de pérdidas productivas (Borràs-Escayola et al., 2021; Samper, 2020).

Este comportamiento es consistente con enfoques agroecológicos que destacan la importancia de la diversificación como estrategia para mejorar la estabilidad de los sistemas agrícolas frente a la variabilidad climática (Altieri y Nicholls, 2013). Asimismo, se ha evidenciado que la eficiencia del sistema no se traduce necesariamente en mayores niveles de productividad, sino que depende de la diversificación y del diseño de la biodiversidad

funcional, particularmente en el uso de nutrientes, agua y energía (Casimiro-Rodríguez et al., 2020)

En conjunto, los resultados evidencian que la resiliencia del sistema productivo no depende únicamente de la reducción del daño, sino de la capacidad del sistema para amortiguar sus efectos, a través de la diversificación y el manejo adaptativo, lo que constituye un elemento clave para la sostenibilidad de los sistemas de producción de quinua en el Altiplano (Casimiro-Rodríguez et al., 2020).

### **Resiliencia socioecológica según tipo de familias**

El análisis de la resiliencia socioecológica en los sistemas productivos de quinua evidencia diferencias significativas en función del ciclo de vida familiar, configurando un gradiente estructurado de capacidad de respuesta frente a eventos climáticos extremos. Los resultados muestran que la resiliencia no es homogénea, sino que depende de la interacción entre factores sociales, productivos y ambientales, los cuales condicionan la capacidad de los sistemas para absorber, adaptarse y transformarse frente a perturbaciones, en concordancia con el enfoque de resiliencia socioecológica (Folke, 2006; Casimiro-Rodríguez et al., 2020).

#### *Diferencias de resiliencia según ciclo de vida familiar*

Los resultados evidencian que las familias en consolidación presentan los niveles más altos de resiliencia socioecológica, con valores medios a altos en los ámbitos social, económico-productivo y ambiental. En contraste, las familias en formación muestran niveles bajos de resiliencia, mientras que las familias en reestructuración presentan una resiliencia intermedia, pero con tendencia al deterioro.

Esta diferenciación responde a la disponibilidad de recursos, experiencia productiva y grado de articulación social, factores que condicionan la capacidad adaptativa de los sistemas productivos

familiares frente a perturbaciones climáticas, en concordancia con el enfoque de resiliencia socioecológica (Folke, 2006; Casimiro-Rodríguez et al., 2020). Las familias en consolidación cuentan con mayor acceso a tierra (2–6 ha), mejor manejo agronómico y mayor integración en redes organizativas, lo que les permite enfrentar de manera más efectiva la variabilidad climática.

Por el contrario, las familias en formación presentan limitaciones estructurales como superficies reducidas ( $\leq 2$  ha), baja diversificación productiva y débil inserción organizativa, lo que incrementa su vulnerabilidad. Este comportamiento evidencia que la resiliencia está asociada a la disponibilidad de activos productivos y sociales, así como a la capacidad de articulación dentro de sistemas de agricultura familiar (Samper, 2020).

Las familias en reestructuración, aunque conservan ciertos activos productivos, enfrentan procesos de fragmentación familiar y debilitamiento de redes sociales, lo que reduce su capacidad adaptativa. Este patrón evidencia que la resiliencia no depende únicamente de la disponibilidad de recursos, sino de la capacidad del sistema para mantener su funcionalidad productiva y social en el tiempo, especialmente bajo condiciones de variabilidad climática (Liuhto et al., 2016).

#### *Factores sociales determinantes de la resiliencia*

El análisis del ámbito social evidencia que la resiliencia está fuertemente asociada al nivel de organización y a la participación en redes comunitarias, más que a variables individuales como la educación. Las familias en consolidación presentan mayores niveles de participación organizativa ( $\approx 3.3$ ), percepción de beneficios ( $\approx 3.5$ ) y prácticas de reciprocidad ( $\approx 3.2$ ), lo que refleja un capital social consolidado.

En contraste, las familias en formación presentan bajos niveles de participación ( $\approx 1.8$ ), escasa percepción de beneficios ( $\approx 1.3$ ) y limitada reciprocidad ( $\approx 1.6$ ), evidenciando una débil

articulación social. Las familias en reestructuración presentan valores igualmente bajos, asociados a procesos de envejecimiento y desvinculación comunitaria.

Estos resultados indican que la resiliencia social depende de la capacidad de los sistemas para construir redes de apoyo y mecanismos de acción colectiva, los cuales son fundamentales para enfrentar eventos climáticos extremos. Este hallazgo es consistente con lo planteado por Adger (2003), quien destaca que el capital social y la cohesión comunitaria son determinantes clave en la capacidad adaptativa de los sistemas socioecológicos. Asimismo, Pretty (2003) señala que la organización social mejora la gestión de recursos y reduce la vulnerabilidad frente a perturbaciones.

En este contexto, los resultados evidencian que la resiliencia social en sistemas productivos de quinua no se sustenta únicamente en capacidades individuales, sino en la fortaleza de las relaciones sociales y en el grado de articulación organizativa, lo que coincide con estudios en agricultura familiar que destacan el rol de la acción colectiva en la gestión de riesgos y en la adaptación frente a la variabilidad climática (Samper, 2020; Casimiro-Rodríguez et al., 2020).

#### *Factores productivos y ambientales en la resiliencia*

En el ámbito productivo y ambiental, la resiliencia está asociada a la disponibilidad y gestión de recursos, particularmente el acceso a tierra, la diversificación productiva y el manejo agroecológico. Las familias en consolidación presentan mayores niveles de resiliencia ambiental ( $\approx 3.8$ ), con prácticas como rotación de cultivos, uso de abonos orgánicos y estrategias de manejo de agua, lo que contribuye a mejorar la estabilidad productiva, bajo condiciones de variabilidad climática, tal como se ha observado en sistemas agrícolas del Altiplano (Conde et al., 2024).

Por el contrario, las familias en formación presentan los niveles más bajos ( $\approx 2.2$ ), caracterizados por

superficies reducidas, baja diversidad varietal y dependencia de condiciones de secano, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a sequías y heladas. Las familias en reestructuración presentan una resiliencia intermedia ( $\approx 2.9$ ), aunque con tendencia a la disminución debido a la pérdida de prácticas de manejo y conocimiento productivo, lo que limita su capacidad de respuesta frente a perturbaciones.

La diversidad varietal y la diversificación productiva emergen como factores clave de resiliencia, al permitir una respuesta diferenciada frente a condiciones climáticas adversas. Este comportamiento coincide con lo reportado por Altieri et al. (2015), quienes destacan que la agrobiodiversidad incrementa la estabilidad y capacidad adaptativa de los agroecosistemas. De igual manera, Lin (2011) señala que los sistemas diversificados presentan mayor capacidad para amortiguar el impacto de eventos extremos. Estos resultados son consistentes con estudios aplicados en sistemas productivos, donde la diversificación contribuye a mejorar la resiliencia frente a la variabilidad climática (Borràs-Escayola et al., 2021; Casimiro-Rodríguez et al., 2020).

Asimismo, el acceso a tierra constituye un factor estructural de resiliencia, ya que permite implementar prácticas como rotación, descanso de suelos y diversificación, reduciendo la presión sobre los recursos naturales y mejorando la sostenibilidad del sistema productivo. En este sentido, la disponibilidad de recursos no solo influye en la productividad, sino en la capacidad del sistema para reorganizarse y mantener su funcionalidad frente a eventos extremos, en concordancia con enfoques de resiliencia socioecológica aplicados a sistemas agrícolas (Folke, 2006).

#### *Síntesis integradora de la resiliencia socioecológica*

En conjunto, los resultados evidencian que la resiliencia socioecológica es un atributo emergente del sistema productivo, resultado de la interacción

dinámica entre factores sociales, productivos y ambientales. La mayor resiliencia observada en las familias en consolidación explica, en parte, la menor afectación productiva frente a eventos climáticos, mientras que la baja resiliencia en familias en formación y reestructuración se traduce en una mayor vulnerabilidad, evidenciando que la respuesta del sistema está condicionada por su estructura interna y capacidad de organización (Casimiro-Rodríguez et al., 2020; Borràs-Escayola et al., 2021).

Estos hallazgos confirman que el impacto de los eventos climáticos extremos sobre la producción de quinua no depende únicamente de la intensidad de dichos eventos, sino de la capacidad del sistema productivo para amortiguar sus efectos. En este sentido, la resiliencia actúa como un factor modulador del riesgo climático, determinando la magnitud de las pérdidas productivas, tal como ha sido evidenciado en sistemas agrícolas del Altiplano donde la variabilidad climática interactúa con factores socioeconómicos y productivos (Geerts et al., 2008; Liuhto et al., 2016).

Este enfoque es consistente con el marco conceptual de resiliencia socioecológica planteado por Folke (2006), quien señala que la capacidad de adaptación y transformación de los sistemas depende de su organización interna y de la gestión de sus recursos. Asimismo, los resultados refuerzan la importancia del capital social y la acción colectiva en la capacidad adaptativa de los sistemas productivos (Adger, 2003; Pretty, 2003), así como del rol de la diversificación y el manejo agroecológico en la estabilidad frente a perturbaciones (Altieri et al., 2015; Lin, 2011).

En el contexto del Altiplano boliviano, estos resultados evidencian que el fortalecimiento de la resiliencia socioecológica requiere estrategias integrales orientadas a consolidar la organización social, promover la diversificación productiva y mejorar el manejo sostenible de los recursos. En este sentido, el estudio aporta evidencia empírica que demuestra que la resiliencia no es una condición

estática, sino un proceso dinámico que determina la capacidad del sistema productivo para sostener su funcionalidad frente a escenarios de creciente variabilidad climática.

## CONCLUSIONES

El presente estudio permitió analizar la relación entre los eventos climáticos extremos y la resiliencia socioecológica en sistemas productivos de quinua en el municipio de Sica Sica, evidenciando que dicha relación está mediada por la interacción entre variables climáticas, productivas y del sistema.

Se identificó que los eventos climáticos extremos, particularmente la sequía en la fase de establecimiento y las heladas en la fase de maduración, constituyen los principales factores que afectan el rendimiento del cultivo. La variabilidad en la precipitación, caracterizada por retrasos de hasta 60 días en el inicio de lluvias y déficits hídricos en fases críticas, limita el establecimiento del cultivo, mientras que la alta frecuencia de heladas durante la maduración incrementa el riesgo de pérdidas productivas.

Sin embargo, los resultados evidencian que el efecto de estos eventos no es uniforme, sino que depende de su interacción con las condiciones del sistema productivo. La sincronización entre las fases fenológicas del cultivo y las condiciones climáticas, junto con factores como la diversidad varietal, el manejo agronómico y el acceso a recursos productivos, determina la magnitud del impacto sobre el rendimiento.

En este contexto, la resiliencia socioecológica emerge como un factor clave que regula dicha relación, al influir en la capacidad del sistema para amortiguar los efectos de los eventos climáticos. Los sistemas productivos con mayor diversificación, mejor manejo y mayor disponibilidad de recursos presentan una menor afectación frente a condiciones adversas, evidenciando que la respuesta del cultivo está condicionada por la estructura y funcionamiento del sistema.

Asimismo, se comprobó que la resiliencia socioecológica presenta diferencias significativas según el tipo de familia. Las familias en consolidación muestran mayores niveles de resiliencia, asociados a un mejor acceso a tierra, mayor diversificación productiva y una mayor articulación organizativa, lo que les permite enfrentar de manera más efectiva la variabilidad climática. En contraste, las familias en formación y en reestructuración presentan mayores niveles de vulnerabilidad, debido a limitaciones en recursos productivos, debilidad en redes sociales y menor capacidad de gestión.

En síntesis, el estudio demuestra que la relación entre eventos climáticos extremos y producción de quinua no es directa, sino que está condicionada por la resiliencia socioecológica del sistema, la cual depende de la interacción entre factores sociales, productivos y ambientales. Esta interacción determina la capacidad del sistema para responder frente a perturbaciones y, en consecuencia, la estabilidad productiva.

Desde el punto de vista de políticas públicas, estos resultados evidencian la necesidad de implementar estrategias diferenciadas según el tipo de familia, orientadas a fortalecer la diversificación productiva, el acceso a recursos y la articulación organizativa, como base para mejorar la resiliencia de los sistemas productivos frente al cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Asociación de Productores de Quinua del municipio de Sica Sica por su valiosa colaboración, apertura y disposición durante el desarrollo del trabajo de campo, así como por compartir sus conocimientos y experiencias en la producción del cultivo.

Asimismo, se reconoce y agradece a la ONG PROSUCO por el apoyo brindado en el marco de la pasantía que permitió la ejecución del presente estudio, facilitando el acceso a información, acompañamiento técnico y articulación territorial.

## BIBLIOGRAFÍA

Alavi, G; Diels, J; Willems, P; García, M. 2015. Simulación de la producción de quinua en el Altiplano boliviano con el modelo AquaCrop con escenarios futuros generados por LARS-WG y QPM. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales* 2(1): 7–18. Disponible en [http://www.scielo.org.bo/pdf/riarn/v2n1/v2n1\\_a03.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/riarn/v2n1/v2n1_a03.pdf)

Adger, WN. 2003. Social capital, collective action, and adaptation to climate change. *Economic Geography* 79(4): 387–404. Disponible en <https://doi.org/10.1111/j.1944-8287.2003.tb00220.x>

Altieri, MA; Nicholls, CI. 2013. Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología* 8(1): 7–20. Disponible en <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182921>

Altieri, MA; Nicholls, CI; Henao, A; Lana, MA. 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 869–890. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>

Bazile, D; Jacobsen, SE; Verniau, A. 2016. The global expansion of quinoa: trends and limits. *Frontiers in Plant Science* 7: 622. Disponible en <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00622>

Benique Olivera, E.; Ojeda Tito, A. 2024. Impacto del cambio climático en la producción y rendimiento de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) en la provincia de Azángaro, región del Altiplano-Puno, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 26(3): 154–160. Disponible en: <https://doi.org/10.18271/ria.2024.618>

Borràs-Escayola, M.; Casimiro-Rodríguez, L.; Suárez-Hernández, J. 2021. Evaluación de la resiliencia socioecológica en seis fincas de la provincia de Sancti Spiritus, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 44: 1–12. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269169781026>

Casimiro-Rodríguez, L; Casimiro-González, JA; Suárez-Hernández, J; Martín-Martín, GJ; Navarro-Boulardier, M; Rodríguez-Delgado, I. 2020. Evaluación de la resiliencia socioecológica en escenarios de agricultura

familiar en cinco provincias de Cuba. *Pastos y Forrajes* 43(4): 304–314. Disponible en [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-03942020000400304](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942020000400304)

Conde Viscarra, E; Garcia-Apaza, E. 2024. Análisis de la vulnerabilidad en el rendimiento del cultivo de quinua frente a la variabilidad climática en el Altiplano boliviano. *Journal of the Selva Andina Biosphere* 12(2): 54–67. Disponible en <http://www.scielo.org.bo/pdf/jsab/v12n2/2308-3859-jsab-12-02-54.pdf>

Del Castillo, C.; Winkel, T.; Nina Laura, J.P.; Mamani Alcón, C.; Rocheteau, A. 2013. La heterogeneidad de las plantas dentro de los cultivos de quinua: una protección frente a las heladas nocturnas. En: Del Castillo, C.; Bosque, H. (eds.). *La quinua y la UMSA: avances de investigaciones científicas*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Thierry-Winkel/publication/273059134\\_La\\_heterogeneidad\\_de\\_las\\_plantas\\_dentro\\_de\\_los\\_cultivos\\_de\\_quinua\\_una\\_proteccion\\_frente\\_a\\_las\\_heladas\\_nocturnas/links/54f5ccaf0cf21d8b8a5b7fdd/La-heterogeneidad-de-las-plantas-dentro-de-los-cultivos-de-quinua-una-proteccion-frente-a-las-heladas-nocturnas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Thierry-Winkel/publication/273059134_La_heterogeneidad_de_las_plantas_dentro_de_los_cultivos_de_quinua_una_proteccion_frente_a_las_heladas_nocturnas/links/54f5ccaf0cf21d8b8a5b7fdd/La-heterogeneidad-de-las-plantas-dentro-de-los-cultivos-de-quinua-una-proteccion-frente-a-las-heladas-nocturnas.pdf)

Folke, C. 2006. Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16(3): 253–267. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>

Geerts, S.; Raes, D.; García, M.; Del Castillo, C.; Buytaert, W. 2006. Agro-climatic suitability mapping for crop production in the Bolivian Altiplano: A case study for quinoa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(3–4): 399–412. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.08.018>

Geerts, S; Raes, D; Garcia, M; Mendoza, J; Huanca, R; Mamani, J; Condori, O; Mamani, A; Morales, B; Miranda, R et al. 2008. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa in the southern Bolivian Altiplano? *Agricultural Water Management* 95(8): 909–917. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.02.004>

IPDRS (Instituto para el Desarrollo Rural de Sudamérica). 2025. *Retos y propuestas: el sector quinuero andino frente a la variabilidad climática*. La Paz, Bolivia (en

línea). Consultado 15 abr. 2026. Disponible en: <https://ipdrs.org/wp-content/uploads/2025/11/IPDRS-Libro-Retos-y-propuestas-del-sector-quinuero-andino.pdf>

Jacobsen, S.E. 2012. La producción de quinua en el sur de Bolivia: del éxito económico al desastre ambiental. *LEISA Revista de Agroecología*, 28 (4), 20. Disponible en: <https://leisa-al.org/web/revista/volumen-28-numero-04/la-produccion-de-quinua-en-el-sur-de-bolivia-del-exito-economico-al-desas>

Lin, BB. 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience* 61(3): 183–193. Disponible en <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>

Liuhto, M.; Mercado, G.; Aurquipa, R. 2016. El cambio climático sobre la producción de quinua en el Altiplano Boliviano. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 3(2), p.166-178, 2016. Disponible en: [http://www.scielo.org.bo/pdf/riarn/v3n2/v3n2\\_a06.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/riarn/v3n2/v3n2_a06.pdf)

Pretty, J. 2003. Social capital and the collective management of resources. *Science* 302(5652): 1912–1914. Disponible en <https://doi.org/10.1126/science.1090847>

Samper Kutschbach, M. 2020. Contribuciones de los agroecosistemas campesinos y sistemas territoriales de agricultura familiar al desarrollo de los territorios rurales y a la seguridad alimentaria: conceptos medulares y cuestiones actuales. *Enfoque Rural* 1(1): 58–80. Disponible en <https://enfoquerural.uaemex.mx/article/view/15472>

Artículo recibido en: 17 de abril del 2026

Aceptado en: 26 de abril del 2026