ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Aliaga Lordemann, Javier; Caballero Caballero, Adriana Beatriz

Working Paper

Evaluación del rendimiento del cultivo de la quinua ante estresores agroclimáticos con el modelo NL-CROP

Development Research Working Paper Series, No. 11/2024

Provided in Cooperation with:
Institute for Advanced Development Studies (INESAD), La Paz

Suggested Citation: Aliaga Lordemann, Javier; Caballero Caballero, Adriana Beatriz (2024) : Evaluación del rendimiento del cultivo de la quinua ante estresores agroclimáticos con el modelo NL-CROP, Development Research Working Paper Series, No. 11/2024, Institute for Advanced Development Studies (INESAD), La Paz

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/302255

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo

Evaluación del rendimiento del cultivo de la quinua ante estresores agroclimáticos con el modelo NL-CROP

Por:

Javier Aliaga Lordemann
Adriana Beatriz Caballero Caballero

Serie Documentos de Trabajo sobre Desarrollo

No. 11/2024

La Paz - Agosto 2024

Las opiniones expresadas en este documento pertenecen al (los) autor(es) y no necesariamente reflejan la posición oficial de las instituciones auspiciadoras ni de la Fundación INESAD (Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo). Los derechos de autor pertenecen al autor y/o a las instituciones auspiciadoras, si las hubiera. El documento solamente puede ser descargado para uso personal.

Evaluación del rendimiento del cultivo de la quinua ante estresores agroclimáticos con el modelo NL-CROP*

Javier Aliaga Lordemann**
Adriana Beatriz Caballero Caballero***

Resumen

Los modelos de cultivo son una herramienta clave para desarrollar estrategias de adaptación en el sector agrícola. Con su evolución en el tiempo, han ido incorporando nuevos enfoques y herramientas. Este documento desarrolla un modelo no lineal para simular el desempeño de los cultivos con un enfoque innovador que incorpora funciones no lineales, lo que permite una representación más realista de los mecanismos agrícolas. Con un enfoque en la quinua, usamos datos experimentales y de campo de las zonas del altiplano boliviano para evaluar los niveles de producción bajo diferentes escenarios agroclimáticos que incluyan múltiples estresores. El estudio revela que las variedades de quinua adaptadas a las condiciones locales de las zonas de estudio muestran un mejor desempeño que las variedades convencionales. Esto subraya la importancia de contar con material genéticamente adaptado para enfrentar los impactos del cambio climático. Adicionalmente, los resultados muestran que el modelo NL-CROP es capaz de reproducir de manera satisfactoria los patrones observados de crecimiento y producción de la quinua, y que el modelo también presenta una buena capacidad predictiva, considerando los efectos del estrés hídrico y el estrés térmico. Esto convierte al modelo en una herramienta clave para evaluar el impacto del cambio climático y, además, anticiparse a los desafíos y oportunidades que puedan presentarse para la quinua en el futuro, brindando así una asistencia valiosa para la planificación agrícola.

Código JEL: Q01, Q10, Q54, O13.

Palabras clave: Quinua, rendimiento de cultivo, estresores climáticos, modelo de cultivo, cambio climático, gestión agrícola.

* La investigación forma parte del proyecto *Creating Indigenous Women's Green Jobs Under Low-Carbon COVID-19 Responses and Recovery in the Bolivian Quinoa Sector*, actualmente desarrollado por la Fundación INESAD bajo el patrocinio del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC), Canadá. Los posibles errores son de entera responsabilidad de sus autores.

** Investigador asociado de INESAD (jaliaga@inesad.edu.bo).

*** Investigadora *junior* de INESAD (acaballero@inesad.edu.bo).

Abstract

Crop models are a key tool to develop adaptation strategies in the agriculture sector. With their evolution over time, crop models have been incorporating new approaches and tools. This paper proposes an innovative non-linear methodology to simulate crop's performance including non-linear functions that approach a more realistic representation of agricultural systems. Focused on the quinoa grain, we use experimental and field data from highland zones of Bolivia to evaluate different production outcomes under various climatic and agricultural management scenarios, including multiple agroclimatic stressors. The study reveals that quinoa varieties adapted to local conditions in the study areas have a better performance than the conventional varieties. This underscores the importance of having genetically adapted material to address the impacts of climate change. Additionally, the results show that the NL-CROP model has a satisfactory ability to both reproduce and predict observed quinoa patterns, considering water and heat stress impacts. This makes the afore mentioned model a valuable tool for assessing the impacts of climate change and anticipating the challenges and opportunities that quinoa production will face in the future, providing valuable assistance for agricultural planning.

JEL Code: Q01, Q10, Q54, O13.

Key words: Quinoa, crop yield, climatic stressors, crop model, climate change, agricultural management

1. Introducción

Los sistemas agrícolas a nivel mundial enfrentan crecientes desafíos en la producción de cultivos debido a los efectos del cambio climático, la variabilidad climática y las prácticas de manejo inadecuadas. Fenómenos como el estrés hídrico, el estrés térmico y la mayor incidencia de plagas y enfermedades están afectando severamente los rendimientos de los principales cultivos a escala global (Lobell y Gourdji, 2012; Tao *et al*., 2018).

En este documento presentamos el desarrollo conceptual del modelo no lineal NL-CROP (*Non-Linear Crop Optimization Model*), que adopta un enfoque innovador y holístico para simular los procesos que determinan el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. A diferencia de los modelos lineales tradicionales, NL-CROP incorpora funciones no lineales que capturan la complejidad inherente a los sistemas agrícolas, permitiendo una representación más realista de los mecanismos subyacentes. Una de las principales fortalezas del NL-CROP es su capacidad para simular los efectos sinérgicos y antagónicos del estrés hídrico, el estrés térmico y la incidencia de plagas.

El presente trabajo aplica el NL-CROP para evaluar el rendimiento de la quinua en Bolivia ante diferentes escenarios de estrés climático y de manejo agrícola. Bolivia, país conocido por producir quinua (uno de los cultivos andinos más importantes), enfrenta importantes retos en cuanto a la sostenibilidad de sus sistemas agrícolas. Por ello, se consideró relevante realizar simulaciones con el NL-CROP y con validaciones a nivel experimental y de campo, para así analizar la capacidad del modelo para reproducir los patrones observados de crecimiento y producción.

Los resultados obtenidos muestran que el NL-CROP es capaz de simular de manera satisfactoria los rendimientos de la quinua bajo distintas condiciones de estrés hídrico, estrés térmico, cambio climático y huella de carbono. Esto se debe a la inclusión de funciones no lineales que representan, de forma más realista, los complejos mecanismos fisiológicos que determinan la respuesta de la quinua a los factores ambientales y de manejo. Asimismo, el modelo demuestra una buena capacidad predictiva, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para evaluar los impactos del cambio climático en la producción de la quinua a nivel local y regional. Mediante el acoplamiento del NL-CROP con escenarios climáticos futuros, es posible anticipar los desafíos y las oportunidades que enfrentará este cultivo andino bajo condiciones ambientales cambiantes.

A continuación, se presenta una revisión de la literatura realizada acerca de los diversos modelos de rendimiento del cultivo. Posteriormente, en la sección 3 se contextualizan la variabilidad climática y su efecto sobre la producción agrícola. En la sección 4 se desarrolla la propuesta metodológica NL-CROP, que es aplicada en la sección 5, donde se muestran los resultados obtenidos para las zonas que son objeto de este estudio. Por último, se presentan las conclusiones del análisis y se cierra el documento con un glosario de términos utilizados en su desarrollo.

2. Revisión de la literatura

En esta sección presentamos una revisión de la literatura acerca de los modelos utilizados para simular los rendimientos de los cultivos agrícolas ante diferentes estresores (*i.e.*, el cambio climático, la variabilidad climática, el estrés hídrico, el estrés térmico y las buenas prácticas agrícolas). Los modelos de simulación de cultivos han sido ampliamente utilizados para evaluar el impacto de los cambios ambientales y de las prácticas de manejo sobre la producción agrícola.

Uno de los primeros modelos ampliamente utilizados ha sido el APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*), que ha evolucionado hasta influir en una nueva generación de simuladores de sistemas agrícolas (Holzworth *et al*., 2014). Este modelo integra diversos componentes (cultivos, pastizales, ganado y recursos hídricos) para simular el crecimiento y el rendimiento de los cultivos bajo diferentes condiciones.

Otro modelo ampliamente utilizado es el DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), un sistema de modelado de sistemas de cultivos que ha sido fundamental para evaluar los efectos del cambio climático en la

producción agrícola (Jones *et al.*, 2003). Este modelo integra información sobre cultivos, suelos, clima y manejo para simular el crecimiento y el rendimiento de los cultivos.

Por su parte, el modelo CropSyst también ha sido utilizado para evaluar los efectos del cambio climático y las prácticas de manejo en el rendimiento de los cultivos (Stöckle *et al.*, 2003). El modelo se centra en los procesos biofísicos que determinan el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Más allá de los modelos de simulación de cultivos, Boote *et al.* (1983) desarrollaron un enfoque para acoplar modelos de plagas a los simuladores de crecimiento de cultivos, con el fin de predecir las reducciones de rendimiento causadas por factores bióticos.

La versión 4.5 del sistema de apoyo a la toma de decisiones para la transferencia de agrotecnología (DSSAT) proporciona una herramienta integrada para simular el crecimiento y el rendimiento de los cultivos bajo diferentes condiciones ambientales y de manejo (Hoogenboom *et al.*, 2010). Esta herramienta ha sido ampliamente utilizada por la comunidad científica.

En el contexto del cambio climático, el Proyecto de Intercomparación y Mejora de Modelos Agrícolas (AgMIP) ha establecido protocolos y estudios piloto para evaluar la incertidumbre y mejorar los modelos de cultivos (Rosenzweig *et al.*, 2013). Este esfuerzo ha sido crucial para avanzar en la comprensión de los impactos del cambio climático en la agricultura. En cuanto a la incertidumbre en la simulación de los rendimientos, Asseng *et al.* (2013) han analizado el caso del cultivo de trigo bajo los efectos del cambio climático, destacando la necesidad de mejorar los modelos de cultivos. Este ha sido un paso importante para identificar las limitaciones de los modelos actuales y guiar el desarrollo de nuevas herramientas más robustas.

Siguiendo esta línea, Antle *et al.* (2014) desarrollaron nuevos métodos de simulación parsimoniosos, con herramientas para evaluar la seguridad alimentaria y ambiental futura. Estos enfoques integran aspectos económicos, sociales y ambientales, aumentando el alcance de los modelos de cultivos tradicionales. Ewert *et al.* (2011) han abordado los cambios de escala y los métodos de vinculación de modelos para la evaluación integrada de sistemas agroambientales. Esto ha sido fundamental para entender cómo los impactos a nivel local se manifiestan a escalas más amplias, y viceversa. Por su parte, Rötter *et al.* (2011) han señalado la necesidad de una revisión fundamental de los modelos de cultivos-clima, destacando la importancia de incorporar una mejor comprensión de los procesos biofísicos y de las interacciones entre los diferentes componentes del sistema. Holzworth *et al.* (2015) han examinado el estado actual y las perspectivas futuras de los modelos y los *software* de sistemas de producción agrícola, identificando áreas clave para el desarrollo de nuevas herramientas y enfoques.

Rivington y Koo (2010) han analizado el uso de modelos de cultivos para evaluar los impactos del cambio climático en la agricultura. Así, resaltaron la necesidad de mejorar la integración de los modelos de cultivos con otros modelos climáticos y ambientales. Fodor *et al.* (2017) también han avanzado en esta dirección, pues desarrollaron un marco de modelado integrado para evaluar los efectos del estrés hídrico y térmico en el rendimiento de los cultivos, lo que ha permitido una evaluación más integral de los impactos de los factores climáticos. Semenov y Stratonovitch (2015) han utilizado el modelo de cultivos SIRIUS para simular los efectos del cambio climático en el rendimiento del trigo, destacando así la importancia de considerar la variabilidad climática en la evaluación de los impactos.

Finalmente, Shibu *et al.* (2010) han aplicado el modelo APSIM para evaluar el impacto de las prácticas de manejo agrícola en el rendimiento de los cultivos, lo que ha sido fundamental para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación en el sector agrícola.

Los modelos de simulación de cultivos han sido herramientas clave para comprender y evaluar los impactos del cambio climático, la variabilidad climática, el estrés hídrico, el estrés térmico y las prácticas de manejo en la producción agrícola. Estos modelos han evolucionado con el tiempo, incorporando nuevos enfoques y herramientas, y siguen siendo esenciales para informar sobre la toma de decisiones y el desarrollo de estrategias adaptativas en el sector agrícola.

3. Cambio climático y variabilidad climática

El altiplano boliviano presenta condiciones climáticas áridas y semiáridas extremadamente duras. También cuenta con una gran altitud, con escasas precipitaciones, oscila entre -11 °C y 30 °C de temperatura, tiene 200 días de heladas anuales y suelos muy pobres y salinos (Jacobsen, 2011). Como resultado del cambio climático, se espera que sus condiciones áridas se profundicen aún más, con un aumento del riesgo de sequías, de heladas y de escasez de agua, así como también con un aumento de la temperatura (Boulanger *et al.*, 2014).

Algunas proyecciones muestran un aumento de la temperatura de al menos 3 °C para el año 2100, y una reducción de las precipitaciones entre un 10% y un 30% para fines de este siglo (Boulanger *et al.*, 2014). Además, se espera que la humedad del suelo disminuya y que las sequías sean más frecuentes (Valdivia *et al.*, 2013). Asimismo, la variabilidad climática del altiplano ha aumentado y, con ella, el nivel de vulnerabilidad para la producción de la quinua (McDowell y Hess, 2012; Boulanger *et al.*, 2014; Twomlow *et al.*, 2008).

En este contexto, es necesario promover medidas adaptativas y anticipatorias que aumenten la preparación de un sistema para enfrentar la crisis climática en lugar de reaccionar una vez ocurrido el evento (Morton, 2007). Además, se debe poner énfasis en estrategias de adaptación desde un enfoque de abajo hacia arriba, para así asegurar una asignación equitativa de recursos a nivel comunitario, como también para mejorar la capacidad de adaptación de los productores de quinua.

Con el propósito de comprender mejor las trayectorias de rendimiento del cultivo de quinua –ante escenarios de cambio y variabilidad climática–, se han realizado simulaciones agroclimáticas ajustando un climograma[1] que permite realizar simulaciones con base en un modelo conocido como NL-CROP, que se explica detalladamente en la siguiente sección. En términos generales, se pretende incorporar no linealidades al momento de modelar el ciclo fenológico del cultivo, tipo Gompertz. Para calibrar el ejercicio, se cuenta con registros históricos (de 30-35 años) de las estaciones de Uyuni, así como de otras zonas aledañas. Específicamente, se tienen cuatro zonas de estudio: i) Pampa Aullagas y Challapata, ii) Patacamaya, iii) Salinas de Garci Mendoza, iv) Uyuni, Colchacani y Pulacayo.

Las simulaciones son muy sensibles a los parámetros climáticos, la compactación del suelo, la densidad de la plantación y las características hidrofílicas de los suelos. Por ello, estos parámetros se mantienen estables dentro de rangos óptimos. El análisis de las proyecciones de temperatura y precipitación se realizó mediante un análisis de escalamiento estadístico, bajo los límites del Modelo de Circulación General ECHAM5.0 y con las condiciones definidas por el IPCC (2007) para el escenario A2[2].

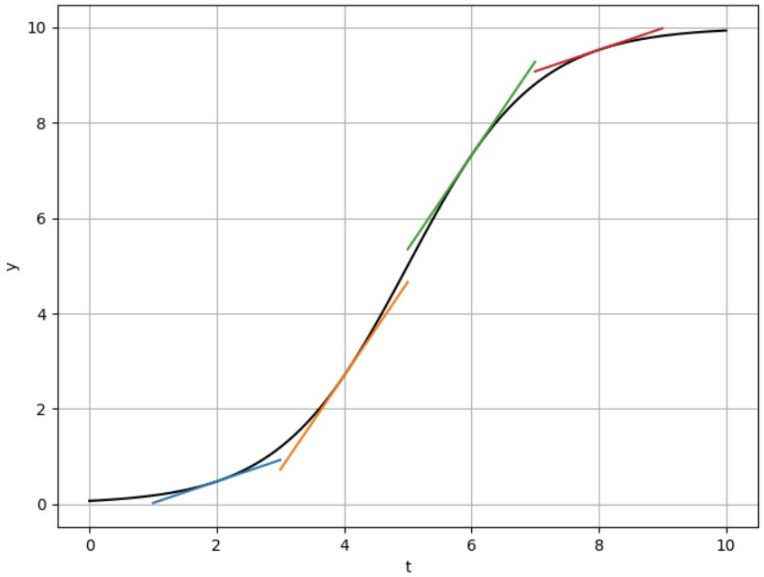
4. Metodología: Modelo NL-CROP

El modelo NL-CROP busca simular el desarrollo y el rendimiento de un cultivo bajo condiciones de estrés hídrico, junto con una serie de condiciones edáficas y climáticas. Tal modelo es gobernado por una ecuación no lineal tipo Gompertz, que integra varias ecuaciones como resultado de una "función *spline* por partes", lo que representa una herramienta útil para aproximar funciones no lineales complejas mediante la unión de segmentos lineales más sencillos (ver Figura 1). La resolución de NL-CROP se realiza mediante un "framework de simulación", donde compiten

[1] En los anexos se encuentra el climograma respectivo para cada zona de estudio.
[2] Este escenario proyecta un aumento de la temperatura global entre 2°C y 5,4°C para el año 2100, dependiendo de la sensibilidad climática. Bajo este escenario, también se espera un aumento del nivel del mar y cambios en los patrones de precipitación a nivel regional.

métodos iterativos como el de Newton-Raphson[3], el método del punto fijo[4] o los métodos de región de confianza[5], para así encontrar los parámetros del modelo que mejor se ajusten a los datos disponibles.

Figura 1: Función S piezas



Fuente: Elaboración propia.

A su vez, este modelo consta de varias ecuaciones que simulan el crecimiento y el rendimiento del cultivo con base en datos del clima, la densidad de la población, las características genéticas, el tipo de suelo, el nivel de fertilización y el nivel de déficit hídrico. Para calibrarlo se requiere información meteorológica mensual o de menor frecuencia por un período mayor a 10 años. Esta información puede ser sistematizada antes del ejercicio mediante la elaboración de un climograma que contenga: la temperatura máxima (Tmax), la temperatura mínima (Tmin), la precipitación (Pp) y la evapotranspiración de referencia (ETo).

Se supone un nivel de dióxido de carbono (CO2) en la atmósfera entre 1959 y 2021, junto con los siguientes escenarios de cambio climático: B1, A1 T, B2, A1 B, A2 y A1 F del Índice de Severidad de Eventos Extremos (ISEE)[6], que son de unos 600, 700, 800, 850, 1,250 y 1,550 ppm[7], respectivamente. En caso de ser posible, se pueden sustituir los escenarios por valores puntuales, dado que la producción de biomasa y de grano dependen de los parámetros del cultivo, como la conductancia estomatal, la senescencia del dosel vegetal, la productividad del agua y el índice de cosecha.

La ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo (Y) es la Ecuación (1):

$$Y = Ae^{-be^{-ct}} \quad (1),$$

[3] Método de Newton-Raphson: Este método se basa en la linealización local de la función no lineal y la iteración hasta encontrar la solución.
[4] Método del punto fijo: Consiste en encontrar el punto fijo de una función no lineal mediante un proceso iterativo. Utiliza la idea de "mapeo" de la función.
[5] Métodos de región de confianza: Definen una región de confianza alrededor de la solución actual y minimizan la función dentro de esa región.
[6] ISEE es un indicador que se utiliza en el contexto del cambio climático para evaluar la severidad de los eventos climáticos extremos, como las olas de calor, las sequías, las inundaciones, los huracanes, entre otros. Este índice proporciona una medida cuantitativa de la magnitud y frecuencia de estos eventos extremos en relación con un período de referencia.
[7] Partes por millón.

donde:

Y: es el rendimiento potencial del cultivo en ausencia de estrés hídrico, medido en toneladas por hectárea;
A: es el rendimiento máximo potencial o asintótico del cultivo;
b : determina el punto de inflexión; es decir, el momento en que el cultivo pasa de una fase de crecimiento lento a una fase de crecimiento más acelerado;
c : controla la tasa de crecimiento del cultivo; cuanto mayor sea este parámetro, más rápido será el crecimiento del cultivo;
t: es el tiempo (generalmente medido en días, semanas o meses);
e: es el número de Euler.

Por ejemplo, pensemos en un ciclo fenológico de quinua de 180 días, con un rendimiento potencial de 1.2 toneladas por hectárea. La Ecuación (2) sería la que gobierna el modelo:

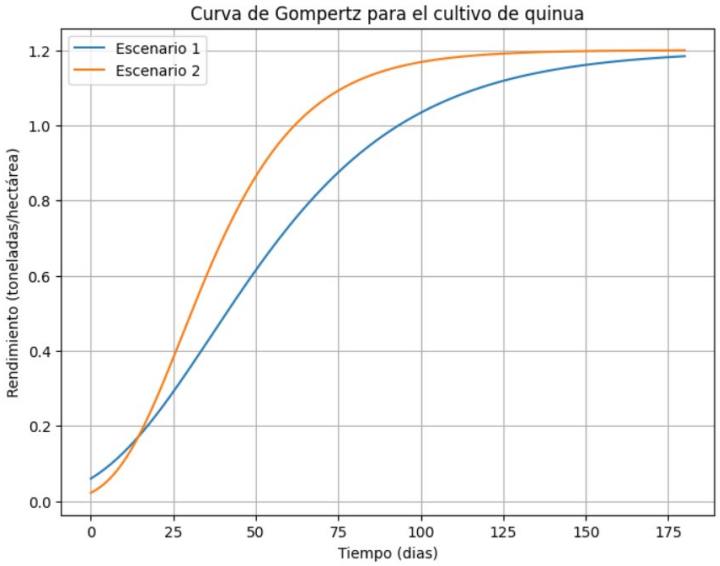
$$Y \cong 1.2\, e^{-be^{-ct}}; (0 \leq t \leq 180) \quad (2)$$

Para encontrar los valores de b y c , vamos a suponer algunos escenarios:

Escenario 1: *b=3* y *c=03.*
Escenario 2: *b=4* y *c=05.*

Estos dos escenarios permitirán generar curvas de crecimiento del rendimiento de la quinua con diferentes tasas de crecimiento y puntos de inflexión, que una vez linealizadas se aproximan a las condiciones hídricas, edáficas, climáticas, etc., introducidas en el modelo (ver Figura 2).

Figura 2: Crecimiento del rendimiento de la quinua para los dos escenarios



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo NL-Crop.

La solución en el NL-CROP consiste en dos etapas. Primero se determina la función potencial que gobierna el rendimiento del cultivo. Segundo, se incluyen otras ecuaciones que describan el perfil del clima, las características del suelo, las prácticas del manejo, etc. Estas ecuaciones afectan los parámetros *b* y *c* y, por lo tanto, la tasa de crecimiento e inflexión en el ciclo fenológico del cultivo; es decir que se imponen restricciones al crecimiento potencial.

El NL-CROP se vuelve a simular con estas restricciones, encontrando un perfil de rendimiento ajustado que ya no es potencial, sino que consta de un rendimiento efectivo.

Rendimiento efectivo del cultivo

Estas dos etapas resolutivas del modelo equivalen a reformular la Ecuación (1), que gobierna el rendimiento del cultivo de la quinua, en términos de la biomasa (*B*) y el índice de cosecha (*H*), como se muestra en la Ecuación (3):

$$Y = B \cdot H = Ae^{-be^{-ct}} \quad (3),$$

donde:

B : es la biomasa del cultivo (en toneladas por hectárea);
H : es el índice de cosecha, que depende de las características específicas del cultivo de quinua.

Despejando la ecuación en términos de la biomasa, se obtiene:

$$B = A_i e^{-be^{-ct}} \quad (4),$$

donde ahora A_i es la producción efectiva de biomasa ajustada por el índice de cosecha (en toneladas por hectárea).

Estrés térmico

Ahora, bajo la nueva especificación, se pueden considerar tres diferentes casos de respuesta, dependiendo de cuál sea el efecto del estrés térmico (referido a un aumento de la temperatura) en el desarrollo del cultivo:

i) Inhibición de la expansión del dosel vegetal

Este efecto se puede modelar mediante un factor de reducción de la tasa de crecimiento (c), que disminuye a medida que aumenta el estrés térmico, como se muestra en la Ecuación (5):

$$B = A_i \, e^{-be^{-c(1-K_1 \cdot T)t}} \quad (5),$$

donde K_1 es un parámetro que cuantifica la sensibilidad a la temperatura (*T*).

ii) Aceleración de la senescencia del dosel vegetal

Este efecto se puede modelar mediante un factor de aumento en la tasa de senescencia (b), que crece a medida que aumenta el estrés térmico, como se muestra en la Ecuación (6):

$$B = A_i e^{-b(1+K_2 \cdot T)e^{-ct}} \quad (6),$$

donde K_2 es un parámetro que cuantifica la sensibilidad a la temperatura (*T*).

iii) Cierre estomático

Este efecto se puede modelar mediante un factor de reducción en la tasa fotosintética que disminuye a medida que aumenta el estrés térmico, como se muestra en la Ecuación (7):

$$B = Ae^{-be^{-c(1-K_3 \cdot T)t}} \quad (7),$$

Donde K_3 es un parámetro que cuantifica la sensibilidad a la temperatura (*T*).

Estrés hídrico

Para incorporar los efectos del estrés hídrico, el modelo considera una curva que se activa cuando se alcanzan los límites establecidos para la humedad del suelo. Así, es posible evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo, lo que resulta útil para planear y evaluar estrategias bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua, de sistema de riego, de tipo de suelo y de fecha de siembra.

El requerimiento hídrico del cultivo se estima mediante un balance de humedad en el suelo que se muestra en la Ecuación (8) a continuación:

$$\theta_{i,j} = \theta_{ij-1} + D + (R + P) + ES + Tr \cdot K \quad (8),$$

donde:

$\theta_{i,j}$: es el contenido de humedad del suelo en la profundidad i y el momento j ;
D : es el drenaje por percolación profunda;
R : es el riego;
P: es la precipitación;
ES: es la evaporación del suelo;
Tr: es la transpiración del cultivo;
K: es un factor de ajuste que considera las características del suelo y del sistema de riego;

Ahora veamos otra familia de especificaciones que integra el efecto del estrés hídrico en los tres casos mencionados anteriormente:

i) Inhibición de la expansión del dosel vegetal:

$$B = Ae^{-be^{-c[1-K_1 \cdot T - K_4(\theta_c - \theta)]t}} \quad (9),$$

donde:

K_4 : es un parámetro que cuantifica la sensibilidad al déficit de humedad del suelo $(\theta_c - \theta)$;
θ_c **:** es el contenido crítico de humedad del suelo;
θ**:** es el límite de humedad de suelo (valor referencial, ya que varía según el cultivo).

ii) Aceleración de la senescencia del dosel vegetal:

$$B = Ae^{-b[1+K_2 \cdot T + K_5(\theta_c - \theta)] \cdot e^{-ct}} \quad (10),$$

donde K_5 es un parámetro que cuantifica la sensibilidad al déficit de humedad del suelo.

iii) Cierre estomático:

$$B = Ae^{-be^{-c[1-K_3 \cdot T - K_6(\theta_c - \theta)]t}} \quad (11),$$

donde K_6 es un parámetro que cuantifica la sensibilidad al déficit de humedad del suelo.

Crecimiento del dosel vegetal

Por su parte, para el crecimiento del dosel vegetal en el NL-CROP, se asumen dos casos: un crecimiento de tipo exponencial, y una senescencia también exponencial. Para su modelación se suelen utilizar la Ecuación (11) y la Ecuación (12) respectivamente:

$$CC = CC_0 \, e^{k \cdot LAI} \quad (12),$$

donde:

CC: es la cobertura del dosel vegetal;
CC_0: es la cobertura inicial del dosel vegetal;
k : es el coeficiente de extinción de la luz;
$L\,A\,I$: es el índice de área foliar.

La Ecuación (11) describe el crecimiento exponencial del dosel vegetal en función del índice de área foliar (LAI). A medida que el LAI aumenta, la cobertura del dosel (CC) se expande exponencialmente.

En el caso de la senescencia exponencial del dosel vegetal (Ecuación 13):

$$CC = CC_{max} \, e^{-ks \cdot t} \quad (13),$$

donde:

CC_{max}: es la cobertura máxima del dosel vegetal;
$k\,s$: es el coeficiente de senescencia del dosel vegetal;
t : es el tiempo.

La Ecuación (12) describe la senescencia o el decaimiento exponencial de la cobertura del dosel vegetal a lo largo del tiempo. A medida que el tiempo transcurre, la cobertura del dosel disminuye exponencialmente. Estas ecuaciones se basan en los trabajos de Monsi y Saeki (1953) y Goudriaan y van Laar (1994), y son ampliamente utilizadas en modelos de simulación de cultivos para representar el comportamiento del dosel vegetal.

Estimación de las necesidades de agua

El modelo estima las necesidades de agua a partir de los datos del coeficiente de cultivo *(kc)* y de la evapotranspiración potencial *(ETP)*. El primero es un valor morfo-fisiológico propio de cada cultivo; el segundo, una variable que depende del clima de una zona (Brouwer *et al*., 1987; Doorenbos y Pruitt, 1976).

Para el coeficiente de cultivo se requiere la evapotranspiración real (ETR), la cual, en el caso de la quinua, se puede aproximar por lisimetría con base en la ecuación del balance hídrico presentada anteriormente (Ecuación 8), como se muestra en la Ecuación (14):

$$ETR = (P + R) - D \; +/- SA \quad (14),$$

donde:

ETR: es la evapotranspiración real;
P: es la precipitación;
R: es el riego;
D: es el drenaje interno;
SA: es la variación del *stock* de agua en el suelo.

Luego, se calcula la evapotranspiración potencial *(ETP)* mediante la siguiente fórmula (Ecuación 15):

$$ETP = f(u) \cdot (e_s - e_a) \quad (15),$$

donde:

$f(u)$: es una función de la velocidad del viento;
e_s: es la presión de vapor de saturación;
e_a: es la presión de vapor actual.

Así, el coeficiente de cultivo (*kc*) se obtiene a partir de la relación entre la evapotranspiración real (*ETR*) y la evapotranspiración potencial (*ETP*), como se muestra en la Ecuación (16):

$$k_c = \frac{ETR}{ETP} \quad (16)$$

La integración de las ecuaciones de balance hídrico en la especificación no lineal ajustada en el modelo permitirá estimar con mayor precisión los requerimientos de agua del cultivo de la quinua. Esto se logra a partir de la relación entre las variables climáticas (como la evapotranspiración potencial) y las características morfo-fisiológicas de la planta (reflejadas en el coeficiente de cultivo). Al incorporar esta sección de cálculo de requerimientos hídricos, el modelo ajustado será capaz de simular de manera más completa el crecimiento y desarrollo del cultivo. Para ello se deben considerar los efectos del estrés hídrico y térmico, así como la dinámica del dosel vegetal.

Temperatura

Finalmente, para calibrar el NL-CROP se requiere construir un climograma, que es una representación sintética de las condiciones climáticas de un lugar o una región a lo largo del año. Específicamente, un climograma combina y correlaciona información de temperatura y precipitación. El climograma permite identificar patrones climáticos a lo largo de las diferentes estaciones del año. Mediante su análisis se pueden clasificar los tipos de climas (*e.g.* cálido, frío, seco, húmedo) de una región. Para las temperaturas máximas y mínimas que afectan a los cultivos agrícolas, comúnmente se utiliza el modelo de Hargreaves-Samani, que se resume en la Ecuación (17):

$$T_{max/min} = T_{mean} \pm 0{,}5 \cdot R_a \sqrt{T_{mean} - T_{min}} \quad (17),$$

donde:

$T_{max/min}$ = es la temperatura máxima o mínima (°C);
T_{mean} = es la temperatura media diaria (°C);
T_{min} = es la temperatura mínima diaria (°C);
R_a= es la radiación solar extraterrestre $(MJ/m^2/día)$.

La radiación solar extraterrestre (R_a) se calcula en función de la latitud del lugar y el día del año, utilizando ecuaciones astronómicas. Esta radiación representa la cantidad de energía solar que llega a la parte superior de la atmósfera. Al incorporar la ecuación de Hargreaves-Samani en el modelo, se puede estimar de manera más precisa el efecto de las temperaturas máximas y mínimas en el crecimiento y desarrollo del cultivo de quinua. Esto, junto con las ecuaciones de temperatura y CO2 previamente mencionadas, permitirá simular de manera más completa la respuesta del cultivo a las condiciones climáticas.

5. Resultados: Escenarios agroclimáticos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para cada una de las zonas de estudio: i) Pampa Aullagas y Challapata, ii) Patacamaya, iii) Salinas de Garci Mendoza, iv) Uyuni, Colchacani y Pulacayo. Aplicando la metodología NL-CROP especificada anteriormente, se analiza el comportamiento de las variedades específicas del cultivo de

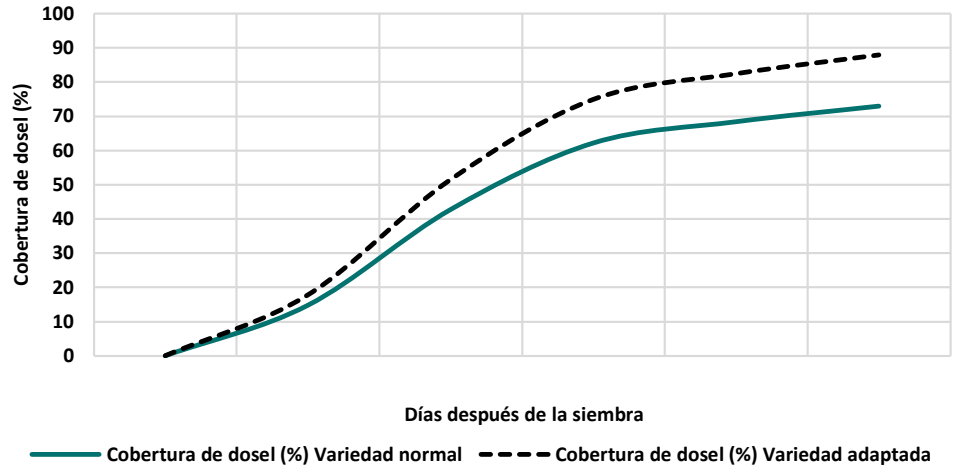
quinua ante diferentes escenarios climáticos. Para cada una de las zonas se escoge una variedad de quinua normal, y otra alternativa que se considera con mayor adaptabilidad al cambio climático. En todos los casos, la evaluación del estudio se realiza en la etapa de floración y/o madurez fisiológica para comprobar el comportamiento de las dos variedades escogidas. El análisis para cada una de las zonas de estudio se compone de tres partes: inicialmente se evalúa la cobertura del dosel ante variaciones en la compactación y la fertilidad del suelo; posteriormente se analiza el comportamiento de la producción de biomasa fresca y rendimiento ante tres escenarios de cambio climático (Normal, Niño y Niña). El ejercicio está calibrado para un nivel simétrico de fertilidad en un rango de 65-75%. Los tres escenarios fueron derivados del Tercer Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*IPCC*, por sus siglas en inglés, 2022): a) SIM-1 es la estimación puntual del Año 0, que corresponde al valor contemporáneo 2022; b) SIM-2 es la estimación que corresponde al escenario de cambio climático para el período entre 2023 y 2039; c) SIM-3 corresponde al escenario climático para el periodo comprendido entre 2040 y 2050. A continuación, se pasa a simular el rendimiento del cultivo en diferentes niveles bajo condiciones específicas. El estudio cierra con la estimación de las emisiones de CO2 para cada nivel de rendimiento.

A. Pampa Aullagas y Challapata

En la zona de Pampa Aullagas y Challapata se seleccionaron las variedades de quinua Huaycha para el escenario normal y Pasankalla para el escenario alternativo. La semilla **Pasankalla** es una de las variedades de quinua más antiguas. Su principal característica es su particular coloración, que puede variar entre azul y marrón. Esta variedad logra su mejor desarrollo en la zona agroecológica Suni del altiplano, entre los 3,815 y 3,900 msnm. Por su parte, la semilla **Huaycha** es pequeña, ovalada y de color blanco-amarillento. Crece en una planta que puede alcanzar los dos metros de alto; posee hojas grandes oval-lanceoladas, flores rojizas aglutinadas en panículas laxas y frutos en cápsula dura, que son resistentes a los cambios climáticos. En cuanto a su perfil nutricional, las semillas de Huaycha son ricas en proteínas, carbohidratos, fibra, aminoácidos (triptófano, leucina, arginina, metionina, histidina y valina), ácidos grasos insaturados, vitaminas A, C y E y vitaminas del grupo B, tales como el ácido fólico, la tiamina y la riboflavina.

En la etapa de floración se espera que el dosel máximo alcance una altura de 1.5 a 2.0 m, dependiendo de la variedad. El *Huaycha Grano* logra alcanzar la madurez fisiológica con un dosel máximo de 73% (ver Figura 3); es decir, una altura máxima entre 1.09 a 1.25 metros. Por su parte, la variedad *Pasankalla* se adapta muy bien al cambio climático y alcanza un dosel máximo de 88%; es decir, de 1.65 a 1.70 metros.

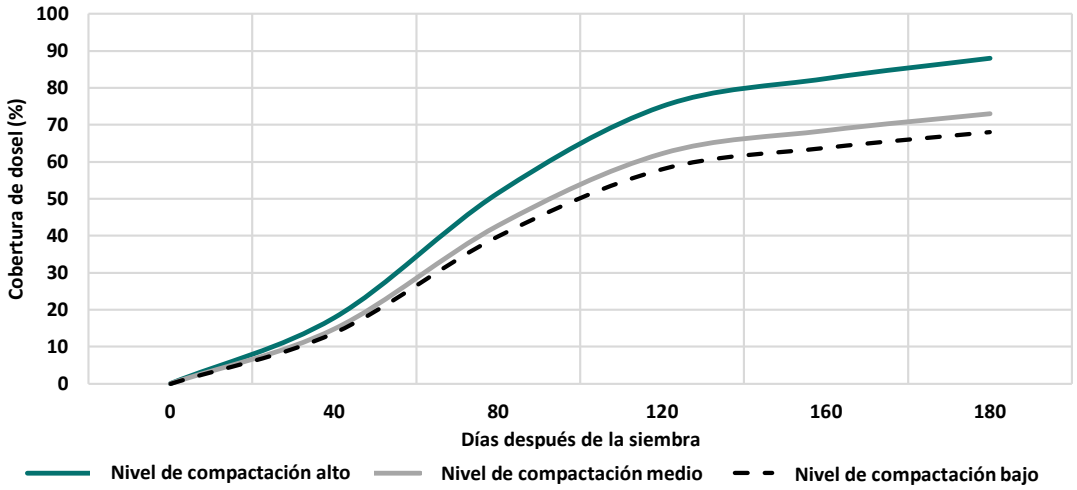
Figura 3. Cobertura de dosel por tipo de variedad (en %)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 4 se evalúa el crecimiento de la cobertura de dosel según la porosidad de la tierra y su resistencia a la penetración de las raíces; es decir, según el nivel de compactación del suelo[8] –*i.e.*, alto, medio y bajo–. Para un nivel adecuado de compactación, se alcanza un dosel comprendido entre los 1.70 y 2.0 metros; es decir, con un crecimiento al 88%. Para un nivel medio de compactación se alcanza un dosel comprendido entre los 1.60 y 1.75 metros (73%). Para un nivel de compactación bajo (68%), se alcanza un dosel comprendido entre 1.40 y 1.5 m. En un escenario de atrofia celular, se espera una reducción del dosel superior al 40%.

Figura 4. Cobertura de dosel por nivel de compactación (en %)

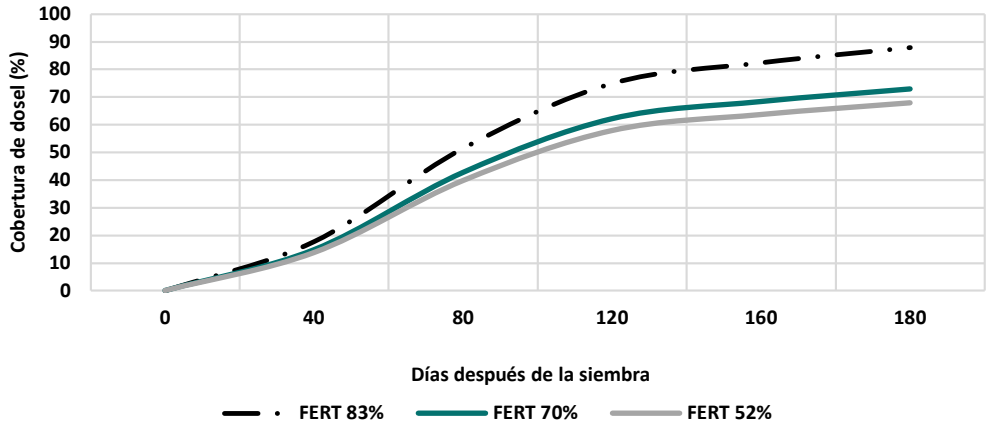


Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP

En la Figura 5, se estima la cobertura del dosel con base en distintos escenarios de fertilidad. Para un nivel de fertilidad del 83% en el suelo, se espera alcanzar un dosel de 88% (aproximadamente 1.8 m de altura). Para un nivel de fertilidad del 70% del suelo, se espera un dosel con un 73% de crecimiento (aprox. 1.7 m de altura). Para un nivel bajo de fertilidad (52%), se espera alcanzar un dosel con un 65-68% de crecimiento; es decir, con una altura de 1.3 m aprox.

[8] El grado de compactación es determinado por la razón entre la densidad seca del suelo y la densidad seca máxima.

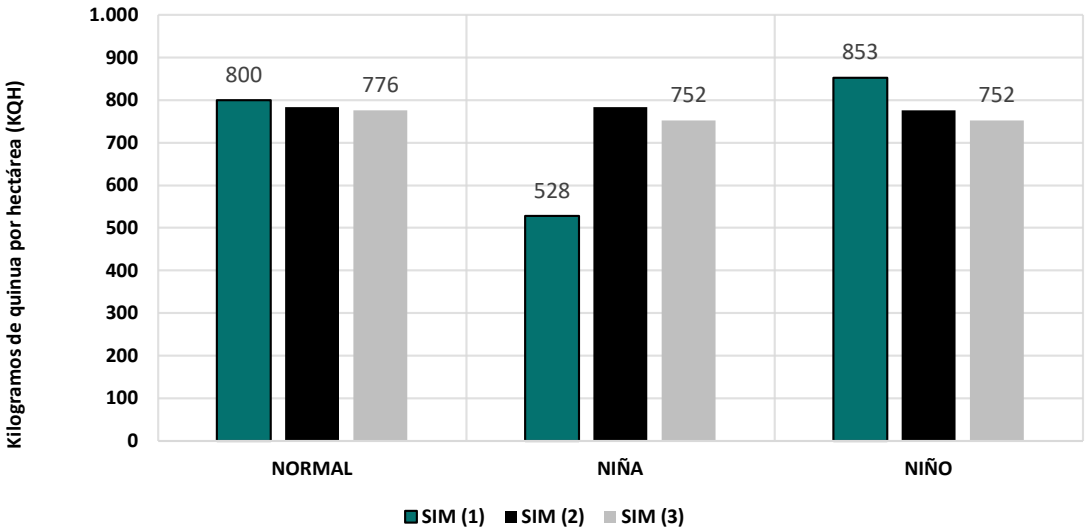
Figura 5. Cobertura de dosel por nivel de fertilidad (en %)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP

En la Figura 6 se muestra el impacto de tres escenarios de cambio climático en la producción de biomasa fresca: Normal, o *Business as Usual* (*BAU*, por sus siglas en ingles), Niña y Niño. Considerando los tres periodos de análisis mencionados: SIM-1 corresponde al valor contemporáneo 2022, SIM-2 es el escenario para el periodo 2023-2039 y SIM-3 corresponde al periodo comprendido entre 2040 y 2050.

Figura 6. Escenarios de cambio climático (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

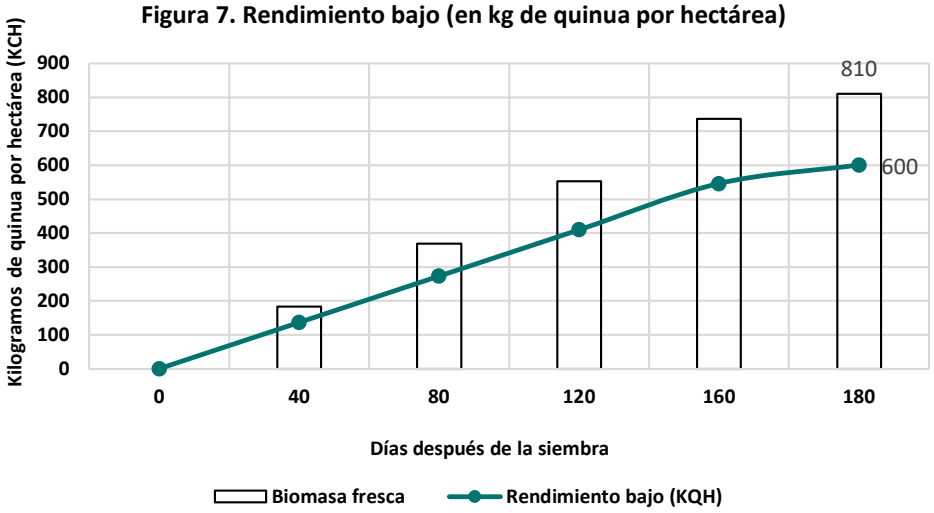
Los resultados muestran que el cambio climático reduce el rendimiento del cultivo en casi todos los escenarios. Comparando el escenario Normal en el tiempo, podemos observar que el cambio climático reduce la producción de 800 a 776 Kilogramos de Quinua por Hectárea (KQH,) lo que equivale a una disminución del 3.01% hasta 2050.

En el caso del escenario Niña, se observa un incremento del 42%, pasando de 528 a 752 (KQH). Se pueden esperar temperaturas más frías de lo normal en la región del Océano Pacífico ecuatorial, lo que a menudo resulta en un aumento de las precipitaciones en ciertas regiones. Además, la quinua tiene una eficiencia de uso del agua (EUA) de 0.43 kg/m³, lo que significa que puede producir esa cantidad de grano por cada metro cúbico de agua utilizada. Por lo tanto, en un escenario con el fenómeno de La Niña, donde hay más agua disponible, es probable que la quinua pueda producir más grano.

Para el escenario Niño, se tiene una disminución de hasta el (-)11,8% en el mismo período; es decir, de 853 a 752 KQH. El fenómeno de El Niño se caracteriza por temperaturas más cálidas de lo normal en el Océano Pacífico ecuatorial, lo que a menudo resulta en una disminución de las precipitaciones en ciertas regiones. En el caso de la quinua, el aumento del estrés hídrico puede resultar en una disminución del rendimiento. Además, puede alterar los patrones de las plagas y enfermedades, lo que podría tener un impacto negativo en el rendimiento del cultivo.

La Figura 7 muestra un escenario de bajo rendimiento para niveles de fertilidad del 55% o inferiores, con un bajo contenido de materia orgánica. Se supone un suelo arenoso, con un pH en un rango de 6.4 a 7. Según el modelo, la temperatura afecta especialmente a las etapas de germinación, ya que un mínimo de -4 °C es requerido. La temperatura también afecta la etapa de floración, causando una baja producción de polen y, como consecuencia, esterilidad en las plantas. En la etapa de ramificación no hay problema alguno con los descensos de temperatura. Los resultados muestran que se alcanzan los 810 kg de biomasa fresca y un rendimiento final de 600 KQH.

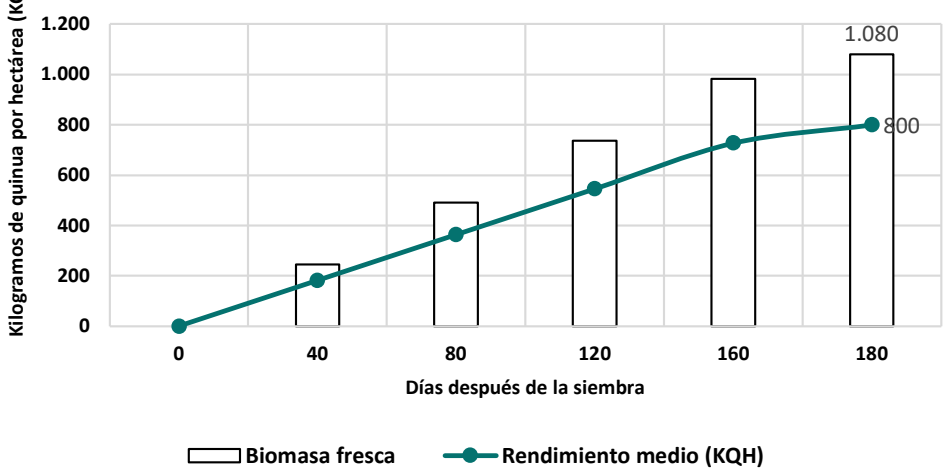
Figura 7. Rendimiento bajo (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 8 muestra un escenario de rendimiento medio para niveles de fertilidad del 60 al 70%, con un contenido moderado de materia orgánica. Los resultados muestran que se alcanzan los 1,080 kg de biomasa fresca, y un rendimiento final de 800 KQH. En este caso, se consideran niveles razonables de nitrógeno, calcio, fósforo y potasio. Además, se espera una temperatura promedio de 25°C durante el día, una humedad relativa del 87,71% y una precipitación anual media de 2,000 mm.

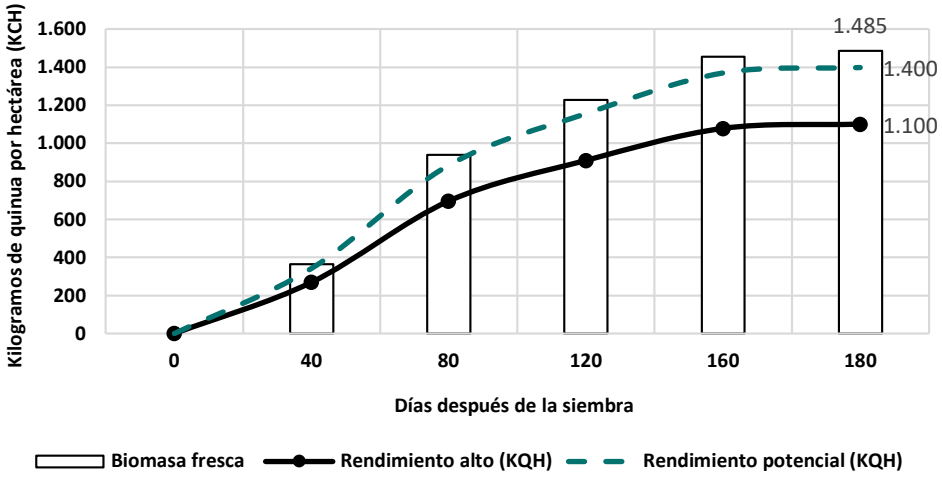
Figura 8. Rendimiento medio (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 9 muestra un escenario de rendimiento alto para niveles de fertilidad del 80% o superiores, con un contenido adecuado de materia orgánica. Los resultados muestran que se alcanzan los 1,485 kg de biomasa fresca, y un rendimiento final de 1,100 KQH sin riego en su ciclo vegetativo. En este ejercicio, además, se calcula el rendimiento potencial del cultivo en condiciones de optimalidad de manejo, alcanzando un rendimiento de hasta 1,400 KQH.

Figura 9. Rendimiento alto (en kg de quinua por hectárea)

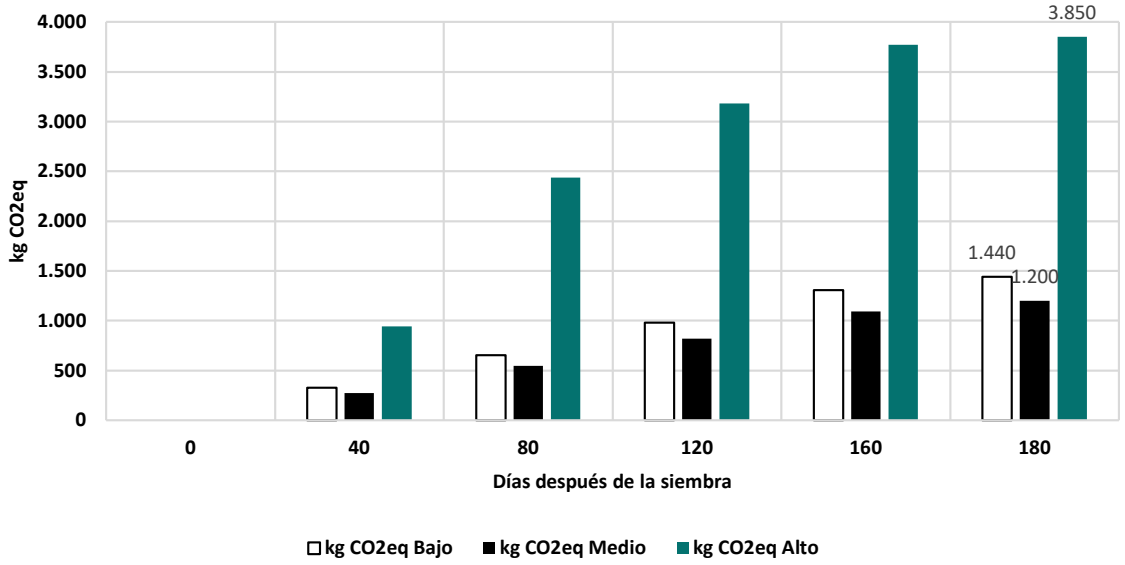


Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

Finalmente, en la Figura 10 se estiman las emisiones de CO2eq para los tres escenarios de rendimiento simulados. Esto es relevante para evaluar también el impacto de los cultivos sobre el cambio climático, una forma de medir este efecto es a través de las emisiones de gases de efecto invernadero que se dan en el proceso de producción. Para un

ciclo fenológico con rendimiento bajo, se tiene una emisión de 1,440 kg de CO2eq por hectárea a los 180 días después de la siembra. Para una trayectoria de rendimiento medio, es decir, alcanzado a 800 KQH en el mismo periodo de tiempo, se tiene una emisión de 1,200 kg de CO2eq por hectárea. Por último, para una trayectoria de rendimiento alto se tiene una emisión de 3,850 kg de CO2eq por hectárea.

Figura 10. Emisones por nivel de cobertura (en kg de CO2eq)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

Estas estimaciones muestran que, el escenario óptimo considera las condiciones de un rendimiento medio de 800 KQH a los seis meses después de la siembra, obteniendo un menor grado de emisiones (1,200 kg de CO2eq por hectárea) en comparación con las situaciones de rendimiento bajo o alto. Se deben buscar alternativas para reducir las emisiones sin necesidad de afectar el rendimiento del cultivo, esto se puede lograr a través de la implementación de prácticas agrícolas que sean amigables con el medio ambiente.

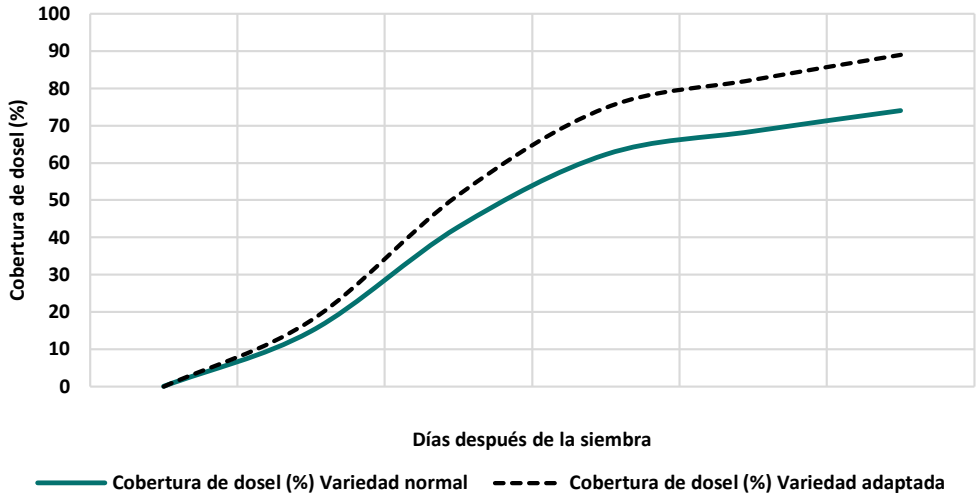
B. Patacamaya

Para un ciclo fenológico medio de 180 días, en la Figura 11 se compara la evolución de cobertura de dosel (en porcentajes) entre una variedad normal de quinua y una variedad adaptada al clima. Cabe mencionar que existen muchas variedades de este grano: la quinua Blanquita, Kurmi, Patacamaya, etc.

En el caso del Altiplano Sur, la demanda por la semilla es más variable que en las zonas del Altiplano Central y Norte, pues en el Sur los habitantes se abastecen con sus propias parcelas. En otras palabras, aunque algunos productores prefieren comprar semillas certificadas, la mayoría acude a las suyas cuando llega la hora de sembrar.

En este ejercicio se seleccionan las variedades **Patacamaya** para el escenario base y **Quinua Real** para el escenario alternativo. La semilla Patacamaya ha sido elegida por su adaptabilidad a las condiciones climáticas específicas del Altiplano Sur[9], incluyendo su resistencia al frío y su capacidad de crecer en suelos con poca fertilidad. Por su parte, la quinua real es conocida por su alta resistencia a condiciones climáticas adversas como la sequía y las temperaturas extremas, lo que la hace adecuada para el cultivo en regiones de mucha altitud, como en el Altiplano Sur.

Figura 11. Cobertura de dosel por tipo de variedad (en %)



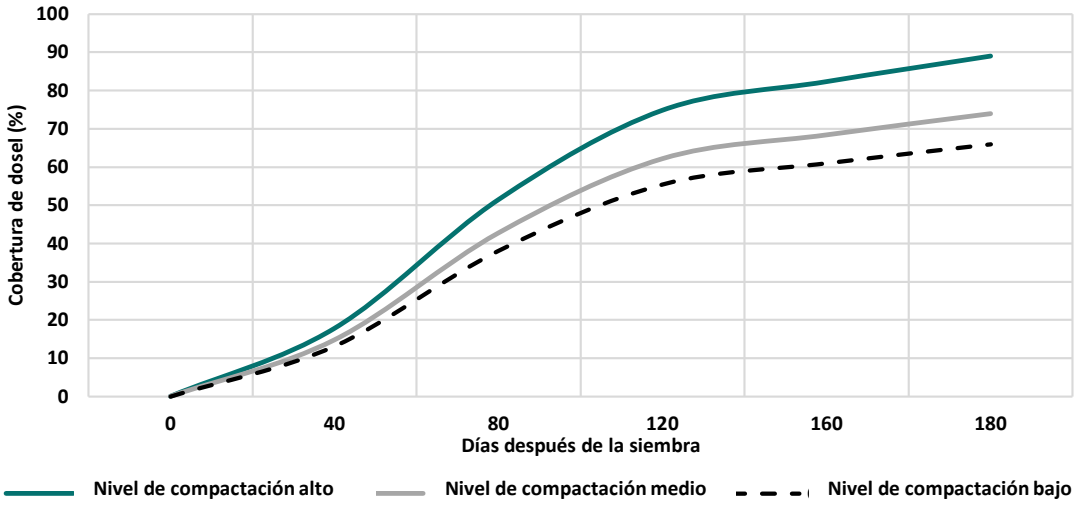
Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

Se espera que el dosel máximo alcance una altura entre 1.5 a 1.75 m., dependiendo de la variedad. En la Figura 11 se muestra que la variedad Patacamaya logra alcanzar la madurez fisiológica con un dosel máximo de 74%; es decir, una altura máxima de 1.45 metros. Por su parte, la variedad Quinua Real se adapta muy bien y alcanza un dosel máximo de 89%; es decir, 1.70 metros.

En la Figura 12 se evalúa el crecimiento de la cobertura de dosel según el nivel de compactación del suelo –*i.e.* alto, medio y bajo–. Para un nivel adecuado de compactación, se alcanza un dosel de 89%, comprendido entre 1.53 y 1.64 metros. Para un nivel de compactación medio, se alcanza un dosel de 74%, comprendido entre 1.14 y 1.37 metros. Para un nivel de compactación bajo se alcanza un dosel de 66%, comprendido entre 1.00 y 1.18 metros. Urge mencionar que los productores están cada vez más expuestos a episodios de sequía extrema por períodos más largos, durante los cuales la densidad seca del suelo aumenta de manera significativa. Como resultado, se produce una atrofia celular con un crecimiento de dosel 38-50% inferior al nivel medio.

[9] En el Altiplano Sur las variedades locales se siembran en septiembre, independientemente de la ocurrencia de la lluvia o la nevada. En esta zona los suelos son arenosos y, bajo condiciones de preparación apropiada, almacenan humedad proveniente de las lluvias de enero y febrero. Las variedades requeridas en la zona son de ciclo semi tardío o tardío. Las fallas en la emergencia o la pérdida de campos (por enterrado de plántulas a causa del viento) conducen a realizar resiembras. En este caso, las variedades precoces ("noventonas") son la única opción, lo que genera una demanda de variedades precoces o "noventonas".

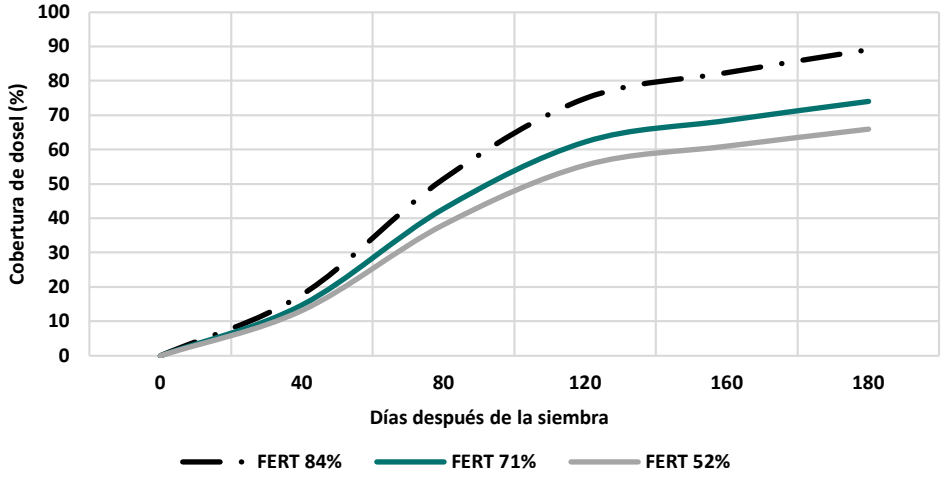
Figura 12. Cobertura de dosel por nivel de compactación (en %)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 13 se establecen los niveles de fertilidad en el suelo equivalentes para las trayectorias de crecimiento de dosel previamente definidas. Para un nivel de fertilidad del 84% o superior, es posible alcanzar un dosel con un 89% de crecimiento (hasta 1.66 metros). Un nivel de fertilidad en el suelo del 71% permite alcanzar un dosel de 74%, con una altura máxima de 1.38 metros. Un nivel bajo de fertilidad de 52-55% permite alcanzar un dosel al 66% de crecimiento, con una altura máxima de 1.10 metros.

Figura 13. Cobertura de dosel por nivel de fertilidad (en %)

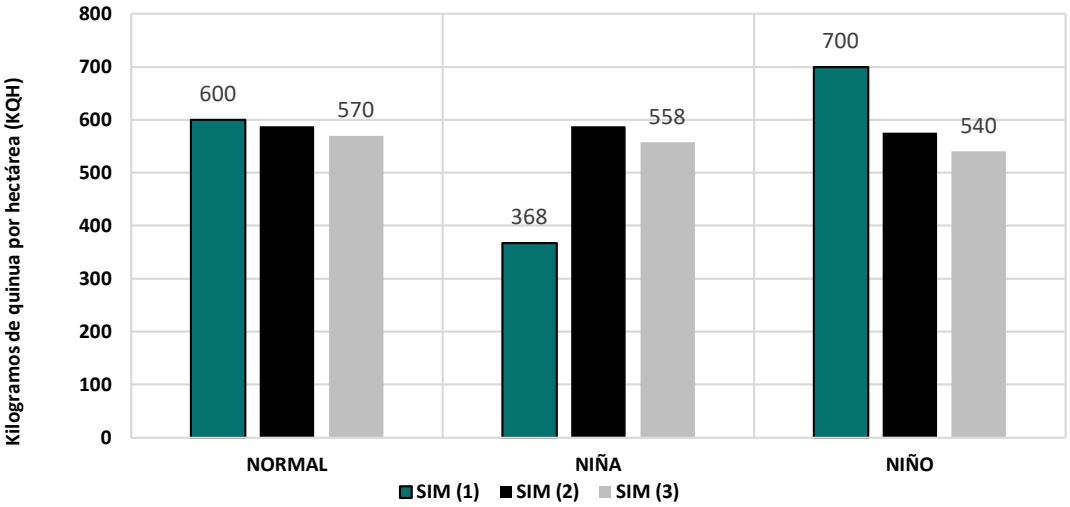


Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 14 se muestra el impacto de los tres escenarios del cambio climático considerados en el caso anterior (Normal, Niña y Niño) en la producción de biomasa fresca. Se consideran los tres periodos de análisis mencionados: SIM-1 corresponde al valor contemporáneo 2022, SIM-2 es el escenario para el periodo 2023-2039 y SIM-3 para el periodo comprendido entre 2040 y 2050.

Los resultados muestran cómo el cambio climático reduce el rendimiento del cultivo en casi todos los escenarios. Comparando con el escenario Normal en el tiempo, podemos observar que el cambio climático reduce la producción de 600 a 570 KQH, lo que equivale a una disminución del (-)5.26% hasta 2050 (SIM 3). En el caso del escenario Niña, se observa un aumento de hasta un 51.6%, mientras que para el escenario Niño se tiene una disminución de hasta un (-)22.9% en el mismo período.

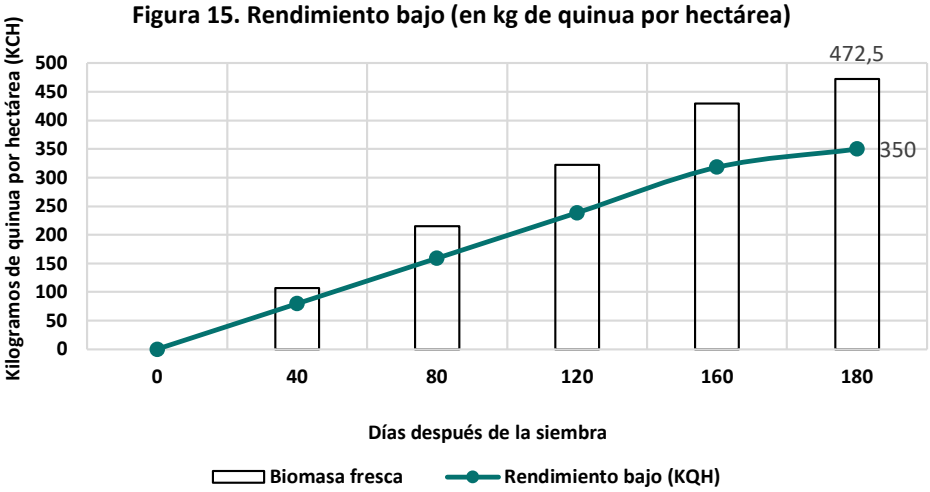
Figura 14. Escenarios de cambio climático (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 15 muestra un escenario de bajo rendimiento para niveles de fertilidad del 55% o inferiores, con un bajo contenido de materia orgánica. Se supone un suelo arenoso-arcilloso y un pH entre 6.5 y 7.5. Los parámetros climáticos siguen la pauta promedio del climograma de la zona. Según el modelo, la temperatura afecta especialmente a las etapas de germinación, ya que un mínimo de -4 °C es requerido. El escenario también afecta la etapa de floración, causando una baja producción de polen y, en consecuencia, esterilidad en las plantas. En la etapa de ramificación no hay problemas con los descensos de temperatura. Los resultados muestran que se alcanzan los 472.5 kg de biomasa fresca –dosel de 88%–, con un rendimiento de 350 KQH.

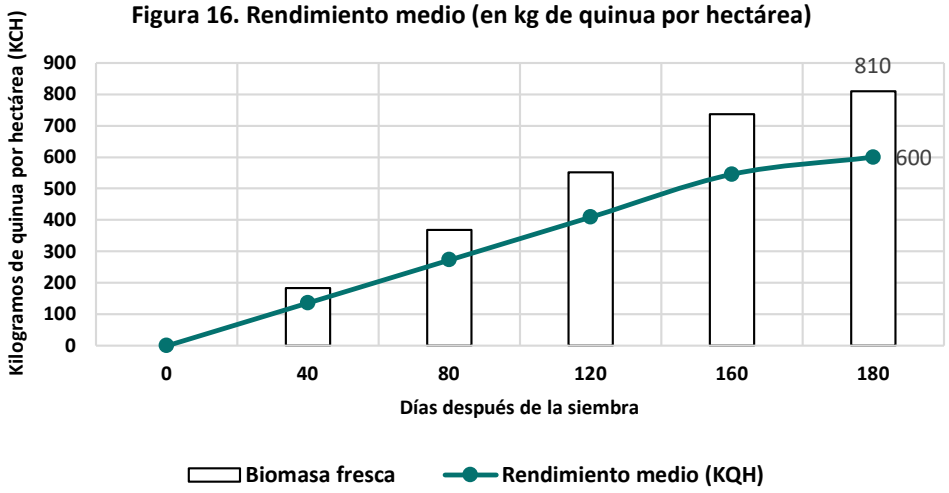
Figura 15. Rendimiento bajo (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 16 muestra un escenario de rendimiento medio para niveles de fertilidad del 60 al 70%, con un contenido moderado de materia orgánica. Se supone un suelo franco-arcilloso, y un pH entre 6.5 y 7.5. Los parámetros climáticos siguen la pauta promedio del climograma de la zona. Los resultados muestran que se alcanzan los 810 kg de biomasa fresca y un rendimiento final de 600 KQH.

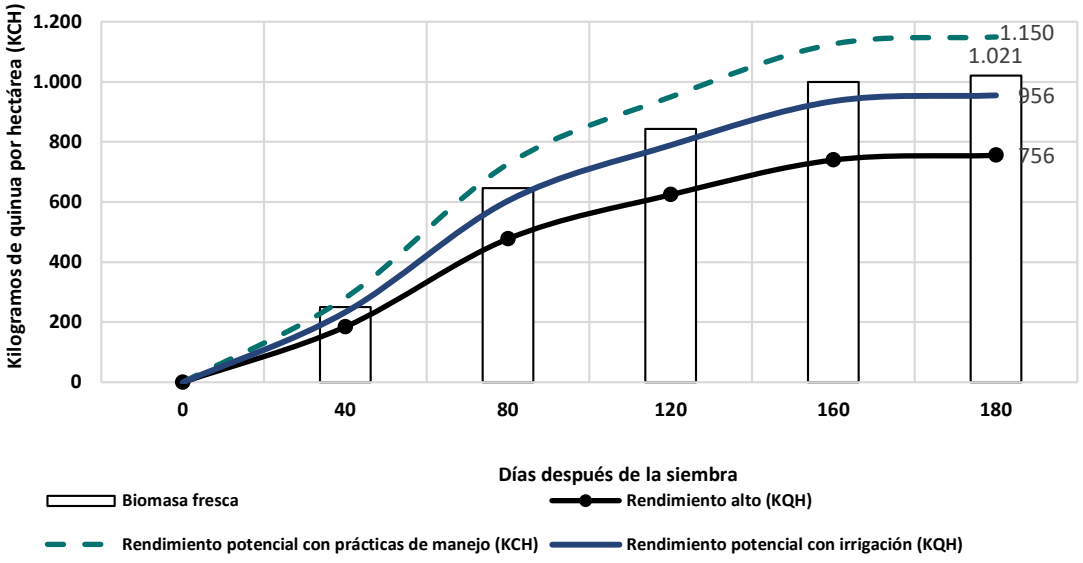
Figura 16. Rendimiento medio (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 17 muestra un escenario de rendimiento alto para niveles de fertilidad del 80% o superiores, con un contenido adecuado de materia orgánica. Se supone un suelo franco-arcilloso con pendientes moderadas y un pH entre 6.5 y 7.5. Los parámetros climáticos siguen la pauta promedio del climograma de la zona. Los resultados muestran que se alcanzan los 1.021 kg de biomasa fresca y un rendimiento final de 756 KQH, sin riego en el ciclo vegetativo. En este ejercicio, además, se calcula el rendimiento potencial del cultivo en condiciones de riego. La aplicación de capas de riego muestra una disminución en la pérdida de biomasa fresca, y se alcanza un rendimiento de hasta 1.150 KQH.

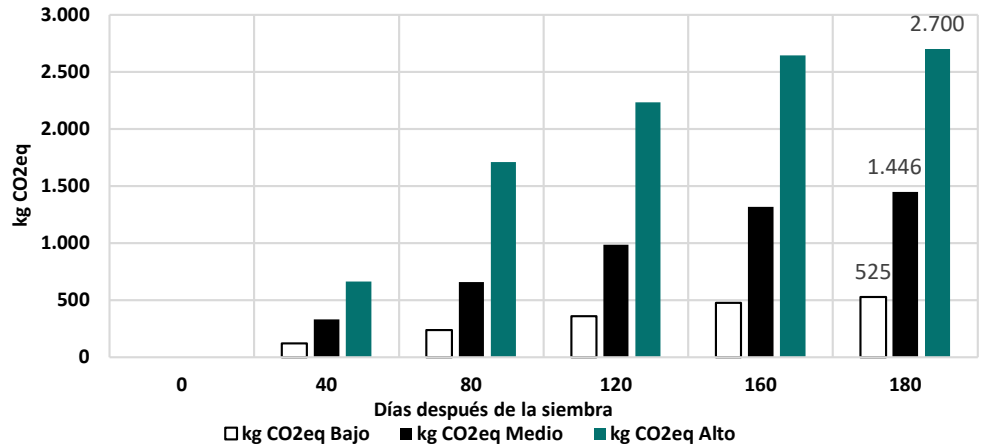
Figura 17. Rendimiento alto (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 18 se estiman las emisiones de CO2eq para los tres escenarios de rendimiento simulados. Para un ciclo fenológico con rendimiento bajo se tiene una emisión de 525 kg de CO2eq por hectárea. Para una trayectoria de rendimiento medio se tiene una emisión de 1,446 kg de CO2eq por hectárea. Por último, para una trayectoria de rendimiento alto se tiene una emisión de 2,700 kg de CO2eq por hectárea. Se observa una relación directa entre el nivel de rendimiento del cultivo y su respectiva emisión de gases de efecto invernadero. El aumento en las emisiones se potencia debió a la intensidad de insumos agrícolas y prácticas que no son amigables con el medio ambiente. Esto sugiere la adopción de Buenas Prácticas Agrícolas que incrementen el rendimiento del cultivo, sin generar un incremento exponencial en las emisiones.

Figura 18. Emisones por nivel de cobertura (en kg CO2eq)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

C. Salinas de Garci Mendoza

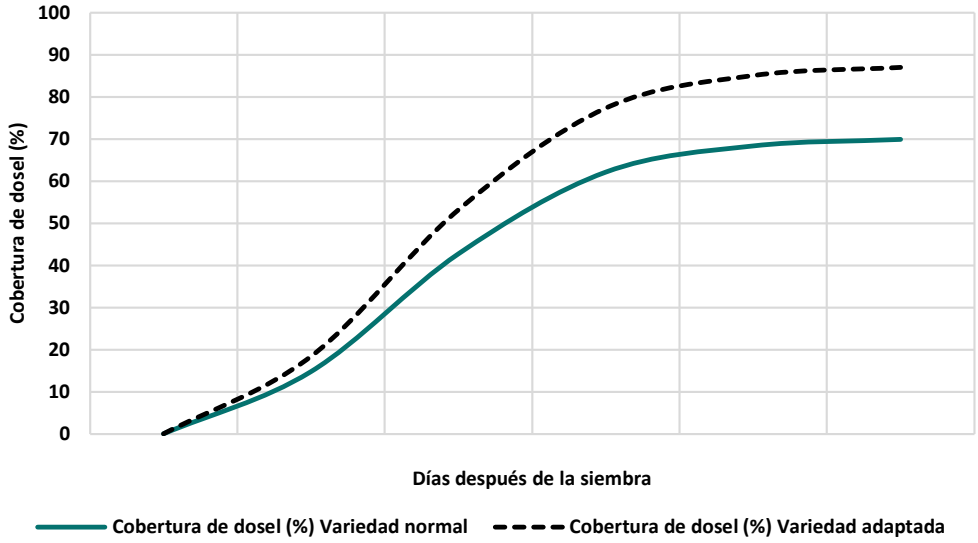
Salinas de Garci Mendoza se encuentra entre los salares de Uyuni y Coipasa, muy cerca de Tunupa y junto a los cerros de San Pedro y San Pablo. La región es quinuera por excelencia, lo que le ha dado el merecido sobrenombre de “capital de la quinua real”. Esta variedad, la quinua real, crece únicamente en esta zona y es altamente valorada en los mercados mundiales por ser orgánica y de una calidad insuperable.

Para un ciclo fenológico medio de 180 días, en la Figura 19 se compara la evolución de la cobertura de dosel (en porcentajes) entre una variedad normal y una variedad adaptada al clima. En Salinas de Garci Mendoza se almacenan semillas de quinua de las variedades Kellu, Toledo, Real Blanca, Utusaya y Pandela. Estas semillas son estratégicas para las familias productoras de la región, que es conocida como la capital de la quinua real.

La variedad Kellu se adapta bien a diferentes climas -incluyendo aquellos frescos-, y puede soportar la falta de riego. También puede tolerar altos niveles de sal en el suelo, vientos y escarcha, lo que permite su cultivo en zonas altas. Al igual que Kellu, la variedad Toledo también se adapta a diferentes condiciones climáticas. Por su parte, la variedad Utasaya se adapta a diferentes climas y a la salinidad, y además puede soportar la falta de riego.

En este ejercicio se seleccionaron las variedades **Kellu** y **Toledo** para un escenario normal, mientras que la variedad **Utasaya** se utilizó para el escenario alternativo. En la etapa de floración se espera que el dosel máximo alcance una altura entre 1.5 y 1.8 m, dependiendo de la variedad. Las variedades Kellu y Toledo logran alcanzar, en promedio, un dosel máximo de 70%; es decir, una altura máxima entre 1.0 y 1.30 metros. Por su parte, la variedad adaptada Utasaya se adapta muy bien, sobre todo al estrés hídrico, y alcanza un dosel máximo de 89%; es decir, de 1.30-1.62 metros.

Figura 19. Cobertura de dosel por tipo de variedad (en %)



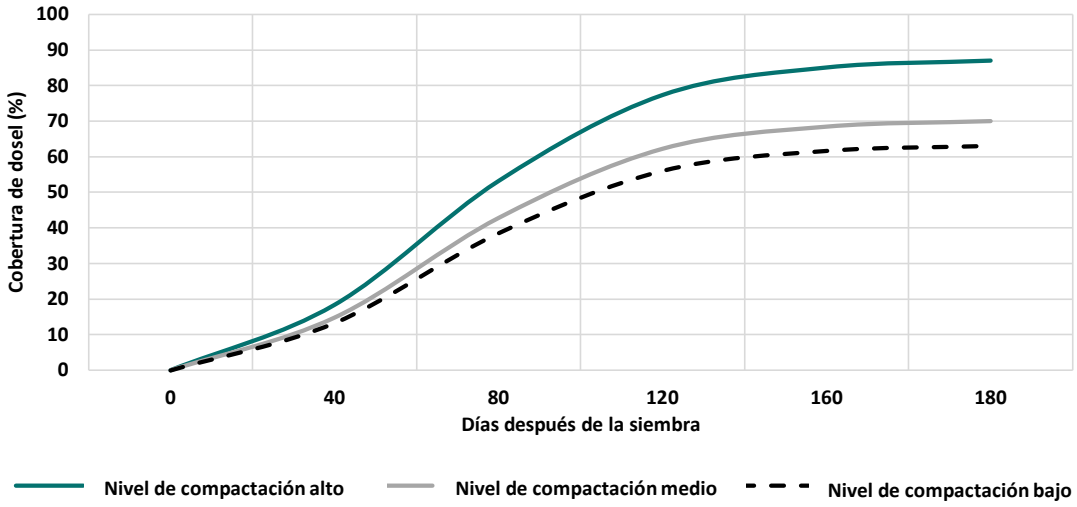
Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 20, evaluamos el crecimiento de la cobertura de dosel según el nivel de compactación del suelo –*i.e.* alto, medio y bajo–. Para un nivel alto, se alcanza un dosel de 88.8%, con una altura comprendida entre los 1.30 y 1.60 metros. El nivel medio de compactación que alcanza un dosel es del 70%, con una altura comprendida entre los 1.02 y 1.31 metros. Finalmente, para un nivel de compactación bajo, se alcanza un dosel de 60.08%, comprendido entre los 0.93 y 1.15 metros. Cabe mencionar que los productores están cada vez más expuestos a episodios climáticos de mayor intensidad, sobre todo a sequías prolongadas. Como resultado, se produce una atrofia celular con un crecimiento de dosel entre el 35% y el 48% (un dosel de 54 cm de alto o inferior), lo que ocasiona pérdidas en la producción de hasta el 88%[10].

En la Figura 21 se evalúan los niveles de fertilidad en el suelo equivalentes para las trayectorias de crecimiento de dosel previamente definidas. Para un nivel de fertilidad del 82% en el suelo, se logra alcanzar un dosel de 88.2%, con una altura comprendida entre los 1.29 y 1.64 metros. Para un nivel de fertilidad del 69% del suelo, se logra alcanzar un dosel de 70.02%, con una altura comprendida entre los 1.05 y 1.27 metros. Finalmente, para un nivel bajo de fertilidad del 53-57%, se logra alcanzar un dosel al 57-62%; es decir, con una altura aproximada de 86 cm.

[10] Este resultado fue estimado fuera del modelo, debido a que los valores de crecimiento de dosel por debajo del 60% no son capturados por el modelo.

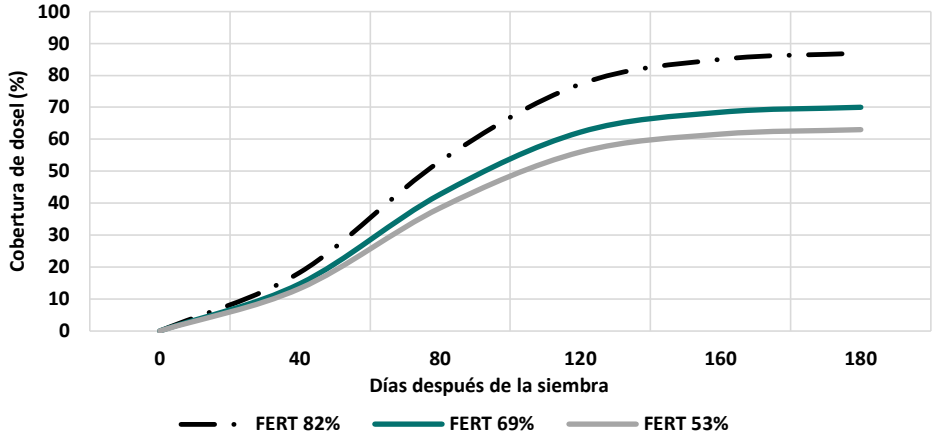
Figura 20. Cobertura de dosel por nivel de compactación (en %)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La fertilidad del suelo está muy relacionada con factores ambientales y con prácticas agrícolas que tienen una enorme incidencia en el rendimiento final del cultivo. En la región de Salinas de Garci Mendoza, las fechas de siembra de las semillas varían según las condiciones climáticas y la disponibilidad del agua. La siembra generalmente se lleva a cabo durante la temporada de lluvias, que suele ocurrir entre los meses de diciembre y marzo. Durante este período, el suelo suele estar más húmedo, lo que favorece la germinación de las semillas y el crecimiento de los cultivos.

Figura 21. Cobertura de dosel por nivel de fertilidad (en %)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

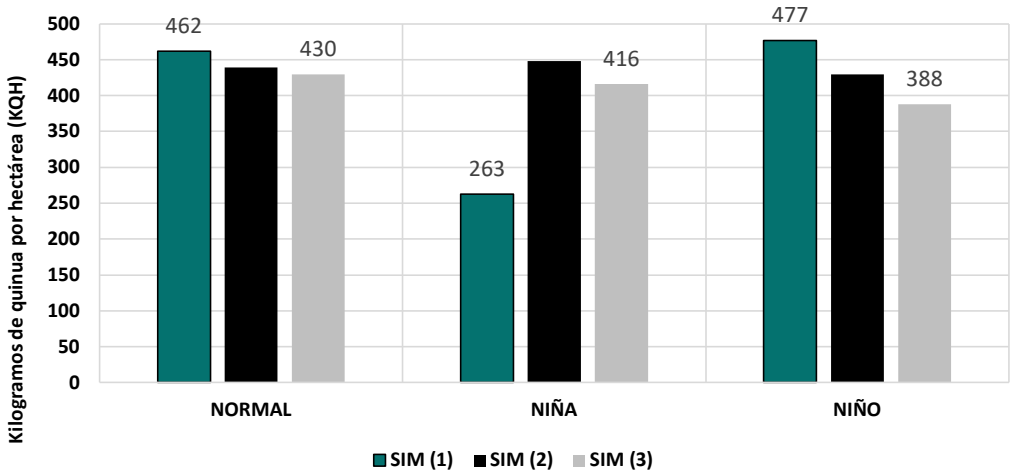
Los suelos en la región son diversos, pero en general se caracterizan por ser áridos y semiáridos, además de tener niveles variables de fertilidad. Su humedad puede ser baja debido a la escasez de precipitaciones durante ciertas épocas del año. De hecho, la disponibilidad del agua es un factor crucial para el éxito de los cultivos en esta región, y los agricultores suelen depender en gran medida de las lluvias.

Las prácticas agrícolas utilizadas en Salinas de Garci Mendoza no son usuales, pero incluyen técnicas como la rotación de cultivos, el barbecho, el uso de abonos orgánicos y el manejo sostenible del agua. La rotación de cultivos es común para mantener la fertilidad del suelo; el barbecho se utiliza para permitir que el suelo se recupere entre temporadas de siembra. El uso de abonos orgánicos contribuye a mejorar la calidad del suelo, y (de nuevo) el manejo sostenible del agua es fundamental.

En la Figura 22 se muestra el impacto de tres escenarios de cambio climático (Normal, Niña y Niño) en la producción de biomasa fresca. Considerando los tres periodos de análisis mencionados: SIM-1 corresponde al valor contemporáneo 2022, SIM-2 es el escenario para el periodo 2023-2039 y SIM-3 es el periodo comprendido entre 2040 y 2050. Los resultados muestran cómo el cambio climático reduce el rendimiento del cultivo en casi todos los escenarios. En el escenario Normal comparado en el tiempo; es decir de forma longitudinal, podemos observar que el cambio climático reduce la producción de 462 a 429.66 KQH, lo que equivale a una disminución del 7% hasta 2050.

En el caso del escenario Niña, se observa un aumento que va de 262,63 KQH (lo Normal) a 415.80 KQH, que equivalen a un aumento de hasta el 37% solo para la cota superior de fertilidad. Durante un episodio de La Niña, la región experimenta un aumento en las precipitaciones, lo que resulta en una mayor humedad relativa en el suelo. La quinua es conocida por su resistencia a las condiciones de humedad y a suelos ligeramente alcalinos. La Niña puede favorecer el rendimiento de la quinua al proporcionar el agua necesaria para el desarrollo saludable de los cultivos. Además, un exceso de humedad en el suelo puede contribuir a un mayor vigor en las plantas y a un aumento en la productividad de los cultivos.

Figura 22. Escenarios de cambio climático (en kg de quinua por hectárea)



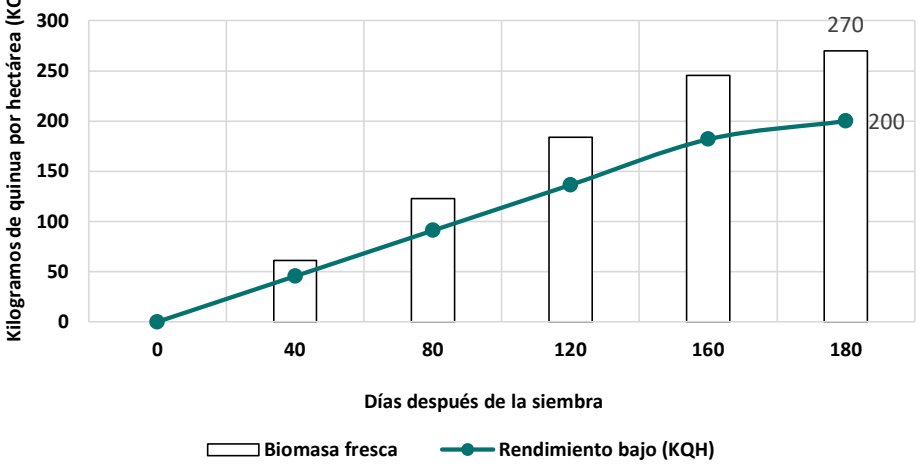
Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

Para el escenario Niño, se tiene una disminución de hasta un (-)18.7% en el rendimiento de la quinua hasta el año 2050. Durante un episodio de El Niño, la región puede experimentar sequías prolongadas y condiciones de aridez extrema. La escasez de agua puede afectar significativamente al crecimiento y el desarrollo de los cultivos, lo que resulta en una reducción del rendimiento. Asimismo, las mayores temperaturas asociadas con El Niño pueden provocar estrés hídrico en las plantas de quinua, lo que reduce su capacidad para absorber nutrientes y agua; esto, a su vez, afecta el crecimiento y la productividad. Finalmente, se espera que más días o más horas de sol puedan acelerar la evaporación del agua en el suelo, lo que contribuye a condiciones más secas y a una mayor demanda de

riego, pudiendo reducir así el rendimiento de la quinua. Estos factores, combinados con el cambio climático, podrían tener un impacto significativo en el rendimiento del grano durante los episodios de El Niño, lo que resalta la importancia de implementar estrategias de adaptación para contrarrestar sus desafíos.

La Figura 23 muestra un escenario de bajo rendimiento para niveles de fertilidad del 55% o inferiores; es decir, aquellos con bajo contenido de materia orgánica. El suelo en Salinas de Garci Mendoza se caracteriza por ser árido y semiárido. La zona tiene un pH ligeramente alcalino que puede afectar la disponibilidad de nutrientes para las plantas. De acuerdo con el modelo, la temperatura afecta especialmente durante las etapas de germinación. También afecta durante la etapa de floración, pues causa una baja producción del polen y, en consecuencia, una mayor incidencia en la esterilidad de las plantas. Los resultados muestran que, en este escenario, se alcanzan los 270 kg de biomasa fresca, con un rendimiento final de 200 KQH.

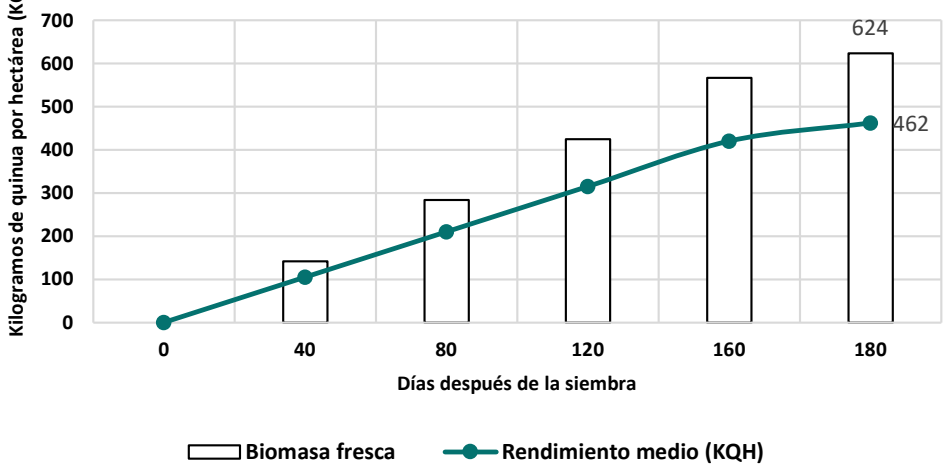
Figura 23. Rendimiento bajo (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 24 muestra un escenario de rendimiento medio para niveles de fertilidad del 60 al 70%, con un contenido moderado de materia orgánica. Se supone la misma estructura de suelo y de pH. Los parámetros climáticos siguen la pauta promedio del climograma de la zona. Los resultados muestran que se alcanzan los 623.70 kg de biomasa fresca –el dosel no supera los 1.40 m–, y que el rendimiento final es de 462 KQH.

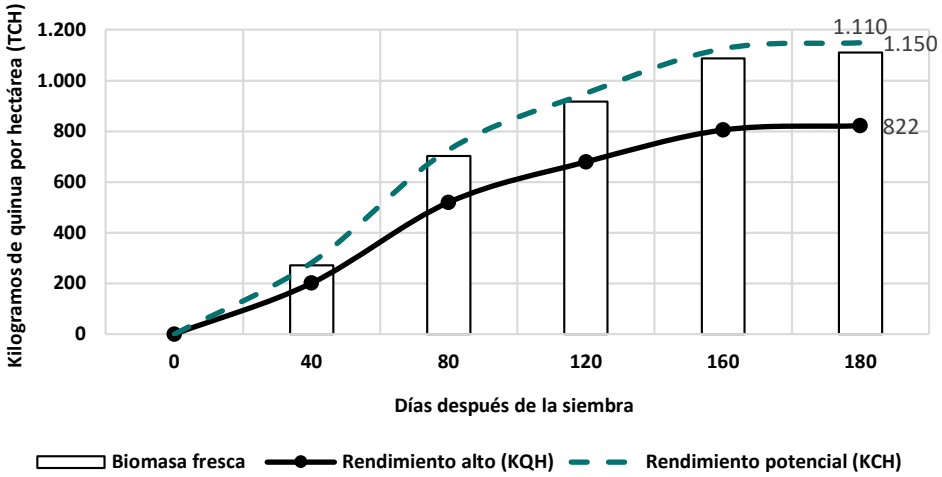
Figura 24. Rendimiento medio (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 25 muestra un escenario de rendimiento alto para niveles de fertilidad del 80% o superiores, con un adecuado contenido de materia orgánica. Se suponen las mismas características estructurales de suelo, pH y climograma. Los resultados muestran que se alcanzan los 1,109.70 kg de biomasa fresca –el dosel no supera los 1,5 m–, con un rendimiento final de 822 KQH sin riego en el ciclo vegetativo. En este ejercicio, además, se calcula el rendimiento potencial del cultivo –implementación de *BPA*–, que alcanza un rendimiento de 1,150 KQH.

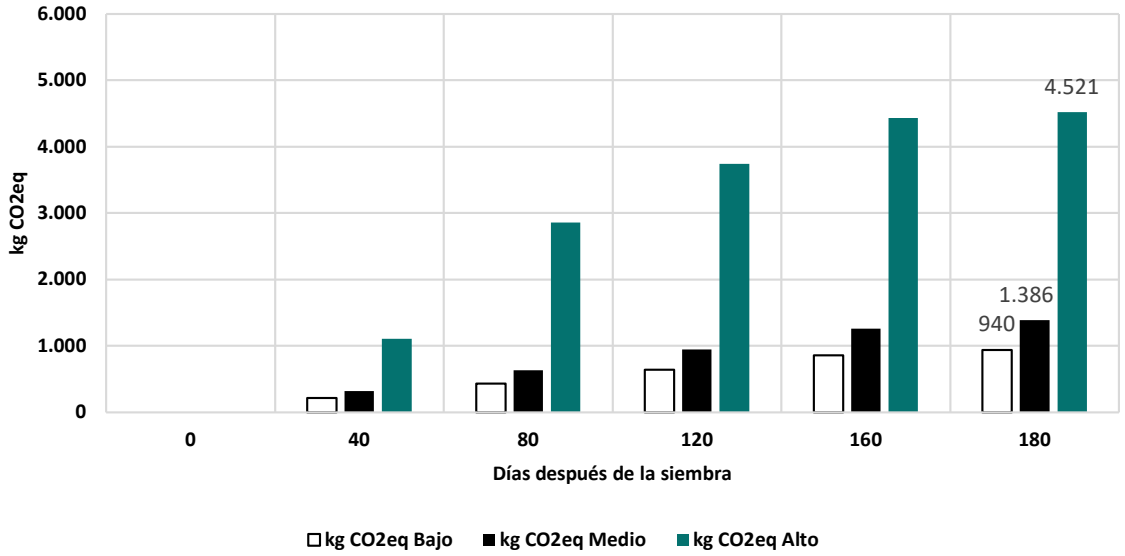
Figura 25. Rendimiento alto; kilogramos de quinua por hectárea



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 26 se estiman las emisiones de CO2eq para los tres escenarios de rendimiento simulados. Para un ciclo fenológico con rendimiento bajo de 200KQH, se tiene una emisión de 940 kg de CO2eq por hectárea. Para una trayectoria de rendimiento medio equivalente a 462KQH, se tiene una emisión de 1,386 kg de CO2eq por hectárea. Por último, para una trayectoria de rendimiento alto alcanzando 822 KQH, se genera una emisión de 4,521 kg de CO2eq por hectárea a los seis meses después de la siembra. Nuevamente se observa un incremento exponencial en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) conforme se aumenta el nivel de rendimiento del cultivo.

Figura 26. Emisones por nivel de cobertura (en kg CO2eq)



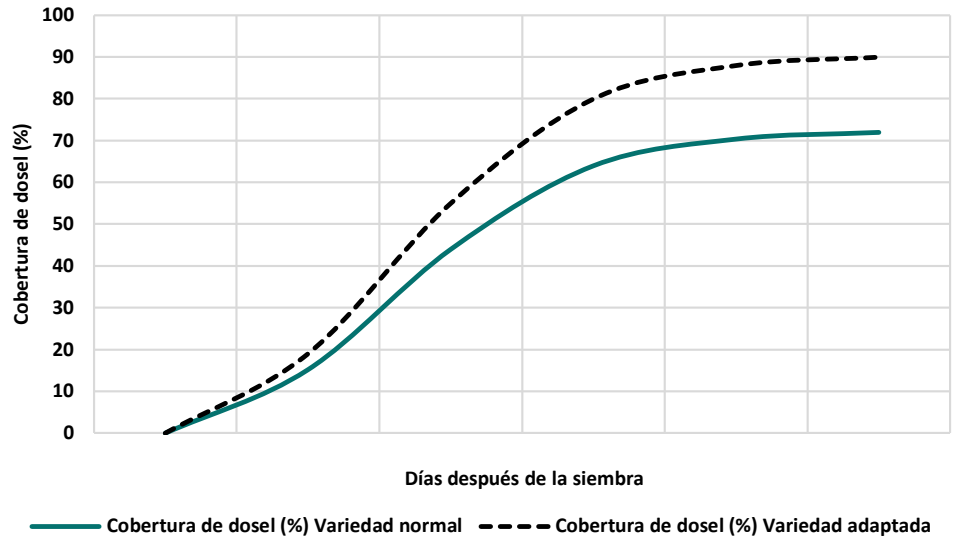
Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

D. Uyuni, Colchacani y Pulcayo

La región de Uyuni –incluyendo zonas aledañas como Colchacani y Pulacayo– está ubicada en el Altiplano Sur boliviano, a 3,674 msnm. Corresponde a la clasificación Cwb de Köppen y Geiger, con inviernos fríos o templados y veranos frescos. Además, los veranos son lluviosos y los inviernos, secos. En Uyuni y sus alrededores, la temperatura media anual es de 7.76 °C; la temperatura máxima (Tmedx) es de 15.24°C y la temperatura media mínima (Tmin) es de 0.47°C. La precipitación en un año normal fluctúa entre 156 y 400 mm/año, mientras que en un año seco fluctúa entre 88 y 315 mm/año. En un año húmedo, fluctúa entre 246 y 493 mm/año. Con base en estos parámetros, se estima que Uyuni –en un año normal– puede llegar a tener un déficit de precipitación de hasta 340 mm/año, con un nivel medio de evapotranspiración de 1.38 mm/día.

Para un ciclo fenológico medio de 180 días, en la Figura 27 se compara la evolución de cobertura de dosel (en porcentajes) entre una variedad normal y una variedad adaptada al clima[11]. Existen muchas variedades de quinua; por ejemplo, están el *Jach'a* Grano, Blanquita, Kurmi, Chucapaca, Aynoca, Patacamaya, Phisancalla, Uyuni, Surumi, Sayaña, Horizontes, Intinaira y Santa María[12].

Figura 27. Cobertura de dosel por tipo de variedad (en %)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En este ejercicio se seleccionaron las variedades ***Jach'a* Grano** y **Uyuni** para el escenario normal, que se prefiere por ser precoz, de grano grande y con resistencia parcial al Mildiu. Por otro lado, las variedades mejoradas (adaptadas) son **Horizontes** y **Blanca Real**, aunque existe evidencia de que las variedades reales son susceptibles al Mildiu. Aunque la semilla y la variedad son importantes en relación con la pureza, adaptación y viabilidad, existen otros factores ambientales que también son determinantes para el rendimiento, especialmente la fertilidad del suelo y la ocurrencia de episodios climáticos de magnitud y severidad media-alta. Estos factores son controlados.

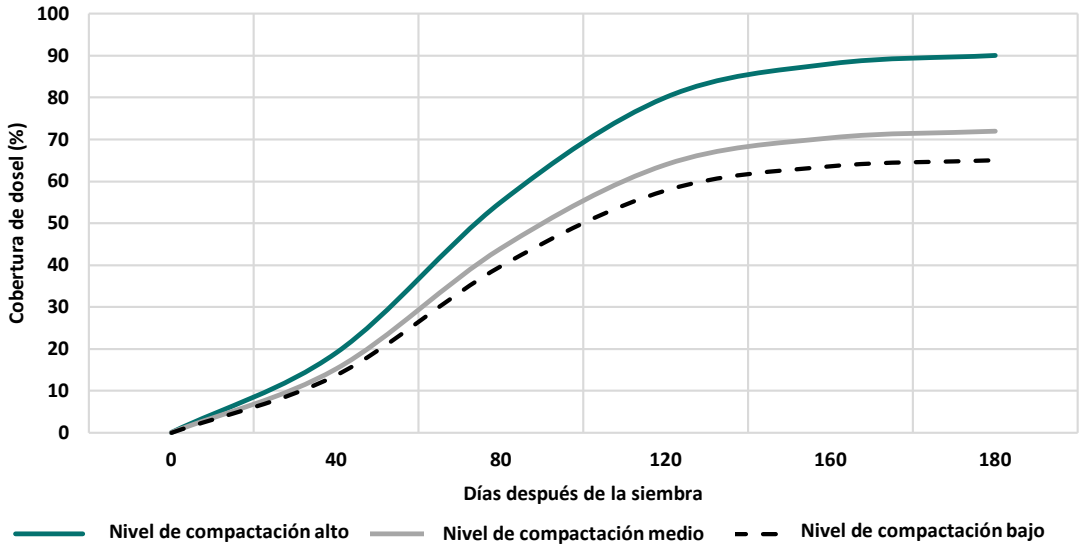
En la etapa de floración, se espera que el dosel máximo alcance una altura entre los 1.5 y 1.8 m, dependiendo de la variedad. La variedad *Jach'a* Grano logra alcanzar su madurez fisiológica con un dosel máximo de 72%; es decir, con una altura máxima entre los 1.08 y 1.30 metros. Por su parte, las variedades mejoradas se adaptan muy bien y alcanzan un dosel máximo del 90%; es decir entre los 1.35 y 1.62 metros.

[11] Por la amplia diversidad genética del cultivo, las variedades de quinua difieren en la duración de su ciclo productivo y su resistencia a las enfermedades, lo que determina su adaptación diferenciada en las zonas de producción.

[12] A escala comercial, se han comercializado las variedades Maniqueña, Cariquimeña, Qanchis Blanco, Kurmi, Rosa Blanca, Toledo Rojo, Amarillo Real, *Jach'a* Grano, Puñete y Moqu.

En la Figura 28 evaluamos el crecimiento de la cobertura de dosel según el nivel de compactación del suelo –*i.e.*, alto, medio y bajo–. Para un nivel adecuado de compactación, se alcanza un dosel comprendido entre los 1.33 y 1.60 metros (90%). Para un nivel medio, se alcanza un dosel comprendido entre los 1.06 y 1.31 metros (72%). Para un nivel bajo, se alcanza un dosel comprendido entre los 0.97 y 1.15 m (65%). Todos son valores simulados muy robustos en relación con el anterior ejercicio. Sin embargo, los productores están cada vez más expuestos a episodios de sequía severa extrema por períodos más largos. En ellos la densidad seca del suelo aumenta de manera significativa. Como resultado se produce una atrofia celular, con un crecimiento del dosel entre el 38 al 50% –un dosel de 57 cm de alto o inferior–, lo que ocasiona pérdidas en la producción de hasta el 86%[13].

Figura 28. Cobertura de dosel por nivel de compactación (en %)

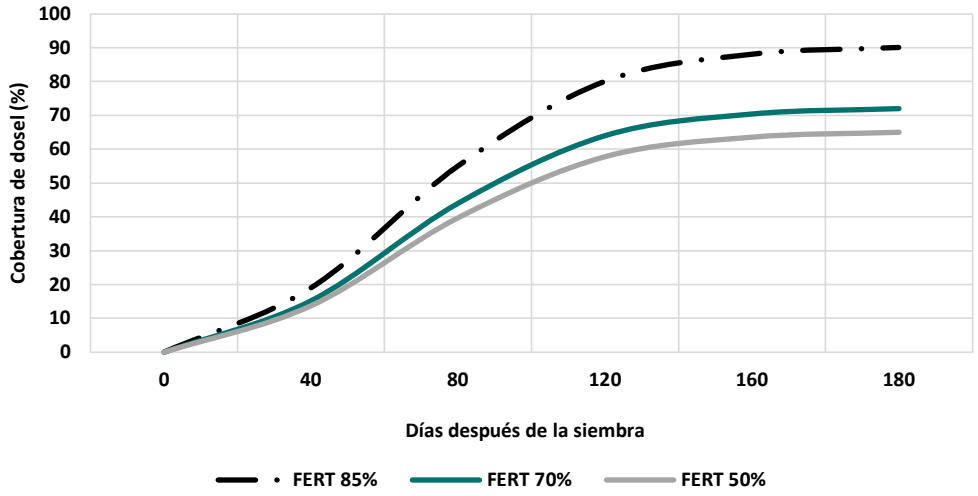


Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 29 se establecen los niveles de fertilidad equivalentes en el suelo para las trayectorias de crecimiento de dosel previamente definidas. Para un nivel de fertilidad del 85% o superior, es posible alcanzar un dosel comprendido entre los 1.32 y 1.66 metros equivalente al 90% de crecimiento. Un nivel de fertilidad del 70% permite alcanzar un dosel comprendido entre los 1.08 y 1.30 metros (72%), mientras que un nivel bajo de fertilidad del 50-60% permite alcanzar un dosel al 60-65% de crecimiento; es decir, con una altura aproximada de 90 cm. En la realidad, la fertilidad del suelo está muy relacionada con los factores ambientales y las prácticas agrícolas que tienen una enorme incidencia en el rendimiento final del cultivo.

[13] Este resultado fue estimado fuera del modelo, debido a que valores de crecimiento de dosel por debajo del 60% no son capturados por el modelo.

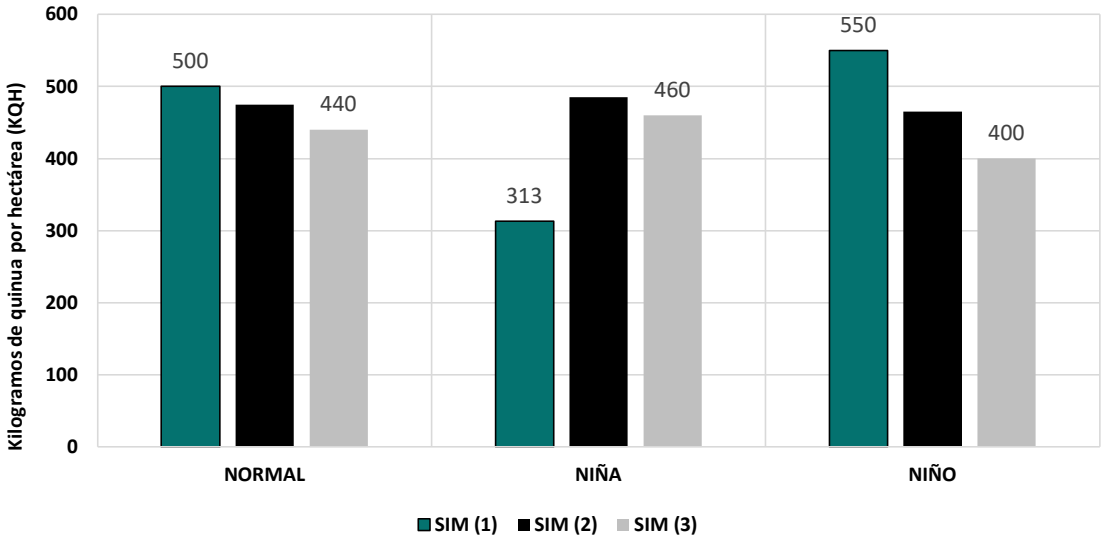
Figura 29. Cobertura de dosel por nivel de fertilidad (en %)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

En la Figura 30 se muestra el impacto de tres escenarios de cambio climático (Normal, Niña y Niño) en la producción de biomasa fresca. Considerando los tres periodos de análisis mencionados: SIM-1 corresponde al valor contemporáneo 2022, SIM-2 es el escenario para el periodo 2023-2039 y SIM-3, para el periodo comprendido entre 2040 y 2050.

Figura 30. Escenarios de cambio climático (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

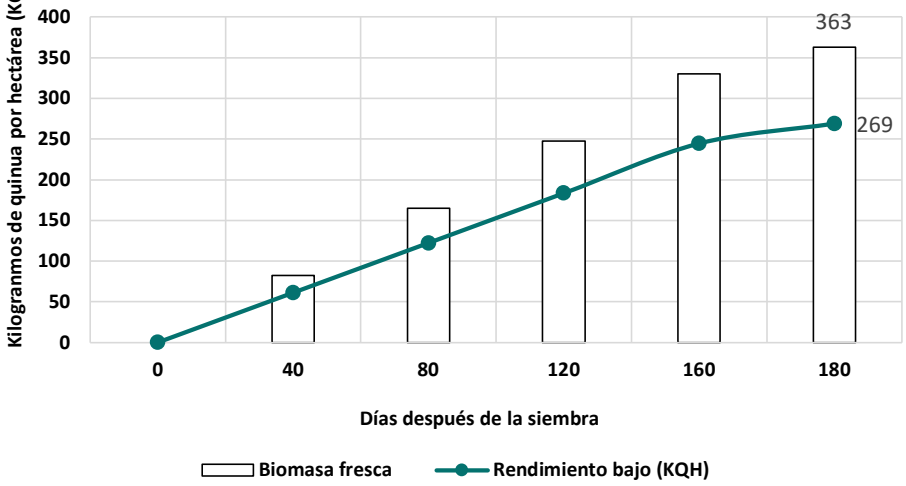
Los resultados muestran cómo el cambio climático reduce el rendimiento del cultivo en casi todos los escenarios. Comparando con el escenario Normal en el tiempo (es decir, de forma longitudinal), podemos observar que el cambio climático reduce la producción de 500 a 440 KQH, lo que equivale a una disminución del 12% hasta 2050.

En el caso del escenario Niña, se observa un incremento de hasta un 47% debido a las características del suelo. Con un mayor grado de humedad se potencia el rendimiento, pasando de 313 a 460 KQH.

Para el escenario Niño se tiene una disminución de hasta un (-)27% en el mismo período. Durante un episodio semejante, la región puede experimentar sequías prolongadas y condiciones de aridez extrema. La escasez de agua puede afectar significativamente el crecimiento y el desarrollo de los cultivos, lo que reduce el rendimiento. Asimismo, las mayores temperaturas asociadas con El Niño pueden provocar estrés hídrico en las plantas, lo cual reduce su capacidad para absorber nutrientes y agua del suelo, algo que a su vez afecta al crecimiento y la productividad. Finalmente, se espera que un mayor número de días o más horas de sol aceleren la evaporación del agua en el suelo.

La Figura 31 muestra un escenario de bajo rendimiento para niveles de fertilidad del 55% o inferiores, con un contenido moderado-bajo de materia orgánica (Nitrógeno). Se supone un suelo franco-arcilloso con pendientes moderadas y un pH entre 6.5 y 7.5. Los parámetros climáticos siguen la pauta promedio del climograma de la zona. Según el modelo, la temperatura afecta especialmente a las etapas de germinación, ya que un mínimo de -4 °C es requerido. La temperatura también afecta a la etapa de floración, pues causa una baja producción del polen y, en consecuencia, esterilidad en las plantas. En la etapa de ramificación no hay problemas con los descensos de temperatura. Los resultados muestran que se alcanzan los 363 kg de biomasa fresca –el dosel no supera los 1.30 metros de altura–, y el rendimiento final es de 269 KQH.

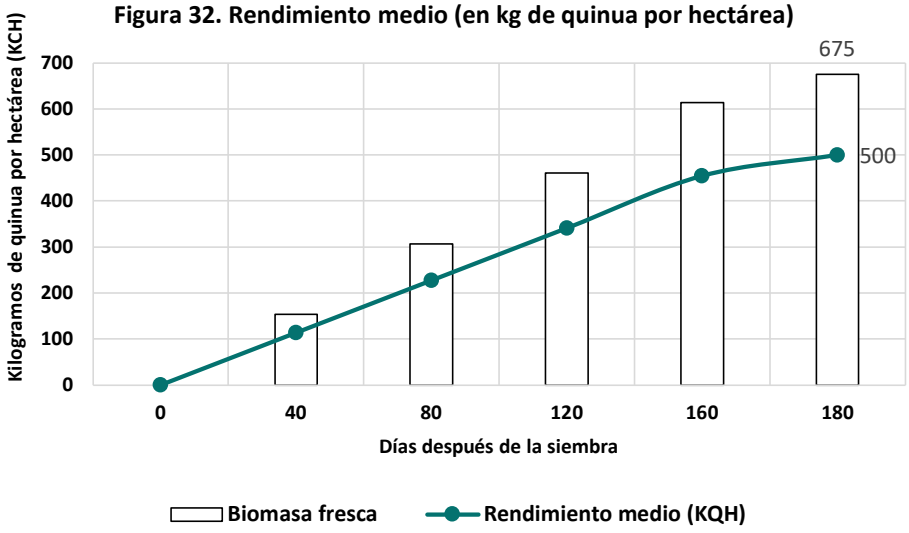
Figura 31. Rendimiento bajo (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 32 muestra un escenario de rendimiento medio para niveles de fertilidad del 60 al 70%, con un contenido moderado de materia orgánica. Se supone un suelo franco-arcilloso con pendientes moderadas y un pH entre 6.5 y 7.5. Los parámetros climáticos siguen la pauta promedio del climograma de la zona. Los resultados muestran que se alcanzan los 675 kg de biomasa fresca –el dosel no supera los 1.39 metros de altura–, y el rendimiento final es de 500 KQH.

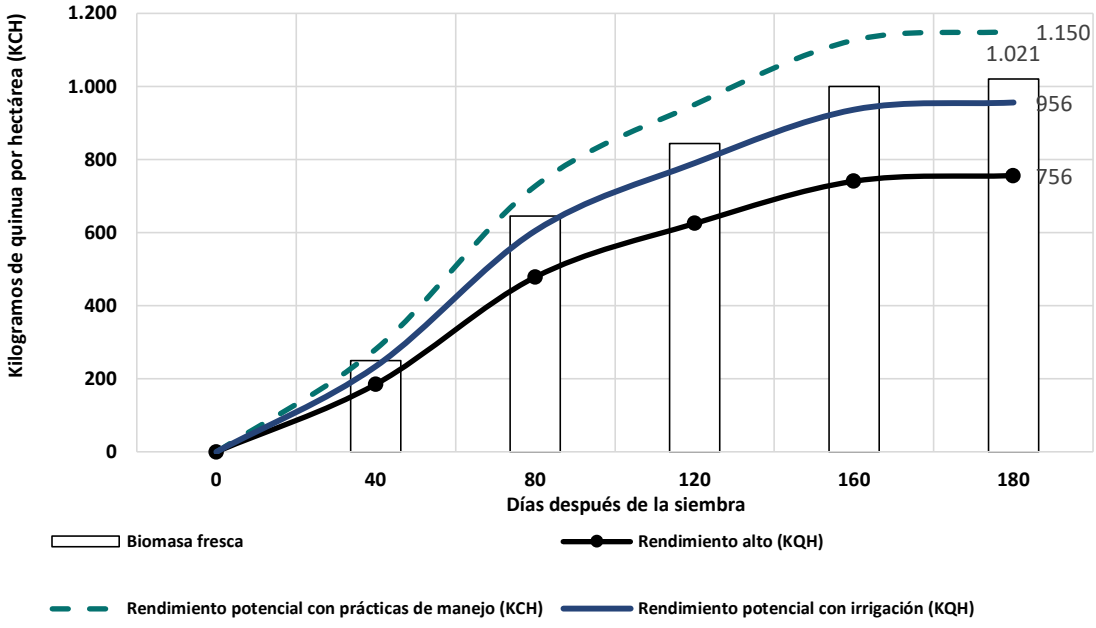
Figura 32. Rendimiento medio (en kg de quinua por hectárea)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

La Figura 33 muestra un escenario de rendimiento alto para niveles de fertilidad del 80% o superiores, con un contenido adecuado de materia orgánica. Se supone un suelo franco-arcilloso con pendientes moderadas y un pH entre 6.5 y 7.5. Los parámetros climáticos siguen la pauta promedio del climograma de la zona. Los resultados muestran que se alcanzan los 1.021 kg de biomasa fresca –el dosel no supera el 1,48 metro de altura–, y el rendimiento final es de 756 KQH, sin riego en el ciclo vegetativo. En este ejercicio, además, se calcula el rendimiento potencial del cultivo en condiciones de optimalidad. La aplicación de capas de riego muestra una disminución en la pérdida de biomasa fresca, con una producción de 957 kilogramos, mientras que la aplicación de un manejo adecuado del cultivo permite alcanzar un rendimiento de hasta 1,150 KQH.

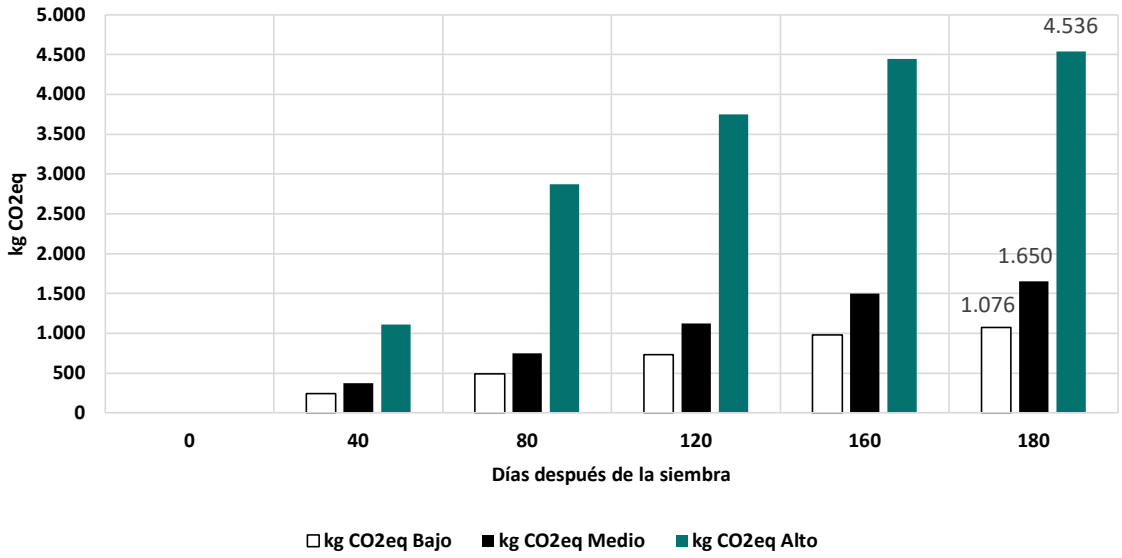
Figura 33. Rendimiento alto; kilogramos de quinua por hectárea



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

Finalmente, en la Figura 34 se estiman las emisiones de CO2eq para los tres escenarios de rendimiento simulados. Para un ciclo fenológico con rendimiento bajo (269 KQH), se tiene una emisión de 1,076 kg de CO2eq por hectárea. Para una trayectoria de rendimiento medio (500 KQH), se tiene una emisión de 1,650 kg de CO2eq por hectárea. Por último, para una trayectoria de rendimiento alto (756 KQH), se tiene una emisión de 4,536 kg de CO2eq por hectárea.

Figura 34. Emisones por nivel de cobertura (en kg CO2eq)



Fuente: Elaboración propia con base en el modelo ajustado NL-CROP.

6. Conclusiones

El modelo NL-CROP es un modelo no lineal diseñado para la evaluación del rendimiento de cultivos que ha demostrado ser una herramienta poderosa en la investigación agrícola. A diferencia de los modelos lineales tradicionales, que simplifican las relaciones entre variables, NL-CROP captura la complejidad de las interacciones entre los estresores hídricos, térmicos y climáticos. Esta capacidad no lineal permite una representación más precisa de cómo estos factores afectan el rendimiento del cultivo, lo que resulta crucial para las estrategias de adaptación y manejo sostenible. Los principales hallazgos de la aplicación del modelo NL-CROP al cultivo de la quinua en Bolivia son los siguientes:

Las variedades de quinua adaptadas a las condiciones locales, como la Pasankalla en Pampa Aullagas-Challapata, la Quinua Real en Patacamaya y la Utasaya en Salinas de Garci Mendoza, logran un mayor desarrollo del dosel foliar y alcanzan rendimientos más elevados en comparación con variedades convencionales. Esto es fundamental, ya que estas variedades han evolucionado en su entorno específico y han desarrollado características que les permiten tolerar mejor las condiciones climáticas adversas (como las sequías o las heladas). La adaptación genética no solo mejora la capacidad de la planta para capturar luz solar y realizar la fotosíntesis, sino que también optimiza el uso de nutrientes y agua, lo que resulta en una producción más eficiente.

Sin embargo, el rendimiento de la quinua no depende únicamente de la selección de variedades. El nivel de compactación y fertilidad del suelo son factores clave que influyen en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Se ha encontrado que los suelos con una adecuada porosidad permiten alcanzar mayores rendimientos, ya que facilitan el desarrollo radicular y la circulación de aire y agua. En contraste, los suelos compactados limitan el crecimiento de las raíces, restringen el acceso a nutrientes y agua, y pueden provocar estrés en las plantas, lo que resulta en una

disminución significativa del potencial productivo. Así, la calidad del suelo se convierte en un determinante esencial para maximizar la producción de la quinua.

La relación entre la materia orgánica del suelo y los rendimientos también es crítica. Los suelos con bajo contenido de materia orgánica alcanzan rendimientos alrededor de los 600 kg/ha, muy por debajo de su rendimiento potencial máximo incluso en condiciones climáticas normales. La materia orgánica es fundamental para la salud del suelo, ya que mejora su estructura, retiene la humedad y proporciona nutrientes esenciales. Sin una adecuada gestión de la fertilidad del suelo, la capacidad de producción de la quinua se ve comprometida, lo que subraya la necesidad de implementar buenas prácticas agrícolas que aumenten el contenido de la materia orgánica.

Una mejora en el contenido de la materia orgánica en el suelo permite alcanzar rendimientos superiores a los 800 kg/ha bajo condiciones climáticas normales. Esto se debe a que un mayor contenido de materia orgánica mejora la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, lo que favorece un crecimiento más robusto en las plantas. Además, la materia orgánica promueve la actividad biológica en el suelo, contribuyendo a un ecosistema más saludable y productivo. Un suelo más robusto también hace que el cultivo sea más resiliente y resistente a los efectos adversos del cambio climático, lo que es crucial en un contexto donde las condiciones ambientales son cada vez más inciertas.

En suelos con un adecuado contenido de materia orgánica, los rendimientos pueden superar los 1,400 kg/ha en condiciones de secano, mostrando la importancia del buen manejo de los suelos. Este manejo implica no solo la adición de materia orgánica, sino también la implementación de prácticas como la rotación de cultivos y el uso de coberturas vegetales. A su vez, la mejora en la productividad del agua permite alcanzar rendimientos superiores a los 2,000 kg/ha, resaltando la interrelación entre la gestión del suelo y la eficiencia en el uso del agua, que es fundamental para la sostenibilidad de la producción agrícola en el contexto del cambio climático.

Los análisis de los escenarios de cambio climático (Normal, Niña y Niño) revelan un impacto significativo en la producción de biomasa fresca de quinua. A lo largo del periodo estudiado, se anticipa una reducción hasta del 13% en la producción, considerando un periodo de tiempo hasta 2050. En particular, el escenario Niña presenta un aumento de hasta el 32% atribuido al incremento en las precipitaciones, que, junto con la eficiencia de uso del agua de la quinua; es probable que se pueda producir más grano. Por otro lado, el escenario Niño muestra una caída drástica del 37%, debido a sequías prolongadas y condiciones de aridez que limitan el crecimiento de la quinua. Estos hallazgos subrayan la vulnerabilidad de este cultivo -a pesar de su resistencia a ciertas condiciones climáticas-, y destacan la necesidad de implementar estrategias de adaptación para mitigar los efectos adversos del cambio climático.

Por último, el análisis de las emisiones de CO2eq para los tres escenarios de rendimiento simulados revela la relación directa entre los niveles de rendimiento y las emisiones de gases de efecto invernadero (a excepción del caso de Pampa Aullagas, que muesrta una relación en forma de U, y que el rendimiento medio es el que genera menos emisiones). Por ejemplo, para un ciclo fenológico con rendimiento bajo en la zona de Uyuni (269 KQH), se tiene una emisión de 1,076 kg de CO2eq por hectárea. Para una trayectoria de rendimiento medio (500 KQH), se registra una emisión de 1,650 kg de CO2eq por hectárea. Finalmente, para una trayectoria de rendimiento alto (756 KQH), se observa una emisión de 4,536 kg de CO2eq por hectárea. Estos perfiles de emisiones reflejan cómo los niveles de rendimiento influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero. Un bajo rendimiento se asocia con menores emisiones debido a un uso menos intensivo de insumos agrícolas, mientras que un aumento en el rendimiento, especialmente en niveles altos, conlleva un incremento significativo en las emisiones, lo que es atribuible a la intensificación de las prácticas agrícolas. Este hallazgo subraya la necesidad de equilibrar la producción agrícola con

prácticas sostenibles que minimicen las emisiones de carbono, promoviendo así un enfoque más responsable hacia la gestión agrícola.

La principal conclusión de este trabajo es que, para alcanzar altos rendimientos y sostenibilidad en la producción de la quinua, es fundamental asegurar un manejo adecuado del suelo, del agua y de las prácticas agrícolas. Estos tres elementos son interdependientes y deben ser considerados de manera sinérgica para enfrentar los desafíos del cambio climático y optimizar la producción. Un suelo bien gestionado es esencial para el desarrollo robusto de la quinua, ya que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes y en la capacidad de retención de agua. Sin embargo, la calidad del suelo por sí sola no garantiza buenos rendimientos: es igualmente crucial implementar un manejo eficiente del agua. La disponibilidad del agua, especialmente en el contexto de cambio climático, puede determinar la capacidad de las plantas para crecer y desarrollarse adecuadamente. Además, las prácticas agrícolas adecuadas, como la rotación de cultivos y el uso de coberturas vegetales, complementan estos esfuerzos al mejorar la salud del suelo y optimizar el uso de recursos. Estas prácticas no solo contribuyen a aumentar la materia orgánica del suelo, sino que también fomentan un ecosistema más equilibrado y resiliente.

La integración de estos tres elementos—suelo, agua y prácticas agrícolas—permite alcanzar trayectorias de rendimiento que no solo son altas, sino también sostenibles. Al hacerlo, se pueden implementar estrategias de producción que no solo reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también aumenten la captura de carbono en el suelo. Esto sería crucial para mitigar el impacto del cambio climático, asegurando que la producción de quinua no solo sea viable en el presente, sino también en el futuro. En resumen, un enfoque holístico que considere la interrelación entre el manejo del suelo, el uso del agua y las prácticas agrícolas será esencial para lograr una producción sostenible y resiliente frente a los desafíos ambientales actuales.

Glosario

Cobertura del dosel vegetal (CC): Fracción del suelo cubierta por el dosel vegetal (Goudriaan y Van Laar, 1994).
Cobertura máxima del dosel vegetal (CC_max): Cobertura máxima que puede alcanzar el dosel vegetal (Goudriaan y Van Laar, 1994).
Coeficiente de extinción de la luz (k): Parámetro que describe la tasa a la que la luz se atenúa a medida que pasa a través del dosel vegetal (Monsi y Saeki, 1953).
Coeficiente de senescencia del dosel vegetal (ks): Parámetro que describe la tasa de senescencia o envejecimiento del dosel vegetal (Goudriaan y Van Laar, 1994).
Coeficiente de senescencia a 360 ppm de CO2 (ks0): Tasa de senescencia del dosel vegetal a una concentración de 360 ppm de CO2 (Medlyn *et al.*, 1999).
Concentración de CO2 (CO2): Cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera (Myhre, *et al.*, 2013)
Conductancia estomatal (gs): Capacidad de los estomas de la planta para intercambiar gases con la atmósfera (Medlyn *et al.*, 1999).
Conductancia estomatal a 360 ppm de CO2 (gs0): Conductancia estomatal de la planta a una concentración de 360 ppm de CO2 (Medlyn *et al.*, 1999).
Dosel vegetal: Capa superior de la vegetación que cubre el suelo, formada por las hojas y tallos de las plantas (Monsi y Saeki, 1953).
Escenarios de cambio climático (B1, A1T, B2, A1B, A2, A1F): Diferentes proyecciones de las condiciones climáticas futuras, considerando factores como las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014).
Grados día (°D): Acumulación térmica diaria necesaria para el desarrollo del cultivo (McMaster y Wilhelm, 1997).
Índice de área foliar (LAI): Relación entre el área total de las hojas de la planta y área del suelo que ocupa (Monsi y Saeki, 1953).
Índice de cosecha (HI): Relación entre el rendimiento económico y la biomasa total producida por el cultivo (Hay, 1995). Relación entre la producción de grano y la producción total de biomasa (Sadras y Cassman, 2008).
Modelo de Hargreaves-Samani: Modelo utilizado para estimar la temperatura máxima y mínima a partir de datos de temperatura media y radiación solar (Hargreaves y Samani, 1982).
Productividad del agua (WP): Cantidad de biomasa producida por unidad de agua utilizada por la planta (Steduto *et al.*, 2012).
Radiación solar extraterrestre (Ra): Cantidad de energía solar que llega a la parte superior de la atmósfera (Hargreaves y Samani, 1982).
Senescencia del dosel vegetal (ks): Tasa de envejecimiento o pérdida de vigor del dosel vegetal (Goudriaan y Van Laar, 1994).
Temperatura base (Tb): Temperatura mínima por debajo de la cual no hay crecimiento del cultivo (McMaster y Wilhelm, 1997).
Temperatura óptima (To): Temperatura a la cual el cultivo alcanza su tasa de desarrollo máxima (McMaster y Wilhelm, 1997).
Temperatura media diaria (Tmean): Promedio de las temperaturas máxima y mínima diarias (Hargreaves y Samani, 1982).
Temperatura mínima diaria (Tmin): Temperatura más baja registrada durante el día (Hargreaves y Samani, 1982).

Bibliografía

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Roma, 300(9), D05109.

Antle, J. M., Stoorvogel, J. J. y Valdivia, R. O. (2014). New Parsimonious Simulation Methods and Tools to Assess Future Food and Environmental Security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1639), p.201-208.

Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rötter, R. P., Cammarano, D. y Brisson, N. (2013). Uncertainty in Simulating Wheat Yields Under Climate Change. *Nature Climate Change*, 3(9), 827-832.

Boote, K. J., Jones, J. W., Mishoe, J. W. y Berger, R. D. (1983). Coupling Pests to Crop Growth Simulators to Predict Yield Reductions. *Phytopathology*, 73(11), 1581-1587.

Boote, K. J., Jones, J. W. y Pickering, N. B. (1996). Potential Uses and Limitations of Crop Models. *Agronomy Journal*, 88(5), 704-716.

Boulanger, J. P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R. y Vicuña, S. (2014). *Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change.* Central and South America in Climate Change 2014. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University y Nueva York, Estados Unidos de América. pp. 102-104.

Brouwer, C., Goffeau, A. y Heibloem, M. (1987). *Necesidades de agua de los cultivos*. Manual de campo n°3. Roma, Italia: FAO. pp. 79.

Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R. y Chhetri, N. (2014). A Meta-Analysis of Crop Yield Under Climate Change and Adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287-291.

Challinor, A. J., Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., Ferro, C. A. y Stephenson, D. B. (2007). Adaptation of Crops to Climate Change Through Genotypic Responses to Mean and Extreme Temperatures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(1-2), 190-204.

Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1976). Las necesidades de agua de los cultivos. *Estudio FAO: riego y drenaje*, 24, 194 p33.

Ewert, F., van Ittersum, M. K., Heckelei, T., Therond, O., Bezlepkina, I. y Andersen, E. (2011). Scale Changes and Model Linking Methods for Integrated Assessment of Agri-Environmental Systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(1-2), 6-17.

Fodor, N., Challinor, A., Droutsas, I., Ramirez-Villegas, J., Zabel, F., Koehler, A. K., y Foyer, C. H. (2017). Integrating Plant Science and Crop Modeling: Assessment of the Impact of Climate Change on Soybean and Maize Production. *Plant and Cell Physiology*, 58(11), 1833-1847. https://doi.org/10.1093/pcp/pcx141

Goudriaan, J., y van Laar, H. H. (1994). *Modelling Potential Crop Growth Processes: Textbook with Exercises*. Springer Science & Business Media.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático -IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1982). Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230.

Hay, R. K. (1995). Harvest Index: A Review of Its Use in Plant Breeding and Crop Physiology. *Annals of Applied Biology*, 126(1), 197-216.

Hsiao, T. C. (1973). Plant Responses to Water Stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24(1), 519-570.

Holzworth, D. P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I. N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J. W. y Thorburn, P. (2015). Agricultural Production Systems Modelling and Software: Current Status and Future Prospects. *Environmental Modelling & Software*, 72, 276-286.

Holzworth, D. P., Huth, N. I., deVoil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C. y Moore, A. D. (2014). APSIM–Evolution Towards a New Generation of Agricultural Systems Simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327-350.

Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Boote, K. J., Hunt, L. A., Ligon, J. I., Ever, U.P.K.N., Gijsman, A. J. y Ritchie, J. T. (2010). *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), Version 4.5 [CD-ROM].* University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Jacobsen, M. Z., Delucchi, M. A., Barth, M., Bauer, S., Natalie, F., Gartz, S., y Mwabonje, O. (2011). Impacts of Climate Change on Regional Climate, Air Quality, and Human Health. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(5), 691-706.

Jacobsen, S. E. (2011). The Situation for Quinoa and its Production in Southern Bolivia: From Economic Success to Environmental Disaster. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197(5), 390-399.

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J. y Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265.

Lobell, D. B. y Gourdji, S. M. (2012). The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity. *Plant Physiology*, 160(4), 1686-1697.

Lobell, D. B. y Asseng, S. (2017). Comparing Estimates of Climate Change Impacts from Process-Based and Statistical Crop Models. *Environmental Research Letters*, 12(1), p.15.

McDowell, J. Z., y Hess, J. J. (2012). Accessing Adaptation: Multiple Stressors on Livelihoods in the Bolivian Highlands Under a Changing Climate. *Global Environmental Change*, 22(2), 342-352.

McMaster, G. S., y Wilhelm, W. W. (1997). Growing Degree-Days: One Equation, Two Interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 291-300.

Medlyn, B. E., Dreyer, E., Ellsworth, D., Forstreuter, M., Harley, P. C., Kirschbaum, M. U., y Wang, S. (1999). Temperature Response of Parameters of a Biochemically-Based Model Photosynthesis. II. A Review of Experimental Data. *Plant, Cell & Environment*, 22(12), 1516-1526.

Monsi, M. y Saeki, T. (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 14(1), 22-52.

Monteith, J. L. (1985). *Evaporation from Land Surfaces: Progress in Analysis and Prediction Since 1948*. Advances in Evapotranspiration, Proc. National Conference on Advances in Evapotranspiration. Chicago, Illinois, Estados Unidos de América: Am. Soc Agric. Eng., St. Joseph, MI.

Morton, J. F. (2007). The Impact of Climate Change on Smallholder and Subsistence Agriculture. *Proceedings of the national Academy of Sciences*, *104*(50), 19680-5.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F. M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J. y Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change*, 423, 658-740.

Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., Lobell, D. B. and Travasso, M. I. (2014). Food Security and Food Production Systems. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (485-533). Cambridge University Press.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. y Fereres, E. (2009). Aquacrop – The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal* 101, 438-447.

Rivington, M. y Koo, J. (2010). Linking Climate Change Modellers and Impact Assessment Users: A Review of Tools and Methods. *Integrated Assessment of Agriculture and Sustainable Development: Setting the Agenda for Science and Policy*. Wageningen, Países Bajos: Wageningen Academic Publishers, 45-56.

Rodríguez, C. (1980). *La radiación solar en la estimación de la evapotranspiración potencial*. Chapingo, México: Departamento de irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo.

Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P., Antle, J. M., Nelson, G. C., Porter, C., Janssen, S. y Asseng, S. (2013). The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and Pilot Studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170,166-182.

Rötter, R. P., Carter, T. R., Olesen, J. E. y Porter, J. R. (2011). Crop–Climate Models Need an Overhaul. *Nature Climate Change*, 1(4), 175-177.

Rötter, R. P., Appiah, M., Fichtler, E., Kersebaum, K. C., Trnka, M. y Hoffmann, M. P. (2018). Linking Modelling and Experimentation to Better Capture Crop Impacts of Agroclimatic Extremes—A review. *Field Crops Research*, 221, 142-156.

Sadras, V. O., y Cassman, K. G. (2008). Yield Gaps in Grain Crops: Causes and Remedies. *Crop Physiology*, 495-517. Academic Press.

Semenov, M. A., y Stratonovitch, P. (2015). Adapting Wheat Ideotypes for Climate Change: Accounting for Uncertainties in CMIP5 Climate Projections. *Climate Research*, 65, 123-139. https://doi.org/10.3354/cr01297

Seguin B., Baelz, S., Monget, J. M. y Petit, V., (1982). Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évaporation régionale. Mise au point méthologique sur le site de la Crau. *Agronomie*, 2, 7-16.

Shibu, M. E., Leffelaar, P. A., van Keulen, H. y Aggarwal, P. K. (2010). Quantitative Description of Soil Organic Matter Dynamics—A Review of Approaches with Reference to Rice-Based Cropping Systems. *Geoderma*, 155(1-2), 1-15. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.003

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., y Raes, D. (2012). Crop Yield Response to Water. *FAO Irrigation and drainage paper*, 66.

Stöckle, C. O., Donatelli, M. y Nelson, R. (2003). CropSyst, A Cropping Systems Simulation Model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 289-307.

Tao, F., Rötter, R. P., Palosuo, T., Díaz-Ambrona, C. G. H., Mínguez, M. I., Semenov, M. A., y Schulman, A. H. (2018). Contribution of Crop Model Structure: Parameters and Climate Projections to Uncertainty in Climate Change Impact Assessments. *Global Change Biology*, 24(3), 1291-1307. https://doi.org/10.1111/gcb.13965

Thornley, J. H., y France, J. (2007). *Mathematical Models in Agriculture: Quantitative Methods for the Plant, Animal and Ecological Sciences*. Cabi.

Trnka, M., Rötter, R. P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K. C., Olesen, J. E., Žalud, Z. y Semenov, M. A. (2014). Adverse Weather Conditions for European Wheat Production will Become More Frequent with Climate Change. *Nature Climate Change*, 4(7), 637-643.

Twomlow, S., Mugabe, F. T., Mwale, M., Delve, R., Nanja, D., Carberry, P. y Howden, M. (2008). Building Adaptive Capacity to Cope with Increasing Vulnerability due to Climatic Change in Africa–A New Approach. *Physics and Chemistry of the Earth,* A/B/C, 33(8-13), 780-787.

Valdivia, C., Thibeault, J., Gilles, J. L., García, M. y Seth, A. (2013). Climate Trends and Projections for the Andean Altiplano and Strategies for Adaptation. *Advances in Geosciences*, 33, 69-77.

White, J. W., Hoogenboom, G., Kimball, B. A. and Wall, G. W. (2011). Methodologies for Simulating Impacts of Climate Change on Crop Production. *Field Crops Research*, 124(3), 357-368.

ANEXO

A. Climograma: Pampa Aullagas y Challapata

El clima de Pampa Aullagas se clasifica como cálido y templado. Los veranos tienen una precipitación aceptable, mientras que los inviernos tienen muy poco de ella. Este clima es considerado como Cwb, según la clasificación climática de Köppen-Geiger. La temperatura aquí es, en promedio, de 9.0 °C. La precipitación aproximada es de 669 mm. Las temperaturas son más altas (en promedio) en noviembre, pues giran alrededor de los 11.6 °C. Julio es el mes más frío, con temperaturas promediando los 5.8 °C.

El mes con mayor humedad relativa es febrero (72.08%). El de menor humedad relativa es junio (26.02%). El mes con el mayor número de días lluviosos es enero (25.07 días). El de más bajo número es junio (1.40 días). La menor cantidad de lluvia ocurre en junio, con un promedio de 6 mm. La mayor parte de la precipitación aquí cae en enero, promediando los 154 mm. La variación de la precipitación entre los meses más secos y húmedos es de 148 mm. A lo largo del año, las temperaturas varían en 5.8 °C.

En Oruro, el mes con más horas de sol diarias es noviembre, con una media de 10.02 horas de sol. En total hay 310.49 horas de sol a lo largo de este mes. El mes con menor recuento es enero, con un promedio de 8.46 horas de sol al día y un total de 262.32 horas de sol en este mes. Más aún, en Oruro se cuentan alrededor de 3,219.62 horas de sol durante todo el año. En promedio, hay 105.71 horas de sol al mes.

Tabla 1: Climograma estacional de Pampa Aullagas

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	10	9.8	9.6	9.3	7.8	6.4	5.8	7	8.8	10.5	11.6	11
Temperatura mín. (°C)	5.7	5.7	5	3.3	0.8	-0.4	-1.2	-0.6	1.1	3.4	4.9	5.8
Temperatura máx. (°C)	15.2	14.9	15.2	16	15.4	14.3	13.9	15.3	16.8	18	18.7	17.1
Precipitación (mm)	154	123	90	32	9	6	9	14	23	40	56	113
Humedad (%)	69%	72%	68%	53%	29%	26%	28%	29%	32%	36%	38%	55%
Días lluviosos (días)	19	17	16	8	2	1	2	3	4	8	10	16
Horas de sol (horas)	6.9	6.5	6.9	8.5	9.6	9.5	9.5	9.8	9.9	10	10.1	8.5
Rango de temperaturas	Mínimo	Máximo	Medio									
Año seco	132.88	222.12	223.00									
Año normal	201.40	336.66	338.00									
Año húmedo	307.46	513.96	516.00									

Fuente: Elaboración propia para el período 1991 – 2022, con información de Climate-data.org.

B. Climograma: Patacamaya

La región de Patacamaya es considerada como ET según la clasificación del clima de Köppen-Geiger. Es decir, se trata de un clima de tundra. Durante los meses cálidos, este tipo de climas presenta una temperatura media que oscila

entre 0 °C y 10 °C. La vegetación consiste únicamente en hierbas durante los meses en que superan los 0 °C (T de tundra[14]). Patacamaya puede ser considerada como ETH: clima de tundra alpina; es decir, un clima de tundra (ET) pero de alta montaña, lo que ocurre en ciudades como El Alto (Bolivia), Puno (Perú), o en un contexto fuera de Los Andes, en Pagri (China).

La temperatura aquí es, en promedio, de 6.8 °C, con una precipitación promedio de 820 mm. Noviembre es el mes más cálido del año: la temperatura promedio es, entonces, de 9.0 °C. El mes más frío (con un promedio de 4.2 °C) es julio. Finalmente, las temperaturas medias varían durante el año en 4.8 °C.

La humedad relativa más baja del año ocurre en junio (42.99%). El mes con mayor humedad es febrero (74.45 %). La menor cantidad de días lluviosos se espera en junio (4.30 días), mientras que los días más lluviosos se miden en enero (25.80 días). El mes más seco es junio, con 17 mm de lluvia. Por otro lado, la caída media en enero es de 159 mm, lo que lo convierte en el mes con las mayores precipitaciones del año. Hay una diferencia de 142 mm de precipitación entre los meses más secos y los más húmedos.

El mes con el mayor número de horas de sol diarias es noviembre, con una media de 9.06 horas. En total hay 280.71 horas de sol a lo largo de este mes. En enero el promedio es de 8.05 horas, lo que lo convierte en el mes con el menor número de horas diarias de sol. De hecho, en total hay 249.64 horas de sol en este mes. Finalmente, en Patacamaya se cuentan alrededor de 2,958.34 horas de sol durante todo el año y hay, en promedio, 97.13 horas de sol al mes.

Tabla 2: Climograma estacional de Patacamaya

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	7.8	7.7	7.5	6.9	5.8	4.8	4.2	5	6.3	7.8	9	8.6
Temperatura mín. (°C)	3.9	3.7	3	1.4	-1.1	-2.1	-2.7	-2	-0.3	1.6	3	3.9
Temperatura máx. (°C)	12.9	12.9	13.1	13.4	13.4	12.6	12.1	13.1	14.1	15	16	14.5
Precipitación (mm)	159	128	101	53	23	17	19	32	47	61	65	115
Humedad(%)	73%	74%	73%	64%	47%	43%	45%	48%	52%	54%	52%	64%
Días lluviosos (días)	19	17	17	11	4	3	4	6	8	10	11	16
Horas de sol (horas)	6.4	6	6.2	7.3	9	9	8.9	9	8.8	9.1	9.3	8.1
Rango temperaturas	Mínimo	Máximo	Medio									
Año seco	115.00	193.77	193.00									
Año normal	187.69	316.25	315.00									
Año húmedo	299.72	505.00	503.00									

Fuente: Elaboración propia para el período 1991 – 2022, con información del Climate-data.org.

[14] La temperatura en la tundra representa la media térmica experimentada en esta región de ecosistema frío y árido, ubicada en proximidades a los polos. En la tundra, las temperaturas suelen ser notablemente bajas, caracterizadas por veranos cortos y frescos, así como prolongados inviernos extremadamente fríos.

C. Climograma: Salinas de Garci Mendoza

La región Salinas de Garci Mendoza[15] tiene un clima templado y cálido, una altura de 3,732 msnm, veranos relativamente lluviosos e inviernos secos. El clima es considerado como Cwb —según la clasificación climática de Köppen-Geiger— o isotérmico (Cwb + i), que es un clima que se encuentra en sectores elevados de los Andes centrales, las zonas altas de México, Centroamérica y el cuerno de África. Cabe añadir que el clima isotérmico (o ecuatorial) presenta una baja amplitud térmica anual, pues la diferencia entre el mes más cálido y el mes más frío es menor a los 5 °C, aunque también existen climas isotérmicos de gran altura, como ocurre en la ciudad ecuatorial de Quito (Ecuador), Misti (Perú) y el altiplano de Bolivia.

En Salinas de Garci Mendoza, el valor más bajo de humedad relativa se mide en junio (13.47 %), mientras que la humedad relativa más alta ocurre en febrero (64.11 %). En promedio, la menor cantidad de días lluviosos se mide en junio (0.27 días), y el mes con más días lluviosos es enero (19.30 días). La temperatura media anual es de 8.47 °C, con una máxima de 15.38 °C y una mínima de 1.7 °C. La precipitación máxima anual es de 505 mm. El mes más seco es mayo (1 mm de precipitación), y la mayor parte de la precipitación cae en enero, promediando los 158 mm. Con una precipitación media de 303 mm/año, Salinas de Garci Mendoza presenta un déficit hídrico de 280 a 332 mm/año.

Tabla 2: Climograma estacional de Salinas de Garci Mendoza

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	10	9.7	9.5	9	6.5	5	4.4	6.2	8.2	10.1	11.4	11.6
Temperatura mín. (°C)	5.2	4.9	3.9	2.2	-0.7	-2	-2.5	-1.5	0.1	2.2	3.5	5.1
Temperatura máx. (°C)	15.7	15.2	15.5	15.7	13.7	12.3	11.7	13.8	16	17.8	18.9	18.3
Precipitación (mm)	158	135	77	15	1	1	3	5	4	10	20	76
Humedad(%)	56%	64%	56%	33%	17%	13%	15%	14%	15%	16%	18%	32%
Días lluviosos (días)	14	13	10	3	0	0	1	1	1	2	3	8
Horas de sol (horas)	8.5	7.8	8.3	9.7	9.9	9.8	9.8	10.2	10.6	11.1	11.4	10.6
Rango temperaturas	Mínimo	Máximo	Medio									
Año seco	76.00	159.17	95.50									
Año normal	133.70	280.00	168.00									
Año húmedo	241.13	505.00	303.00									

Fuente: Elaboración propia para el período 1991 – 2022, con información de Climate-data.org.

[15] En esta zona operan varias organizaciones productoras de quinua: APQUISA, APRIOCA, AMEPROQUIR, ACIF.

D. Climograma: Uyuni, Colchacani y Pulacayo

En esta sección se presenta el climograma para la zona de estudio. Se trata de un registro climático de múltiple entrada que resume los valores de precipitación, temperatura, humedad, días de sol y días de lluvia. La información se basa en los registros históricos de 30-35 años (o más) obtenidos por estaciones meteorológicas del altiplano boliviano.

El climograma permite establecer las condiciones base sobre las cuales se desarrolla el ciclo fenológico del cultivo. La baja temperatura afecta especialmente a las etapas de germinación, ya que un mínimo de -4 °C es requerido; pero también afecta a la etapa de floración, causando una baja producción de polen y, en consecuencia, esterilidad en las plantas. En la etapa de ramificación, la planta no tendrá mayores problemas con los descensos de temperatura hasta los -4 °C.

Por otro lado, las altas temperaturas afectan los procesos fisiológicos de la planta, haciendo que acelere su proceso de producción de granos para asegurar su supervivencia. También suponemos un aborto de flores, con una temperatura media óptima entre los 5 a 15 °C y una oscilación térmica de 5 a 7 °C. Finalmente, cuando hay descensos extremos, por debajo de -4°C, se presentan cambios fisiológicos celulares y rupturas del plasma debido a la presencia de cristales de hielo intercelular.

La región de Uyuni está en el hemisferio sur, a 3,700 msnm. El mes con mayor humedad relativa es febrero (60.74%), mientras que el mes con menor humedad relativa es junio (14.59 %). El mes con el mayor número de días lluviosos es enero (19.40 días), y aquel con el número más bajo es junio (0.33 días).

De acuerdo con Köppen y Geiger, el clima en Uyuni se clasifica como Cwb; es decir, es un clima templado con un invierno seco. Los meses de diciembre a marzo tienen mucha más lluvia, con una temperatura media anual de 7.8 °C. Con una temperatura media de 11.8 °C, diciembre es el mes más caluroso del año. Con 2.7 °C en promedio, julio es el mes más frío, mientras que la variación en la temperatura anual está alrededor de los 9.1 °C.

Entre los meses más secos y húmedos, la diferencia en las precipitaciones es de 145 mm. La precipitación media aproximada es de 445 mm; la más baja ocurre en junio, con un promedio de 1 mm. En enero, la precipitación alcanza su pico, con un promedio de 146 mm.

El mes con más horas de sol diarias es noviembre, con una media de 11.05 horas y un total de 342.59 horas de sol. A con menos horas diarias de sol es enero, con un promedio de 10.45 horas al día. En total hay 323.8 horas de sol en este mes. Asimismo, en Uyuni se cuentan alrededor de 3,611.57 horas de sol durante todo el año y, en promedio, hay 118.63 horas de sol al mes.

Tabla 4: Climograma estacional de Uyuni

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	10.8	10.3	10	8.4	4.7	3.1	2.7	4.4	6.7	9.2	11	11.8
Temperatura mín. (°C)	5.1	5	3.7	0.8	-2.6	-3.4	-3.8	-3.4	-2.1	-0.1	1.8	4.5
Temperatura máx. (°C)	16.9	16.2	16.6	15.9	12.7	11	10.6	12.8	15.2	17.4	18.8	18.8
Precipitación (mm)	146	112	60	13	2	1	2	4	4	11	19	71
Humedad (%)	54%	61%	52%	31%	18%	15%	16%	15%	15%	17%	18%	34%
Días lluviosos (días)	15	13	9	2	0	0	0	1	1	2	3	8
Horas de sol (horas)	8.7	8.2	8.8	9.8	9.9	9.8	9.8	10.2	10.6	11.1	11.4	10.4
Rango temperaturas	Mínimo	Máximo	Medio									
Año seco	88.00	315.00	100.00									
Año normal	156.00	400.00	160.00									
Año húmedo	246.00	493.00	280.00									

Fuente: Elaboración propia para el período 1991 – 2022, con información del Climate-data.org.

Concentración de CO2

Para complementar el análisis, incorporamos en el modelo diferentes escenarios de concentración de CO2 y su impacto en la producción de biomasa y grano del cultivo. Concentración de CO2 en la atmósfera:

a. Valor histórico (1959-2021):

$$CO_2 = 315.7 + 2.06 \cdot (y - 1959) \quad (19),$$

donde:

CO_2 es la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (ppm);
y es el año.

b. Escenarios de cambio climático:

Escenario B1: $CO_2 = 600\ ppm.$
Escenario A1T: $CO_2 = 700\ ppm.$
Escenario B2: $CO_2 = 800\ ppm.$
Escenario A1B: $CO_2 = 850\ ppm$.
Escenario A2: $CO_2 = 1250\ ppm.$
Escenario A1F: $CO_2 = 1550\ ppm.$

Siendo el efecto de la concentración de *CO2* en la producción de biomasa y grano, el caso de una conductancia estomatal (g_s) se muestra en la Ecuación (20):

$$g_s = g_{so}\left[1 + 0.3\frac{(CO_2 - 360)}{360}\right] \quad (20),$$

donde g_{so} es la conductancia estomatal a 360 ppm de CO2.

En el caso de la senescencia del dosel vegetal (k_s), se tiene a la Ecuación (21):

$$k_s = k_{so}\left[1 - 0.2\frac{(CO_2 - 360)}{360}\right] \quad (21),$$

donde k_{so} es el coeficiente de senescencia a 360 ppm de CO2.

Con relación a la productividad del agua (*WP*) (Ecuación 22):

$$WP = WP_0\left[1 - 0.4\frac{(CO_2 - 360)}{360}\right] \quad (22),$$

donde WP_0: es la productividad del agua a 360 ppm de CO2.

Además, con un índice de cosecha (H) como el que se muestra en la Ecuación (23):

$$H = H_0\left[1 - 0.1\frac{(CO_2 - 360)}{360}\right] \quad (23),$$

donde H_0: es el índice de cosecha a 360 ppm de CO2.

Al incorporar estas ecuaciones, el modelo será capaz de simular el crecimiento y desarrollo del cultivo de quinua bajo los diferentes escenarios de concentración de CO2, considerando los efectos en la conductancia estomatal, la senescencia del dosel vegetal, la productividad del agua y el índice de cosecha.