



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DEL
CULTIVO DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* WILLD.) BAJO
CONDICIONES DE SEQUÍA EN AMBIENTES ANDINOS
UTILIZANDO EL MODELO AQUACROP”

Tesis para optar al título profesional de:
INGENIERA AMBIENTAL

Presentado por:

Bach. Vanessa Marilú Lino Bilbao

<https://orcid.org/0000-0003-1134-2180>

Asesor:

Dr. Eloy Cuellar Bautista

<https://orcid.org/0000-0001-5087-5719>

Lima - Perú

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 30 de julio de 2020.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dr. Julio Cesar Alegre Orihuela	<input type="checkbox"/>
Miembro: Mg. Luis Alfredo Roca Infante	
Miembro: Ing. Haydeé Miriam Ramos León	

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE QUINUA (*Chenopodium quinoa* WILLD.) BAJO CONDICIONES DE SEQUÍA EN AMBIENTES ANDINOS UTILIZANDO EL MODELO AQUACROP

Presentada por la bachiller:

- Vanessa Marilú Lino Bilbao

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Ambiental

Asesorado por:

- Dr. José Eloy Cuellar Bautista
- Lic. Wilbert Eddy Cruz Hilacondo

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de la estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime (X) por mayoría simple () calificar a:

Tesis: Vanessa Marilú Lino Bilbao			Nota (en letras): DIECIOCHO
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Dr. Julio Cesar Alegre Orihuela
Presidente del Jurado



Dr. José Eloy Cuellar Bautista
Asesor



Mg. Luis Alfredo Roca Infante
Miembro 1



Ing. Haydeé Miriam Ramos León
Miembro 2



Lic. Wilbert Eddy Cruz Hilacondo
Co-Asesor

DEDICATORIA

A Dios por permitirme conseguir mis logros, al darme fuerzas para seguir adelante. A mis padres, por ser mi motivación, con su amor, sus consejos y su apoyo incondicional logro cumplir una meta más. A mis hermanos, los mejores regalos de mi vida. A mis maestros y compañeros de la facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Científica del Sur, por la etapa inolvidable durante estos cinco años.

AGRADECIMIENTOS

A los especialistas del Laboratorio de Investigación Tecnológica en Cambio Climático para el sector agrario del Instituto Nacional de Innovación Agraria por la participación en calidad de tesista en el Proyecto PIP 306260 “Instalación del Servicio de Investigación Tecnológica Agraria Especializada en Cambio Climático para el Sector Agrario”, cuyas actividades fueron desarrollados en Estación Experimental Agraria Santa Ana.

A la Universidad Científica del Sur, por el tiempo que albergue en sus aulas en esta etapa de mi carrera profesional.

Al programa Nacional de Becas – Beca 18, por brindarme el apoyo en la formación profesional durante estos cinco años.

A Eloy Cuellar, Wilbert Cruz y Raymundo Gutiérrez, por el apoyo brindado durante el desarrollo de esta tesis. A la Dra. Susan Medina por la gran oportunidad y la confianza puesta en mí.

ÍNDICE GENERAL

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1. Quinua.....	2
2.2. Estrés hídrico	4
2.3. Cambio Climático	5
2.4 Modelos de Simulación en agricultura	6
a. Escenarios para cambio climático	6
b. El Modelo AquaCrop	8
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	10
3.1. Objetivo.....	10
a. Objetivo general.....	10
b. Objetivos específicos.....	10
3.2. Hipótesis.....	10
a. Hipótesis general.....	10
IV. METODOLOGÍA	11
4.1. Zona de estudio	11
4.2. Materiales	11
a. Material Biológico	11

b. Campo experimental	13
c. Programa para el modelamiento.....	13
4.3. Dinámica de respuesta del cultivo al estrés hídrico en AquaCrop	15
4.4. Inputs para el modelo AquaCrop	17
4.5. Interfaz del modelamiento en AquaCrop	22
4.6. Interpretación de las salidas en AquaCrop	23
4.7. Softwares complementarios	24
4.8. Análisis estadísticos	25
a. Análisis de Varianza.....	25
b. Prueba t	25
4.9. Diseño experimental	26
4.10. Proceso experimental.....	27
4.10.1. Recolección de datos meteorológicos y de campo	28
4.10.2. <i>Evaluación de parámetros sensibles en el programa AquaCrop</i>	34
4.10.4. <i>Criterio de evaluación del programa AquaCrop</i>	37
4.10.5. <i>Simulación bajo escenarios de Cambio Climático</i>	40
V. RESULTADOS	42
5.1. Datos de entrada para el modelo AquaCrop	42
5.1.1. <i>Datos Climáticos</i>	42
5.1.2. <i>Fenología del cultivo</i>	42

5.1.3. Mediciones fisiológicas	45
a. Medición de longitud de raíz	45
b. Medición de la Biomasa aérea	47
c. Medición de altura de planta	50
d. Medición del rendimiento	51
5.2. Calibración y validación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a través de diferentes regímenes hídricos para el modelamiento a futuros escenarios de cambio climático.....	52
a. <i>Simulación de la cobertura del dosel (CC)</i>	55
b. <i>Simulación de la Biomasa Aérea Seca</i>	58
c. <i>Simulación del rendimiento</i>	61
5.3. Evaluación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a futuros escenarios de Cambio Climático	72
5.4. Modelamiento de la respuesta del cultivo de quinua inducida a diferentes regímenes hídricos bajo escenarios de Cambio Climático.	79
VI. DISCUSIÓN	86
6.1. Con respecto al análisis de datos de entrada en el programa AquaCrop	86
6.1.1. <i>Interpretación de la medición fisiológica</i>	86
6.2. Con respecto a la calibración y validación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a través de diferentes regímenes hídricos para el modelamiento a futuros escenarios de cambio climático.....	89

6.2.1. Interpretación de la calibración y validación	89
6.3. Con respecto a la evaluación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a futuros escenarios climáticos	93
6.3.1. Interpretación de los efectos del cambio climático en el rendimiento periodo 2030-2031.....	93
6.3.2. Interpretación de simulación del rendimiento para 2030-2031	95
6.4. Interpretación con respecto al modelamiento de la respuesta del cultivo de quinua inducida a diferentes regímenes hídricos bajo escenarios de cambio climático.....	98
6.4.1. Interpretación de la simulación de la biomasa para 2030-2031	98
6.4.2. Interpretación de la simulación de la cobertura del dosel 2030-2031	98
VII. CONCLUSIONES	100
VIII. RECOMENDACIONES	101
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
X. ABREVIATURAS	112
XI. ANEXOS.....	114

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Nivel de incertidumbre de los Escenarios Climáticos. Tomado de SENAMHI, 2014	8
Figura 2. Distribución del experimento en la EEA. Santa Ana – Huancayo	11
Figura 3. Dinámica de respuesta del cultivo al estrés hídrico. Tomado de FAO, 2019 ..	15
Figura 4. Componentes principales del suelo-planta-atmosfera y parámetros fisiológicos. Tomado de FAO, 2009.	16
Figura 5. Proceso de los inputs en el modelo AquaCrop. Tomado de FAO, 2019.....	17
Figura 6. Data de entrada, que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo. Tomado de FAO, 2019	21
Figura 7. Salida del modelo AquaCrop. Tomado de FAO, 2019.	24
Figura 8. Distribución del Lote 30, diseño experimental.....	27
Figura 9. Diagrama de los procesos para la modelación en AquaCrop. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 10. Esquema de cálculo del modelo AquaCrop. Fuente: Raes et al. (2012).....	34
Figura 11. Diseño por surcos y las áreas de muestreo	35
Figura 12. Diagrama ombrotérmico de la estación Santa Ana en la campaña setiembre 2018-mayor 2019	42
Figura 13. Riego (mm) y precipitación (mm) durante el periodo de fenología.....	45
Figura 14. Validación de la Cobertura vegetal (%), observado vs. simulado. a) INIA-433, b) Acollina, c) Hualhuas y d) Huancayo, periodo de fenología=Días después de la siembra.	57

Figura 15. Ajuste de la Biomasa Aérea Seca (kg ha-1), observado vs. Simulado. a) INIA-433, b) Hualhuas, c) Huancayo y d) Acollina.	59
Figura 16. Ajuste de la Biomasa (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Huancayo	60
Figura 17. Ajuste de la Biomasa (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Hualhuas	60
Figura 18. Ajuste de la Biomasa (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Acollina	61
Figura 19. Ajuste de la Biomasa (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa INIA-433	61
Figura 20. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Huancayo	62
Figura 21. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Hualhuas	63
Figura 22. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Acollina	63
Figura 23. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa INIA-433	63
Figura 24. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa Acollina. a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%.....	64
Figura 25. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa Hualhuas. a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%.....	66
Figura 26. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa Huancayo. a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%.....	68

Figura 27. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa INIA-433.
a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%..... 70

Figura 28. Precipitación (mm) durante el periodo de fenología Santa Ana 2018 vs los
Escenarios Climáticos 2030 73

Figura 29. Temperatura máxima durante el periodo fenológico Santa Ana 2018 vs el
escenario climático RCP4.5 2030 para el 2030 75

Figura 30. Temperatura máxima durante el periodo de fenología Santa Ana 2018 vs el
escenario climático RCP8.5 para el 2030 76

Figura 31. Temperatura mínima durante el periodo de fenología 2018 vs el 2030 para el
escenario climático RCP4.5..... 77

Figura 32. Temperatura mínima durante el periodo de fenología 2018 vs el 2030 para el
escenario climático RCP8.5..... 78

Figura 33. Rendimiento de la variedad de Quinoa Huancayo para la estación Santa Ana
2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031 80

Figura 34. Rendimiento de la variedad de Quinoa Hualhuas para la estación Santa Ana
2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031 81

Figura 35. Rendimiento de la variedad de Quinoa Acollina para la estación Santa Ana
2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031 82

Figura 36. Rendimiento de la variedad de Quinoa INIA-433 para la estación Santa Ana
2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031 83

Figura 37. Biomasa frente a los escenarios climáticos para las variedades de Quinoa
Huancayo (a), Quinoa Hualhuas (b), Quinoa Acollina (c) y Quinoa INIA-433 (d) 85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor nutricional / 100 g de productos frescos de quinua	3
Tabla 2. Descripción de las variedades de quinua evaluadas	12
Tabla 3. Características del campo experimental, por bloques.	13
Tabla 4. Componentes del input cultivo del modelo AquaCrop	19
Tabla 5. Categorías de prácticas de manejo para el modelo AquaCrop.	21
Tabla 6. Software utilizado para el presente trabajo experimental	24
Tabla 7. Índices de análisis de varianza	25
Tabla 8. La consola Vantage Pro 2 cinco modos de función.	28
Tabla 9. Dosis de riego por tratamiento en la campaña desde los meses de Setiembre 2018 a Enero 2019.....	33
Tabla 10. Tiempo de riego por tratamiento y fechas	33
Tabla 11. Parámetros a calibrar en el programa AquaCrop para el cultivo de quinua ..	37
Tabla 12. <i>Valores de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)</i>	39
Tabla 13. <i>Modelo climático global</i>	41
Tabla 14. Características de los escenarios climáticos	41
Tabla 15. <i>Actividades agronómicas realizadas</i>	43
Tabla 16. Desarrollo fenológico	43
Tabla 17. <i>Registro de riego (mm) y precipitación (mm) en el periodo de fenología</i>	44
Tabla 18. Longitud promedio de raíz (cm).....	45
Tabla 19. Análisis de varianza para el primer muestreo de longitud de raíz (77 DDS) ..	46
Tabla 20. Análisis de varianza para el segundo muestreo de longitud de raíz (131 DDS)	47
Tabla 21. Análisis de varianza para el tercer muestreo de longitud de raíz (169 DDS) .	47

Tabla 22. Biomasa promedio aérea ($t\ ha^{-1}$)	48
Tabla 23. Análisis de varianza para el primer muestreo de biomasa (77 DDS).....	48
Tabla 24. Análisis de varianza para el segundo muestreo de biomasa (131 DDS).....	49
Tabla 25. Análisis de varianza para el tercer muestreo de biomasa (169 DDS).....	49
Tabla 26. Altura máxima promedio (m)	50
Tabla 27. Análisis de varianza para altura máxima	51
Tabla 28. <i>Rendimiento total promedio ($t\ ha^{-1}$)</i>	51
Tabla 29. Análisis de varianza para el rendimiento total	52
Tabla 30. Parámetros de las variedades de quinua para la calibración	54
Tabla 31. Indicadores estadísticos para resultados de Cobertura de Dosel (Observado vs Simulado).....	55
Tabla 32. Indicadores estadísticos para resultados de Biomasa Aérea Seca (Simulado vs Observado)	58
Tabla 33. Indicadores estadísticos de los cuatro cultivos para la simulación del rendimiento	62
Tabla 34. Rendimiento de las variedades de quinua de la campaña 2018 – 2019	72
Tabla 35. Probabilidad de la prueba t para el análisis comparativo de la precipitación entre los escenarios climáticos vs Santa Ana	73
Tabla 36. Probabilidad de la prueba t para el análisis comparativo de la temperatura máxima entre los escenarios climáticos vs Santa Ana	74
Tabla 37. Probabilidad de la prueba t para el análisis comparativo de la temperatura mínima entre los escenarios climáticos vs Santa Ana	76
Tabla 38. Rendimiento de la variedad de Quinua Huancayo para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031	79

Tabla 39. Rendimiento de la variedad de Quinoa Hualhuas para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031	81
Tabla 40. Rendimiento de la variedad de Quinoa Acollina para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031	82
Tabla 41. Rendimiento de la variedad de Quinoa INIA-433 para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031	83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Entrada de los datos al ETo calculator de la estación ubicada en el Lote 30 de la EEA. Santa Ana – Huancayo	114
Anexo 2. Análisis del suelo enviado al laboratorio de suelos del INIA, para su caracterización fisicoquímico por tratamientos del Lote 30 de la EEA. Santa Ana – Huancayo	115
Anexo 3. Datos obtenidos de la simulación (p) en comparación con el observado (o) para su posterior análisis frente a los cuatro tratamientos de riego con relación al rendimiento.....	116
Anexo 4. Datos obtenidos en la campaña 2018 para las cuatro variedades de quinua, donde se determinó el rendimiento	117
Anexo 5. Datos obtenidos de la simulación (p) en comparación con el observado (o) para su posterior análisis frente a los cuatro tratamientos de riego con relación a los tres muestreos de biomasa	118

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo modelar la respuesta del cultivo de quinua ante diferentes régimen hídrico, debido a la intensificación de la variabilidad climática que genera incertidumbre sobre la disponibilidad de agua para el riego así como variaciones en la temperatura ambiental, provocando inestabilidad en la producción de diferentes cultivos andinos de la sierra peruana, como es el caso de la quinua que es muy importante por su alto valor nutricional para el consumo humano. En este contexto, se evaluó durante la campaña agrícola de setiembre 2018 a mayo 2019, cuatro variedades de Quinua (Acollina, Huancayo, Hualhuas e INIA 433) fueron sometidas a diferentes regímenes hídricos desde exceso a déficit de riego (200 %, 100 %, 50 % y 25 %). Se evaluó la biomasa, cobertura vegetal y rendimiento de las variedades para la validación y calibración a través del programa AquaCrop. Los datos obtenidos fueron evaluados mediante tres escenarios climáticos (CanESM2, MPI-ESM-MR y CNRM-CM5) todos bajo un incremento de CO₂ (RCP4.5). Los resultados señalan una reducción del rendimiento de las variedades Huancayo (69 %), Acollina (64 %), INIA-433 (55 %) y Hualhuas (54 %). Concluyéndose que para el 2030 los rendimientos de quinua se verá afectada negativamente ante el déficit hídrico como consecuencia del cambio climático.

Palabras clave: Escenarios climáticos, quinua, AquaCrop, Cambio Climático, déficit hídrico.

ABSTRACT

The present work aims to model the response of the quinoa crop to different water regime scenarios due to the intensification of climatic variability that generates uncertainty about the availability of water for irrigation and instability in the production of different Andean crops in the Peruvian highlands such as quinoa, which is important for its high nutritional value. In this context, we worked with four varieties of Quinoa: Acollina, Huancayo, Hualhuas and INIA 433- Santa Ana/AIQ/FAO. Each of these varieties was subjected to optimal irrigation conditions (200% and 100%) and water deficit conditions (50% and 25%). Then, biomass, plant cover and yield were evaluated during the campaign from September 2018 to May 2019, measurements needed to later perform the simulations through the AquaCrop model. The simulated data were evaluated through three climate scenarios (CanESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-MR) all under an increase of CO₂ (RCP4.5). The results indicate a reduction in yield for the four varieties, Huancayo (69%), Acollina (64%), INIA-433 (55%) and Hualhuas (54%). It is concluded that by 2030 quinoa yields will be negatively affected by the water deficit as a result of climate change.

Keywords: Climate scenarios, quinoa, AquaCrop, Climate Change, Water stress

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agricultura es una actividad económica vulnerable a factores climáticos como la variación de temperatura y sequía. Estos factores se encuentran asociados con la reducción en la producción de los cultivos e intensificándose con el incremento de plagas y malezas (Nelson *et al.*, 2009), los suelos agrícolas dependen del recurso hídrico la cual se ve afectada por periodos prolongados de sequía reduciendo el desarrollo normal de cosechas agrícolas (Vergara *et al.*, 2014; Broshell, 2016).

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), es un cultivo de zonas altoandinas, sus granos presentan un alto contenido nutricional, adaptándose a condiciones ambientales extremas (Conde, 2016). Esta característica ha permitido desarrollar diferentes variedades de quinua altamente productivas con tolerancia a la sequía, heladas, salinidad con la finalidad de producir comercialmente en todos los ambientes geográficos (Dixit, 2015).

El cambio climático, afecta a la agricultura alterando el régimen hídrico disponible para esta actividad, asimismo la temperatura se incrementa, afectando en la fisiología de la planta (evapotranspiración) con un efecto negativo en el rendimiento de los cultivos (Conde, 2016). Así mismo las heladas afectan la producción de los cultivos (SENAMHI, 2014) y las sequías se presentan en diferentes estados de desarrollo del cultivo. No obstante, la quinua tiene el potencial de tolerar eventos desfavorables como sequía y heladas (Alavi *et al.*, 2015). Sin embargo, las proyecciones climáticas señalan un impacto negativo en la producción de la quinua (Alarcón, 2015).

En este contexto es necesario abordar estudios, la respuesta de la quinua bajo diferentes escenarios climáticos y evaluar su potencial desarrollo bajo una reducción del régimen hídrico. Modelos que evalúa la respuesta de la necesidad hídrica del cultivo. Por ello, se ha planteado como interrogante de investigación: ¿Cuál es el impacto del cambio climático en el rendimiento de la quinua bajo futuros escenarios climatológicos en la sierra central del Perú?, para ello se modelo en AquaCrop el potencial productivo bajo diferentes regímenes de riego a diferentes escenarios climáticos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Quinua

La quinua con nombre científico *Chenopodium quinoa* Willd., es un cultivo nativo proveniente de la región altoandina del Perú y Bolivia, donde se encuentra la mayor diversidad genética y distribución de especies del género *Chenopodium* (Tapia y Fries, 2007). Es una planta dicotiledónea, anual, con metabolismo C3, su altura varía desde 50 hasta 250 cm, sus raíces son fasciculadas y pivotantes, su tallo puede ser ramificado o recto de color variable, presenta tres tipos de hojas (romboidales, triangulares y lanceoladas) según la posición de éstas en el tallo (Mendoza, 2013).

La inflorescencia es de tipo panoja, conformada por pequeñas flores hermafroditas y pistiladas, con estigma trifido. El grano presenta un diámetro entre 1.50 - 2.50 mm y su fruto es de tipo aquenio (Castro, 2018). Las saponinas se ubican en la primera membrana del grano. Además, almacena almidón en el perisperma a diferencia de los cereales que lo hacen en el endospermo (Carrasco *et al.*, 2003).

La quinua es un alimento nutritivo de alto potencial para solventar la seguridad alimentaria y la lucha contra el hambre en el mundo. Es una fuente natural de proteínas con alto contenido de aminoácidos esenciales de alto valor nutritivo (Apaza *et al.*, 2013).

(Tabla 1).

Tabla 1. *Valor nutricional / 100 g de productos frescos de quinua*

Componentes	Cantidad
Humedad	12.60 %
Proteínas	12- 16 %
Carbohidratos	59.70 %
Fibras	4.10 %
Grasas	4 - 9 %
Lisina	0.88 %
Metionina	0.42 %
Triptofano	0.12 %
Vitamina C	8.50 mg.
Calcio	100 mg.
Fierro	13.2 mg.
Fósforo	448 mg.
Calorías	370 kcal

Fuente: Mendoza (2013), Koziol (1992)

La quinua se distribuye en diferentes ambientes geográficos, con una diversidad de climas, suelos, y altitud debido a su amplia plasticidad genética que le ha permitido adaptarse morfológicamente y fisiológicamente a diversos ambientes (Aguilar, 2006). Las quinuas de valle se desarrollan entre los 2000- 3600 msnm con un periodo vegetativo superior a los 220 días, con bajo rendimientos y semillas pequeñas (Mendoza, 2013; Investigación de Productos Andinos, 2011).

2.2. Estrés hídrico

El estrés hídrico se refiere al exceso de agua o al déficit hídrico. La sequía es una condición meteorológica de ausencia de lluvias y puede ser tolerada por las plantas que presentan un sistema de adaptación, permitiéndoles tolerar las condiciones de ausencia de agua (Yepes y Silveira, 2011). Además, se considera estrés a aquella alteración de la condición fisiológica de cualquier cultivo causada por factores externos que alteran el equilibrio de la planta u homeostasis (Ergo, 2013). Dependiendo de la intensidad del estrés provoca una disminución en el desarrollo y crecimiento de la planta generando así un impacto negativo en el rendimiento de los cultivos.

El estrés se presenta cuando el potencial del organismo difiere del potencial ambiental, estimulando un traspaso de materia o energía hacia el organismo (factor estrés), generando una respuesta metabólica que genera una respuesta fisiológica. Rodríguez *et al.* (2016), distingue dos tipos de estrés hídrico: los originados por factores bióticos y factores abióticos, siendo este último el más limitante.

La quinua ha demostrado gran adaptabilidad y rusticidad para resistir a condiciones de estrés hídrico, Esprella (2011) reporta la pérdida del 60 % en el rendimiento del cultivo, bajo déficit hídrico. Así mismo, el grano lechoso es el más afectado dentro del ciclo fenológico, recomendando su evaluación.

Además, la quinua ofrece diferentes mecanismos de tolerancia a la sequía, en su estado vegetativo puede extender su ciclo biológico, así permite que la planta compense la pérdida de desarrollo durante la sequía inicial. A la vez, una abundante concentración de solutos que permiten un ajuste osmótico sustancial bajo restricciones de sequía, realizando una apertura parcial de las estomas (Bazile *et al.*, 2014). A fin de evitar los efectos negativos del estrés, la planta genera un enraizamiento rápido, profundo y limita su área foliar por medio de una controlada senescencia foliar (Steduto *et al.*, 2012).

2.3. Cambio Climático

Según IPCC (2013), define al cambio climático como el cambio constante del clima y su persistencia por un periodo de tiempo extendido, debido a factores como el incremento de gases de efecto invernadero, aerosoles, fertilizantes, quemas, entre otros. Para brindar sostenibilidad y la seguridad alimentaria es necesario implementar estrategias de mitigación y adaptación que permitan estimar el efecto del cambio climático y zonificar los cultivos más vulnerables (Fernández, 2013).

Identificar los efectos del cambio climático en la agricultura es complicado, a causa de la heterogeneidad en los componentes estructurales del ambiente biofísico y de las circunstancias socioeconómicas a nivel temporal y espacial. El Perú, fue uno de los primeros países de América Latina en realizar estudios y propuestas frente el Cambio Climático a través de “Plan de Gestión de riesgos y adaptación al Cambio Climático en el sector agrario – PLANGRACC”, “La evaluación de los impactos del cambio climático”, “El análisis de vulnerabilidad a la seguridad alimentaria” y “Estado del arte del cambio climático en el Perú” (MINAG, 2012; Nelson *et al.*, 2009; Cuellar, 2009).

2.4 Modelos de simulación en la agricultura

En agricultura, los modelos de simulación permiten obtener información más relevante de los sistemas de producción en cultivos (Saavedra, 2011). En el caso del clima, trata de reproducir un sistema climático y los procesos biofísicos permite modelar el impacto del medio ambiente sobre el cultivo, el manejo de suelo y riego. La necesidad de conocer mejor las consecuencias del cambio climático en la agricultura se ha convertido en un incentivo para estudiar y comprender su vulnerabilidad ante las amenazas climáticas. El objetivo de la simulación climática es proporcionar información acerca del impacto que generará sobre los cultivos, proponer respuestas para reducir su impacto negativo o prevenirlos, contribuyendo a generar políticas de adaptación al cambio climático (Saavedra, 2011, Alonso y Jiménez 1999).

Los escenarios climáticos ofrecen importante información del clima futuro en una determinada región, esta información puede ser usada para plantear los impactos desfavorables del cambio climático de manera que proporcione adaptación al clima y desarrollo bajo en emisiones (PNUD, 2011).

a. Escenarios para cambio climático

En los últimos años, los investigadores en modelamiento han desarrollado escenarios climáticos de eventos futuros a escala local siendo empleadas en la planificación y proyección hacia un futuro.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) ha desarrollado escenarios climáticos a nivel nacional, con datos de precipitación, temperatura máxima y mínima hacia el 2050 utilizando el estudio del Portal de Regionalización Estadística, desarrollado por “Predictia Intelligent Solutions” y el Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria (SENAMHI, 2014), para luego ser modelados en diferentes cultivos a través del portal integrador del proyecto MOSAICC (Modelling System for Agriculture Impacts of Climate Change) (Parry *et al.*, 2004). Además, con el proyecto AMICAF (2014 - 2017) se evaluó los efectos del cambio climático en los cultivos y desarrollaron un mapeo de la seguridad alimentaria vulnerable bajo cambio climático con perspectiva de adaptación de los medios de subsistencia (FAO, 2019).

El SENAMHI desarrolló proyecciones completas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de alrededor de 2,652 estaciones en Perú al año 2050 mediante la metodología de regionalización estadística de alrededor en seis proyecciones de precipitaciones (3x2 ESM RCP). Para el período 2036-2065 se incrementará en promedio de 2–3 °C para la temperatura máxima y para la temperatura mínima de 4–6 °C, con precipitaciones entre 10-20 % a nivel nacional (SENAMHI, 2014) (Figura 1).

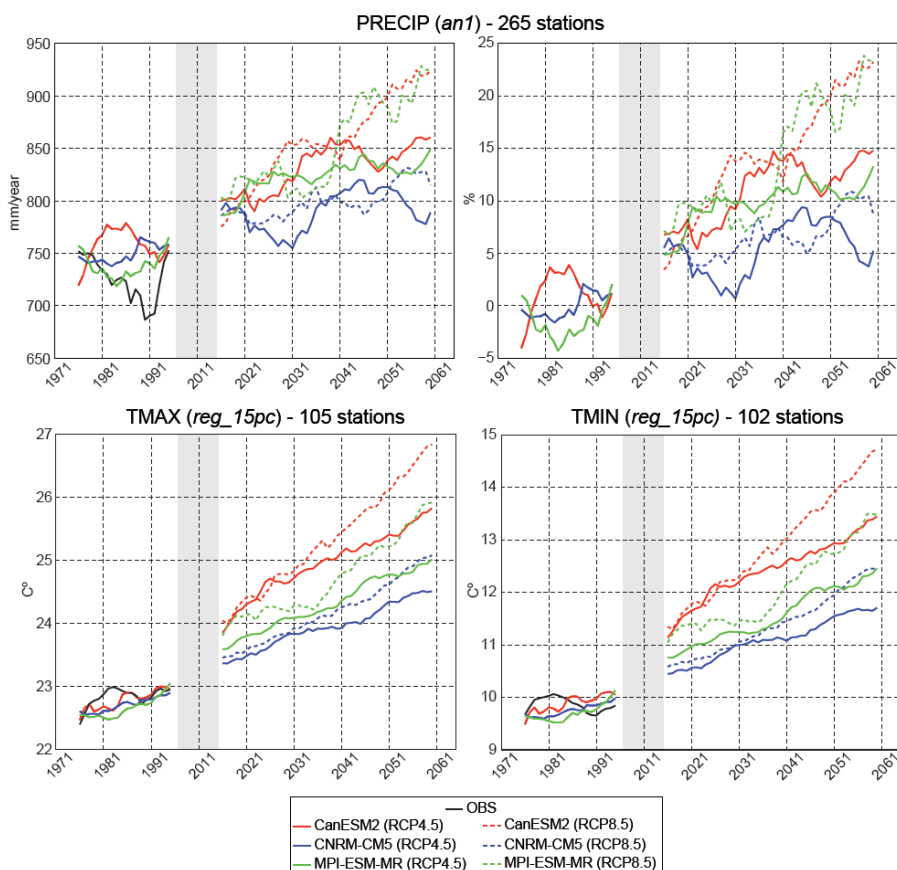


Figura 1. Nivel de incertidumbre de los Escenarios Climáticos. Tomado de SENAMHI, 2014

b. El Modelo AquaCrop

El modelo AquaCrop se encuentra basado en la respuesta fisiológica del cultivo con respecto al suministro del agua, es un modelo útil para la toma de decisiones. Para ello es necesario calibrar bajo condiciones del área de estudio, obteniéndose así la información necesaria como el clima, cultivo, suelo y manejo agronómico. En los últimos años se ha empleado para el estudio en algodón (Farahani *et al.*, 2009; García *et al.*, 2009), maíz (García y Fereres, 2012; Flores, 2011; Heng *et al.*, 2009), cebada (Araya *et al.*, 2010), trigo (Andarzian *et al.*, 2011) y papa (García y Fereres, 2012), soya (Rodríguez *et al.*, 2018). El AquaCrop es simple y presenta una robustez de resultados frente a otros modelos de simulación (García *et al.*, 2009).

Flores *et al.* (2011), trabajó en maíz con AquaCrop en el norte de Sinaloa, México, aquí se planificó y simuló del cultivo como una herramienta para analizar escenarios agrícolas en diferentes ciclos y localidades. Gracias a esto se tomó decisiones a nivel de parcela para simular con una acertada confiabilidad el rendimiento del maíz bajo diversas condiciones climáticas y manejo de riego.

Rodríguez *et al.* (2018), trabajó con el programa AquaCrop para la soja bajo 7 diferentes niveles de riego durante la época seca y un tratamiento seco en la estación lluviosa en Motopiba, Brasil. El modelo fue parametrizado y calibrado utilizando los datos de rendimiento de soja recolectados en el campo. El rendimiento fue evaluado mediante los parámetros: error de predicción (P_e), índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NDE), coeficiente de determinación (r^2), error absoluto medio (MAE), error cuadrático medio normalizado (RMSEN) e índice de Willmott (d). Los análisis de calibración permitieron obtener un error aceptable para la predicción del rendimiento de la soja bajo condiciones climáticas tropicales. Llegando a la conclusión cuando el cultivo estaba bien provisto de agua en la fase de floración, el rendimiento fue mayor en comparación del cultivo que estuvo en sequía.

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Objetivo

a. Objetivo general

Modelar la respuesta del cultivo de quinua inducida a diferentes regímenes hídricos bajo escenario de Cambio Climático.

b. Objetivos específicos

- Calibrar y validar la respuesta de cuatro variedades de quinua a través de diferentes regímenes hídricos para el modelamiento a futuros escenarios de cambio climático.
- Evaluar la respuesta de cuatro variedades de quinua a futuros escenarios de cambio climático.

3.2. Hipótesis

a. Hipótesis general

La producción de Quinua en la región de Huancayo no se verá afectada en su rendimiento a causa del déficit hídrico como consecuencia de los diferentes escenarios al cambio climático RCP (8.5 y 4.5)

IV. METODOLOGÍA

4.1. Zona de estudio

El experimento fue realizado en las instalaciones de la Estación Experimental Agraria (EEA) Santa Ana del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ubicada en el distrito de San Pedro de Saños, provincia de Huancayo, Región Junín (Figura 2). Las coordenadas geográficas del experimento fueron 12°00'46.71"S, 75°13'15.88"O a 3390 msnm.



Figura 2. Distribución del experimento en la EEA. Santa Ana – Huancayo

4.2. Materiales

a. Material Biológico

Se seleccionó cuatro variedades comerciales de quinua (Huancayo, INIA-433, Hualhuas y Acollina), las cuales fueron proporcionadas por el Programa Nacional de Granos Andinos y Leguminosas de la Dirección de Desarrollo Tecnológico Agrario del Instituto Nacional de Innovación Agraria, cuyas características agronómicas se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de las variedades de quinua evaluadas

Variedades de Quinua	Origen	Adaptación	Característica agronómica	
INIA 433 – Santa Ana/AIQ/FAO	Proviene de una cruzada simple, desarrollada en la Estación Experimental Agraria ILLPA-INIA, cuyos progenitores son: - Progenitor femenino: Illpa INIA (004) - Progenitor masculino: Sajama (002)	Cultivo desde los 2800 a 3700 msnm.	Altura promedio de planta: 160 cm Longitud de panoja: 42.5 cm Diámetro de grano: 2.10 mm Contenido de saponina: Bajo Rendimiento de semilla/planta: 42.5 g	Diámetro de panoja: 8.8 cm Color de grano: Blanco cremoso Peso de 1000 semillas: 5 g Días a la madurez fisiológica: 160 Rendimiento potencial: 3.50 t ha ⁻¹
Huancayo	Obtenida por selección en la EEA Santa Ana Huancayo, siendo el cruce de Rosada de Junín, propagada con la clave UNC-U20P-69	Cuenca del Río Mantaro entre los 3200 a 3400 msnm	Altura promedio de planta: 160 cm Longitud de panoja: 42.5 cm Diámetro de grano: 2.10 mm Contenido de saponina: Bajo Rendimiento de semilla/planta: 42.5 g	Diámetro de panoja: 8.80 cm Color de grano: Blanco cremoso Peso de 1000 semillas: 5 g Días a la madurez fisiológica: 160 Rendimiento potencial: 2.80 t ha ⁻¹
Hualhuas	EEA El Mantaro de la UNCP, selección masal, selección de segregantes y genealógica	Se ajusta a diferentes localidades correspondientes a la cuenca del Mantaro en condiciones ecológicas similares a la EEA El Mantaro de la UNCP	Altura promedio de planta: 146 cm Longitud de panoja: 51 cm Diámetro de grano: 2.00 mm Contenido de saponina: Regular Rendimiento de semilla/planta: 39.1 g	Diámetro de panoja: 9.50 cm Color de grano: Blanco cremoso Peso de 1000 semillas: 4.20 g Días a la madurez fisiológica: 170 Rendimiento potencial: 3.20 t ha ⁻¹
Acollina	Selección masal originaria de la región central del Perú	Entre los 3500	Altura promedio de planta: 165 cm Longitud de panoja: 33.4 a 48.5 cm Diámetro de grano: 2.20 mm Contenido de saponina: Regular Rendimiento de semilla/planta: 35.5 g	Diámetro de panoja: 7.80 a 9.30 cm Color de grano: Blanco cremoso Peso de 1000 semillas: 2.10 a 3.80 g Días a la madurez fisiológica: 170 Rendimiento potencial: 2.50 t/ha

Fuente: INIA (2013) y Apaza *et al.* (2013)

b. Campo experimental

El experimento se desarrolló en el Lote 30 (Tabla 3), la superficie se dividió en 4 bloques experimentales o tratamientos de acuerdo al diseño, con tres repeticiones espaciados entre ellos 1.60 m. El número total de parcelas fueron 12 (28 m largo x 17.6 m ancho) equivalente a 84 miniparcelas o plot (17.6 m ancho x 4 m largo) de las cuales 48 son de quinua, además un espacio libre para el control del suelo (Figura 8).

Tabla 3. *Características del campo experimental, por bloques.*

Campo experimental		Parcela Experimental	
Número de tratamientos	4	Longitud de surco (m)	4
Parcelas de Quinua	48	N° de surcos	19
Número de parcelas por tratamiento	12	Distancia entre semillas (m)	0.20
		N° de semillas por surcos	20
Área de cada parcela (m ²)	70.4	N° de plantas por golpe al deshije	20

c. Programa para el modelamiento

Se empleó el programa AquaCrop, la División de Tierra y Agua de la FAO desarrollado el programa en el 2009, para simular el desarrollo y productividad de los cultivos, a partir del desenvolvimiento de la biomasa (follaje) y la producción cosechable en respuesta a la disponibilidad del agua o al suministro del riego (FAO, 2019).

El programa relaciona el rendimiento del cultivo con respecto a la transpiración del cultivo. El volumen disponible en el suelo, son estimados a partir de los datos de la precipitación y del régimen de riego. La FAO (2019) señala que AquaCrop se basa en un enfoque del requerimiento hídrico asimismo presenta las siguientes características:

- Utiliza la cobertura de dosel.
- La productividad del cultivo está en función al déficit hídrico.
- Datos de entrada que son parámetros y variables explícitas y algunas intuitivas.
- Tienen un gran equilibrio entre precisión, simplicidad y robustez.
- Se hace hincapié en la productividad de los cultivos en respuesta al déficit del agua.

El modelo AquaCrop separa la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, desarrollando un modelo de desarrollo y envejecimiento del follaje, siendo la base para estimular la transpiración, donde finalmente el rendimiento es una función entre el índice de cosecha y la biomasa (Esperanza, 2013).

4.3. Dinámica de respuesta del cultivo al estrés hídrico en AquaCrop

El principal indicador de estrés hídrico es el agotamiento en la zona radicular (D_r) y agotamientos de humedad del suelo en la zona radicular expresada en fracciones del agua total disponible en el suelo (TAW). Al ya no haber agotamiento, el Coeficiente de estrés hídrico del cultivo (K_s) =1.0. A medida que va avanzando el agotamiento, el K_s se reduce hasta que alcanza el umbral superior para el efecto del estrés, el umbral es nombrado p_{upper} .

La base del AquaCrop es el agua (Figura 3), el cual permite calcular el balance hídrico en el suelo, es el volumen almacenado de agua en la zona de la raíz puede expresarse en profundidad de agua (W_r). El agua total disponible (TAW) es el volumen de agua contenido a nivel de raíz, la capacidad de campo se determina por el contenido de humedad o agua que es capaz de retener el suelo. El punto de marchitez permanente y la saturación es el punto mínimo de humedad en el cual la planta o cultivo no puede seguir extrayendo agua del suelo (Steduto *et al.*, 2012).

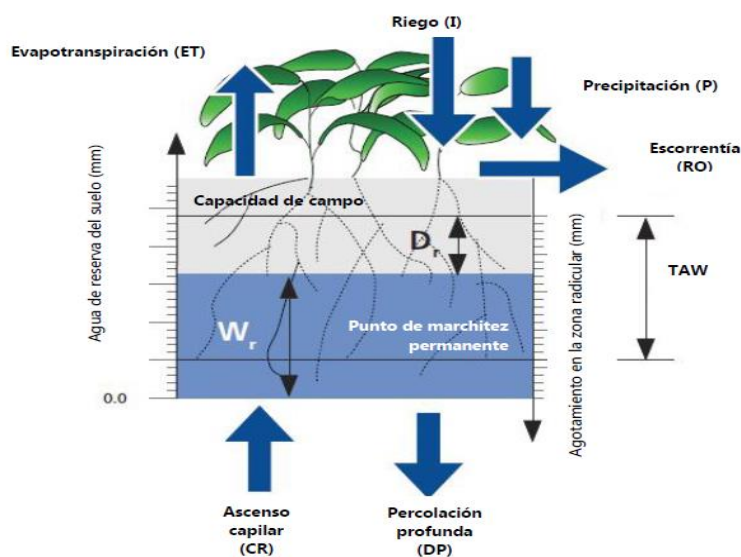


Figura 3. Dinámica de respuesta del cultivo al estrés hídrico. Tomado de FAO, 2019

El modelo AquaCrop distingue las tensiones relacionadas con el exceso y déficit de agua. Las consecuencias del estrés hídrico se generan sobre el rendimiento y el uso del agua (Fernández, 2013). En la Figura 4, se pueden observar los componentes principales entre las interacciones del suelo, planta y atmósfera. Además, se evidencia los parámetros que impulsan las fases fenológicas. Las líneas continuas señalan los enlaces directos entre los procesos y variables, y las líneas punteadas señalan retroalimentación.

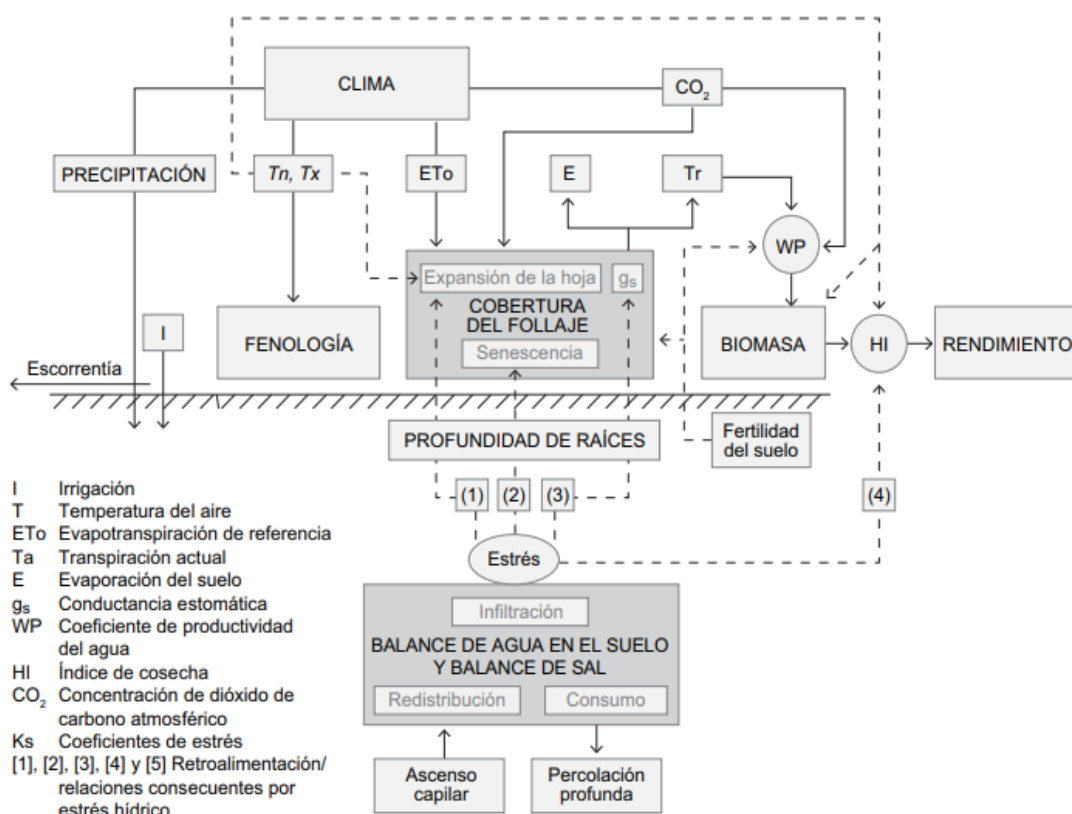


Figura 4. Principales componentes del planta-suelo-atmósfera y parámetros fisiológicos. Tomado de FAO, 2009.

Los símbolos (1), (2), (3) y (4), es la respuesta al estrés hídrico para el crecimiento de las hojas, senescencia, conductancia estomática e índice de cosecha.

4.4. Inputs para el modelo AquaCrop

AquaCrop utiliza un pequeño número de variables y parámetros (Figura 5). La información requerida de entrada principalmente son datos climáticos, características del cultivo, suelo y prácticas de manejo, que definen el entorno donde se desarrolla el cultivo. Los datos de entrada se acumulan en los inputs de cultivo, clima, suelo y gestión (Steduto *et al.*, 2012).

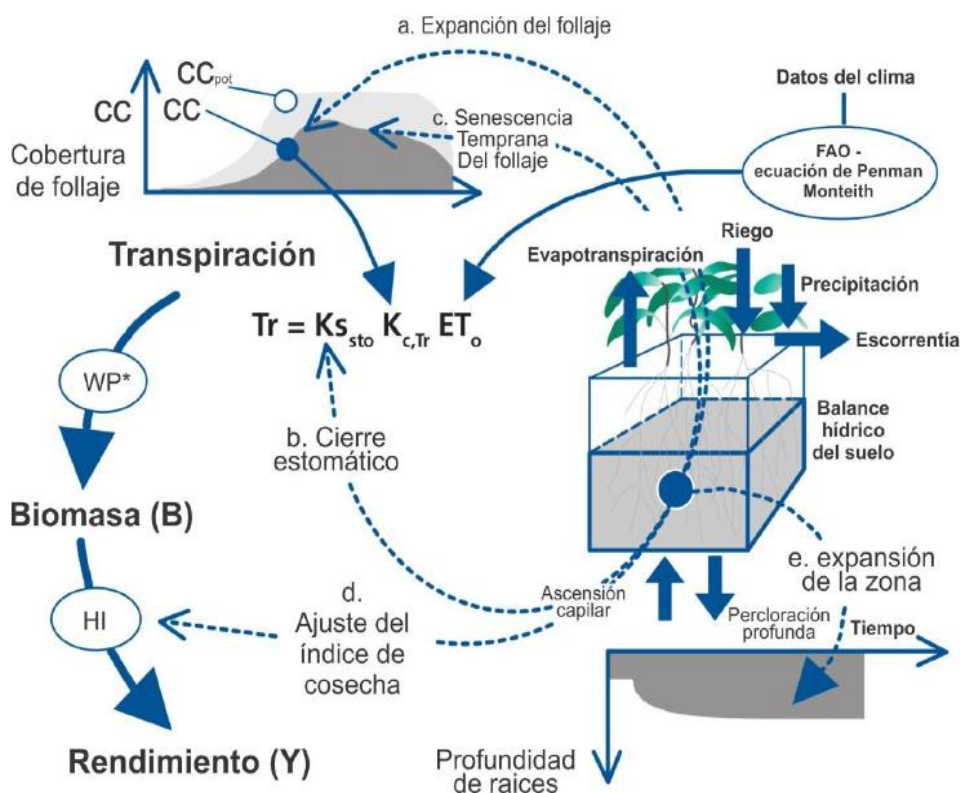


Figura 5. Proceso de los inputs en el modelo AquaCrop. Tomado de FAO, 2019

a. Datos del Clima

AquaCrop requiere información diaria de la temperatura, evapotranspiración y precipitación de referencia, también de la concentración anual de CO₂ atmosférico. En el caso de la evapotranspiración se puede estimar a partir del programa ETo Calculator (de acceso libre) que permite estimar a partir de los datos primarios (Raes *et al.*, 2018). El programa cuenta con datos históricos anual de concentración de CO₂ atmosférico que son proveídos del observatorio Manua Loa (Hawaii), así como las concentraciones futuras (Raes *et al.*, 2018).

b. Datos del Cultivo

El programa AquaCrop utiliza un número pequeño de parámetros para caracterizar el cultivo. Los datos se dividen en dos grupos (constantes y no constantes). Los datos constantes no se modifican en el tiempo, son considerados el clima, las prácticas de manejo y la ubicación. Los datos no constantes se encuentra ligada al desarrollo del fenológico del cultivo y de la respuesta al estrés, son considerados como el dosel, profundidad radicular, profundidad de las raíces (Steduto *et al.*, 2012).

Tabla 4. Componentes del input cultivo del modelo AquaCrop

Componentes	Características
Fenología	AquaCrop utiliza los grados días acumulados (GDD), anotando los efectos de los regímenes de temperatura en la fenología, sin embargo, se muestra y ejecuta la simulación en intervalos diarios. AquaCrop se aplica a diferentes tipos de cultivos herbáceos, las etapas claves de desarrollo son: Emergencia, inicio de floración, inicio de senescencia de dosel y maduración fisiológica.
Desarrollo del dosel	Característica decisiva de AquaCrop. Su desarrollo, envejecimiento y senescencia, además de la conductancia que es controlada por la estoma, determina la cantidad de agua transpirada determinando la cantidad de biomasa producida. El inicio de la senescencia es importante al determina la duración de la cobertura vegetal en el momento en que es más efectivo la fotosíntesis.
Profundización de las raíces	Las raíces absorben el agua; AquaCrop simula definiendo la efectiva profundidad de las raíces y el patrón de extracción de agua.
Transpiración del cultivo	La transpiración del cultivo depende de la fracción de la superficie del suelo cubierta por el dosel cuando no hay estrés suficiente para limitar la apertura estomática. La transpiración se calcula a partir de la ETo con el coeficiente de transpiración del cultivo.
Evaporación del suelo	La evaporación del suelo es producida desde la superficie humedecida que no está protegida por la sombra de dosel. AquaCrop separa la evaporación del suelo y la transpiración. A medida que se produce la senescencia del dosel, esta continúa brindando sombra, pero de manera menos efectiva.
Producción de biomasa	La producción de agua para la biomasa es importante para el manejo en AquaCrop, la demanda evaporativa de la atmósfera lo normaliza, como el ETo y la concentración de CO ₂
Rendimiento cosechable	La fracción de la biomasa en la cantidad de rendimiento se simula por medio del índice de cosecha. El índice de cosecha es la conexión entre la biomasa de los órganos preservantes y la biomasa total.

*Fuente: Steduto *et al.* (2012)

Entre las entradas del input cultivo (Tabla 4), se registra la fecha de siembra del cultivo, cobertura máxima, días de cobertura máxima vegetal, permanencia del ciclo del cultivo, el índice de cosecha, relación de la cosecha y producción de biomasa (Steduto *et al.*, 2012).

c. Datos del Suelo

AquaCrop, divide en 12 secciones el perfil del suelo con características hidráulicas diferentes según la capa del suelo, permitiendo imitar la redistribución del agua sobre la capa del suelo determinando el balance hídrico, así también el programa implementa el equilibrio de sales, la cual se realiza por ascenso capilar (Steduto *et al.*, 2012). Los parámetros para el input suelo son: el punto de marchitez permanente, el contenido de agua volumétrica a capacidad de campo y saturación, además de la conductividad hidráulica saturada (Steduto *et al.*, 2012).

Para el estudio del suelo, se debe evaluar hasta cinco estratos, cada estrato presenta las diferencias en clase textural, contenido de agua en el límite superior bajo la capacidad de campo o gravedad, límite inferior donde la planta puede captar agua o punto de marchitez permanente. Con estos datos el modelo deriva otros parámetros como drenaje interno, la evaporación de agua del suelo y percolación profunda, el ascenso capilar y escurrimiento superficial (Raes *et al.*, 2018).

d. Prácticas de manejo

Se dividen en campo y riego las prácticas de manejo (Tabla 5). Para el manejo de campo se utiliza la información de fertilidad del suelo (natural y/o fertilizante) y el nivel de infestación de malezas. Para el manejo de riego, se emplea la información del calendario de riego, profundidad, uso y gestión del agua en condiciones de riego o seco y calidad del agua (Figura 6).

Tabla 5. Categorías de prácticas de manejo para el modelo AquaCrop.

Categorías de prácticas de manejo	Características
Manejo del riego	Evalúa y analiza el manejo y la producción del cultivo, el uso del agua en condiciones de riego o seco. Incluyen métodos de aplicación del riego por goteo, aspersión o superficial, definiendo en términos de tiempo, calidad y profundidad de agua de riego o el modelo lo genere automáticamente.
Manejo en campo	Se considera tres aspectos: la fertilidad del suelo para su crecimiento del cultivo ya sea natural o por fertilizantes, acolchonado del suelo para minimizar la evaporación y uso de caballones para controlar la escorrentía superficial.

Fuente: Steduto *et al.* (2012)

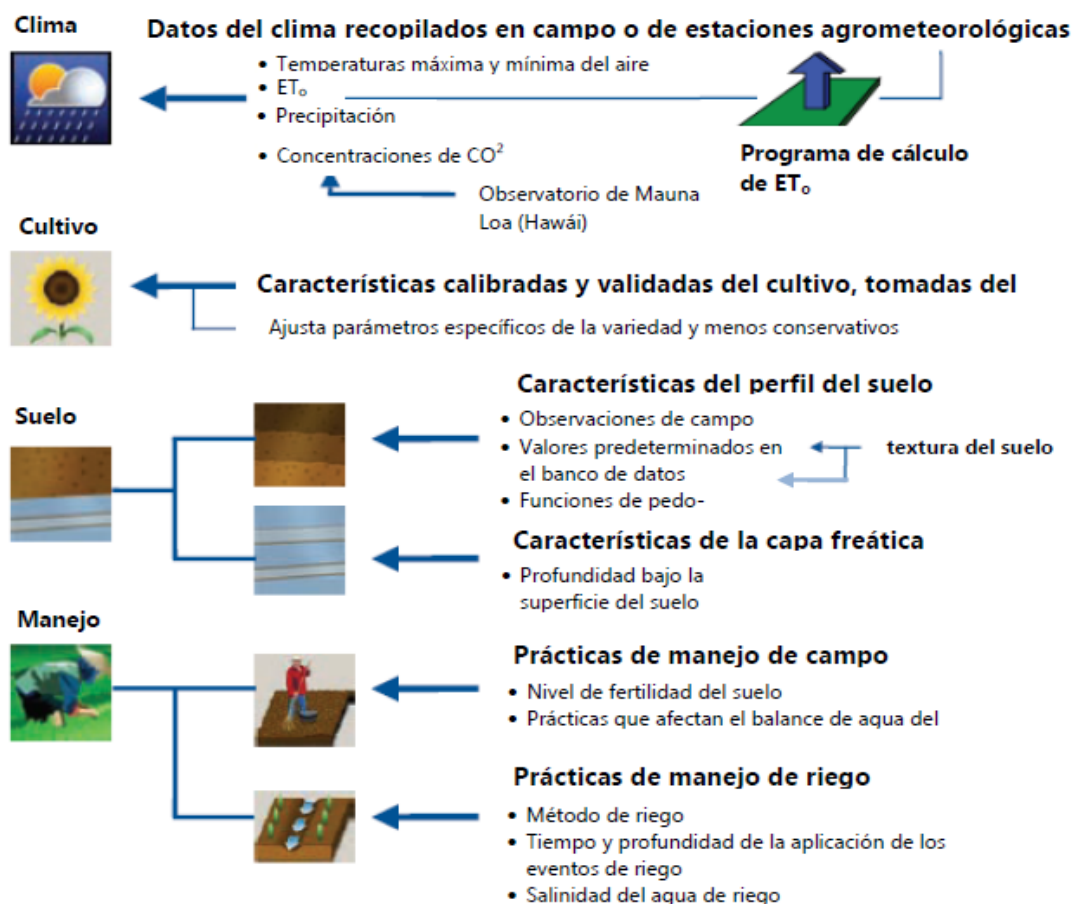


Figura 6. Data de entrada, definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo. Tomado de FAO, 2019

4.5. Interfaz del modelamiento en AquaCrop

La interacción del usuario y la salida de la información en el AquaCrop presentan un interfaz de usuario bien desarrollado, con diferentes gráficos y pantallas esquemáticas del análisis de los resultados de la simulación. En el panel principal, el usuario tiene acceso al panel de medio ambiente con datos de clima, cultivo, manejo y suelo, simulación para el contenido del sal y agua en el suelo y proyecto, para la simulación del cultivo en varios años, siendo rotaciones de cultivos o el mismo cultivo (Cervantes, 2016).

a. Simulación del desarrollo del cultivo

Steduti, *et al.* (2009), simula la cobertura verde del dosel (CC), la parcela del suelo cubierto por la cobertura del dosel entre 0 (antes de la etapa de emergencia) a una máxima cobertura del dosel (CCx), que puede llegar hasta el 100% dependiendo del cultivo. La cobertura del dosel es una característica crucial para el modelo AquaCrop, del mismo modo determina la cantidad de biomasa producida.

b. Simulación de la transpiración del cultivo

La evaluación de la transpiración del cultivo es necesario tener información de la cobertura del dosel y el clima diario, la transpiración del cultivo (Tr) es calculado multiplicando por el producto de ETo y el coeficiente de cultivo (KCtr). El KCtr es proporcional a la cobertura vegetal (CC).

c. Simulación de la producción de biomasa por encima del nivel del suelo (B)

El rendimiento del agua permite evaluar la biomasa normalizada. AquaCrop acumula el rendimiento diario de la biomasa (B) hasta el fin de la temporada por medio de la transpiración (Tr) y la evaporación día correspondiente (ET_o).

d. Simulación del rendimiento del cultivo (Y)

Es calculado por el producto del índice de cosecha (HI) y de la biomasa (B) final. El índice de cosecha se obtiene al acoplar el índice de cosecha de referencia junto con el factor de ajuste, por efecto del estrés.

4.6. Interpretación de las salidas en AquaCrop

La información es incorporada al programa, generando la gráfica de transpiración del cultivo (Tr), se aprecia en la Figura 7., el nivel de cobertura de dosel (CC). A la vez se evalúa el contenido hídrico del suelo (Dr), además de tres líneas los cuales representa los niveles de estrés causado al cultivo. Así mismo, permite evaluar el balance hídrico de la producción, del suelo y relación entre el agua-cultivo-clima-suelo. También se analiza el follaje (CC) y la disponibilidad hídrica a nivel radicular (Dr) para los materiales bajo estudio.

Para analizar si las condiciones de riego fueron satisfactorias como el rendimiento condicionado a la fertilidad del cultivo y el suelo en condiciones saturadas, el punto de marchitez e inicio de senescencia y el desarrollo del follaje potencial. El modelo en la Figura 7, indica la etapa del crecimiento del cultivo, donde se presenta el estrés hídrico debido al déficit de humedad en el suelo, indujo una disminución de la expansión foliar y cierre de estomas, ocasionando una disminución en la producción de biomasa seca y la disminución de la producción del grano (Gaelen *et al.*, 2015).

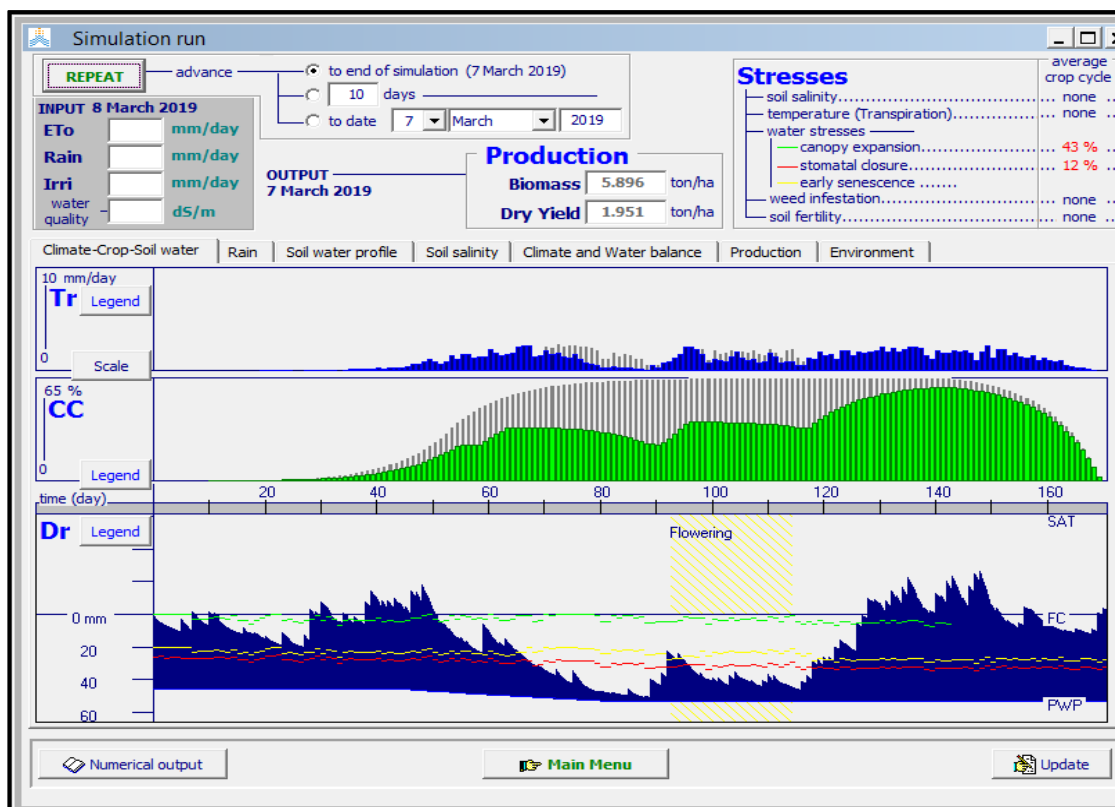


Figura 7. Salida del modelo AquaCrop. Tomado de FAO, 2019.

4.7. Softwares complementarios

Los programas usados para procesar la información en AquaCrop se detallan en la Tabla 6, siendo necesarios estos para procesar datos de campo e incorporarlos al modelo:

Tabla 6. Software utilizado para el presente trabajo experimental

Software	Descripción
ETo Calculator	Cumple la función de calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) según los estándares de la FAO. (Anexo 1)
Image Canopy	Utilizado para calcular la cobertura vegetal tomadas en campo mediante fotografías (Stewart, 2007).

4.8. Análisis estadísticos

Las siguientes pruebas estadísticas fueron usadas para comparar los datos obtenidos en nuestra fase experimental (2018-2019) comparados con los escenarios climáticos (2030 - 2031), así evaluar si hay diferencias significativas.

a. Análisis de Varianza

Se utilizó para precisar si existen diferencias significativas en las mediciones de longitud de raíz, biomasa seca. La altura de la planta y del rendimiento frente a los regímenes hídricos. Tras realizar un ANOVA, se ha tomado como niveles de significación: $p \geq 0,05$ no significativo, $0,01 \leq p < 0,05$ significativo y $p < 0,01$ muy significativo. Se toma en cuenta la siguiente tabla:

Tabla 7. Índices de análisis de varianza

Fuente de variación	gl	SC	CM	F
Modelo	t-1S	SCTR	CMTR	CMTR/CME
Régimen hídrico	t-1	SCTR	CMTR	CMTR/CME
Variedad	t-1	SCTR	CMTR	CMTR/CME
Error	T(r-1)	SCE	CME	
Total		SCT		

Fuente: Fernández, 2010

b. Prueba t

Será usada para examinar las diferencias significativas entre los escenarios climáticos, ya que tienen distribución normal y homogénea en sus varianzas. Además, esta prueba permite comparar muestras hasta $N \leq 30$ y/o establece diferencias entre las medias de las muestras (Sánchez, 2015).

4.9. Diseño experimental

El experimento se desarrolló a través de un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), en total se diseñaron 12 parcelas (17.6 m x 4 m) se obtuvieron 48 parcelas para el estudio quinua (Figura 8).

Se evaluó cuatro tratamientos con tres repeticiones. Los tratamientos fueron 200 % (riego en exceso), 100 % (riego normal), 50 % (estrés hídrico) y 25 % (intenso estrés hídrico). El 100 % de riego fue considerado “el control” con 3000 m³ ha⁻¹ de acuerdo a la lámina de riego (Tabla 8). Los otros dos tratamiento (50 % y 25 %) fueron considerados como régimen de restricción de agua, para ello se diferenció en función al tiempo de riego para cada tratamiento, aplicando un intervalo de 2 horas al 200 %, 1 hora al 100 % 30 minutos al 50% y 15 minutos al 25%.

$$Y_{ijk} = \underbrace{\mu + \gamma_k + \tau_i + (\gamma\tau)_{ki}}_{\text{Representa la parcela}} + \underbrace{\beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}}_{\text{Representa la subparcela}}$$

Representa la parcela

Representa la subparcela

Y_{ijk} = Observación de la unidad experimental

μ = Media general del ensayo

γ_k = Efecto de los bloques

τ_i = Efecto del tratamiento τ de la planta

$(\gamma\tau)_{ki}$ = Error de parcela

β_j = Efecto del tratamiento β de la subparcela

$(\tau\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción de los tratamientos de la parcela y subparcela

ε_{ijk} = Error de la subparcela

	200% (17.6m ó 29 surcos)		100% (17.6m ó 29 surcos)		50% (17.6m ó 29 surcos)		25% (17.6m ó 29 surcos)		
	Huancayo		Huancayo		Huancayo		Huancayo		BORDE
	INIA-433		Acollina		INIA-433		Acollina		Bloque 1 (4m c/u)
	Hualhuas		INIA-433		Hualhuas		INIA-433		
	Acollina		Hualhuas		Acollina		Hualhuas		BORDE
	Acollina		Acollina		Hualhuas		Acollina		Bloque 1 (4m c/u)
	Hualhuas		Hualhuas		Acollina		Hualhuas		
	INIA-433		INIA-433		INIA-433		INIA-433		BORDE
	Huancayo		Huancayo		Huancayo		Huancayo		Bloque 1 (4m c/u)
	Hualhuas		Huancayo		Hualhuas		Huancayo		
	INIA-433		INIA-433		INIA-433		INIA-433		BORDE
	Acollina		Acollina		Acollina		Acollina		Bloque 1 (4m c/u)
	Huancayo		Hualhuas		Huancayo		Hualhuas		BORDE

	Lamina muy alta de riego: 64.7 mm (CALIBRACIÓN)		Lámina alta de riego: 42.2 mm (VALIDACIÓN 1)		Lámina media de riego: 30.9 mm (VALIDACIÓN 2)		Lámina baja de riego: 25.3 mm (VALIDACIÓN 3)		
BORDE		BORDE				BORDE		BORDE	

Figura 8. Distribución del Lote 30, diseño experimental

4.10. Proceso experimental

La Figura 9, resume el proceso realizado:

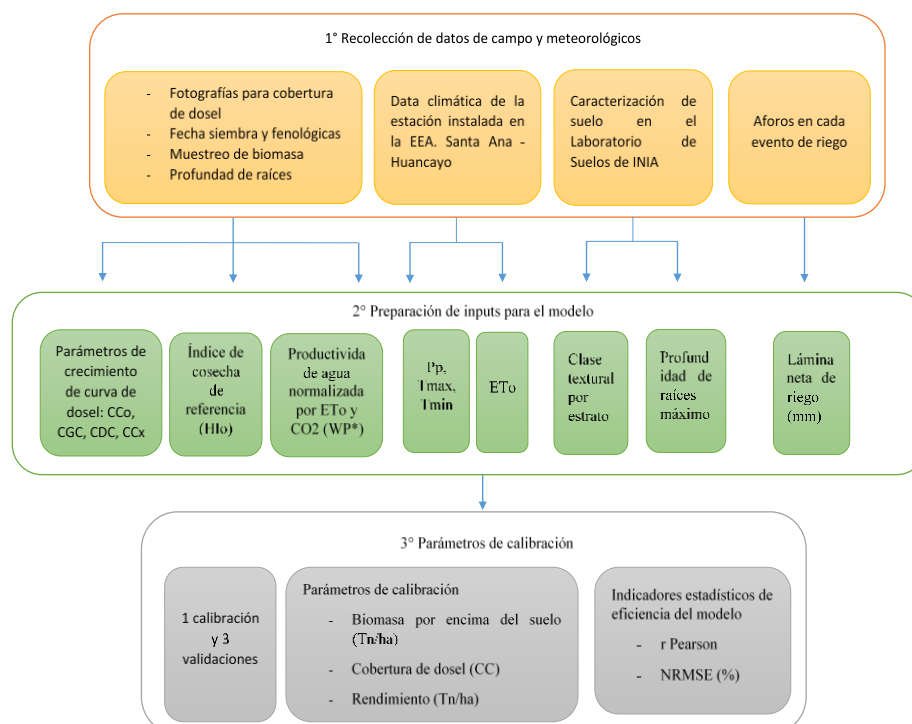


Figura 9. Diagrama de los procesos para la modelación en AquaCrop.

4.10.1. Recolección de datos meteorológicos y de campo

a. Datos del clima

La información fue registrada a través de una estación meteorológica, modelo Vantage Pro2TM (6152) - Davis. Está compuesta por anemómetro, pluviómetro de cazoletas y sensores de humedad, temperatura, UV y radiación solar. (Meteocultura, 2018).

La información recopilada fue almacenada en un servidor y descargadas mediante el programa WeatherLink (Tabla 8).

Tabla 8. La consola Vantage Pro 2 cinco modos de función.

Modo	Descripción
Setup (configuración)	Se ubica la fecha, hora, entre otros datos. Son necesarios para visualizar y calcular los datos meteorológicos.
Current Weather (Tiempo actual)	Usado para leer el informe meteorológico actual, también puede cambiar las unidades de medida, calibrar las lecturas meteorológicas o borrarlas.
High/Low (Máxima/mínima)	Muestra las lecturas mínimas y máximas diaria, tanto mensual y anual.
Alarm (Alarma)	Permite revisar, establecer y borrar las alarmas.
Graph (Gráfico)	Muestra los datos meteorológicos con más de 80 gráficos.

*Fuente: Vantage Pro, 2008.

Para el inicio del experimento se registró en la consola la hora y fecha, latitud y longitud, y elevación El registro de la información se realizó del 13 de septiembre del 2018 al 13 de abril del 2019.

b. Datos del cultivo

Se identifican etapas fenológicas que serán organizados mediante el calendario agrícola: 1) Fecha de emergencia, 2) fechas de 2 hojas, 3) fecha de 4 hojas, 4) fecha de 6 hojas, 5) ramificación, 6) inicio de panojamiento, 7) panoja, 8) inicio de floración, 9) floración, 10) grano lechoso, 11) grano pastoso, 12) maduración fisiológica, se usan los días después de la siembra (DDS). Así mismo se evaluó las biométricas durante el estado fenológico:

Altura de planta (cm)

La medición de la altura de planta se realizó cada dos semanas a partir de los 21 DDS (8 de Octubre de 2018) hasta los 147 DDS (11 de Febrero del 2019). Se midieron 4 plantas en dos surcos centrales. La evaluación fue realizada desde la base de la planta hasta el ápice de la misma.

Diámetro de panoja (cm)

La evaluación fue realizada desde el tercio medio de la panoja principal con ayuda de una wincha, se midió el diámetro de la panoja al momento de la cosecha.

Longitud de la panoja (cm)

La longitud de la panoja fue evaluada a partir de la base hasta el ápice de la panoja principal, la evaluación se realizó al momento de la cosecha.

Peso de 1000 granos de quinua

Se cosechó 1 m lineal de las plantas por unidad experimental. El peso de 1000 granos se estimó a partir de 50 semillas obtenidas al azar de cada muestra cosechada. Se secaron los granos a 60 °C hasta obtener un peso constante.

Rendimiento (t ha⁻¹)

La trillada se realizó por separado para cada variedad. En el cálculo del rendimiento se tomó en cuenta el peso total del grano cosechado sobre el peso total de la planta por cada unidad experimental, luego fue transformado en t ha⁻¹. Se determinó con la siguiente fórmula (SENAMHI, 2014):

$$\frac{t}{ha} = \frac{\text{peso parcela útil} \times 10.000 \text{ m}^2}{\text{área parcela útil m}^2}$$

Índice de cosecha (%)

El índice de cosecha fue calculado a través de la relación del peso de grano a la cosecha con respecto al peso de la biomasa seca aérea total.

c. Datos del suelo

Para la determinación de la caracterización edáfica para el input suelo del modelo, se realizaron calicatas de 1.50 m², se observaron 3 horizontes, definidos a un nivel de profundidad desde los 0 cm hasta los 30 cm, con clase textural franco, el siguiente nivel fue de 30 - 55 cm de profundidad. Se mostró una clase textural de franco arenoso y el tercer nivel de los 55 a 75 cm de profundidad con clase textural franco arenoso limoso. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Suelos del Instituto Nacional de Innovación Agraria (Anexo 2).

d. Manejo de campo y aplicación del riego

Para el presente estudio, se empleó el riego por goteo, siendo el sistema de riego más eficiente en la actualidad, al suministrar el agua de manera uniforme, controlada y constante, además mantiene el agua en la zona radicular en circunstancias de baja tensión. El sistema de riego por goteo, está integrada por cintas de polietileno, tiene un diámetro de 16 mm, con microtubos o goteros cuya descarga de cada gotero oscila entre los 0.40 y 0.60 l h⁻¹.

Para el control del riego se evaluó primero el caudal de cada cinta principal ubicada al inicio del terreno. Se contabilizó los surcos por tratamiento haciendo un total de 76 surcos para ubicar así las cintas de riego, además se tiene en cuenta que en un metro lineal consta de 4 goteros, cada gotero emite 600 ml de agua por hora y la capa laminar es de 8 cm de profundidad con 10 cm de diámetro. Finalmente, cada tratamiento consta de 3648 goteros, haciendo un riego total por tratamiento de 2188.8 L h^{-1} , determinando así la capa laminar y el riego mediante el tiempo según cada tratamiento.

El riego fue controlado por tiempos de acuerdo al tratamiento, recibiendo una lámina de riego establecida. Para el Tratamiento 1 recibió una lámina de riego muy alta con un porcentaje del 200 %, para el Tratamiento 2 recibió una lámina de riego alta con un porcentaje del 100%, para el Tratamiento 3 recibió una lámina de riego media con un porcentaje del 50% y para el Tratamiento 4 recibió una lámina de riego baja con un porcentaje del 25 %.

Las láminas de riego fueron controladas de acuerdo al tiempo, por ejemplo: 200% riego de 2 h, 100% riego de 1 h, 50% riego de 30 min y 25% riego de 15 min, como se aprecia en la Tabla 10, los riegos en relación al tiempo. En total se realizaron nueve eventos de riego durante la campaña, al contabilizar por el tiempo se calculó la lámina de riego tal como se muestra en la tabla 9, el total de agua aplicada a los tratamientos durante el periodo vegetativo fue de 64.7 mm (200 %), 42.2 mm (100 %), 30.94 mm (50 %) y 25.3 mm (25 %).

Tabla 9. *Dosis de riego por tratamiento en la campaña desde los meses de Setiembre 2018 a Enero 2019.*

Lamina de riego (mm)						
DDS	RIEGO	FECHA	200 %	100 %	50 %	25 %
11	1er	27 Setiembre	7.50	7.50	7.50	7.50
17	2do	3 Octubre	0.94	0.94	0.94	0.94
24	3er	10 Octubre	3.75	3.75	3.75	3.75
73	4to	28 Noviembre	7.50	3.75	1.88	0.94
76	5to	1 Diciembre	7.50	7.50	7.50	7.50
86	6to	10 Diciembre	7.50	3.75	1.88	0.94
90	7mo	14 Diciembre	7.50	3.75	1.88	0.94
104	8vo	28 Diciembre	11.3	5.63	2.81	1.41
111	9no	4 Enero	11.3	5.63	2.81	1.41
TOTAL			64.7 mm	42.2 mm	30.9 mm	25.3 mm

*DDS: Días después de la siembra.

Tabla 10. *Tiempo de riego por tratamiento y fechas*

Tiempo por tratamiento (horas)						
RIEGO	FECHA	200%	100%	50%	25%	
1er	27 setiembre	2:00:00	2:00:00	2:00:00	2:00:00	
2do	3 octubre	0:25:00	0:25:00	0:25:00	0:25:00	
3er	10 octubre	1:00:00	1:00:00	1:00:00	1:00:00	
4to	28 noviembre	2:00:00	1:00:00	00:30:00	00:15:00	
5to	1 diciembre	2:00:00	2:00:00	2:00:00	2:00:00	
6to	10 diciembre	2:00:00	1:00:00	00:30:00	00:15:00	
7mo	14 diciembre	2:00:00	1:00:00	00:30:00	00:15:00	
8vo	28 diciembre	3:00:00	1:30:00	00:45:00	00:22:50	
9no	4 enero	3:00:00	1:30:00	0:45:00	00:22:50	
TOTAL		17:25:00	11:25:00	8:25:00	6:25:00	

4.10.2. Evaluación de parámetros sensibles en el programa AquaCrop

En el esquema para el cálculo con AquaCrop (figura 10), permite evaluar la Cobertura de Dosel (CC) a partir de la transpiración y la biomasa que influyen sobre el estrés hídrico. El rendimiento final (Y) fue evaluado por el producto del Índice de cosecha (HI₀) y la materia seca final (B), siendo adaptados por factores de estrés hídrico y térmico a lo largo de la formación del rendimiento (Y) (Raes *et al.*, 2012).

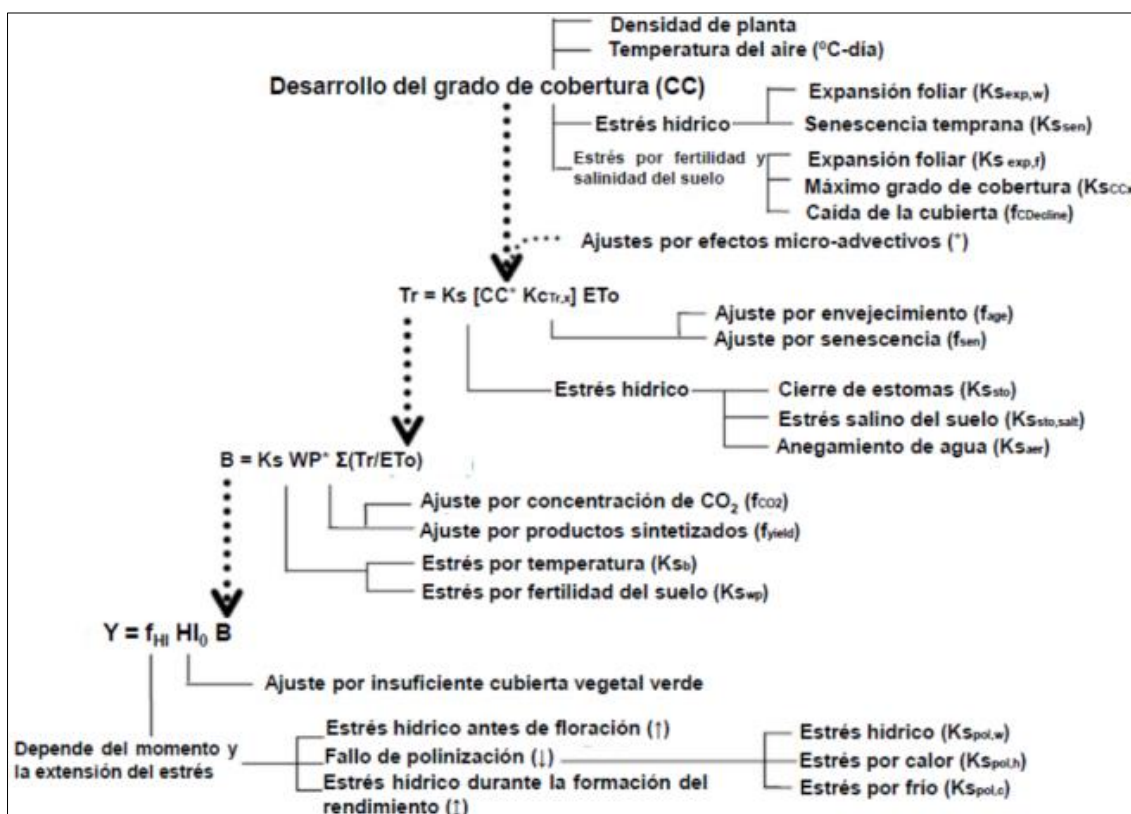


Figura 10. Esquema de cálculo del modelo AquaCrop. Fuente: Raes *et al.* (2012)

a. Evaluación de la Cobertura del dosel

Para ello se delimito un área de 1 x 0.80 m dentro de los bloques del experimento para la evaluación de ocho plantas de los surcos centrales de cada plot (Figura 11). Las imágenes fueron registradas con una cámara digital Samsung ST72 durante el estado fenológico de la quinua. Para el análisis, de las imágenes se usó el programa Image Canopy para la transformación en porcentaje de cobertura.

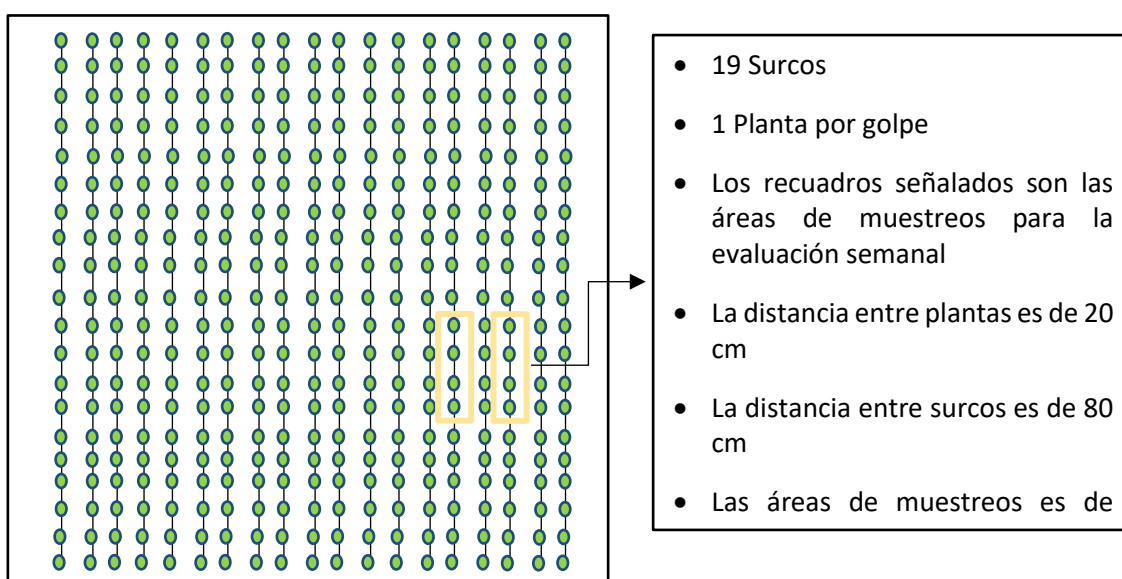


Figura 11. Diseño por surcos y las áreas de muestreo

b. Medición de la biomasa seca y profundidad de raíces

El procedimiento consistió en la cosecha de tres plantas por muestreo, de cada sub parcela se colectó 18 plantas por cada variedad, para los cuatro tratamientos. Las plantas fueron evaluadas independientemente, donde se evaluó el peso húmedo y posteriormente el peso seco previo secado de las muestras a 105 °C por 48 horas.

Las raíces fueron medidas y evaluado el peso fresco y seco de cada raíz, a la vez se evaluó la longitud de la raíz. La medición de la máxima profundidad de las raíces fue realizada al 130 DDS. Los datos fueron analizados mediante el Análisis de Varianza con el nivel de significancia de 0.05.

4.10.3. Calibración y validación del programa

La calibración consiste en adaptar parámetros del programa AquaCrop, con los datos observados en campo. Primero, se abordó los datos de entrada al programa de cada uno de los input del modelo AquaCrop, a la vez se ingresó los datos de clima (temperatura máxima, mínima, evapotranspiración y precipitación), datos de cultivo (CCo, CGC, CDC, CCx, Hlo y WP), datos de suelo (punto de marchitez, saturación, conducción hidráulica y capacidad de campo) y datos de riego (láminas aplicadas). En la Tabla 11, señala los parámetros calibrados en el modelo de cultivo y las variables contrastadas en la calibración: simulación de la cobertura de dosel (CC), rendimiento (Y) y biomasa (B) (Ordoñez, 2016).

El coeficiente basal del cultivo ($K_{cb\text{medio}}$) cambia durante el crecimiento de la cobertura del dosel, el valor de señala que la cobertura del dosel se encuentra sobre el suelo, incrementando a medida que el cultivo se desarrolla hasta una cobertura más densa denominada $K_{cb\text{medio}}$.

Tabla 11. *Parámetros calibrados en el programa AquaCrop para el cultivo de quinua*

Parámetros	Simbolo
Cobertura del dosel promedio del cultivo al 90% de emergencia	CCo
Coefficiente de desarrollo del dosel	CGC
Coefficiente de descenso del dosel	CDC
Cobertura máxima del dosel	CCx
Índice de cosecha de referencia	Hlo
Productividad del agua normalizada por CO ₂ y ETo	WP*
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel	P upper
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel	P lower
Curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel	S
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático	P upper
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescia temprana	P upper
Curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana	S
Coefficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo	Kcb med

Fuente: Ordoñez, 2016

4.10.4. Criterio de evaluación del programa AquaCrop

La cobertura de dosel, biomasa aérea seca y el rendimiento se evaluó en términos de eficiencia (EF) del coeficiente de determinación (R^2), coeficiente Nash-Sutclifferaíz, coeficiente medio de error raíz cuadrado (RMSE):

a. Coeficiente de determinación (R^2)

Representa la proporción de la varianza en los datos medidos explicada en el modelo. Matemáticamente se interpreta como la relación cuadrática entre la covarianza y las desviaciones estándar multiplicadas de las observaciones y predicciones. R^2 varía de 0 a 1, los valores más altos que indican menos varianza de error (Moriassi *et al.*, 2007).

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

* O_i = Observado inicialmente, \bar{O} =promedio observado, P_i = Simulado inicialmente, \bar{P} = promedio de lo simulado

b. Coeficiente Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)

El coeficiente Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) permite evaluar la eficiencia del modelo entre los valores simulados y observados, su valor óptimo es 1 (Coaquira, 2018). Se calcula en la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right)$$

En la Tabla 12, los valores entre el 0 y 1 son vistos generalmente como niveles aceptables de rendimiento. Generalmente evalúa niveles aceptables de rendimiento. El indicador NSE, es muy usado al proporcionar información extensa sobre los valores informados, además es la mejor función objetivo para reflejar el ajuste general de un hidrograma (Fghide *et al.*, 2015).

Tabla 12. Valores de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

EFICIENCIA DE NASH SUTCLIFFE (NSE)	AJUSTE
< 0.20	Insuficiente
0.20 – 0.40	Satisfactorio
0.40 – 0.60	Bueno
0.60 – 0.80	Muy bueno
> 0.80	Excelente

*Fuente: Fghide *et al.* (2015)

c. Coeficiente Media raíz error cuadrado (RMSE)

Indica el error en las unidades del componente de interés, ayudando al análisis de los resultados. El rendimiento del modelo se clasifica en funciones de valores de RMSE como excelentes (RMSE < 10 %), bueno (10 % < RMSE), regular (20 % < RMSE < 30 %) y pobre (RMSE > 30 %) (Gaelen *et al.*, 2015). Se presta especial atención al modelo bajo condiciones en las cuales el estrés hídrico del suelo coincide con el estrés de fertilidad del suelo. Para este propósito el rendimiento del modelo también se evalúa utilizando solo el agua de lluvia y el riego deficitario (Gaelen *et al.*, 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{P})^2}{n}} \cdot \frac{100}{\bar{O}}$$

* O_i = Observado inicialmente, \bar{O} =promedio observado, P_i = Simulado inicialmente, \bar{P} = promedio de lo simulado, n = número total de valores

4.10.5. Simulación bajo escenarios de Cambio Climático

Los escenarios futuros, fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), la información climática obtenida fue la temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y precipitación acumulada diaria, para el periodo del 1971 al 2099. La información proporcionada fue simulada para la región Junín.

En la actualidad los escenarios climáticos son materia de regionalización, el SENAMHI desarrollo proyecciones climáticas locales a nivel nacional con datos de precipitación, temperatura (máxima y mínima) hacia el 2050, para ello se utilizó los portales como de Regionalización Estadística, Predictia Intelligent Solutions y Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria, las cuales fueron integradas en el MOSAICC (Modelling System for Agricultural Impacts of Climate Change) (SENAMHI, 2014).

De los modelamientos desarrollados por el SENAMHI, se evaluó seis escenarios climáticos al 2030, a partir de tres modelos climáticos (CANESM2, MPI-ESM-MR y CNRM-CM5) y dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP 4.5, con emisiones intermedias y RCP 8.5, con altas emisiones) (Tabla 13 y 14).

Tabla 13. *Modelo climático global*

Nombre del ESM (Modelos Climáticos Globales)	Institución	Resolución horizontal atmosférica	Referencia
CANESM2	Centro Canadiense para el modelaje y Análisis (Canada)	2.80 x 2.80	Arora <i>et al.</i> (2011)
CNRM-CM5	Centro Nacional para la Investigación Metereológica (Francia)	1.40 x 1.40	Voltaire <i>et al.</i> (2011)
MPI-ESM-MR	Instituto Mac Planck de Metereología (Alemania)	1.90 x 1.90	Zanchettin <i>et al.</i> (2012)

Tabla 14. *Características de los escenarios climáticos*

Escenario de Cambio Climático	Resolución espacial	Rango Temperatura (°C)	Incremento CO₂ al 2100
CNRM_CM5_rcp4.5	1.40° x 1.40°	0.90 a 2.00	538 ppm
CNRM_CM5_rcp8.5	1.40° x 1.40°	1.40 a 2.60	936 ppm
CANESM2_rcp4.5	2.80° x 2.80°	0.90 a 2.00	538 ppm
CANESM2_rcp8.5	2.80° x 2.80°	1.40 a 2.60	936 ppm
MPI_ESM_MR_rcp4.5	1.80° x 1.80°	0.90 a 2.00	538 ppm
MPI_ESM_MR_rcp4.5	1.80° x 1.80°	1.40 a 2.60	936 ppm

*Fuente: Alarcón Alcántara (2015)

V. RESULTADOS

5.1. Datos de entrada para el modelo AquaCrop

5.1.1. Datos Climáticos

Durante el experimento se desarrolló el diagrama ombrotérmico (Figura 12), con datos de las temperaturas máximas y mínima, también datos de precipitación máxima de 19.8 mm y mínima 0.2 mm, estos datos han sido recaudados durante la etapa de experimentación del presente trabajo, con ayuda de la estación meteorológica ubicada en el Lote 30.

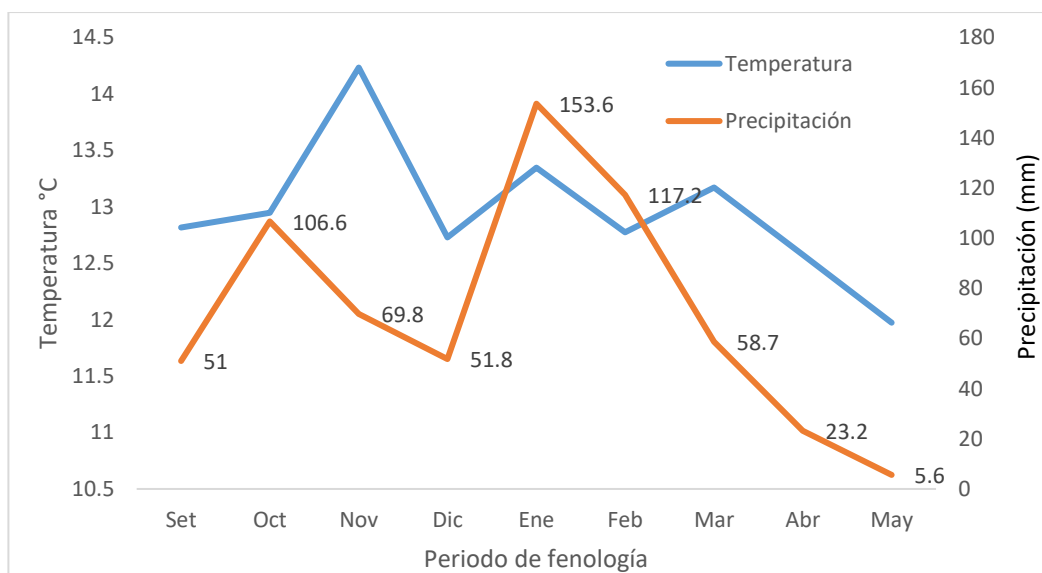


Figura 12. Diagrama ombrotérmico de la estación Santa Ana en la campaña setiembre 2018-mayo 2019

5.1.2. Fenología del cultivo

Las actividades más sustanciales realizadas en el periodo fenológico del cultivo están especificadas en la Tabla 15. Se tomó en consideración el número de días en los cuales se lleva a cabo la etapa de emergencia, cobertura máxima del dosel, inicio de senescencia e inicio de marchitez, siendo importantes en cada variedad del cultivo.

Tabla 15. *Actividades agronómicas realizadas*

Descripción	Fecha
Delimitación del terreno	13 de agosto del 2018
Análisis del suelo	18 de agosto del 2018
Preparación del suelo	13 de septiembre del 2018
Siembra manual	17 de septiembre del 2019
Instalación de la estación meteorológica	13 de setiembre del 2019
Instalación de riego	24 de setiembre
Deshije del cultivo	5 de noviembre
Control de malezas	8 de noviembre
Riegos	10, 17, 24, 73, 76, 86, 90, 104, 111 DDS
Muestreo biomasa	77 DDS
Quinto riego	131 DDS
Deshierbo	169 DDS
Calicata-segundo muestreo	66 DDS
Retiro de malezas	3 de diciembre
Retiro de malezas	8 de enero
Cosecha	28 marzo
Trillado	10 mayo
Evaluación del rendimiento	3 mayo

* DDS: Días después de siembra

Tabla 16. *Desarrollo fenológico*

Descripción	Huancayo	Hualhuas	Acollina	INIA-433
Emergencia	7 DDS	7 DDS	8 DDS	7 DDS
Cobertura máxima	85 DDS	117 DDS	100 DDS	77 DDS
Senescencia	143 DDS	146 DDS	150 DDS	147 DDS
Maduración	171 DDS	175 DDS	178 DDS	171 DDS
Floración	92 DDS	90 DDS	98 DDS	93 DDS
Duración de floración	22 DDS	27 DDS	20 DDS	25 DDS
Longitud acumulada de raíz	59 DDS	65 DDS	60 DDS	58 DDS
Máxima profundidad de raíz	83 DDS	129 DDS	130 DDS	129 DDS

* DDS: Días después de siembra

La emergencia se desarrolló a los 7 DDS para las cuatro variedades, mientras que la floración se registró a Hualhuas a 90 DDS al igual que la variedad de quinua INIA-433 y Huancayo, Acollina a 98 DDS. En la etapa de senescencia Acollina llegó a esta etapa a los 179 DDS, en comparación de las demás variedades en el experimento (Tabla 16).

De los riegos realizados, la etapa donde se realizó el estrés hídrico fue en la etapa de floración, en esta etapa se regó por dos horas el 200 %, una hora el 100 %, media hora el 50 % y un cuarto de hora el 25 %. Los riegos presentados en la Tabla 17, fueron realizados de acuerdo con las etapas que la planta sufre un estrés. Siendo la etapa de prefloración, floración y grano lechoso etapas sensibles al estrés hídrico y no lograr alcanzar su rendimiento potencial (Figura 13) (Garrido *et al.*, 2013).

Tabla 17. Registro de riego (mm) y precipitación (mm) en el periodo de fenología

Fecha	200 %	100 %	50 %	25 %
27/09/2018	7.50	7.50	7.50	7.50
03/10/2018	0.94	0.94	0.94	0.94
10/10/2018	3.75	3.75	3.75	3.75
28/11/2018	7.50	7.50	7.50	7.50
01/12/2018	7.50	7.50	7.50	7.50
10/12/2018	7.50	3.75	1.88	0.94
14/12/2018	7.50	3.70	1.88	0.94
28/12/2018	11.3	5.63	2.81	1.41
04/01/2019	11.3	5.63	2.81	1.41
Precipitación (mm)	637	637	637	637
Total (mm)	702	683	674	669

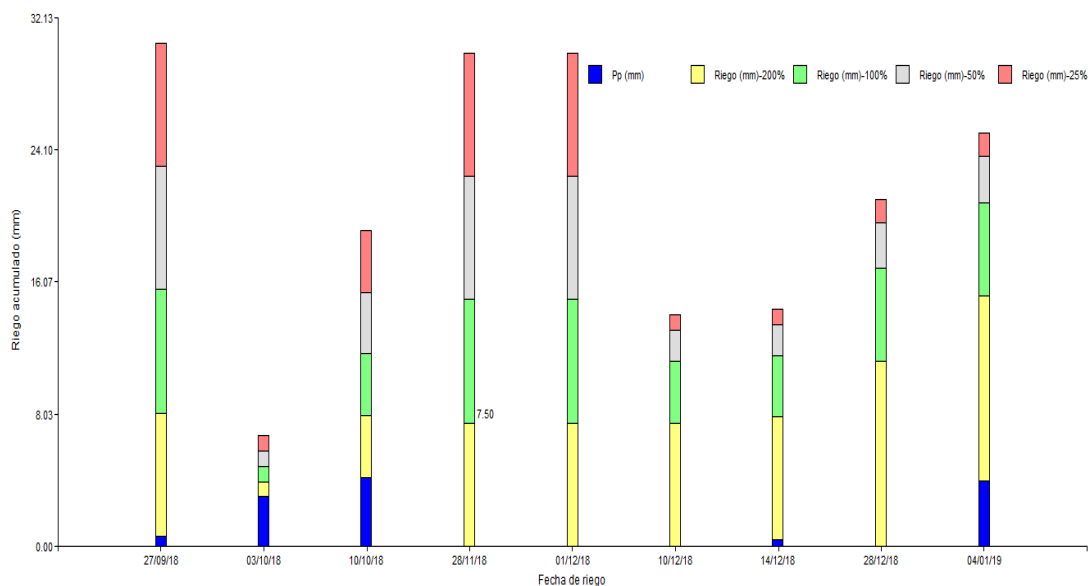


Figura 13. Riego (mm) y precipitación (mm) durante el periodo de fenología.

5.1.3. Mediciones fisiológicas

a. Medición de longitud de raíz

La variedad Huancayo fue la que registró una mayor longitud de raíz, seguida de Acollina, INIA-433 y finalmente Hualhuas. Sin embargo, no se muestran diferencias significativas entre ellas. (Tabla 18).

Tabla 18. Longitud promedio de raíz (cm)

Variedad	Trat.	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
		Promedio	E.E.	Promedio	E.E.	Promedio	E.E.
Acollina	200 %	19.4	±2.31	29.1	±3.18	17.8	±1.30
	100 %	20.2	±1.38	30.1	±1.28	20.2	±0.82
	50 %	16.2	±1.62	29.8	±2.37	18.2	±0.36
	25 %	14.4	±1.47	25.9	±1.90	19.5	±2.15
Hualhuas	200 %	17.6	±1.00	30.9	±0.44	17.8	±1.31
	100 %	18.4	±0.85	32.9	±1.79	20.9	±0.22
	50 %	15.1	±1.57	29	±1.39	19.9	±0.42
	25 %	15.1	±1.07	29.7	±1.84	18.3	±1.04
Huancayo	200 %	18.1	±1.03	30.6	±0.68	18.7	±2.04
	100 %	19.4	±1.20	32.2	±0.95	20.3	±0.63
	50 %	16.1	±0.95	30.2	±2.23	18.9	±0.70
	25 %	14.5	±1.55	29.5	±3.03	18.3	±0.79

INIA-433	200 %	17.1	±0.38	31.9	±0.59	18.4	±0.83
	100 %	17.9	±0.54	35.5	±1.13	19.8	±1.59
	50 %	14.8	±1.13	31.3	±1.73	19	±0.72
	25 %	12.8	±0.66	30.7	±0.51	18.8	±0.58

*E.E.=Error Estándar

De acuerdo al análisis de varianza del primer muestreo de longitud de raíz (77 DDS), se encontró que no existen diferencias significativas en la evaluación de longitud de raíz, se evaluó en el primer muestreo los tratamientos de riego (200%, 100%, 50% y 25%) y las variedades (Acollina, Hualhuas, Huancayo e INIA-433), los datos obtenidos no se diferencian (Tabla 19).

Tabla 19. *Análisis de varianza para el primer muestreo de longitud de raíz (77 DDS)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5.55	6	1	0	0.96
Régimen hídrico	4.88	3	2	0	0.73
Variedad	0.67	3	0	0	0.98
Error	155	41	4		
Total	160	47			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl=grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

De acuerdo al análisis de varianza del segundo muestreo de longitud de raíz (131 DDS), se encontró que no existen diferencias significativas en la evaluación de longitud de raíz, se evaluó en el segundo muestreo los tratamientos de riego y las variedades (Acollina, Hualhuas, Huancayo e INIA-433), los datos obtenidos no se diferencian (Tabla 20).

Tabla 20. *Análisis de varianza para el segundo muestreo de longitud de raíz (131 DDS)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	83.9	6	14	1	0.24
Régimen hídrico	5.67	3	2	0	0.90
Variedad	78.3	3	26	3	0.06
Error	408	41	10		
Total	492	47			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl= Grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

De acuerdo al análisis de varianza del tercer muestreo de longitud de raíz (169 DDS), existen diferencias significativas en la longitud de la raíz bajo los diferentes regímenes hídricos, pero no se encuentra diferencias entre las variedades (Tabla 21).

Tabla 21. *Análisis de varianza para el tercer muestreo de longitud de raíz (169 DDS)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	195	6	32	8	< 0.0001
Régimen hídrico	172	3	57	14	< 0.0001
Variedad	22.4	3	7	2	0.15
Error	164	41	F.V.		
Total	359	47			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl=grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

b. Medición de la Biomasa aérea

De las evaluaciones de la medición de la biomasa aérea en tres fechas de muestreo, la variedad Acollina fue la que registró una mayor biomasa aérea, seguida de Hualhuas, Huancayo y finalmente INIA-433. Se registran diferencias significativas entre ellas. Los resultados se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Biomasa promedio aérea (t ha⁻¹)

Variedad	Trat.	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 3	
		Promedio	E.E	Promedio	E.E	Promedio	E.E
Acollina	200 %	0.48	±0.07	3.89	±0.25	8.07	±1.10
	100 %	0.87	±0.22	4.78	±0.75	8.97	±0.49
	50 %	0.81	±0.18	4.19	±0.66	6.13	±0.35
	25 %	0.45	±0.06	3.02	±0.67	5.26	±0.42
Hualhuas	200 %	0.34	±0.12	4.34	±0.72	6.20	±0.06
	100 %	0.77	±0.17	4.38	±0.25	9.21	±0.88
	50 %	0.77	±0.32	4.33	±0.82	7.09	±0.61
	25 %	0.59	±0.05	3.44	±0.35	5.54	±0.35
Huancayo	200 %	0.45	±0.17	4.34	±0.43	5.69	±0.41
	100 %	1.00	±0.18	5.70	±0.57	8.19	±0.73
	50 %	0.71	±0.18	4.90	±0.73	7.85	±0.49
	25 %	0.46	±0.12	2.46	±0.25	5.29	±0.87
INIA-433	200 %	0.48	±0.21	5.26	±1.06	7.31	±1.16
	100 %	0.80	±0.25	5.26	±1.06	7.88	±0.37
	50 %	0.67	±0.17	5.08	±0.66	5.73	±0.25
	25 %	0.59	±0.05	2.86	±0.30	5.04	±0.40

*Trat.=Tratamiento. E.E.=Error Estándar

De acuerdo al análisis de varianza del primer muestreo de biomasa (77 DDS), se acordó que existen diferencias significativas en la evaluación de biomasa aérea seca, se evaluó en el primer muestreo los tratamientos de riego (200%, 100%, 50% y 25%) y las variedades (Acollina, Hualhuas, Huancayo e INIA-433), los datos obtenidos se diferencian (Tabla 23).

Tabla 23. Análisis de varianza para el primer muestreo de biomasa (77 DDS)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1.32	6	0	3	0.021
Régimen hídrico	0.01	3	0	0	0.002
Variedades	1.31	3	0	6	0.99
Error	3.17	41	0		
Total	4.49	47			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl=grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

De acuerdo al análisis de varianza del segundo muestreo (131 DDS), se acordó que existen diferencias significativas, en la evaluación de biomasa aérea seca, se evaluó en el segundo muestreo los tratamientos de riego (200%, 100%, 50% y 25%) y las variedades (Acollina, Hualhuas, Huancayo e INIA-433), los datos obtenidos se diferencian (Tabla 24).

Tabla 24. *Análisis de varianza para el segundo muestreo de biomasa (131 DDS)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	26.4	6	4	4	0.003
Régimen hídrico	0.90	3	0	0	0.0003
Variedad	25.5	3	9	8	0.85
Error	45.3	41	1		
Total	71.7	47			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl=grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

De acuerdo con el análisis de varianza del tercer muestreo (169 DDS), se encontró diferencias significativas en la evaluación de biomasa aérea seca, se evaluó en el tercer muestreo los tratamientos de riego (200%, 100%, 50% y 25%) y las variedades (Acollina, Hualhuas, Huancayo e INIA-433), de las cuales los datos obtenidos se diferencian (Tabla 25).

Tabla 25. *Análisis de varianza para el tercer muestreo de biomasa (169 DDS)*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	80.9	6	13	12	<0.0001
Régimen hídrico	2.77	3	1	1	<0.0001
Variedad	78.2	3	26	24	0.48
Error	45.2	41	1		
Total	126	47			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl=grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

c. Medición de altura de planta

Se realizó las evaluaciones de la altura de la planta, la variedad Hualhuas fue la que registró una mayor altura, seguida de Huancayo, INIA-433 y finalmente Acollina. Sin embargo, no se registraron diferencias significativas entre ellas. Los resultados se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. *Altura máxima promedio (m)*

Variedad	Régimen hídrico	Promedio	E.E.
Acollina	200 %	1.87	±3.35
	100 %	2.08	±2.53
	50 %	1.98	±4.54
	25 %	1.66	±2.93
Hualhuas	200 %	1.94	±4.67
	100 %	2.20	±7.76
	50 %	2.09	±4.15
	25 %	1.87	±4.75
Huancayo	200 %	1.81	±3.19
	100 %	2.19	±1.10
	50 %	2.06	±7.50
	25 %	1.72	±1.46
INIA-433	200 %	1.94	±3.18
	100 %	2.13	±10.71
	50 %	2.01	±6.16
	25 %	1.81	±4.95

*E.E.=Error Estándar

En la Tabla 27, de acuerdo al análisis de varianza para la altura máxima de la planta se encontró diferencias significativas de acuerdo a los cuatro tratamientos de riego (200%, 100%, 50% y 25%) y las variedades (Acollina, Hualhuas, Huancayo e INIA-433), de las cuales los datos obtenidos se diferencian.

Tabla 27. *Análisis de varianza para altura máxima*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0.35	6	0	25	0.001
Régimen hídrico	0.32	3	0	45	0.0001
Variedad	0.03	3	0	5	0.11
Error	0.02	8	0		
Total	0.37	14			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl =Grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

d. Medición del rendimiento

En la Tabla 28, establece que los valores del rendimiento de las cuatro variedades de quinua encontrándose diferencias de acuerdo con las cuatro condiciones de regímenes hídricos (Anexo 3).

Tabla 28. *Rendimiento total promedio (t ha⁻¹)*

Variedad	Régimen hídrico	Promedio	E.E.
Acollina	200 %	2.19	±0.05
	100 %	2.99	±0.06
	50 %	2.57	±0.05
	25 %	1.79	±0.06
Hualhuas	200 %	2.27	±0.05
	100 %	3.09	±0.06
	50 %	2.68	±0.06
	25 %	1.88	±0.06
Huancayo	200 %	1.95	±0.04
	100 %	2.75	±0.04
	50 %	2.34	±0.04
	25 %	1.57	±0.06
INIA-433	200 %	2.54	±0.07
	100 %	3.35	±0.08
	50 %	2.95	±0.07
	25 %	1.89	±0.18

* E.E.=Error Estándar

En la Tabla 29, de acuerdo al análisis de varianza para el rendimiento total, se encontró que existen diferencias significativas de acuerdo a los cuatro tratamientos de riego (200%, 100%, 50% y 25%) y las variedades (Acollina, Hualhuas, Huancayo e INIA-433), los datos obtenidos se diferencian (Anexo 4).

Tabla 29. *Análisis de varianza para el rendimiento total*

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4.08	6	1	149	<0.0001
Régimen hídrico	3.51	3	1	256	<0.0001
Variedad	0.57	3	0	42	<0.0001
Error	0.04	9	0		
Total	4.12	15			

*F.V.= Fuente de variación. SC.=Suma de Cuadrado. gl=Grados de libertad. CM=Media Cuadrática. F=valor de Fisher, p-valor significancia

5.2. Calibración y validación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a través de diferentes regímenes hídricos para el modelamiento a futuros escenarios de cambio climático.

Como resultado se tiene que, de las variedades de quinua evaluadas, la que tuvo una cobertura máxima de dosel fue la variedad Acollina, que llegó a un 80 % y la variedad INIA- 433 que tuvo una cobertura de 63 %. La Tabla 30 presenta el cuadro de los parámetros del cultivo calibrado en el modelo AquaCrop para las cuatro variedades.

En la calibración realizada, se consideró los cuatro niveles de riego por variedad, por ello se ha utilizado inicialmente la opción “Limited set” para hacer la calibración en condiciones de riego potencial (200 %). Luego de ello, se utilizó la opción de “Full set”, para tener todos los parámetros del cultivo que plantean las respuestas al estrés en las tres condiciones de riego adicionales (100 %, 50 %, 25 %), especialmente las funciones relacionadas con el estrés hídrico (“water” dentro del Aquacrop), considerando las respuestas posibles que pueda hacer la planta como resultado del estrés hídrico, y que dentro del modelo considera la expansión de la cobertura foliar (Canopy expansion), cierre de estomas (Stomatal closure) y la senescencia precoz de la cobertura (Early canopy senescense).

La cobertura máxima de dosel fue alcanzada en la etapa de floración, luego se reduce para todas las variedades de quinua. En el modelo realizado, fue calibrado a un valor de 1.1 para todas las variedades siendo menor que la investigación desarrollada por Heng *et al.* (2009) con un valor (Kcb medio) = 1.05.

Tabla 30. *Parámetros de las variedades de quinua para la calibración*

Descripción	Unidad	Evaluación de calibración			
		Huancayo	Hualhuas	Acollina	INIA- 433
Cobertura de dosel al promedio de las plántulas al 90% de emergencia (CCo)	% día ⁻¹	0.28	0.28	0.28	0.28
Coeficiente del crecimiento de dosel (CGC)	%	10.20	7.40	8.70	11.70
Coeficiente de disminución del dosel (CDC)	%	9.80	10.00	10.00	10.10
Máxima cobertura del dosel (CC_x)	%	65.00	80.00	68.00	63.00
Índice de referencia de cosecha (Hlo)	%	34.00	34.00	32.00	38,00
Productividad de agua normalizada por CO₂ y ETo (WP*)	G m ²	10.5	10.50	10.50	10.50
Umbral superior, decaimiento de humedad del suelo para extensión del dosel (p upper)	-	0.00	0.20	0.20	0.00
Umbral inferior, decaimiento de humedad del suelo para extensión del dosel (p lower)	-	0.30	0.55	0.55	0.35
Forma de la curva de estrés, decaimiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)	-	5.80	6.00	4.00	4.00
Umbral superior, decaimiento de humedad del suelo para cierre de estomas (p upper)	-	0.55	0.45	0.45	0.25
Forma de la curva de estrés, decaimiento de humedad del suelo para cierre de estomas (S)	.	1.00	3.00	1.50	4.50
Umbral superior de decaimiento de humedad del suelo para senescencia temprana (p upper)	.	0.45	0.45	0.55	0.35
Forma de la curva de estrés de decaimiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)	.	4.00	4.00	3.00	3.00
Coeficiente de transpiración basal de la temperatura media del cultivo (K_{cb} medio)	-	1.10	1.10	1.10	1.10

a. Simulación de la cobertura del dosel (CC)

En la tabla 31 podemos observar los resultados donde indican que las predicciones del rendimiento de grano del modelo fueron:

Tabla 31. *Indicadores estadísticos para resultados de Cobertura de Dosel (Observado vs Simulado)*

Variedad	Huancayo		Hualhuas		Acollina		INIA-433	
Indicadores	R ²	RMSE (%)	R ²	RMSE (%)	R ²	RMSE (%)	R ²	RMSE (%)
Validación	0.85	87.5	0.93	54.9	0.97	37.30	0.92	26.5

* R²=coeficiente de determinación RMSE=Error medio cuadrático

Para el nivel de significancia para el coeficiente de determinación siendo 1 el óptimo, en todos los experimentos la correlación es positiva, siendo “R²” en el cultivo de Acollina de 0.92, Acollina de 0.97, Hualhuas de 0.93 y INIA- 433 de 0.85. Según la tabla de Molnar (2011), con una buena a una excelente correlación en los resultados de los coeficientes, indica que la simulación explicó de manera eficaz la variabilidad de los datos de cobertura vegetal, los datos fueron calibrados con el primer tratamiento (Tabla 30).

El ajuste de los valores de la Quinoa INIA-433 en la Figura 14 a., se observa una variación temporal a lo largo del periodo experimentado (setiembre 2018 a mayo 2019), no reporta una sobreestimación a lo largo del período vegetativo; sin embargo, cada variedad muestra una curva diferente, entre los días 53 y 60 empieza a aumentar la cobertura. La máxima cobertura se ve entre los días 120 y 140, en la etapa de grano lecho y pastoso.

En la Figura 14, se muestra el valor de los datos simulados con los datos observados de la cobertura vegetal, para cada una de las variedades de quinua (a, b, c, y d), mostrándose la variabilidad temporal a lo difuso del periodo del experimento (setiembre 2018 a mayo 2019), el eje “y” es el porcentaje de la cobertura de dosel que se desarrollará a lo largo del periodo fenológico siendo los DDS representados en el eje “x”, donde la curva llega a un porcentaje máximo en las etapas de pre-floración y se mantiene hasta que llega a la etapa de maduración del grano debido a que esta etapa las hojas de la quinua tienden a caerse.

De los resultados de la simulación en las variedades de quinua, se obtuvo un mayor desarrollo en las variedades de quinua INIA-433 y Acollina, hasta 150 días después de la siembra y 152 días después de la siembra, respectivamente. Una vez que ha llegado a su nivel máximo, a diferencia de las variedades Huancayo y INIA-433.

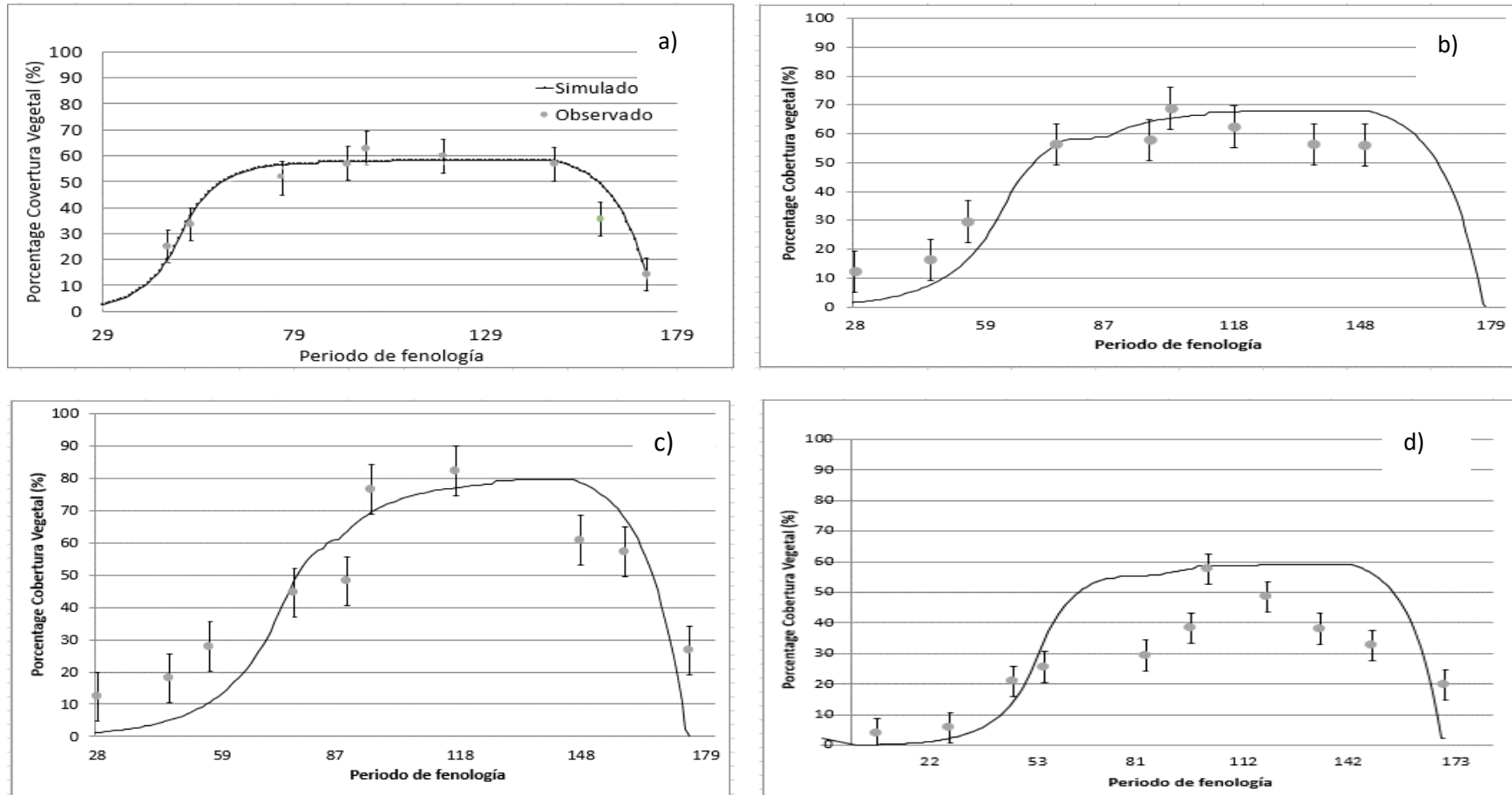


Figura 14. Validación de la Cobertura vegetal (%), observado vs. simulado. a) INIA-433, b) Acollina, c) Hualhuas y d) Huancayo, periodo de fenología=Días después de la siembra.

b. Simulación de la Biomasa Aérea Seca

Como resultado de la biomasa aérea seca, en el muestreo realizado se obtuvieron 4 plantas por cada miniparcela (haciendo un total de 192 muestras de todos los bloques, en las 11 fechas), se obtuvieron valores simulados con significancia positiva en las cuatro variedades, donde el coeficiente de determinación varió entre 0.93 a 0.97 (Tabla 32) (Anexo 5).

Tabla 32. *Indicadores estadísticos para resultados de Biomasa Aérea Seca (Simulado vs Observado)*

Variedad	Huancayo			Hualhuas			Acollina			INIA-433		
	R ²	NSE	RRME (%)	R ²	NSE	RRME (%)	R ²	NSE	RRME (%)	R ²	NSE	RRME (%)
Validación	0.94	0.92	19.9	0.97	0.96	13.9	0.96	0.96	13.9	0.93	0.91	20.3

* R²=coeficiente de determinación. RMSE=Error medio cuadrático. NSE= Nash-Sutcliffe

En la Figura 15, señala una correlación entre lo simulado y observado con una positiva significativa en todos los tratamientos, donde la variedad de quinua Huancayo obtuvo el valor del coeficiente de determinación de 0.97, con una mejor aproximación entre los valores observados y simulados. En tanto, los valores de las eficiencias de Nash-Sutcliffe varían entre 0.92 y 0.96, y según los resultados, con valores de ajuste excelente (Molnar, 2011), explicando adecuadamente la eficiencia de la simulación en la información de biomasa aérea seca observada según la evaluación de los datos medidos.

Se realizó el ajuste al valor medio de los datos simulados con los datos observados de la biomasa seca aérea, para cada una de las variedades de quinua, resultando una variación temporal a lo largo del periodo experimental (setiembre 2018 – mayo 2019).

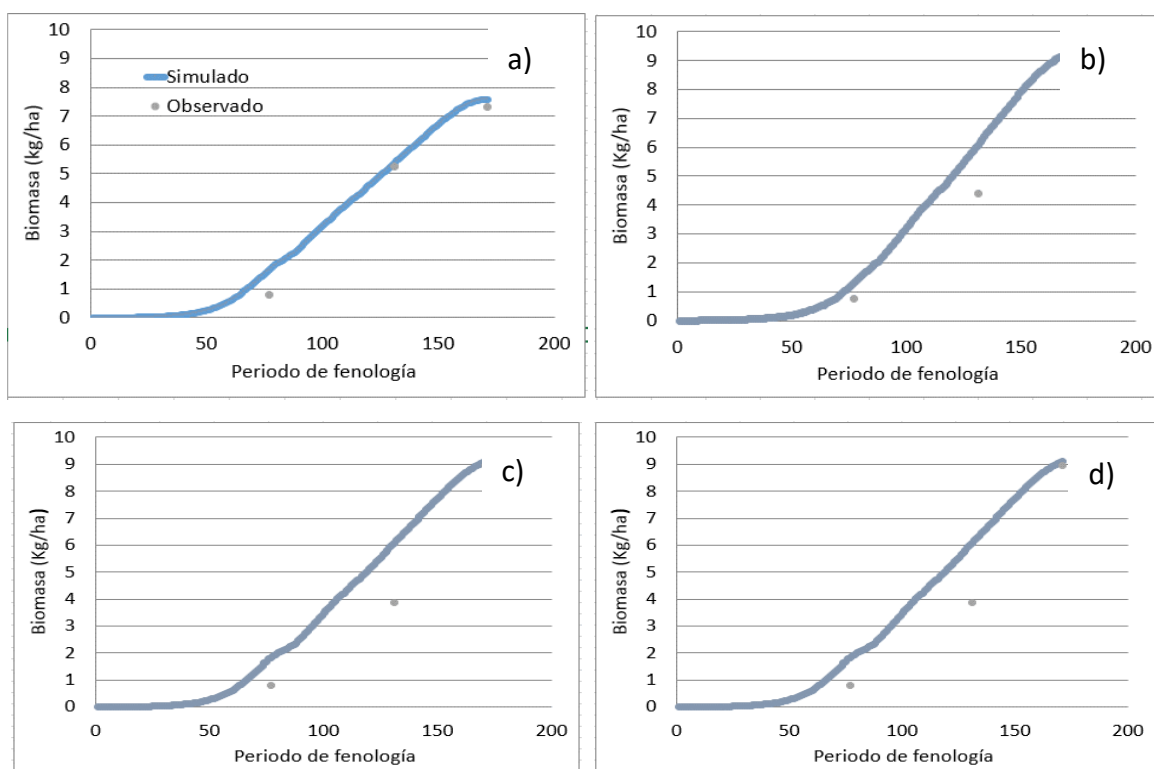


Figura 15. Ajuste de la Biomasa Aérea Seca (kg ha^{-1}), observado vs. Simulado. a) INIA-433, b) Hualhuas, c) Huancayo y d) Acollina.

En las Figuras 16, 17, 18 y 19, se analizó la precisión del modelo para simular la biomasa para cada una de las variedades. Se encontró que la confiabilidad tanto para las cuatro variedades fue entre 0.92 y 0.96 a la hora de medir el estrés hídrico por sequía. Los resultados presentados muestran que el modelo simula adecuadamente la cantidad de biomasa, dependiendo de la variedad de quinua. Las Figuras 16, 17, 18 y 19, se analizó la precisión del modelo para simular la biomasa para cada una de las variedades. Se encontró que la confiabilidad tanto para las cuatro variedades fue entre 0.92 y 0.96 a la hora de medir el estrés hídrico por sequía. Los resultados presentados muestran que el modelo simula adecuadamente la cantidad de biomasa, dependiendo de la variedad de quinua.

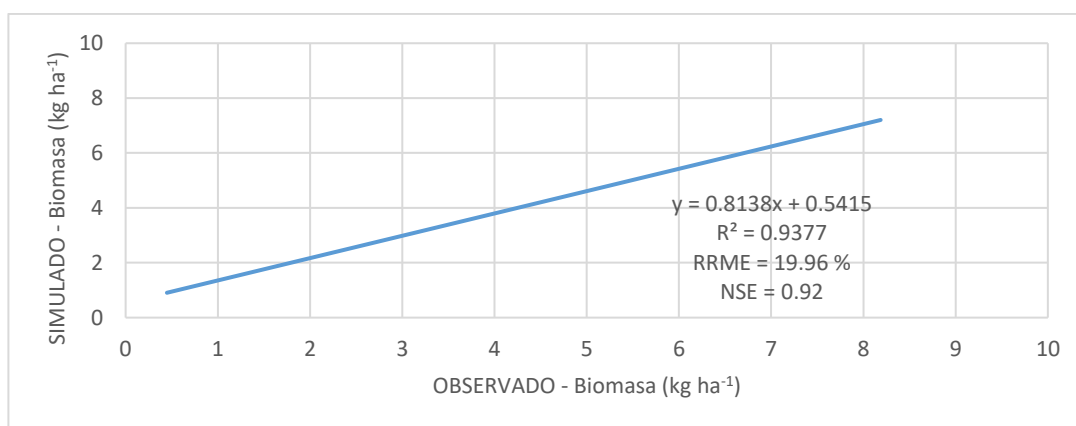


Figura 16. Ajuste de la Biomasa (kg ha⁻¹) Observado vs. Simulado para Quinoa Huancayo

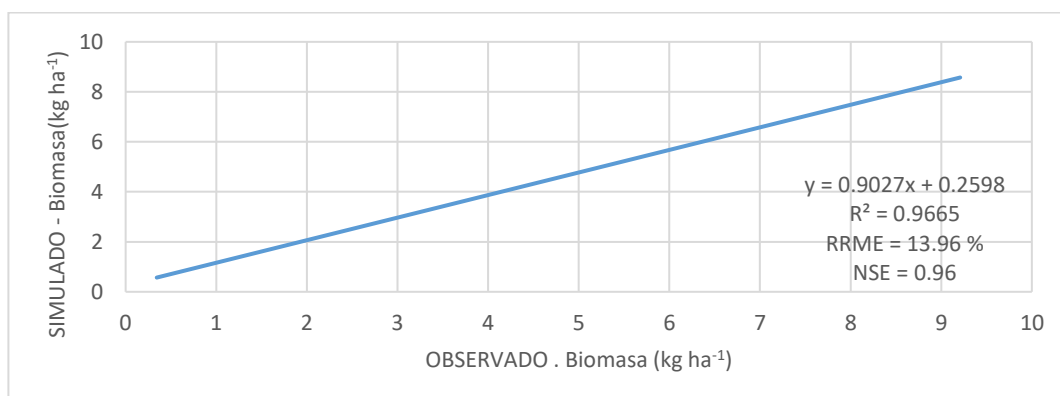


Figura 17. Ajuste de la Biomasa (kg ha⁻¹) Observado vs. Simulado para Quinoa Hualhuas

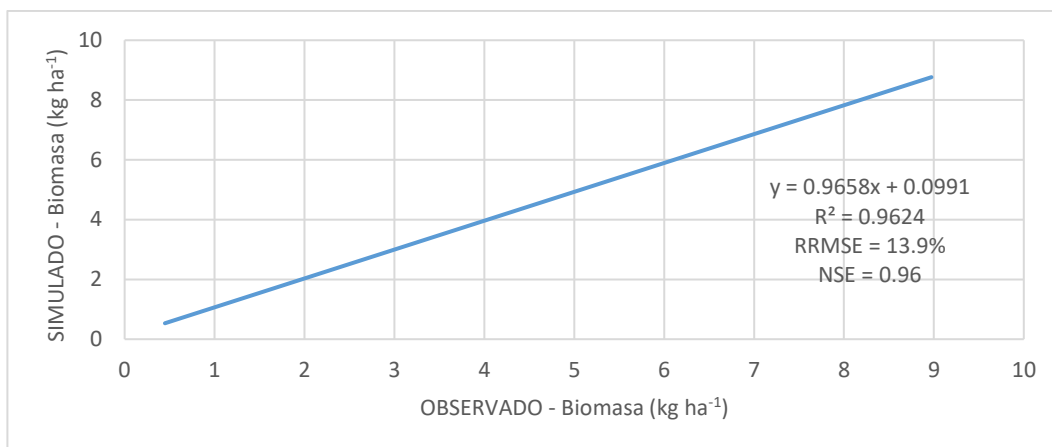


Figura 18. Ajuste de la Biomasa (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Acollina

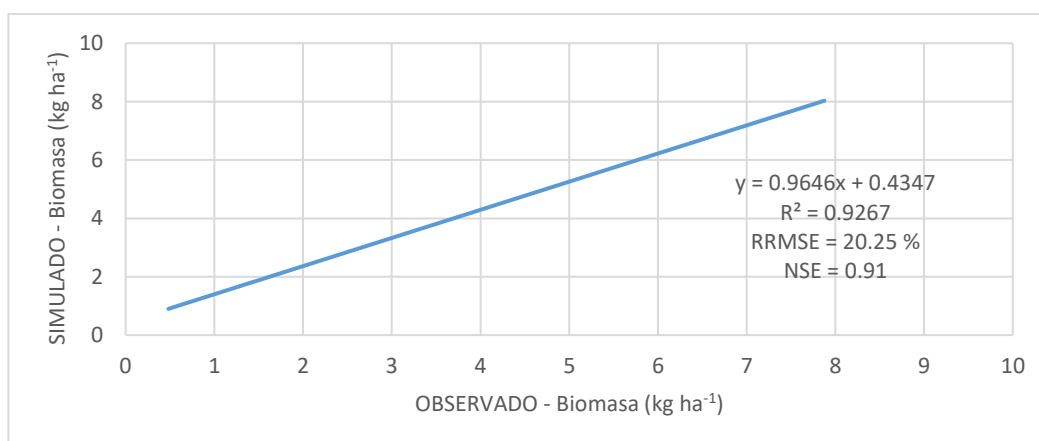


Figura 19. Ajuste de la Biomasa (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa INIA-433

c. Simulación del rendimiento

Como resultado de evaluar el rendimiento del grano seco por hectárea (datos de grano por metro cuadrado, el peso seco de 1000 granos y el peso de granos por panoja), se observa en la Tabla 33, que la confiabilidad de la simulación es adecuada con valores del coeficiente de correlación de determinación que varían entre 0.57 a 0.93.

Tabla 33. *Indicadores estadísticos de los cuatro cultivos para la simulación del rendimiento*

Variedad	Huancayo			Hualhuas			Acollina			INIA-433		
	R ²	NSE	RRME (%)	R ²	NSE	RRME (%)	R ²	NSE	RRME (%)	R ²	NSE	RRME (%)
Validación	0.75	0.68	21.1	0.57	0.46	13.3	0.65	0.69	10.3	0.93	0.57	13.2

* R²=coeficiente de determinación. RMSE=Error medio cuadrático

En la Figura 20, 21, 22 y 23, el coeficiente de determinación (R²) es de 0.75 para la Quinoa Huancayo, 0.57 para la Quinoa Hualhuas 0.57 para la Quinoa Acollina y 0.93 para la Quinoa INIA-433, respectivamente. La precisión del modelo para simular el rendimiento en todas las variedades, sostiene alta confiabilidad a la hora de medir el estrés hídrico por sequía en el modelo. Los resultados presentados muestran que el modelo simula adecuadamente el rendimiento, dependiendo de la variedad de quinoa.

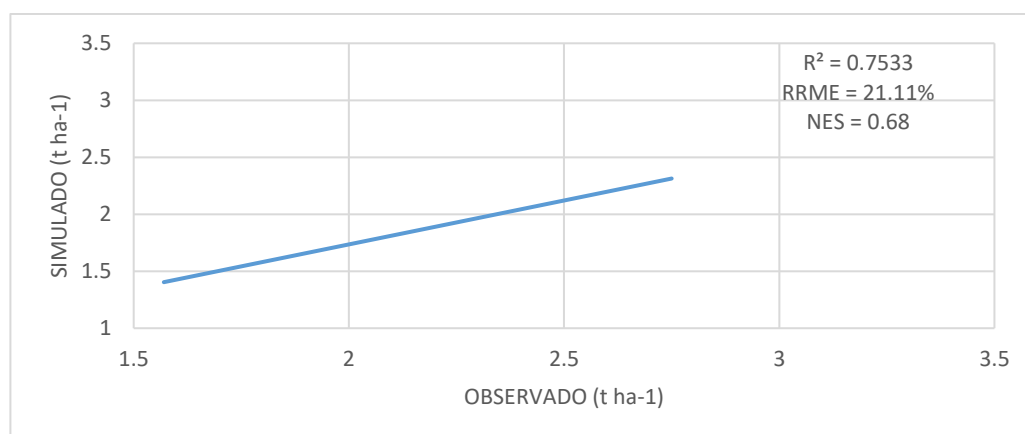


Figura 20. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Huancayo

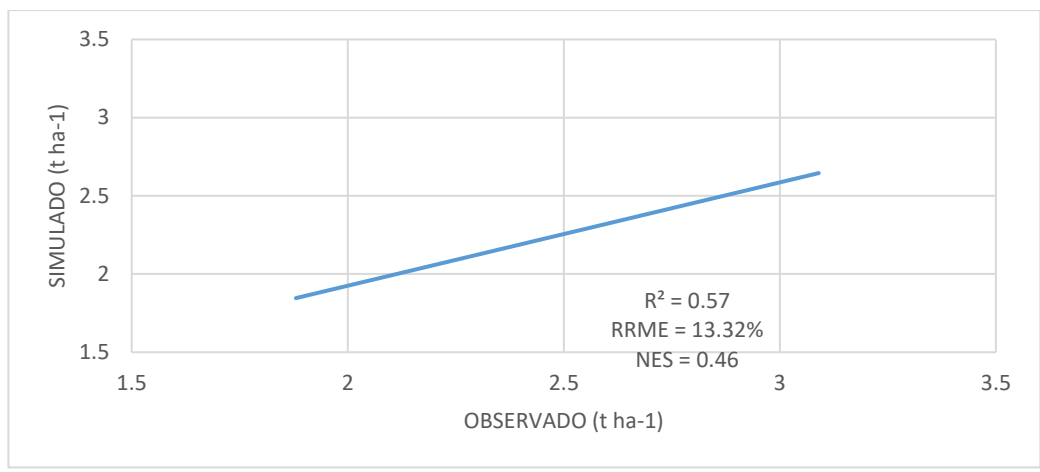


Figura 21. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Hualhuas

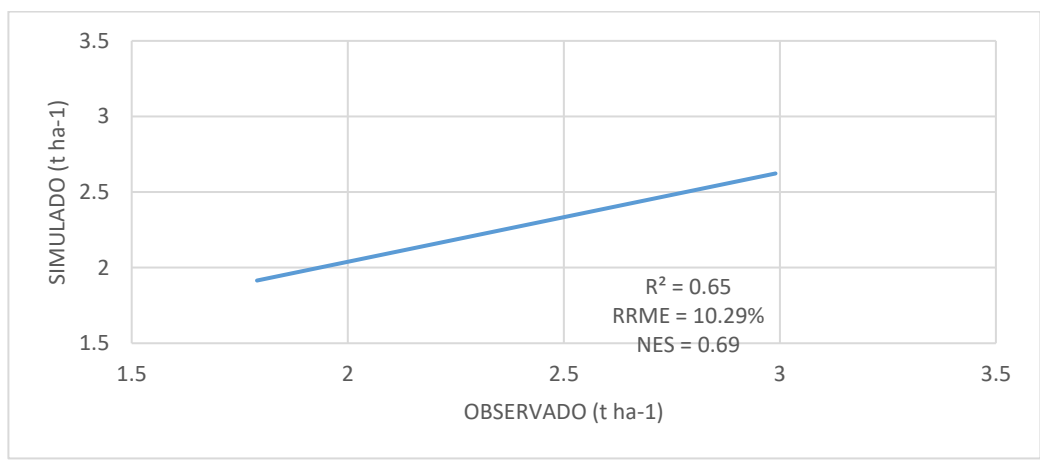


Figura 22. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa Acollina

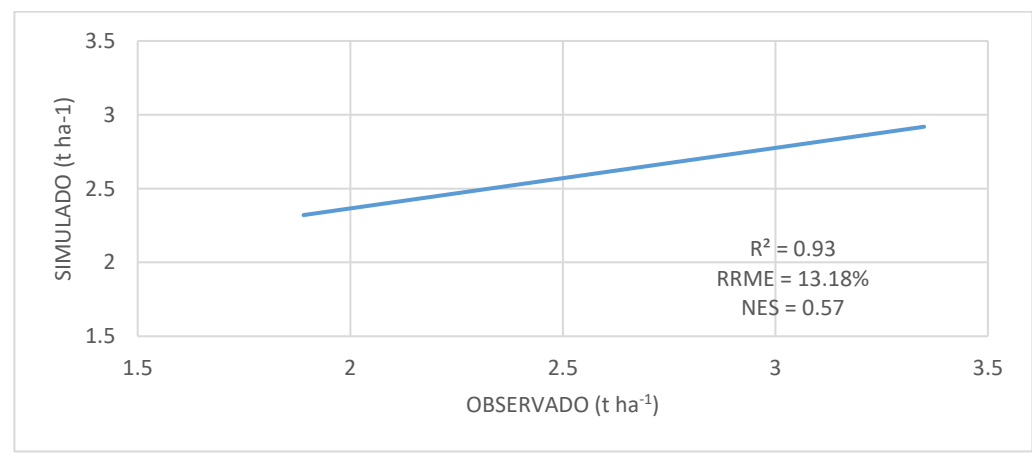


Figura 23. Ajuste de la Rendimiento (kg ha-1) Observado vs. Simulado para Quinoa INIA-433

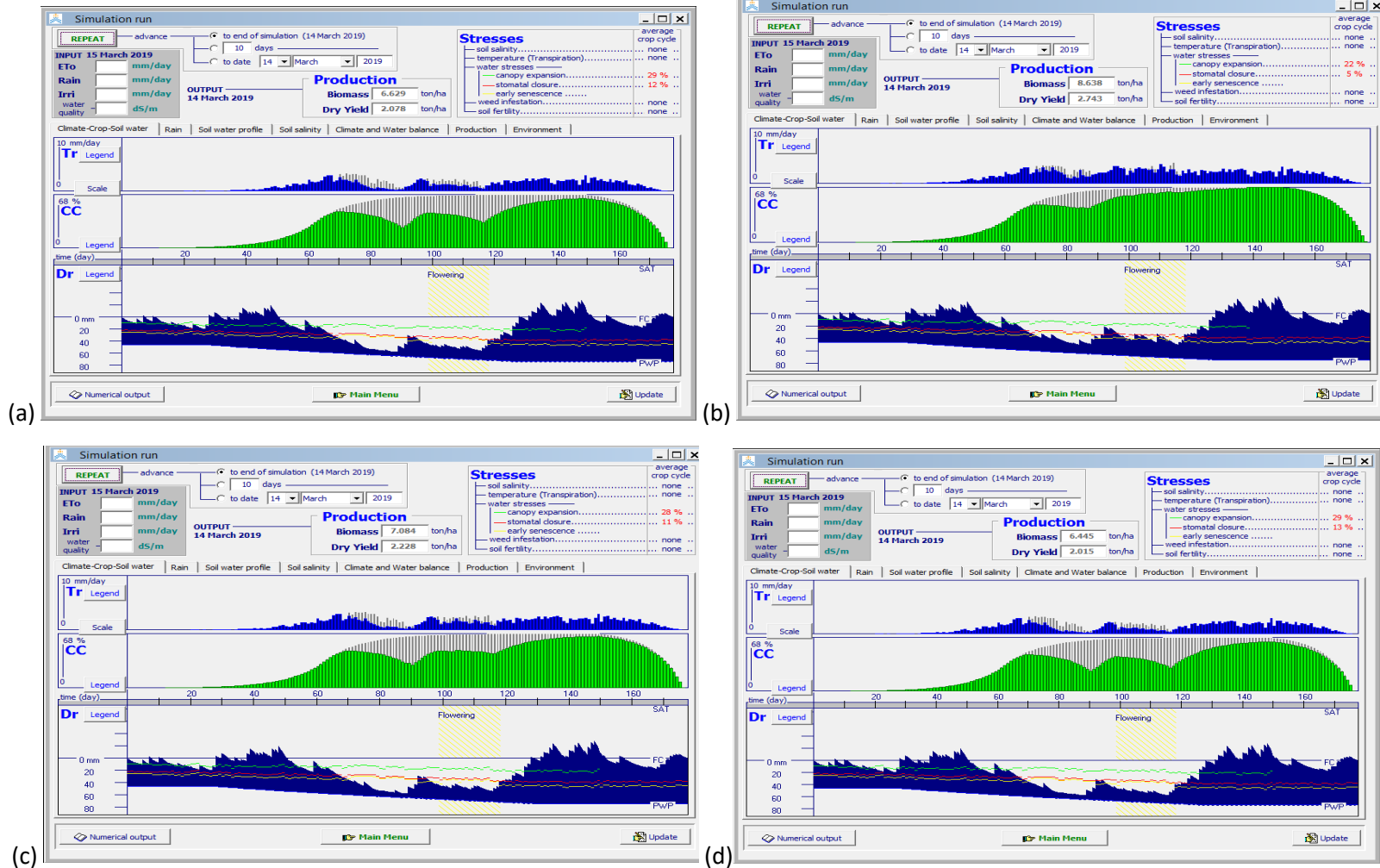


Figura 24. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa Acollina. a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%

En la Figura 24, se presenta la salida del modelo AquaCrop para la variedad de Quinoa Acollina. En la figura 24a, representa al tratamiento 1 (200 %) en el cual se observa una reducción en el desarrollo de la cobertura de dosel, a excepción de los 70 a 90 días después de la siembra, donde se produjo una reducción debido al estrés hídrico. No obstante, el suelo estuvo cercano a la capacidad de campo durante casi todo el ciclo del cultivo. En las figuras b, c y d, los tratamientos 2, 3 y 4 presentan una reducción en la cobertura vegetal, para la etapa de pre floración y floración entre los 90 a 120 días después de la siembra, además de un cierre de estomas entre los 11 y 13 %. El contenido de agua en el suelo entre estos días fue menor, por ello el cultivo sufrió estrés hídrico notándose en los resultados del rendimiento, comparando el tratamiento 1 vs el tratamiento 4, este último se redujo un 26.5 %.

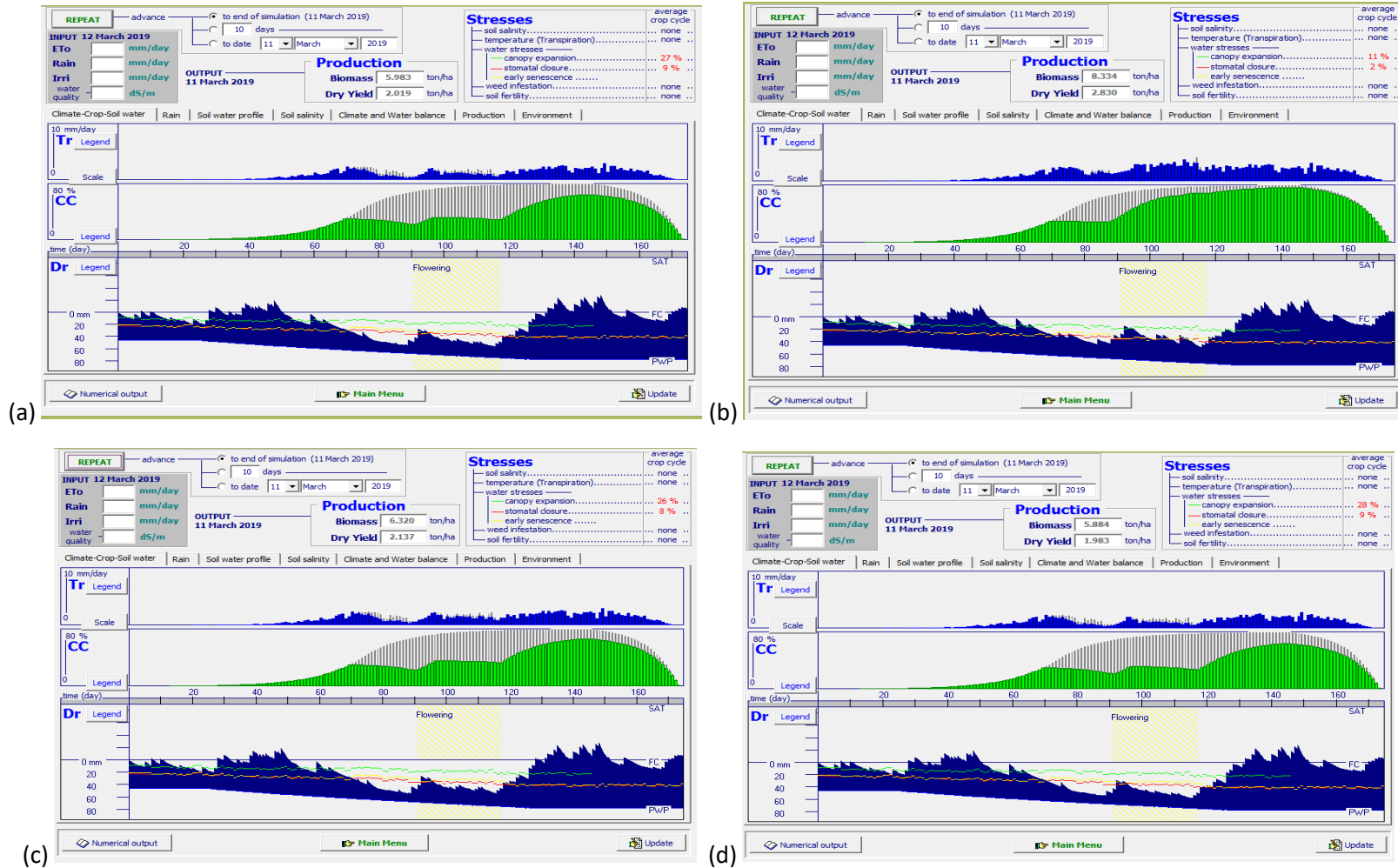


Figura 25. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa Hualhuas. a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%

En la Figura 25, se presenta la salida del modelo AquaCrop para la variedad de Quinoa Hualhuas. En la figura 25a, en el tratamiento 1 (200 %) no observa una reducción en el desarrollo de la cobertura vegetal, a excepción entre los 70 a 90 días después de la siembra. El suelo estuvo cercano a capacidad de campo durante casi todo el ciclo de cultivo tal como se muestra en el gráfico, no encontrándose una disminución de la cobertura vegetal o del cierre estomático. En las figuras b, c y d, los tratamientos 2, 3 y 4 presentan una reducción en la cobertura vegetal, tanto en la etapa de pre floración y floración entre los 90 a 120 días después de la siembra. A Esta reducción se mantuvo hasta los 160 días después de la siembra, perjudicando notablemente la cobertura vegetal, además de un cierre de estomas entre los 8 y 9 %. El contenido de agua en el suelo entre estos días fue menor, por ello el cultivo sufrió estrés hídrico notándose en los resultados del rendimiento, comparado con el tratamiento 1 vs el tratamiento 4, este último se redujo un 28 %.

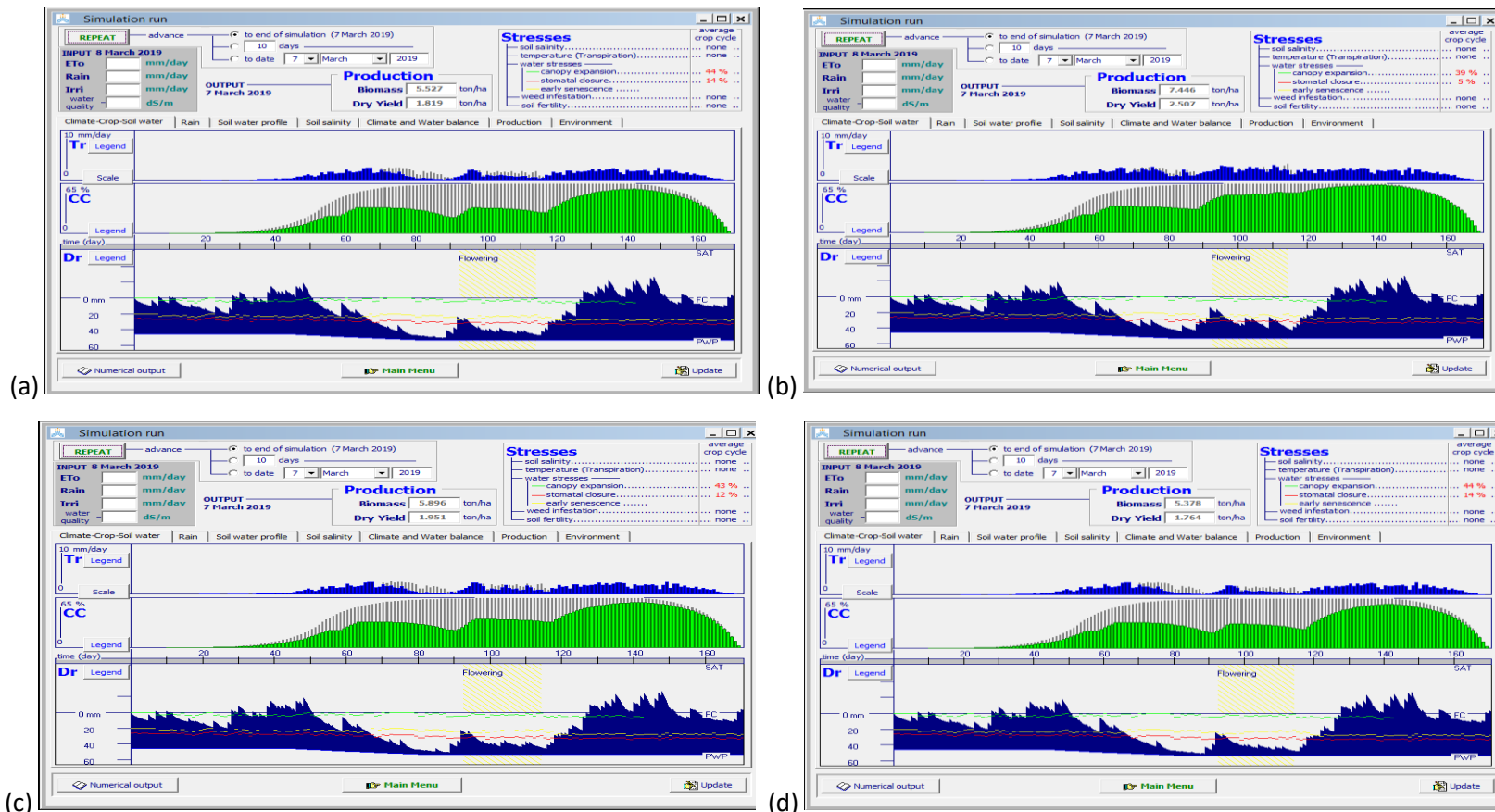


Figura 26. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa Huancayo. a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%

En la Figura 26, se presenta la salida del modelo AquaCrop para la variedad de Quinoa Huancayo. La figura 26a, en el tratamiento 1 (200 %) se observa una reducción en el desarrollo de la cobertura vegetal, en la primera etapa del desarrollo fisiológico donde se redujo el 39 %, presentando estrés hídrico. No obstante, el suelo no estuvo cercano a la capacidad de campo en casi todo el ciclo de cultivo, encontrándose una disminución de la cobertura vegetal o del cierre estomático de 5 %. Las figuras 30 b, c y d, los tratamientos 2, 3 y 4 presentan una reducción en la cobertura vegetal, para la etapa de pre floración y floración entre los 90 a 120 días después de la siembra y se mantuvo hasta los 150 días después de la siembra perjudicando notablemente la cobertura vegetal, además de un cierre de estomas entre los 12 y 14 %. El contenido de agua en el suelo entre estos días fue menor, por ello el cultivo sufrió estrés hídrico notándose en los resultados del rendimiento, comparando el tratamiento 1 vs el tratamiento 4, este se redujo un 44%. Entre las cuatro variedades de cultivo, la variedad de Quinoa Huancayo es la que sufrió un mayor estrés notándose en los resultados del rendimiento.

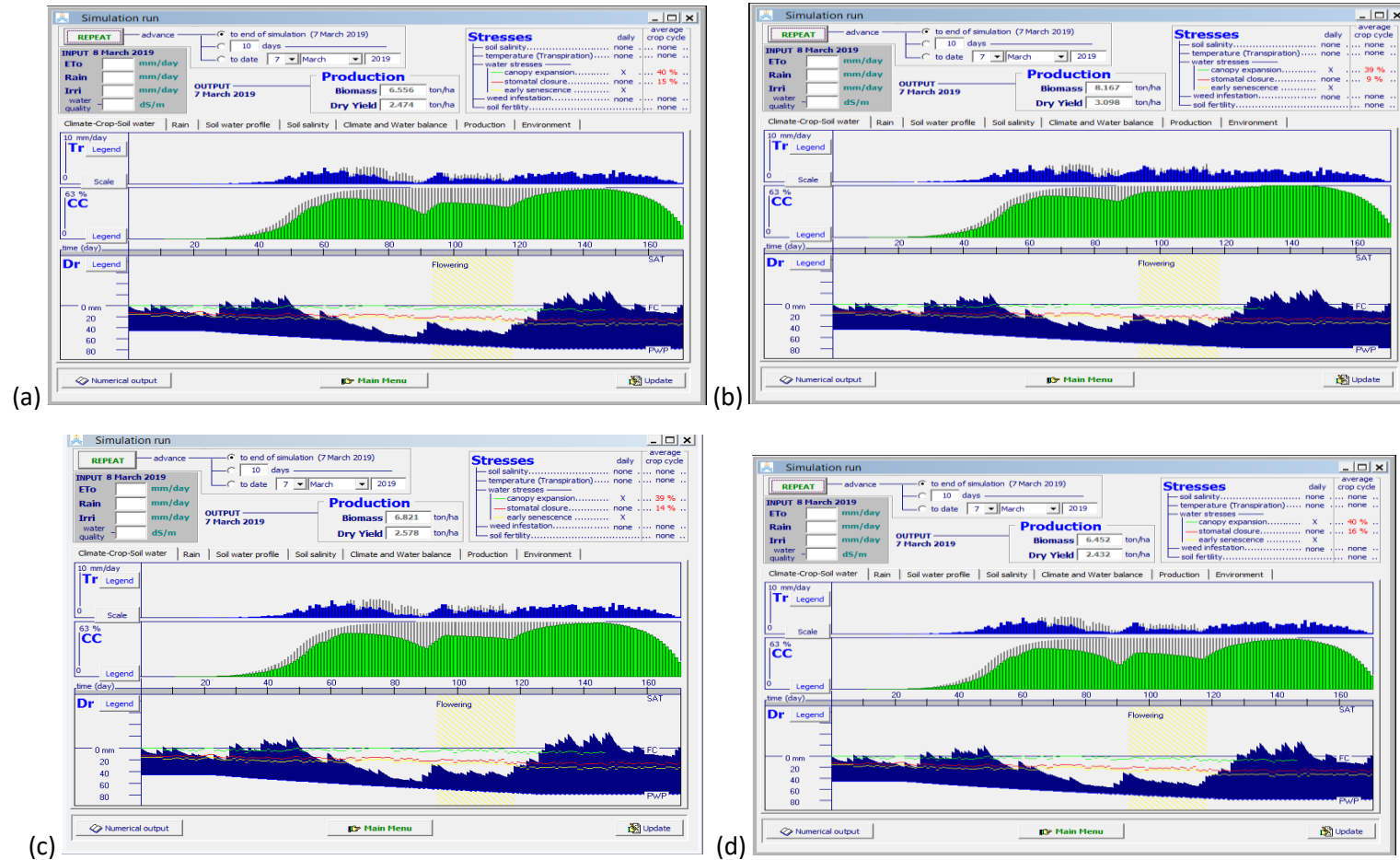


Figura 27. Salida de AquaCrop para el Rendimiento en la variedad de Quinoa INIA-433. a) 200%, b) 100%, c) 50% y d) 25%

En la Figura 27, se presenta la salida del modelo AquaCrop para la variedad de Quinoa INIA-433, en el tratamiento 1 (200 %) se observa una reducción en el desarrollo de la cobertura vegetal, entre los 70 y 90 días después de la siembra, donde se produjo una reducción del 39 %, debido estrés hídrico. No obstante, el suelo no estuvo cercano a la capacidad de campo durante casi todo el ciclo de cultivo, encontrándose una disminución de la cobertura vegetal o del cierre estomático de 9 %. Los tratamientos 2, 3 y 4 presentan una reducción en la cobertura vegetal, para la etapa de pre floración y floración entre los 90 a 120 días después de la siembra, y se mantuvo hasta los 140 días después de la siembra donde se produce una reducción notable de la cobertura vegetal, además de un cierre de estomas entre los 14 y 16 %, el contenido de agua en el suelo entre estos días fue mejor, comparando el tratamiento 1 vs el tratamiento 4, este último se redujo un 40 %. Esta variedad se mantuvo una mejor adaptación, a pesar del estrés hídrico presentado, su rendimiento fue mayor a los demás cultivos 200%: 2.474 t ha⁻¹, 100%: 3.098 t ha⁻¹, 50%: 2.578 t ha⁻¹ y 25%: 2.432 t ha⁻¹, en las etapas de floración y llenado de grano no presentó estrés hídrico es por ello mantuvo un mayor rendimiento (Tabla 34).

Tabla 34. *Rendimiento de las variedades de quinua de la campaña 2018 – 2019*

Variedades	Tratamiento (t ha ⁻¹)			
	200 %	100 %	50 %	25 %
Huancayo	1.19	2.51	1.95	1.76
Hualhuas	2.02	2.83	2.14	1.98
Acollina	2.08	2.74	2.23	2.02
INIA-433	2.47	3.09	2.58	2.43

En la campaña 2018, el cultivo con mayor rendimiento fue la variedad INIA-433 al igual que Hualhuas para el tratamiento 1 (200 %). Tanto para el segundo tratamiento (100%), tercer tratamiento (50 %) y el cuarto tratamiento (25 %) INIA-433 lidero, seguido de la variedad Acollina. En los cuatro tratamientos el cultivo Huancayo tuvo menor rendimiento (Tabla 34).

5.3. Evaluación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a futuros escenarios de Cambio Climático

a. Efectos del Cambio climático en el rendimiento del periodo 2030

De la información proporcionada por SENAMHI sobre los escenarios climáticos, se registra un incremento en la temperatura, similar a lo encontrado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC (2013), para el año 2030 el escenario climático que registra un aumento de 1.60 °C. El evento de helada en la fase experimental entre los días 18 y 21 de diciembre es comparado con las bajas temperaturas de los escenarios climáticos, llega a disminuir la temperatura mínima de 1.4 0°C.

En el Tabla 35, se utilizó la prueba t, donde no se muestran diferencias significativas entre los datos de temperatura y precipitación de los escenarios climáticos (2030-2031) versus los datos de la estación Santa Ana (en el 2017-2018).

Tabla 35. Probabilidad de la prueba t para el análisis comparativo de la precipitación entre los escenarios climáticos vs Santa Ana

Escenario	CANESM2-rcp4.5	CANESM2-rcp8.5	CNRM-CM5-rcp4.5	CNRM-CM5-rcp8.5	MPI-ESM-MR-rcp4.5	MPI-ESM-MR-rcp8.5	Santa-Ana-2018
Lluvia acumulada	628	518	57	579	558	579	637
Prueba t	0.93	0.19	0.52	0.54	0.43	0.54	

El comportamiento de la precipitación durante el periodo fenológico evaluado, de acuerdo con dicha prueba estadística, es similar entre los seis escenarios climáticos, con respecto a la estación de referencia (Figura 28).

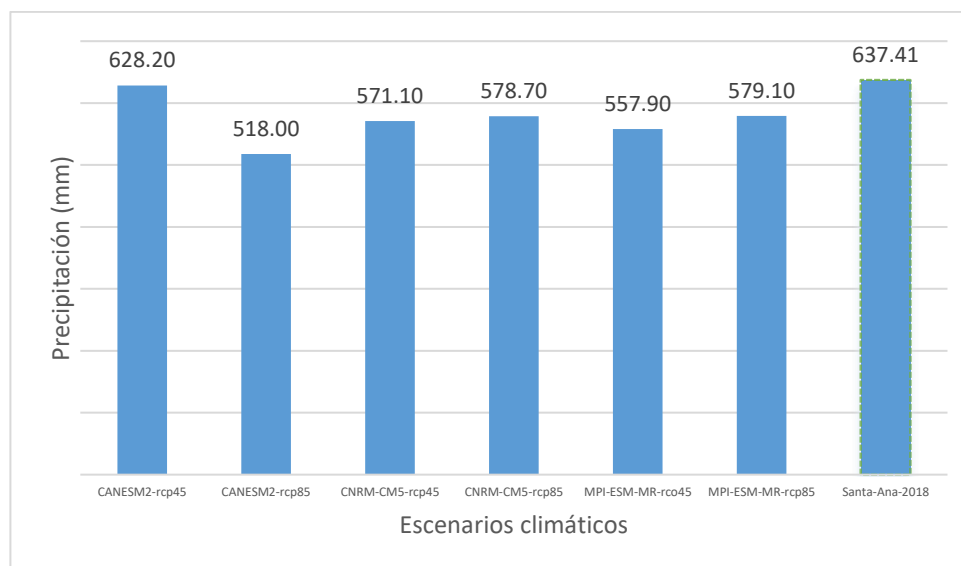


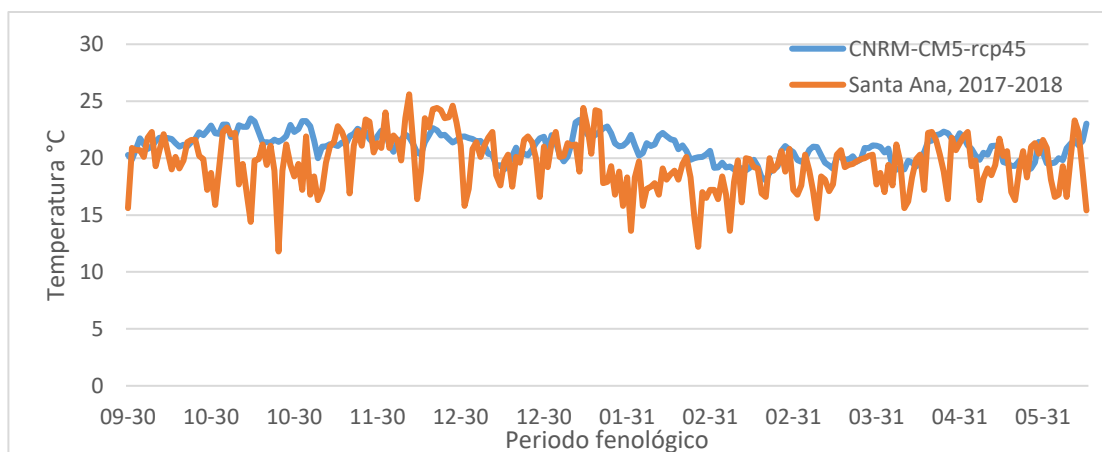
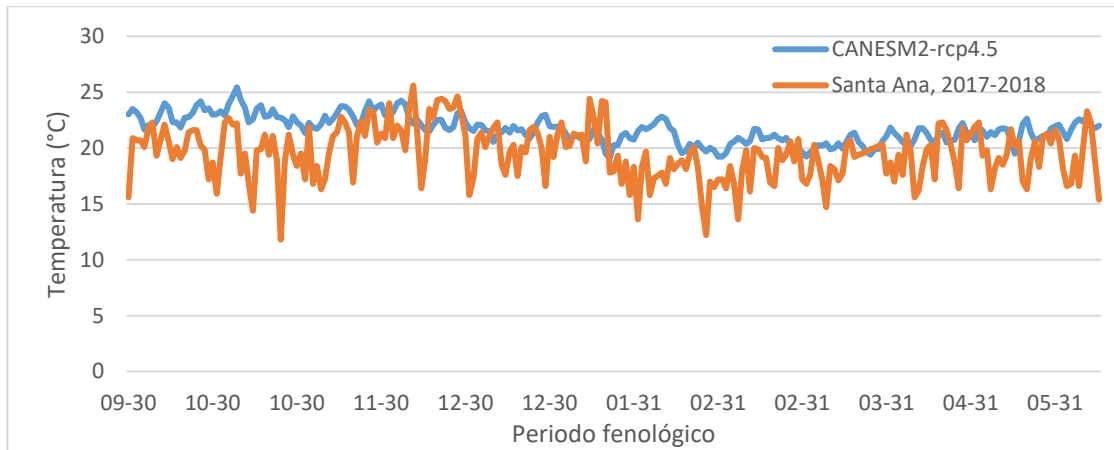
Figura 28. Precipitación (mm) durante el periodo de fenología Santa Ana 2018 vs los Escenarios Climáticos 2030

En el Tabla 36, se utilizó la prueba t, de comparación de medias, donde se muestran diferencias significativas entre los datos de temperatura y precipitación de los escenarios climáticos (2030-2031) versus los datos de la estación Santa Ana (en el 2017-2018).

Tabla 36. Probabilidad de la prueba t para el análisis comparativo de la temperatura máxima entre los escenarios climáticos vs Santa Ana

Escenario	CANESM2-rcp45	CANESM2-rcp85	CNRM-CM5-rcp45	CNRM-CM5-rcp85	MPI-ESM-MR-rcp45	MPI-ESM-MR-rcp85
Prueba t	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

El comportamiento de la temperatura máxima durante el periodo fenológico evaluado, de acuerdo con dicha prueba estadística, es diferente entre los seis escenarios climáticos, con respecto a la estación de referencia (Figura 29 y 30).



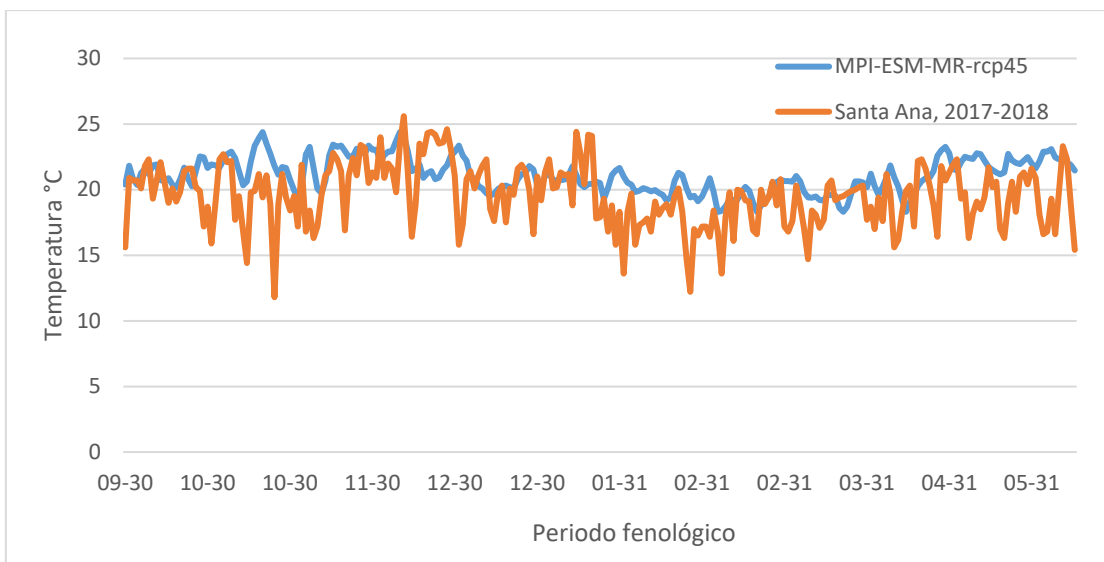
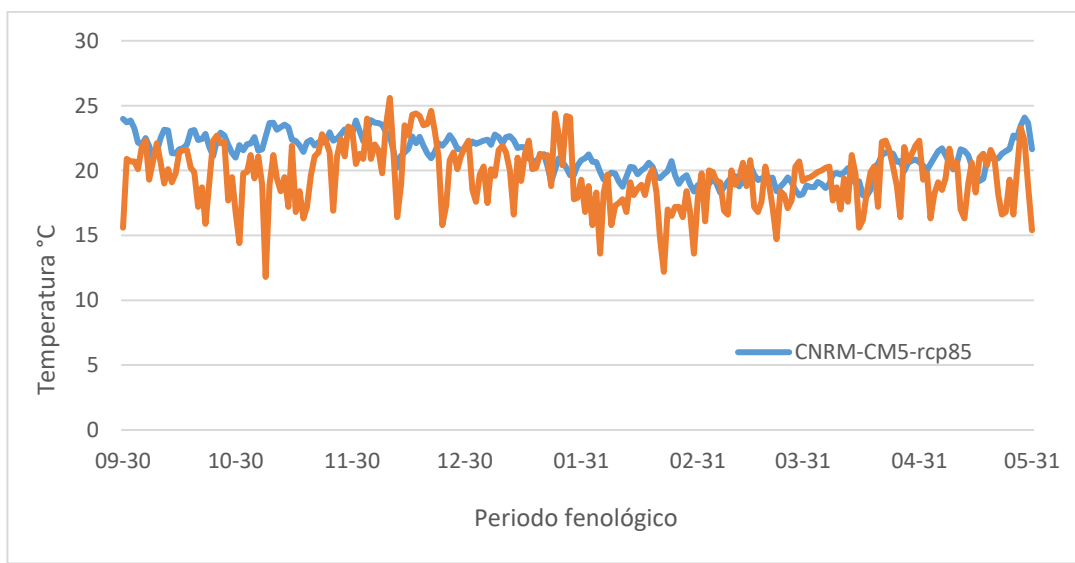
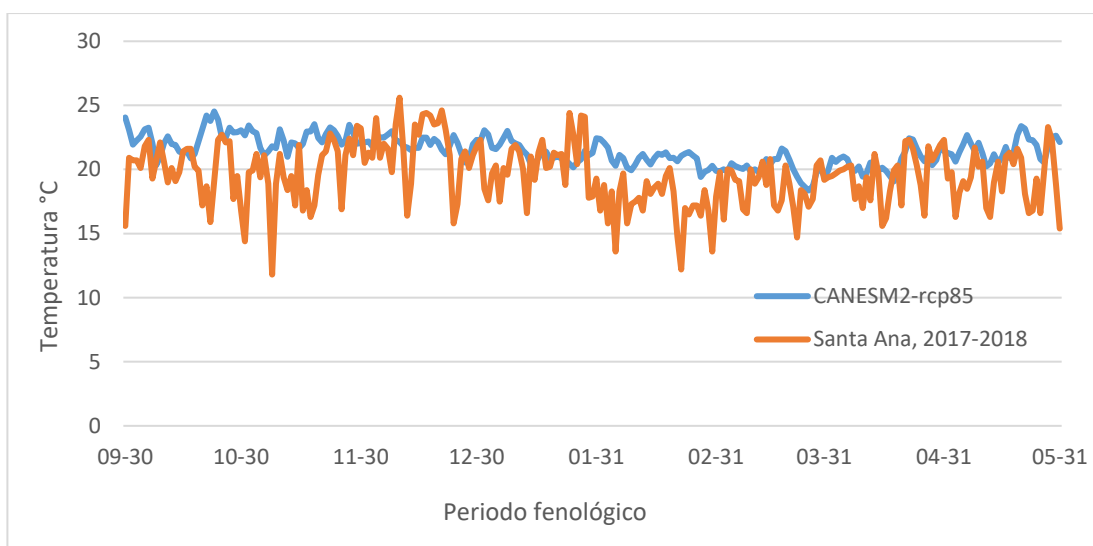


Figura 29. Temperatura máxima durante el periodo fenológico Santa Ana 2018 vs el escenario climático RCP4.5 2030 para el 2030



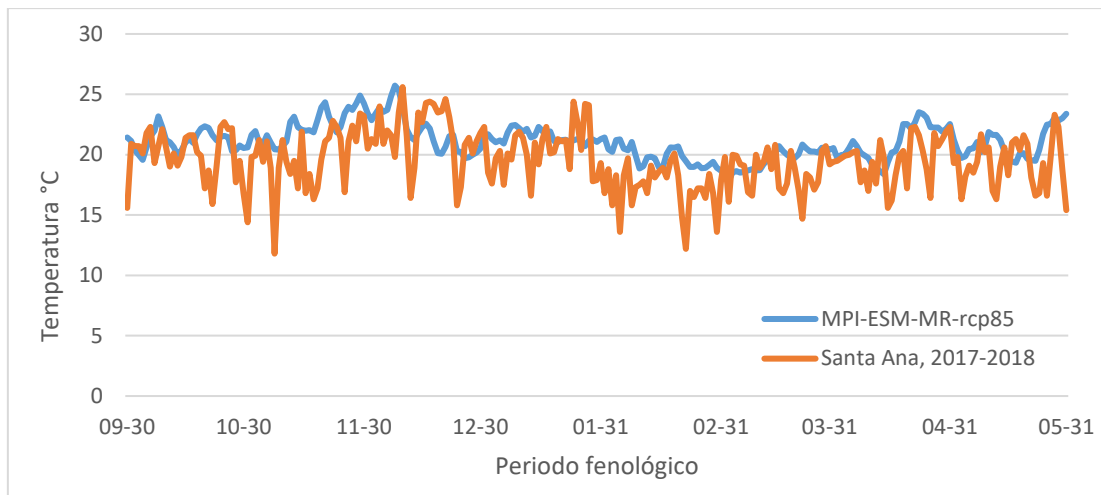


Figura 30. Temperatura máxima durante el periodo de fenología Santa Ana 2018 vs el escenario climático RCP8.5 para el 2030

En la Tabla 37, se utilizó la prueba t, de comparación de medias, donde se muestran diferencias significativas entre los datos de temperatura y precipitación de los escenarios climáticos (2030-2031) versus los datos de la estación Santa Ana (en el 2017-2018).

Tabla 37. Probabilidad de la prueba t para el análisis comparativo de la temperatura mínima entre los escenarios climáticos vs Santa Ana

Escenario	CANESM2 -rcp45	CANESM2 -rcp85	CNRM-CM5- rcp45	CNRM-CM5- rcp85	MPI-ESM- MR-rcp45	MPI-ESM- MR-rcp85
Prueba t	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

El comportamiento de la temperatura mínima durante el periodo fenológico evaluado, de acuerdo con dicha prueba estadística, es diferente entre los seis escenarios climáticos (Figura 31 y 32).

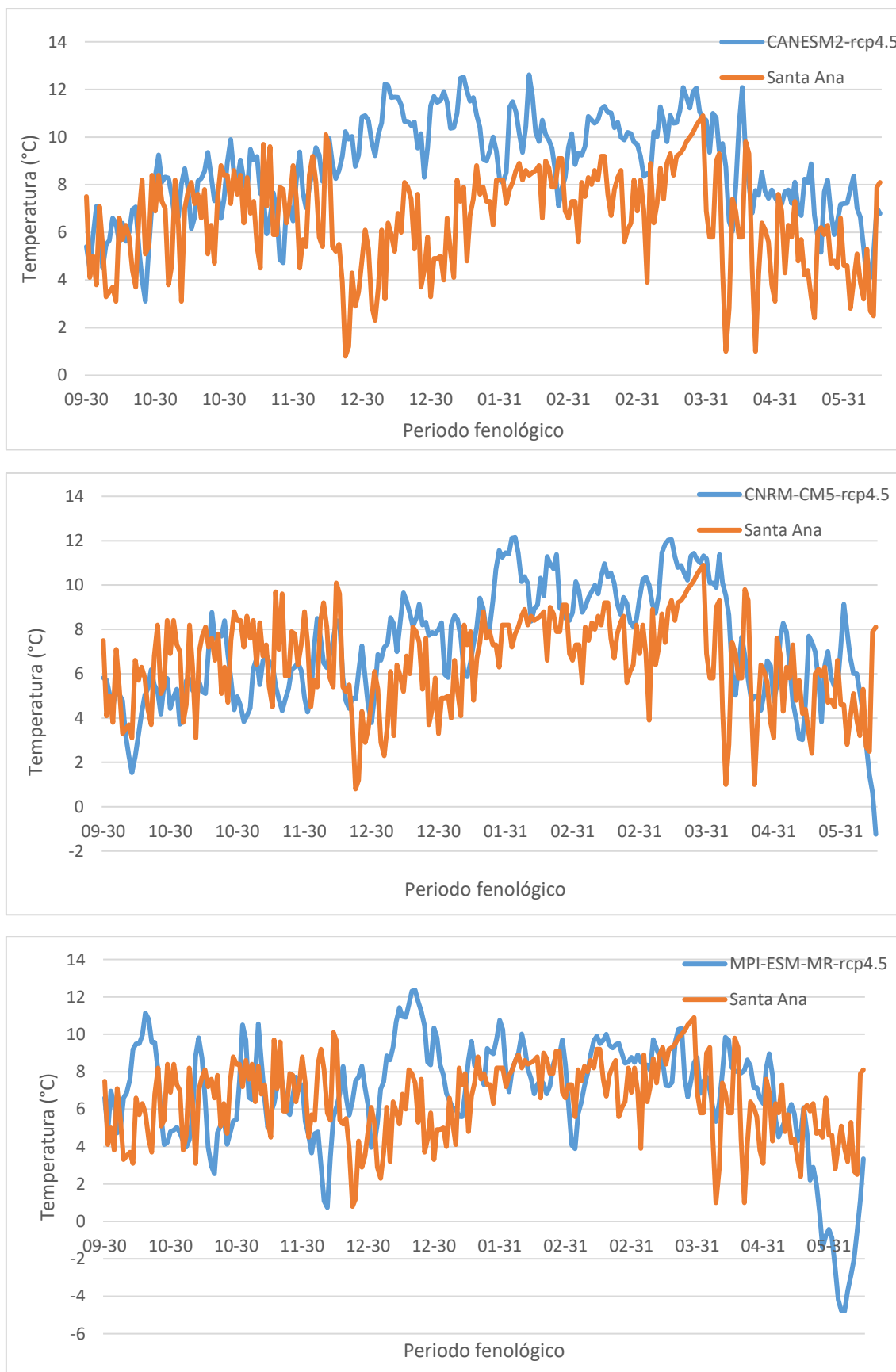


Figura 31. Temperatura mínima durante el periodo de fenología 2018 vs el 2030 para el escenario climático RCP4.5

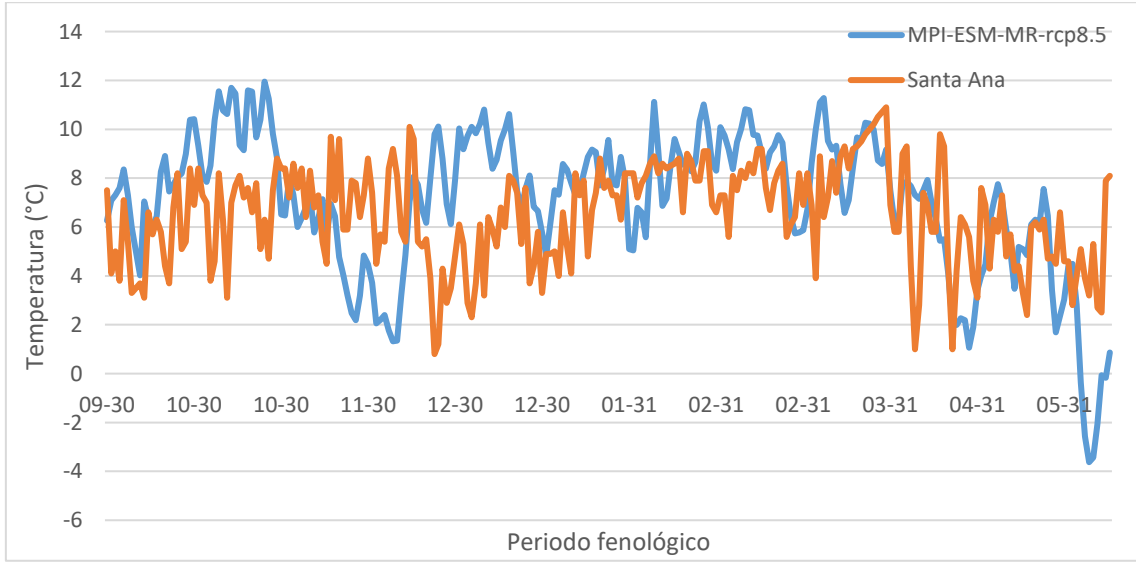
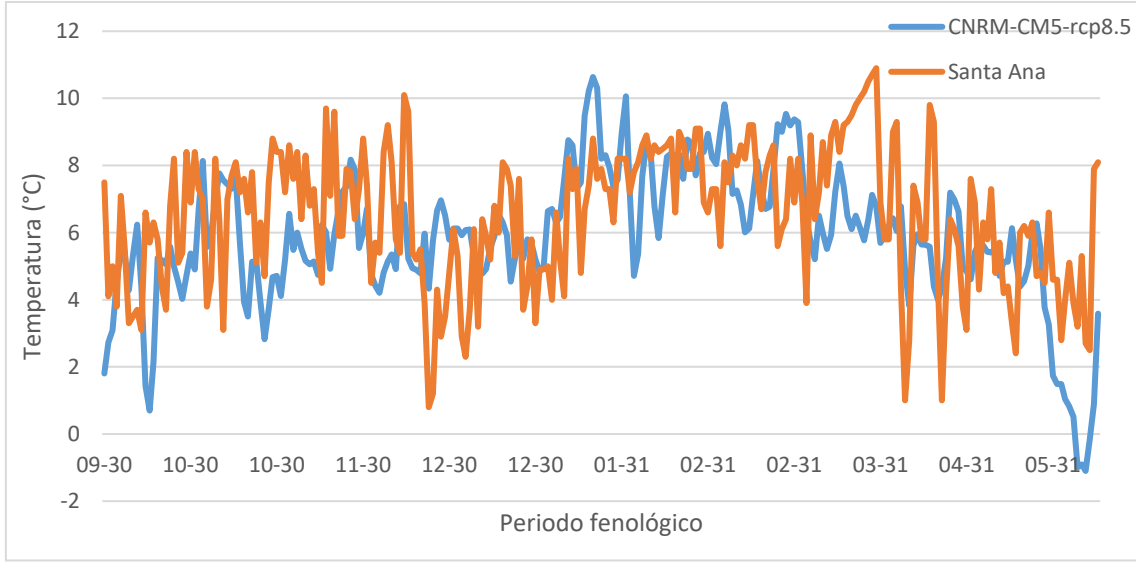
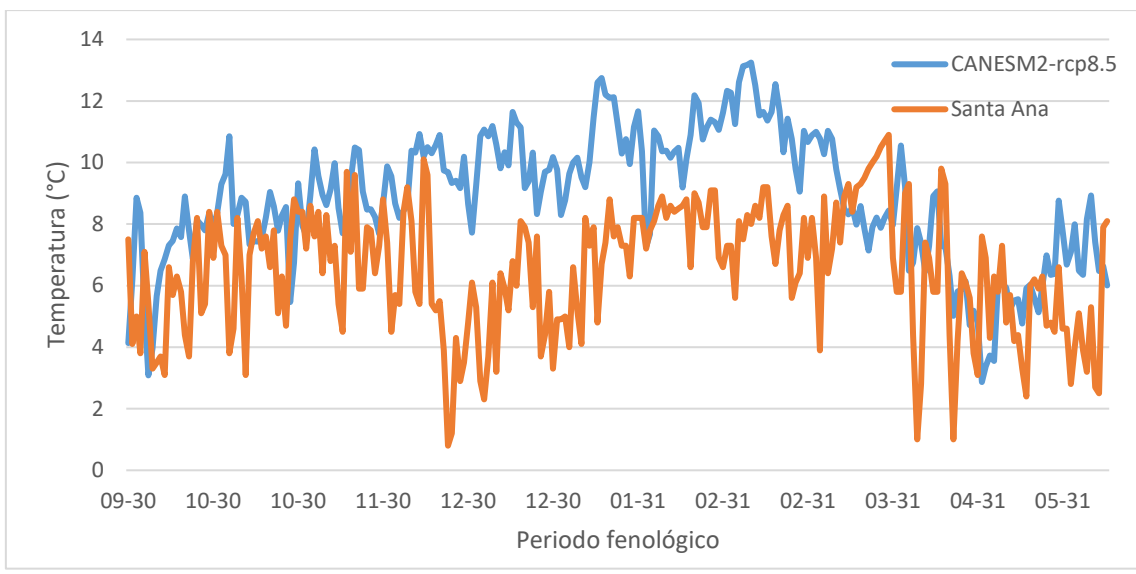


Figura 32. Temperatura mínima durante el periodo de fenología 2018 vs el 2030 para el escenario climático RCP8.5

5.4. Modelamiento de la respuesta del cultivo de quinua inducida a diferentes regímenes hídricos bajo escenarios de Cambio Climático.

Para las proyecciones del rendimiento del periodo 2030-2031, se utilizaron los datos calibrados y validados en la campaña 2018-2019. Para el input clima del modelo AquaCrop se consideró: precipitación diaria, temperatura máxima diaria y mínima diaria. Para una serie futura al 2030, se obtuvieron valores de evapotranspiración asociado a los mayores niveles de temperatura superficial de los escenarios futuros de cambio climático, los cuales estarían afectando a las variedades de quinua al generar estrés y reduciendo la tasa del crecimiento de la biomasa. El rendimiento de las variedades de quinua analizadas reporta una disminución en los escenarios climáticos para los cuatro tratamientos evaluados

En la Tabla 38, los datos simulados para los escenarios climáticos de la variedad de Quinua Huancayo, se muestra rendimiento en los escenarios climáticos CNRM-CMS-rcp45 y MPI_ESM_MR_rcp45 (Figura 35), siendo los más optimistas, sin embargo, a pesar de ello es menor a lo experimentado en la campaña Santa Ana 2018-2019. La cobertura de dosel disminuye hasta un 53 % y un cierre de estomas del 13 % (Figura 33).

Tabla 38. *Rendimiento de la variedad de Quinua Huancayo para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031*

Escenario	Rendimiento Huancayo (t ha ⁻¹)			
	200 %	100 %	50 %	25 %
Santa Ana	1.19	2.51	1.95	1.76
CNRM_CMS_rcp45	1.71	2.13	1.59	1.52
MPI_ESM_MR_rcp45	1.09	1.55	0.96	0.61

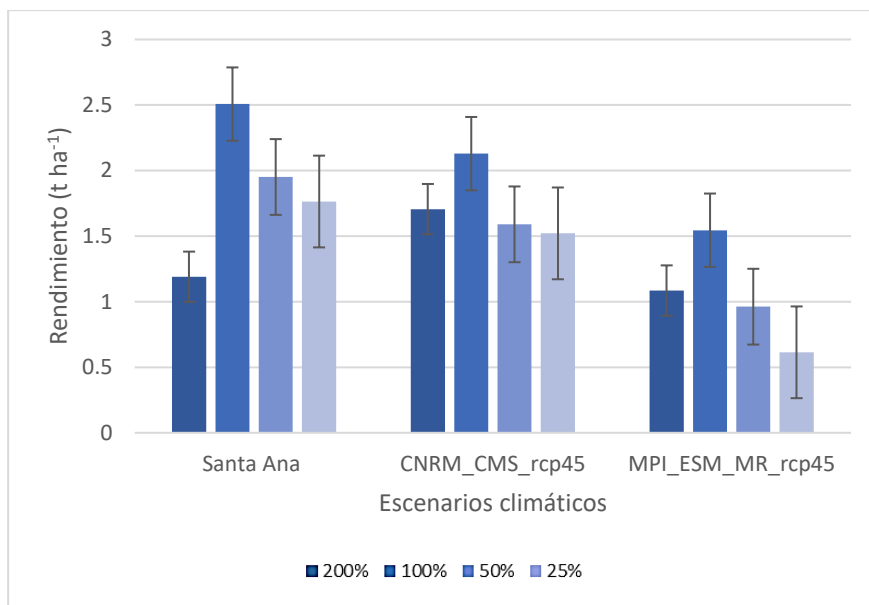


Figura 33. Rendimiento de la variedad de Quinoa Huancayo para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031

En la Tabla 39, los datos simulados para los escenarios climáticos se genera menor rendimiento en CNRM-CMS-rcp45, MPI-ESM-MR-rcp45 y MPI-ESM-MP-rcp85 (Figura 37), sufriendo estrés hídrico la variedad de Quinoa Hualhuas, con cierre estomático del 13 % y una disminución de la cobertura vegetal de 25 %, la irrigación de las precipitaciones y los riegos es menor. Según López (2010) la sobreestimación de la ETO con el uso simplificado del balance puede alcanzar valores que están entre el 15 % y 55 % y la predicción de la humedad del suelo. La capacidad de campo fue menor a lo evaluado en la campaña Santa Ana 2018-2019, por ello presenta un mayor estrés hídrico repercutiendo en el resultado del rendimiento (Figura 34).

Tabla 39. Rendimiento de la variedad de Quinoa Hualhuas para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031

ESTACIÓN	Rendimiento Hualhuas (t ha ⁻¹)			
	200 %	100 %	50 %	25 %
Santa Ana	2.02	2.83	2.14	1.98
CNRM_CMS_rcp45	2.18	2.69	2.33	2.08
MPI_ESM_MR_rcp45	2.02	2.83	2.14	1.98
MPI_ESM_MR_rcp85	1.97	2.67	2.11	1.89

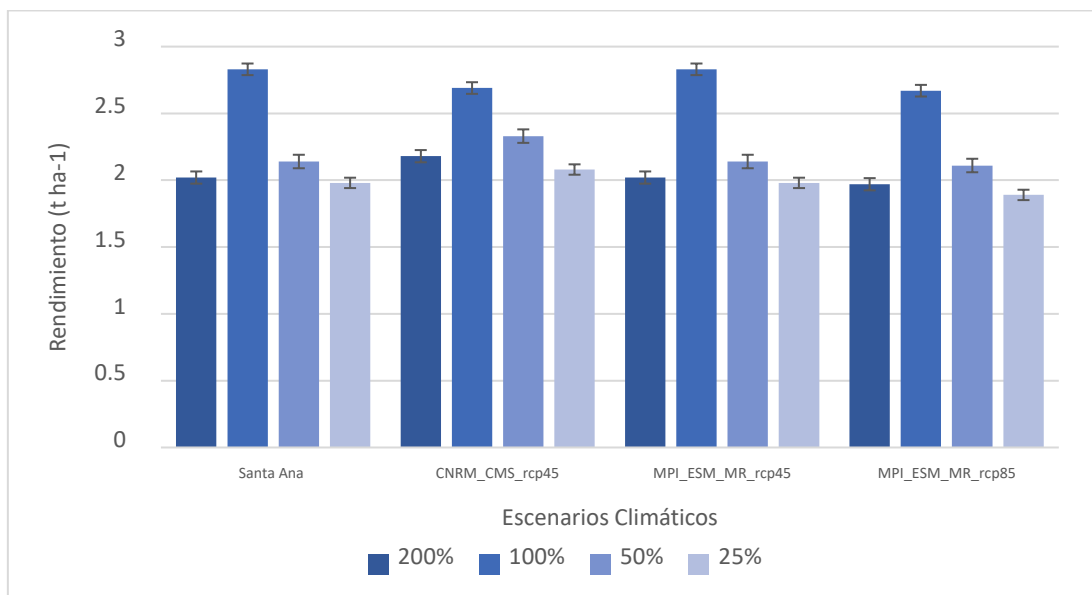


Figura 34. Rendimiento de la variedad de Quinoa Hualhuas para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031

En la Tabla 40, se reporta menor rendimiento en los escenarios climáticos CANESM2_rcp45, CNRM-CMS-rcp45, MPI-ESM-MR-rcp45 y MPI-ESM-MP-rcp85 sufriendo estrés hídrico la variedad de Quinoa Acollina (Figura 38). De acuerdo con el modelo Aquacrop, ocurre un cierre estomático del 10 % y una reducción de la cobertura vegetal del 40 % (Figura 35). La capacidad de campo fue menor a lo evaluado en la campaña Santa Ana 2018 - 2019, por ello presenta un mayor estrés hídrico repercutiendo en el resultado del rendimiento.

Tabla 40. Rendimiento de la variedad de Quinoa Acollina para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031

Escenario	Rendimiento Acollina (t ha ⁻¹)			
	200%	100%	50 %	25 %
Santa Ana	2.08	2.74	2.23	2.02
CANESM2_rcp45	1.65	2.09	1.72	1.62
CNRM_CMS_rcp45	1.89	2.46	2.02	1.83
MPI_ESM_MR_rcp45CNRM_CMS_rcp85	1.31	1.80	1.43	1.25
MPI_ESM_MR_rcp85MPI_ESM_MR_rcp45	2.14	2.65	2.28	2.04

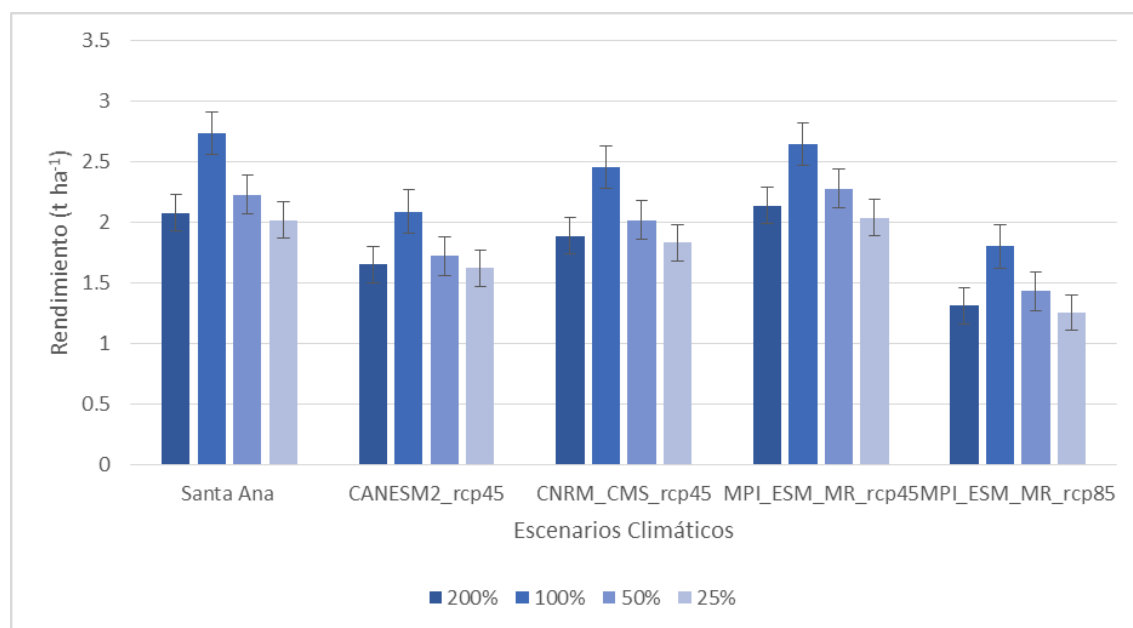


Figura 35. Rendimiento de la variedad de Quinoa Acollina para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031

En la Tabla 41, se muestra menor rendimiento en los escenarios climáticos CNRM-CMS-rcp45 y MPI-ESM-MR-rcp45 (Figura 39), sufriendo estrés hídrico la variedad de Quinoa INIA-433, según el programa AquaCrop use presenta un cierre estomático del 14 % y una reducción de la cobertura vegetal del 56 % (Figura 36). La cobertura vegetal del cultivo se ve restringida en la medida que la disponibilidad de agua se reduce por debajo del límite de la fracción útil, donde influye en la producción de la biomasa y a su vez en el rendimiento, tal como lo menciona Araya *et al.* (2010).

Tabla 41. Rendimiento de la variedad de Quinoa INIA-433 para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031

Escenario	Rendimiento INIA-433 (t ha ⁻¹)			
	200 %	100 %	50 %	25 %
Santa Ana	2.47	3.09	2.58	2.43
CNRM_CMS_rcp45	1.51	2.46	1.98	1.03
MPI_ESM_MR_rcp45	1.24	1.89	1.39	1.17

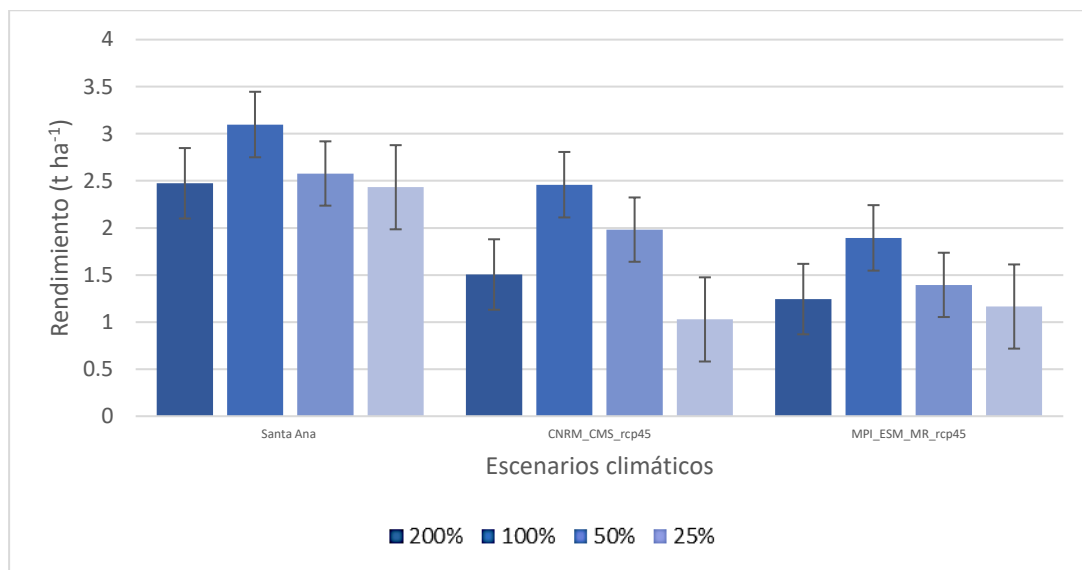
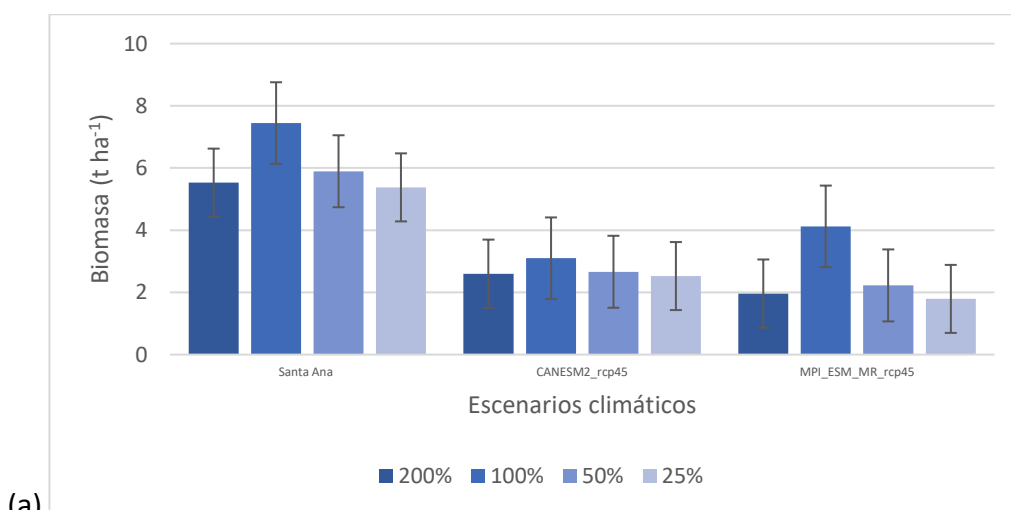


Figura 36. Rendimiento de la variedad de Quinoa INIA-433 para la estación Santa Ana 2018-2019 vs los escenarios climáticos 2030-2031

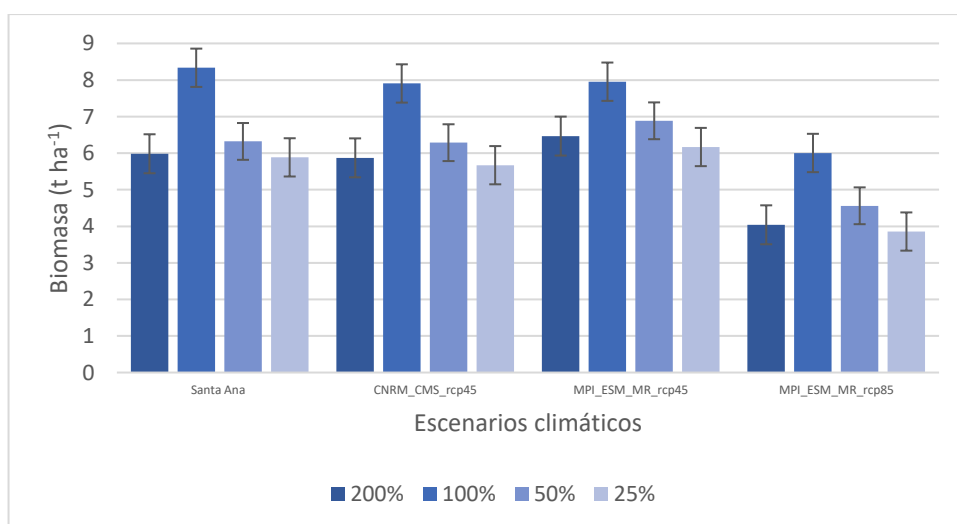
|

a. Efectos del Cambio Climático en la biomasa del periodo 2030-2031

De la simulación para los escenarios climáticos evaluados para el primer muestreo de biomasa. Se genera la biomasa para los escenarios evaluados donde se percibe una disminución drástica, donde afecta de manera directa a la biomasa para el cultivo de Quinua Huancayo (a). De la misma manera afecta a los cultivos de la Quinua Acollina (b) y Quinua INIA-433 (c), mientras para la variedad Hualhuas se genera una mayor cantidad de biomasa en el escenario CNRM-CM5-rcp4.5 (Figura 37). La simulación con estrés hídrico mostró una reducción en la cobertura del dosel, un mayor cierre de estomas y senescencia temprana (González *et al.*, 2018).



(a)



(b)

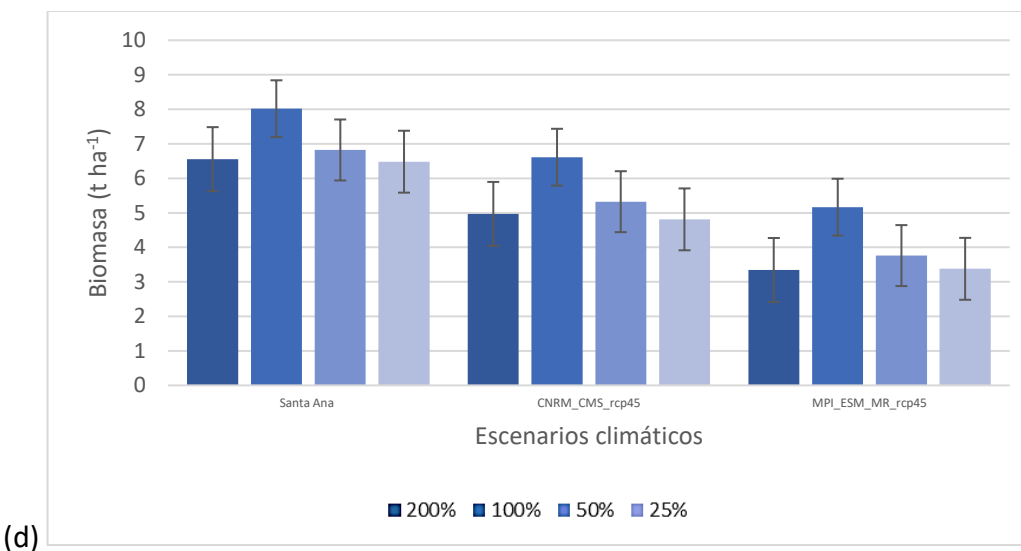
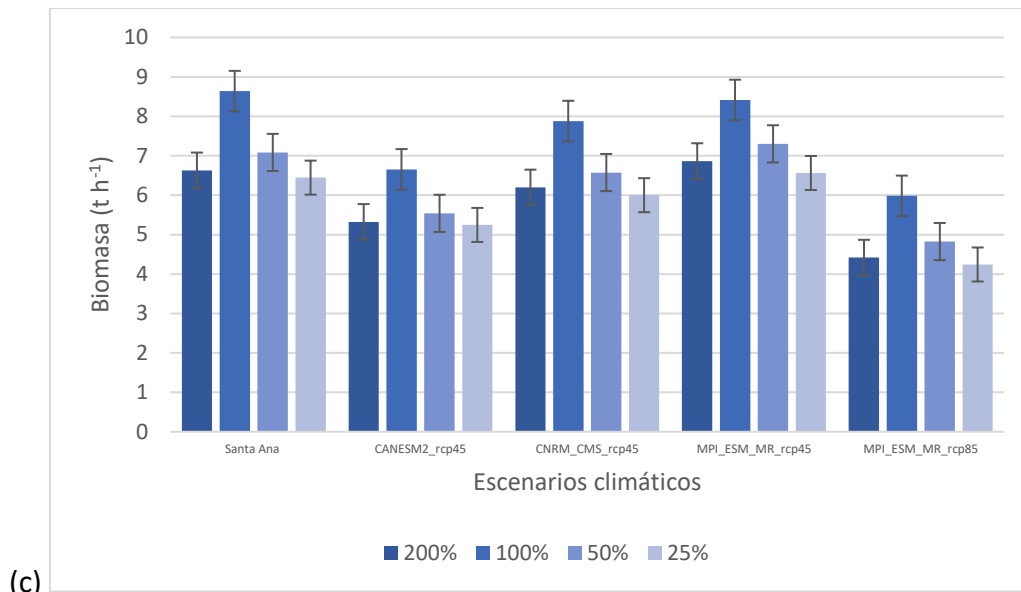


Figura 37. Biomasa frente a los escenarios climáticos para las variedades de Quinoa Huancayo (a), Quinoa Hualhuas (b), Quinoa Acollina (c) y Quinoa INIA-433 (d)

VI. DISCUSIÓN

6.1. Con respecto al análisis de datos de entrada en el programa AquaCrop

El AquaCrop simula adecuadamente el rendimiento y la biomasa bajo diferentes niveles de estrés hídrico de acuerdo con autores como Aguilar (2006), Fajardo (2015), Alarcon (2015) y Alavi (2015). Quienes demostraron en sus estudios que el enfoque semi-cuantitativo del modelo AquaCrop tiene un comportamiento adecuado para las condiciones de producción de quinua en el Altiplano Boliviano y que el modelo puede ser aplicado con niveles de certidumbre en regímenes hídricos. El cual fue útil al momento de usar el modelo para el presente trabajo donde se obtuvieron datos cercanos a lo experimentado y permitió realizar las simulaciones con los escenarios climáticos con la variable de estrés hídrico.

6.1.1. Interpretación de la medición fisiológica

Por otro lado, se ha establecido que para el momento de la floración está fuertemente relacionado con el rendimiento (Gross, 1981; Hirose y Kachi, 1982; Wery, 2005), también en la producción (Metcalf *et al.*, 2003). El efecto del estrés por sequía en la fenología de la quinua es indirecto a través de crecimiento, por lo que a medida que el estrés de sequía va acrecentando durante el estado fenológico, la sequía retrasa el crecimiento de la quinua (Geerts *et al.*, 2009), el crecimiento desacelerado podría ser parte de la explicación de floración retrasada (Hay y Walker, 1989; Reekie, 1997; Azam-Ali y Squire, 2002).

a. Interpretación del análisis estadístico de la longitud de raíz

De los tres análisis de varianza en la medición de longitud de raíz, donde se diferenció la longitud de raíz fue en el último muestreo a los 169 días después de

la siembra, donde la profundidad máxima efectiva de la raíz alcanzada es en la etapa de senectud de la cobertura del cultivo al igual que la investigación desarrollada por Yzarra *et al.* (2011), titulada Impacto del Cambio Climático en el cultivo de quinua en la región de Puno. Para diferenciarse entre las variedades, se registró mayor longitud de raíz por la variedad Huancayo, seguido de Acollina, Inia-433 y Hualhuas.

b. Interpretación del análisis estadístico del peso la biomasa aérea seca

De los tres muestreos realizados, el análisis de varianza se determinó que existen diferencias significativas entre las variedades por cada muestreo, siendo así que Acollina registro mayor peso de biomasa aérea, seguida de Hualhuas, Huancayo y finalmente INIA-433. Jacobsen *et al.* (1999), analizando el efecto del estrés hídrico en la biomasa y en especial al crecimiento de la quinua, reportan que la mayor producción de biomasa fue alcanzado por el tratamiento de riego moderado en nuestro experimento sería el tratamiento con riego al 100%, mientras en comparación con la producción de la biomasa disminuye si el riego se realiza más de los adecuado en comparación con nuestro experimento por el tratamiento al 200%, o menos en los tratamientos 50% y 25%.

c. Interpretación del análisis estadístico de la altura de planta

Para el análisis de varianza de la altura de la planta se determinó que existen diferencias significativas entre ellas, la variedad Hualhuas fue la que registro una mayor altura, seguida de Huancayo, INIA-433 y Acollina. Según Mujica *et al.* (2004) la profundidad de raíz guarda estrecha relación con la altura de la planta, es por ello que la relación con la raíz, la variedad quinua Hualhuas es la que tuvo

mayor altura y mayor profundidad de raíz. Huiza (1994) demostró que en el cultivo de quinua la sequía impuesta en las fases de prefloración y floración, afecta directamente al crecimiento de la altura de la planta en un rango de 23 a 43 por ciento.

d. Interpretación del análisis estadístico del rendimiento

Para el análisis de medición del rendimiento se encontró que existen diferencias significativas entre las variedades de acuerdo al régimen hídrico, donde la variedad de quinua INIA-433 mostro un mayor rendimiento seguida de Hualhuas, Acollina y finalmente Huancayo. Según Huiza (1994) en el cultivo de quinua se reporta un 60% de pérdida en el rendimiento de grano, debido a que la sequía se presentó en la fase de grano lechoso, similar a nuestra investigación donde se reporta una pérdida del 56% en el rendimiento de grano.

e. Interpretación del riego realizado en la campaña 2018-2019

Los riegos se realizaron principalmente en la etapa de floración, siendo la más sensible. Sin embargo, otras investigaciones señalan que el riego debe aplicarse cada 5 días entre 70 - 100 días después de la siembra, y cada 4 días entre 100 y 120 días para un desarrollo eficiente, mientras que en otros autores reportan cada 7 días entre 70 y 90 días después de la siembra como se reportan (Garreaud, 2000; y Geerts *et al.*, 2009). Al comienzo de la floración requerirá frecuentes aplicaciones de riego para evitar perdida en el rendimiento y productividad, si la lluvia es baja durante esta etapa es importante incrementar el riego así mismo es importante el registro dentro de la investigación, según lo propuesto por Geerts *et al.* (2009).

A partir de las simulaciones realizadas, en las variedades de quinua, no se encuentran sobreestimaciones a lo largo del periodo vegetativo, presentándose diferencias durante el inicio de floración (60 a 80 DDS) las variedades más sensibles en esta etapa son Hualhuas y Acollina. Según la investigación realizada por Mujica *et al.* (2019), estas fases son sensibles a la sequía y heladas. De la misma manera, las fases fenológicas en las cuales la precipitación y el riego son importantes, es la germinación, formación del botón floral, floración y el llenado inicial del grano (Aguilar y Jacobsen, 2006).

6.2. Con respecto a la calibración y validación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a través de diferentes regímenes hídricos para el modelamiento a futuros escenarios de cambio climático.

6.2.1. Interpretación de la calibración y validación

La máxima cobertura de dosel es alcanzada en la etapa de floración, luego comienza a decrecer para todas las variedades de quinua. En el modelo realizado, fue calibrado a un valor de K_{cb} medio = 1.1 para todas las variedades siendo mayor que la investigación desarrollada por Heng *et al.* (2009) con un valor (K_{cb} medio) = 1.05 y similar al de Abedinpour *et al.* (2012) donde K_{cb} medio=1.14.

El parámetro K_{cb} medido se ajusta tanto que simule la biomasa y la cobertura observada en campo, el valor tiene relacionado con la transpiración del cultivo, también se relaciona con la cantidad de biomasa producida, y finalmente el rendimiento esperado.

***a. Interpretación de la cobertura del dosel entre lo observado y simulado
(CC)***

El coeficiente de determinación “R²” para las variedades de quinua fueron Acollina de 0.92, Acollina de 0.97, Hualhuas de 0.93 y INIA- 433 de 0.85, siendo 1 el óptimo, mostrando un nivel de confianza en lo simulado con lo observado. Según Molnar (2011), los coeficientes obtenidos presentan valores de buena a excelente, lo indica que la simulación se ve explicada de manera eficaz con la variabilidad de los datos de cobertura vegetal. La calibración del modelo fue realizada con la lámina alta (200 %) de igual manera que el estudio realizado por Alarcón (2015).

Los valores estimados reportados en los valores NRMSE obtenidos en las simulaciones analizadas varían entre 13.8 a 22.3%, siendo estos mayores reportados por Hacia *et al.* (2009), 4.8 a 13.6% o los de García-Villa y Fereres (2012), mayores al 13%, pero siendo menor a los de los estudios realizados por Heng, *et al.* (2009). El experimento bajo condiciones de estrés hídrico, recibieron indicadores estadísticos con (R²=0.97, RMSE=87.5) para el tratamiento al 200%

b. Interpretación de la biomasa aérea seca entre lo observado y simulado

(B)

El modelo simula adecuadamente la cantidad de biomasa producida dependiendo de la variedad de quinua. En el estudio realizado por Gaelen (2015), consiguieron resultados para la validación de la biomasa entre 0.91 a 0.87 para el coeficiente de determinación de R^2 . En caso del riego completo y seco, se puede apreciar la precisión con la que el modelo puede simular la biomasa del cultivo en todas las variedades. Sosteniendo de esta forma la confiabilidad que se obtienen a la hora de medir el estrés hídrico por sequía, en el modelo con resultados cercanos a 1 en el estudio realizado por Silva (2012). En tanto, los valores de las eficiencias de coeficiente de determinación varían entre 0.92 y 0.96, y según los resultados, con valores de ajuste excelente, explicando adecuadamente la eficiencia de la simulación en los datos de biomasa aérea seca observada.

La correlación entre lo simulado y observado con una positiva significativa en todos los tratamientos, donde la variedad de quinua Huancayo obtuvo el valor del coeficiente de correlación de determinación de 0.97, con una mejor aproximación entre los valores observados y simulados. En tanto, los valores de las eficiencias del indicador estadístico Nash-Sutcliffe varían entre 0.92 y 0.96, y según los resultados, con valores de ajuste excelente (Molnar, 2011), explicando adecuadamente la eficiencia de la simulación. Se realizó el ajuste al valor medio de los datos simulados con los datos observados de la biomasa seca aérea, para cada una de las variedades de quinua, resultando una variación temporal a lo largo del periodo experimental (setiembre 2018 – mayo 2019).

c. Interpretación del rendimiento entre lo observado y simulado (CC)

El coeficiente de determinación (R^2) es de 0.75 para Huancayo, 0.57 en Hualhuas, 0.57 en Acollina y 0.93 para INIA-433. La precisión del modelo para simular el rendimiento en todas las variedades, sostiene alta confiabilidad a la hora de medir el estrés hídrico por sequía en el modelo. Los resultados presentados muestran que el modelo simula adecuadamente el rendimiento, dependiendo de la variedad de quinua.

Para entender la respuesta de la quinua frente al estrés hídrico en términos de biomasa y rendimiento de grano bajo riego, los valores son menores comparado los tratamientos (50 % y 25 %) con (100 % y 200 %), al tener resultados similares a la investigación realizada por Rachid *et al.* (2015) con un rendimiento simulado entre 1.05 a 3.74 t ha⁻¹ para el cultivo de quinua frente al estrés hídrico. El rendimiento de las variedades de quinua analizadas reporta una reducción del rendimiento bajo los escenarios climáticos. Es necesario incorporar mayor volumen hídrico para reducir la pérdida de la producción.

En la campaña 2018, el cultivo con mayor rendimiento fue la variedad INIA-433 al igual que Hualhuas para el tratamiento 2 (100 %), tanto para el primer tratamiento (200%), tercer tratamiento (50 %) y el cuarto tratamiento (25 %) disminuye el rendimiento, seguido de la variedad Acollina. En los cuatro tratamientos el cultivo Huancayo tuvo menor rendimiento.

La variedad INIA-433 mantuvo una mejor adaptación, a pesar del estrés hídrico presentado, su rendimiento fue mayor a los demás cultivos: 200 %: 2.474 t ha⁻¹, 100 %: 3.098 t ha⁻¹, 50 %: 2.578 t ha⁻¹ y 25 %: 2.432 t ha⁻¹, en las etapas de

floración y llenado de grano no presentó estrés hídrico es por ello mantuvo un mayor rendimiento.

6.3. Con respecto a la evaluación de la respuesta de cuatro variedades de quinua a futuros escenarios climáticos

6.3.1. Interpretación de los efectos del cambio climático en el rendimiento periodo 2030-2031

El rendimiento de las variedades de quinua analizadas reporta una disminución en los escenarios climáticos para los cuatro tratamientos evaluados. Se realizó la evaluación de significancia futura, esta evaluación fue realizada para los modelos de regionalización estadística empleados por SENAMHI, en dos escenarios RCP4.5, más optimista y RCP8.5, más pesimista.

Para ello, en el modelo AquaCrop se utilizaron los parámetros conservativos del experimento de lámina alta, utilizado para la calibración espacial, por sus buenos indicadores estadísticos. Por su parte las condiciones climáticas futuras fueron insertadas en el input clima del modelo AquaCrop, del mismo modo se desarrolló en la investigación desarrollada por Alarcón (2015).

a. Interpretación de los escenarios climáticos de la precipitación

Se observa el comportamiento de la precipitación de los modelos generales climáticos bajo el efecto del escenario más optimista (RCP4.5) y el más pesimista (RCP 8.5), notándose disminución en ambos escenarios con respecto a Santa Ana. El comportamiento de la precipitación durante el periodo fenológico evaluado, de acuerdo con dicha prueba estadística, es similar entre los seis escenarios climáticos, con respecto a la estación de referencia. Se analiza que

tanto el escenario pesimista (RCP8.5) como optimista (RCP4.5), no se presentan cambios significativos en los escenarios climáticos, se los cuales no aportan mejoras significativas al riego de los cultivos sembrados en condiciones climáticas como la reportada. Como menciona Alarcon (2015), la precipitación autorregula efectos negativos del incremento de temperatura en posibles escenarios climáticos.

b. Interpretación de los escenarios climáticos de la temperatura máxima

El comportamiento de la temperatura máxima durante el periodo fenológico evaluado, de acuerdo con dicha prueba estadística, es diferente entre los seis escenarios climáticos, con respecto a la estación de referencia. Está asociado a los valores más altos de temperatura superficial (°C) de los escenarios de cambio climático futuro, los cuales estarían produciendo un mayor estrés en el cultivo y se reduzca el crecimiento de biomasa. La diferencia entre el escenario más optimista (RCP4.5) y el más pesimista (RCP8.5) al analizar los valores hay diferencia en el aumento de la temperatura.

c. Interpretación de los escenarios climáticos de la temperatura mínima

El comportamiento de la temperatura mínima durante el periodo fenológico evaluado, de acuerdo con dicha prueba estadística, es diferente entre los seis escenarios climáticos. Los mayores valores de temperatura superficial (°C) están asociados a los escenarios de cambio climático futuro, los cuales generan un estrés mayor al cultivo y posiblemente reduzcan la tasa de crecimiento de la biomasa. Los picos más altos se presentan en el modelo CANESM2, para ambos escenarios RCP4.5 Y RCP8.5, mientras que los más bajos en el modelo MPI-ESM-

MR, las diferencias son mínimas a causa de la ligera variación del incremento de la temperatura.

6.3.2. Interpretación de simulación del rendimiento para 2030-2031

a. Interpretación de simulación del rendimiento de la Quinoa Huancayo

Los datos simulados para los escenarios climáticos de la variedad de Quinoa Huancayo, se muestra rendimiento en los escenarios climáticos CNRM-CMS-rcp45 y MPI_ESM_MR_rcp45, siendo los más optimistas, sin embargo, a pesar de ello es menor a lo experimentado en la campaña Santa Ana 2018-2019. La cobertura de dosel disminuye hasta un 53 % y un cierre de estomas del 13 %.

b. Interpretación de simulación del rendimiento de la Quinoa Hualhuas

Los datos simulados para los escenarios climáticos generan menor rendimiento en CNRM-CMS-rcp45, MPI-ESM-MR-rcp45 y MPI-ESM-MP-rcp85, afectando el déficit hídrico sobre Hualhuas, con cierre estomático al 13 % y una disminución de la cobertura vegetal de 25 %. Según López (2010) la sobreestimación de la ETo con el uso del balance simplificado podría alcanzar valores que están entre 15 % y 55 % y la predicción de humedad en el suelo. La capacidad de campo fue menor a lo evaluado en la campaña Santa Ana 2018-2019, por ello presenta un mayor estrés hídrico repercutiendo en el resultado del rendimiento.

c. Interpretación de simulación del rendimiento de la Quinoa Acollina

Se reporta menor rendimiento en los escenarios climáticos CANESM2_rcp45, CNRM-CMS-rcp45, MPI-ESM-MR-rcp45 y MPI-ESM-MP-rcp85 sufriendo estrés hídrico la variedad Acollina. De acuerdo con el modelo Aquacrop, ocurre un cierre estomático del 10 % y una disminución de la cobertura vegetal del 40 %. La cobertura vegetal del cultivo se ve restringida en la medida que la disposición de agua se reduce por debajo del límite de la fracción útil, donde influye en la producción de la biomasa y a su vez en el rendimiento, según Araya *et al.* (2010). La capacidad de campo fue menor a lo evaluado en la campaña Santa Ana 2018 - 2019, por ello presenta un mayor estrés hídrico repercutiendo en el resultado del rendimiento.

d. Interpretación de simulación del rendimiento de la Quinoa INIA-433

Se muestra menor rendimiento en los escenarios climáticos CNRM-CMS-rcp45 y MPI-ESM-MR-rcp45, sufriendo estrés hídrico la variedad de Quinoa INIA-433, que de acuerdo con el modelo AquaCrop, ocurre un cierre estomático del 14 % y una disminución de la cobertura vegetal del 56 %. La cobertura vegetal del cultivo se ve restringida en la medida que la disposición de agua se reduce por debajo del límite de la fracción útil, donde influye en la producción de la biomasa y a su vez en el rendimiento, tal como lo menciona Araya *et al.* (2010). La capacidad de campo fue menor a lo evaluado en la campaña Santa Ana 2018 - 2019, por ello presenta un mayor estrés hídrico repercutiendo en el resultado del rendimiento. Autores como Steduto *et al.* (2012), no recomiendan estrés hídrico durante la floración y llenado del grano, debido a que provoca

directamente una reducción de la tasa de producción en la biomasa y por lo tanto los rendimientos son bajos.

En la simulación del modelo para la serie futura al año 2030, se obtuvieron valores de evapotranspiración estando asociado a los mayores niveles de valores de temperatura superficial de los escenarios futuros de cambio climático, los cuales estarían afectando a las variedades de quinua al generar estrés y reduciendo la tasa del crecimiento de la biomasa.

6.4. Interpretación con respecto al modelamiento de la respuesta del cultivo de quinua inducida a diferentes regímenes hídricos bajo escenarios de cambio climático

6.4.1. Interpretación de la simulación de la biomasa para 2030-2031

De los datos obtenidos en el primer muestreo de biomasa se percibe una disminución drástica según los escenarios evaluados, principalmente en las variedades Huancayo (a), Acollina (b) e INIA-433 (c), mientras para la variedad Hualhuas se genera una mayor cantidad de biomasa en el escenario CNRM-CM5-rcp4.5. El régimen hídrico en los dos escenarios climáticos evaluados es el menor al óptimo. Así mismo la cobertura de dosel del cultivo se ve restringida en la medida que la disposición de agua se reduce por debajo del límite de la fracción útil, Araya *et al.* (2010) señala que el déficit hídrico influye en la producción de la biomasa y a su vez en el rendimiento. No obstante, el suelo estuvo cercano a la capacidad de campo durante la mayor parte del ciclo del cultivo, no encontrándose una disminución de la cobertura vegetal o del cierre estomático, tal como lo observó Gonzales *et al.* (2019).

6.4.2. Interpretación de la simulación de la cobertura del dosel 2030-2031

Los valores de estimación de RMSE obtenidos en la simulación varían entre 26 % y 54 %, siendo mayores que los evaluados por Alarcón (2015). Por otro lado, los valores de *r* en todas las variedades son cercanos a uno, no habiéndose apreciado una sobreestimación de la Cobertura del Dosel.

La simulación con estrés hídrico mostró una reducción en la cobertura del dosel, un mayor cierre de estomas y senescencia temprana (González *et al.*, 2018).

En los escenarios climáticos CNRM-CMS-rcp45 y MPI-ESM-MR-rcp45 todos los cultivos de quinua generaron menor rendimiento, debido el estrés hídrico afecta en el consumo de agua en las variedades, con un mecanismo de incrementar el volumen de agua dentro de la planta, las estomas de ven reducido al 14% así mismo afectando a una reducción de la cobertura del dosel al 56 %.

En la investigación desarrollada en el Altiplano de Bolivia por Alavi *et al.* (2015), evaluó impacto que genera el cambio climático en quinua en tres localidades del Altiplano (Viacha, Patacamaya y Rio Mulatos) bajo dos escenarios climáticos (RCP y SREs) para los años 2030 y 2090. Ambos escenarios incrementan la temperatura máxima y mínima, mientras que la precipitación no mostro cambios significativos, al igual que nuestra investigación con los datos de escenarios climáticos brindado por SENAMHI. Las evaluaciones a través del AquaCrop de la investigación realizada en el Altiplano fueron la cobertura vegetal y el rendimiento, concluyeron la reducción en las tres localidades frente a los dos escenarios climáticos. De manera similar para esta investigación, lo evaluado en los escenarios climáticos RCP8.5 y RCP4.5 por nuestra investigación, muestra cambios significativos en los rendimientos para cada variedad y por los cuatro tratamientos, el rango de reducción en el rendimiento en las variedades de quinua Acollina (0.66 t ha⁻¹), Huancayo (0.378 t ha⁻¹), Hualhuas (0.72 t ha⁻¹) y INIA-433 (0.59 t ha⁻¹).

VII. CONCLUSIONES

- Se ha calibrado y validado la respuesta en las 4 variedades de quinua a través de diferentes regímenes hídricos a escenarios futuros de cambio climático. De los trabajos de modelamiento se observó a la Cobertura vegetal (CC) tuvo una alta coeficiente de determinación $R^2= 0.97$, igual a la biomasa seca aérea (B) y el rendimiento (Y), asimismo el índice Nash-Sutcliffe (NSE) propuesto por Molnar (2011) se ha calculado entre 0.92 y 0.96.
- Se ha modelado 4 variedades de quinua bajo a diferentes regímenes hídricos en escenario de Cambio Climático. Con los datos adquiridos en campo, se ha identificado a la cobertura vegetal como un parámetro de mayor discriminación en el modelo AquaCrop. En las condiciones actuales la variedad INIA-433/Santa Ana/FAO presenta un mayor rendimiento, seguido por Hualhuas, Acollina y Huancayo.
- Bajo escenarios climáticos al 2030 el rendimiento y la biomasa del cultivo se ven afectado negativamente bajo las diferentes condiciones de riego evaluadas. Los datos simulados fueron evaluados mediante tres escenarios climáticos (CanESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-MR) todas bajo un incremento de CO_2 (RCP4.5 y RCP8.5). En todas ellas se observa una reducción del rendimiento para las cuatro variedades, Huancayo (69 %), Acollina (64 %), INIA-433 (55 %) y Hualhuas (54 %).

VIII. RECOMENDACIONES

- Es necesario realizar más campañas en diferentes tipos de cultivos de quinua para la localidad de Huancayo con la aplicación de más tecnologías de riego y un seguimiento constante con los datos observados en campo, así tener mejor precisión y confiabilidad al momento de la calibrar y validar el modelo AquaCrop.
- Se recomienda el uso del modelo AquaCrop como una herramienta para la implementación así tomar decisiones en el uso eficiente del agua en la agricultura del país.
- Los buenos resultados obtenidos en el modelo no implica que no existan elementos que pueden mejorarse. El proceso de validación y calibración del modelo, es importante realizar mediciones en campo además del seguimiento de la cobertura vegetal, la biomasa seca, índice de cosecha, rendimiento como el porcentaje de fertilidad del suelo. También es necesario conocer el índice de cosecha potencial y las láminas de riego, siendo dos parámetros muy sensibles y son determinantes para finalmente obtener un confiable resultado en la salida del modelo.
- Se recomienda al MINAGRI, realizar estudios o investigaciones de los efectos del estrés hídrico en estas variedades a nivel local en zonas potencialmente productivas por medio de un sistema de información climática, Identificando el rendimiento a través de la fertilidad y uso de riego.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abedinpour, M. (2012). Performace evolution of AqueCrop model for maize crop in a semi-arid enviroment. *Agric. Water Manage*, p. 55-66
- Aguilar, P. Jacobsen, S. (2006). Cultivation of Quinoa on the Peruvian Altiplano. *Food Reviews International*, p. 31-41.
- Alarcón, L. (2015). *Efecto del Cambio Climático en el rendimiento del cultivo de maíz amarillo duro bajo condiciones de La Molina utilizando el Modelo Aquacrop*. Lima, Perú: Universidad Agraría la Molina.
- Alavi, G.; Diels, J.; Willems, P.; García, M. (2015). Simulación de la producción de Quinoa en el Altiplano Boliviano con el modelo de Aquacrop con escenarios futuros generados por Lars-WG y QPM. **Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales**, p. 7-118.
- Alonso S. y Jiménez M. (1999). Modelos de simulación del clima. Recuperado de <http://www.divulgameteo.es/fotos/lecturas/Modelos-simulaci%C3%B3n-clima.pdf>
- Apaza, V.; Caceres, G.; Estrada, R.; Pinedo, R. (2013). Catálogo de variedades comerciales de quinoa en el Perú. Lima, Perú: INIA.
- Araya, A.; Habtu, S.; Meles, K.; Kebede, A.; Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97 (11): 1838-1846.

- Azam, S.; Squire, G. (2002) Principles of tropical Agronomy. Wallingford, UK.
- Boshell, F. (2013). Desarrollo de una función agroclimática para estimar la productividad de los cultivos agrícolas en Colombia. Santiago de Chile, Chile: Serie Medio Ambiente y Desarrollo.
- Cervantes N. (2016). *Evaluación del rendimiento del cultivo de quinua (Chenopodium quinoa Wills.) con la aplicación de niveles de abono organico bajo condiciones de riego deficitario en el Altiplano Central*. La Paz.
- Coaquira Y. (2018). *Análisis comparativo de precipitaciones medias mensuales, utilizando datos de Satélites TRMM y estaciones meteorológicas en la cuenca Huancané*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano
- Conde, E. (2016). *Efecto del Cambio Climático en la sostenibilidad productiva de la quinua (Chenopodium quinoa) en el Municipio de Patacamaya en La Paz*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Cuellar, J. y Gallardo M. (2009) Diagnostico del estado del Arte del Cambio Climático en el Perú. Recuperado de https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/326/3/Cuellar-Diagnostico_del_estado_del_arte.pdf
- Davis Peru SAC. (2018). Vantage Vue. Recuperado de <http://davisperu.pe/blog.html>
- Dixit, A. (2015). Adaptación del cambio climático: aumento de la producción de quinua mediante técnicas nucleares. *Boletín del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)*, p. 10-11.
- Diagnino, J. (2014). Análisis de Varianza. *Revista Chil Anest*, (43) 306 - 310

Ergo, V. (2013). *Estrés térmico y/o hídrico durante el llenado de grano en soja: impacto sobre el funcionamiento de la fuente y su efecto sobre el rendimiento*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.

Esperanza, M. (2013). *Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del Modelo AquaCrop*. FONADE e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá.

Esprella Viorel, B. (2011). *Evaluación del rendimiento del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) con la aplicación de niveles de abono orgánico bajo condiciones de riego deficitario en el Altiplano Central*. La Paz.

Euroclima-IICA, P. (2015). *Modelos de simulación y herramientas de modelaje*. Costa Rica.

Fajardo, H. (2015). *Análisis de diferentes niveles de fertilización en varios regímenes hídricos en el cultivo de Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo el modelo AquaCrop para el altiplano Boliviano*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.

FAO (2013). Quinua 2013 año internacional. Recuperado de http://www.fao.org/quinoa-2013/what-is-quinoa/nutritional-value/es/?no_mobile=1

FAO. (2019). AquaCrop Reference Manual. Recuperado de www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropChapter3.pdf

- Farahani, H.; Izzi, G.; Oweis, G. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101(3): 469-476
- Fernandez, M. (2013). Efectos del Cambio Climático en la Producción y Rendimiento de cultivos por sectores. IDEAM.
- Fghide, R.; Wahbi, S.; Anaya, F.; Issa, O.; Benlhabib, O.; Ragab, R. (2015). Response of quinoa to different water management strategies: field experiments and SALTMED model application results. *Irrigation and Drainage*, 64(1): 29-40.
- Flores, H.; Sifuentes, E.; Flores, H. (2011). *Aplicación del modelo AquaCrop en la simulación del rendimiento de Maíz en el norte de Sinaloa, México*. Ciudad de México, México: XII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas.
- Flores, H.; Ojeda, W.; Flores, H.; Sifuentes, E.; Mejía, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*, 47(4): 347-359.
- Gaelen, H., Delbecque, T., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Raes, D. (2015). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: Evaluation of the AquaCrop procedure. *Agricultural Science*. Recuperado de <http://journals.cambridge.org/download.php?file=%2FAGS%2FS0021859614000872a.pdf&code=429cfc251fcc5900388169c5ae3c5095>
- García, M. y Fereres, E. (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*, 36(1): 21-31.

- García, M.; Fereres, E.; Mateos, L.; Orgaz, F.; Steduto, P. (2009). Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101(3): 477-487.
- Garrido, M.; Silva, P.; Silva, H.; Muñoz, R.; Baginsky, C.; Acevedo, E. (2013). Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *IDESIA*, 31(2): 69-76.
- Geerts, S; Raes, D.; García, M.; Taboada, C; Miranda, R; Cusicanqui, J; Vacher, J. (2009). Modeling the potencial for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano. *Agricultural Water Management*, 96 (11): 1652-1658
- Gonzales, F.; Cisneros, E.; Herrera, J.; López, T.; Cid, G. (2019). Predicción del rendimiento de la soya (*Glycine max* L) utilizando el modelo AquaCrop en suelo Ferralítico. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(1).
- González, F.; Delgado, R.; Díaz, Y.; Herrera, J.; López, T.; Cid, G. (2018). Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo. *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(1): 3-12.
- Gross, K. (1981). Predictions of fate from rosette size in fur "biennial" plant species: *Verbascum thapsus* *Oenothera biennis*, *Daucus carota* and *Tragopogin dubius*. *Oecologia*, 48: 209-213.
- Hay, R.; Walker, J. (1989). An introduction to the Physiology of crop yield. Longman Scientific y Technical, Essex, England.

- Heng, L.; Hsiao, T.; Evett, S.; Howell, T.; Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(2): 488-498.
- Hirose, T.; Kachi, N. (1982). Critical plant size for flowering in biennials with special reference to their distribution in a sand dune system. *Oecologia*. 55: 281-284.
- INIA. (2013). Quinoa INIA 433 - Santa Ana/ AIQ/ FAO. Recuperado de http://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/inia/514/1/Trip-Quinoa_INIA433.pdf
- IPCC. (2013). Cambio Climático 2013: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II Y III al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra.
- Jacobsen, S.; Nuñez, N.; Stolen, O. y Mujica, A. (1999). ¿Qué sabemos sobre la resistencia de la quinua a la sequía? CIP. Lima, Perú, p. 65-69.
- López, J. (2010). *Determinación de niveles económicos óptimos de uso de agua en la producción de maíz (Zea mays L.) usando el simulador de rendimientos desarrollado por la FAO AquaCrop Model*. Honduras.
- Mendoza, V. (2013). *Comparativo de accesiones de Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) en condiciones de Costa Central*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Meteocultura. (10 de octubre de 2018). Davis Vantage Pro2: Análisis, opiniones y comparativa. Recuperado de <https://estaciondemeteorologia.com/davis-vantage-pro2-estacion-meteorologica-profesional-analisis-y-opiniones/>

- MINAGRI (2012). Plan de Gestión de Riesgos y Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agrario Periodo 2012-2021. Recuperado de <http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/plangracc/plangracc.pdf>
- Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling. Zurich, Switzerland: Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management.
- Moriasi, D.; Arnold, J.; Van Liew, M.; Bingner, R.; Harmel, R.; Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
- Mujica, A.; Alipio, C.; Saravia, R. (2019). Capítulo II: Agronomía del cultivo de la Quinoa. Recuperado de http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior/segalim/prod_alim/prodveg/cdrom/contenido/libro03/cap2.htm
- Nelson, G.; Rosegrant, M.; Koo, J.; Robertson, R. (2009). El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Washington, EEUU: International Food Policy Research Institute. Washington.
- Ojeda, B.; Flores J. (2015). *Calendarización del riego: teoría y práctica. AquaCrop una herramienta para generar calendarios de riego*. México, p. 1-4.
- Parry, M.; Rosenzweig, C.; Iglesias, A.; Livermore, M.; Fischer, G. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1): 53-67.

PNUD. (2011). Formulando Escenarios de Cambio Climático para contribuir con estrategias de Desarrollo Adaptadas al Clima. Recuperado de: www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment.

PROINPA. (2011). La quinua, cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Recuperado de: http://www.ibce.org.bo/publicaciones/docu_rec.asp.

Reekie, E. (1997). *Tradeoffs between reproduction and growth influence time of reproduction*. New York, p. 191-202

Rodrigues, V.; Araújo, R.; Figueiredo, G.; Campos, C.; Cabral, J.; Pereira, E.; Morant, R. (2018). Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. *Campina Grande: Ciencia Rural*, 48 (1).

Rodríguez, J.; Riaño, N.; Van den, M.; Valdivia, R.; Boote, K.; Potyer, C.; Ruane, A. (2016). Informe del taller sobre Modelamiento para la Evaluación Regional de Cambio Climático y Agricultura en Latinoamérica y el Caribe (LAC). Colombia.

Saavedra, C. (2011). *Modelación de los efectos del cambio climático en tres zonas productoras de quinua (Chenopodium quinoa Wild.) del altiplano boliviano para identificar opciones de adaptación*. La Paz.

Sánchez, R. (2015). T-Student. Usos y abusos. *Revista mexicana de cardiología*. México

Salcedo, S. (2014). Estado del arte de la Quinua en el mundo en 2013. Santiago de Chile, Chile: FAO.

- SENAMHI. (2016). Vulnerabilidad Climática de los Recursos Hídricos en las cuencas de los Ríos Chillón, Rímac, Lurín y Parte Alta del Mantaro. Lima, Perú, p. 250
- SENAMHI. (2014). Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú. Lima, Perú: AMICAF.
- Silva, L.; Rgad, R.; Durane, I.; Lourenco, E.; Chaves, M. (2012). Calibration and validation of SALTMED model under dry and wet conditions using cickpea field data from Southern Portugal. *Irrigation science*, p. 203-210
- Soto, E. (2015). El mercado y la producción de Quinoa en el Perú. Lima, Perú. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Steduto, P.; Hsiao, T.; Fereres, E.; Raes, D. (2012). Yield reponse to water of herbaceous: the AquaCrop simulation model. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, (66): 16-242.
- Stewart, A. (2007). Measuring Canopy Coverage with Digital Imaging. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, (38): 7-8
- Tapia, M., y Fries, A. (2007). Guía de campo de los cultivos Andinos. FAO - ANPE-PERÚ.
- Vantage Pro. (2008). Vantage Pro 2 Console Manual, Euro Version. Hayward, EEUU: Davis Instruments Corp.
- Vergara, W.; Rios, A.; Trapido, P.; Malarín, H. (2014). Agricultura y Clima Futuro en América Latina y el Caribe: Impacto Sistemático y Posibles Respuestas, p. 1-9.
- Winter, E. (1981). El agua, el suelo y la planta. *Ed. Diana*. México, p. 49.

Yepes, A., y Silveira, M. (2011). Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (Revisión). *Colombia Forestal*, 14(2): 213-232.

Yzarra, W. y otros (2010). *Evaluación del efecto del clima en la producción y productividad del maíz amarillo duro en la costa del Perú*. Lima: SENAMHI, UNALM.

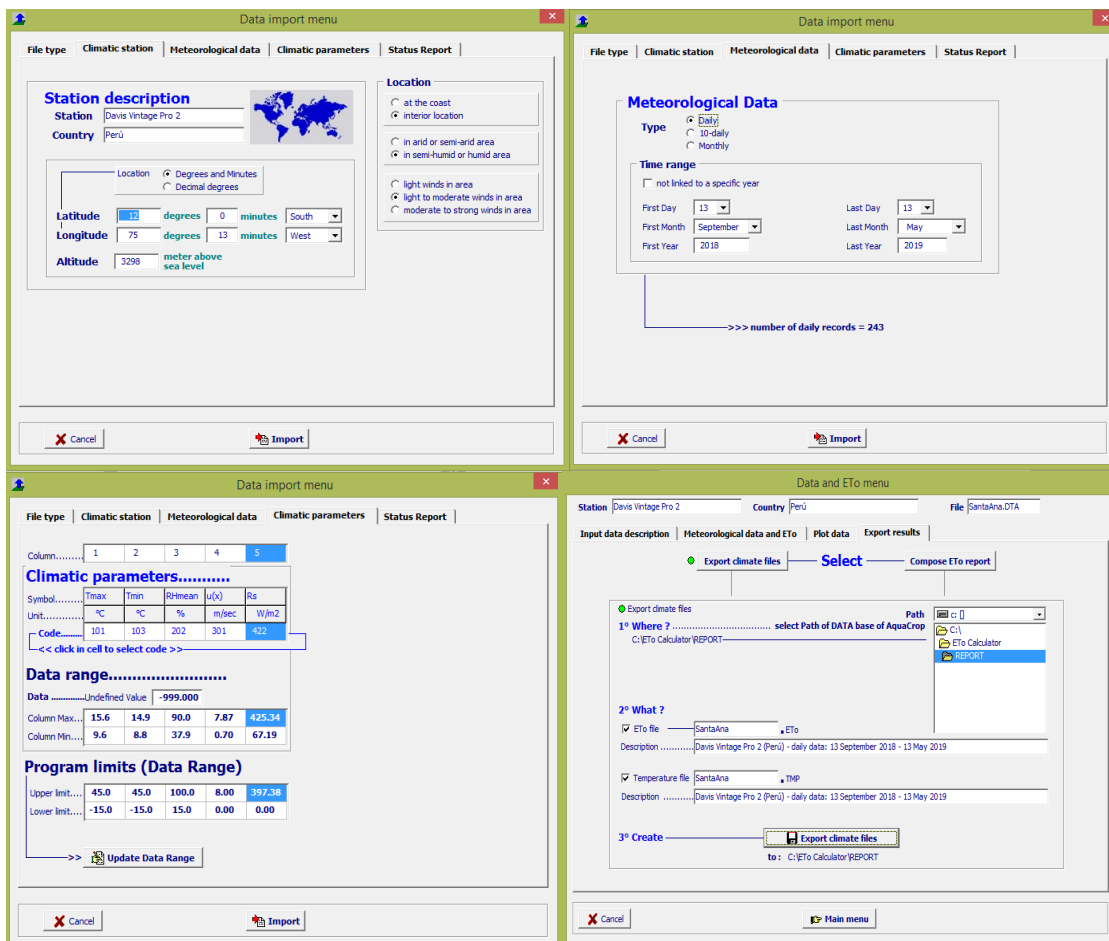
X. ABREVIATURAS

[CO ₂]:	Concentración en la atmósfera de dióxido de carbono [ppm]
BB:	Biomasa seca (t ha ⁻¹ o kg m ⁻²)
CC:	Cobertura del dosel
CCo:	Cobertura de dosel inicial después de la etapa de emergencia
CCx:	Máxima cobertura de dosel alcanzada
CDC:	Coefficiente de descenso del dosel
CGC:	Coefficiente del crecimiento del dosel
DDS:	Días después de la siembra
DI:	Riego deficitario
E:	Evaporación del suelo
ETo:	Evapotranspiración [mm por unidad de tiempo]
FAO:	Food and Agriculture Organization
FC:	Capacidad de campo
HI:	Índice de cosecha
I:	Infiltración
K exp:	Expansión del dosel
Kc:	Coefficiente del cultivo
Kcb:	Coefficiente basal del cultivo
Kcc:	Coefficiente de cultivo de cobertura
Ks:	Coefficiente de estrés
NRMSE:	Raíz del error cuadrático medio normalizado
P:	Factor de agotamiento de agua en el suelo
PM:	Punto de marchitez
Pp:	Precipitación o lluvia [mm]
R ² :	Coefficiente de correlación de determinación
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
Tmax:	Temperatura máxima [°C]
Tmin:	Temperatura mínima [°C]

Tr:	Transpiración del cultivo
WP:	Productividad del agua del cultivo para la biomasa
Wr:	Contenido de agua en el suelo de la zona radicular
X:	Lámina de riego [mm]
Y:	Rendimiento del cultivo [$t\ ha^{-1}$ p $kg\ ha^{-1}$]

XI. ANEXOS

Anexo 1. Entrada de los datos al ETo calculator de la estación ubicada en el Lote 30 de la EEA. Santa Ana – Huancayo



Anexo 2. Análisis del suelo enviado al laboratorio de suelos del INIA, para su caracterización fisicoquímico por tratamientos del Lote 30 de la EEA. Santa Ana – Huancayo



LABORATORIO DE SUELOS

ANÁLISIS COMPLETO DE SUELOS

NOMBRE: EE.A. SANTA ANA HUANCAYO FECHA: 14/09/2018
 DIRECCION: HUANCAYO MUESTRA: TESTIGO 01

Nº LAB.	C.E. mS/cm 1:2.5	pH 1:2.5	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	CaCO3 %	CATIONES INTERCAMBIABLES meq/100 gr suelo				CIC-E
								Ca	Mg	Na	K	
511-514	0.67	6.06	2.30	0.11	23	753	0	18.26	1.83	0.17	1.93	22.19

TEXTURA			
ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	CLASE
37.64	45.64	16.72	Franco

MICROELEMENTOS			
Fe ppm	Zn ppm	Cu ppm	B ppm
82.00	9.95	9.51	3.17

REACCIÓN DEL SUELO (pH) : Moderadamente ácido
 SALINIDAD (C.E.) : Sin peligro de sales
 MATERIA ORGANICA (M.O.) : Medio
 NITROGENO (N) : Medio
 FOSFORO DISPONIBLE (P) : Alto
 POTASIO DISPONIBLE (K) : Alto
 CARBONATO DE CALCIO (CaCO3): Sin presencia

HIERRO (Fe) : Normal
 ZINC (Zn) : Bajo
 COBRE (Cu) : Exceso
 BORO (B) : Exceso

SUGERENCIAS:

CULTIVO			
	N	P2O5	K2O
kg/ha			

OBSERVACIONES:

Proceder a fertilizar e incorporar aprox. 20 tm/ha de guano de aves, estiércol de vacuno, compost, humus de lombriz o guano de isla.

Anexo 3. Datos obtenidos de la simulación (p) en comparación con el observado (o) para su posterior análisis frente a los cuatro tratamientos de riego con relación al rendimiento.

HUANCAYO					
RENDIMIENTO	200 %	100 %	50 %	25 %	PROMEDIO
O	2.75	2.34	1.95	1.57	2.1525
P	2.507	1.951	1.19	1.764	1.853

HUALHUAS					
RENDIMIENTO	200 %	100 %	50 %	25 %	PROMEDIO
O	3.09	2.68	2.27	1.88	2.48
P	2.83	2.137	2.019	1.984	2.2425

ACOLLINA					
RENDIMIENTO	200 %	100 %	50 %	25 %	PROMEDIO
O	2.99	2.57	2.19	1.79	2.385
P	2.743	2.228	2.078	2.015	2.266

INIA-433					
RENDIMIENTO	200%	100%	50%	25%	PROMEDIO
O	3.35	2.95	2.54	1.89	2.6825
P	3.098	2.578	2.474	2.432	2.6455

Anexo 4. Datos obtenidos en la campaña 2018 para las cuatro variedades de quinua, donde se determinó el rendimiento

PLOT	VARIEDAD	PESO DE GRANOS POR PANOJA								PESO DE 1000 GRANOS		Área (m2)	Porcentaje de Humedad	Cantidad de humedad	Rendimiento seco(kg/ha)	PESO TOTAL POR PLOT (kg)	GRANOS POR M2				RENDIMIENTO DE GRANO SECO POR HÉCTAREA (Kg)/HA	RENDIMIENTO (Tr/hectaria)	INDICE DE COSECHA (IC)		
		GRANOS (HUMEDO)				GRANOS (SECO)				HUMEDO	SECO						TOTAL	HUMEDO	HUMEDO	SECO				TRIADO	A
		A	B	C	D	A	B	C	D																
HUALHUAS	T1	72.8	68.4	63.3	96.6	51.7	46.7	51.7	70	3.5	3	60.8	13	2.4	2.7	18.8	620.6	561	619.9	841.5	3090.2	3.09	40.7		
HUALHUAS	T2	67.5	75	74.4	92.4	60	53.3	60	83.3	3.3	2.8	60.8	15	2.4	2.3	16.3	651.5	580.7	644.5	901.3	2680.9	2.68	28		
HUALHUAS	T3	52	59.6	40.5	59.9	41.7	55	38.3	53.3	3.2	2.8	60.8	13.1	1.8	2	13.8	466	611.8	425.9	596.5	2267	2.27	36.6		
HUALHUAS	T4	52.7	41.9	37.1	52.8	41.7	30	36.3	45	3.4	2.8	60.8	17.2	2	1.6	11.4	481.5	337.2	411.9	518.4	1882.4	1.88	33.5		
ACOLLINA	T1	55.1	52.7	54.4	66.8	63.3	63.3	50	66.7	3.2	2.7	60.8	13.9	2.5	2.6	18.2	697.3	695.1	543.5	731.9	2993.3	2.99	29.9		
ACOLLINA	T2	50.6	62.7	60	85.7	66.7	50	75	103.3	3	2.6	60.8	12.5	2	2.3	15.7	701.7	521.5	789.8	1087.5	2574.6	2.57	32.3		
ACOLLINA	T3	29.4	52.1	43.7	40.6	31.3	46.7	38.3	35	2.9	2.5	60.8	12.9	1.7	1.9	13.3	308.2	460.5	398.9	358.2	2191.2	2.19	52.7		
ACOLLINA	T4	24.7	30.7	30.6	40.6	22.3	29.7	24.7	33.3	2.9	2.5	60.8	15.9	1.8	1.5	10.9	239.5	330.8	248.9	343.2	1793.2	1.79	54.4		
HUANCAYO	T1	39.6	39.2	33.4	36.3	33.3	31.7	33.3	71.7	2.9	2.5	60.8	13.7	2.3	2.4	16.7	339.3	321.3	340.9	737.3	2751.3	2.75	56.5		
HUANCAYO	T2	30.8	40.8	46.2	54.7	45	59.3	50	71.7	2.5	2.2	60.8	13.1	1.9	2	14.2	403.4	537.8	429.2	630.2	2342.1	2.34	34.3		
HUANCAYO	T3	49.8	35.1	26.8	24.8	46.7	31.3	26	21.7	2.6	2.3	60.8	12.6	1.5	1.7	11.8	462	289.9	234.3	204.7	1947.9	1.95	37.2		
HUANCAYO	T4	18.9	22.6	16.9	33.3	16.3	21.7	15	31.7	2.6	2.2	60.8	12.9	1.2	1.4	9.6	160.8	202.1	122.3	291.5	1573.3	1.57	99.4		
INIA-FAO-433	T1	120.1	76.4	134.7	144.1	108.3	65	125	105	4	3.3	60.8	16.1	3.3	2.8	20.4	1414.3	862.4	1665.1	1357.9	3351.8	3.35	21.7		
INIA-FAO-433	T2	100.6	85.7	96.2	113	50	68.3	71.7	56.7	3.5	3	60.8	14.7	2.6	2.5	17.9	583.2	806.8	846.5	668	2945.2	2.95	78.7		
INIA-FAO-433	T3	81	67.6	56.8	70	71.7	66.7	51.7	61.7	3.6	3.1	60.8	13.5	2.1	2.2	15.4	877.3	805.3	645.4	755.4	2537.1	2.54	23.3		
INIA-FAO-433	T4	47	38.4	65.1	59.6	42.7	43	56.7	53.3	3.2	2.8	60.8	11.3	1.3	1.7	11.5	536.4	496.6	700.3	668.3	1888.2	1.89	54.5		

Anexo 5. Datos obtenidos de la simulación (p) en comparación con el observado (o) para su posterior análisis frente a los cuatro tratamientos de riego con relación a los tres muestreos de biomasa

HUANCAYO	ULTIMO MUESTREO				SEGUNDO MUESTREO				PRIMER MUESTREO				PROMEDIO
O	8.1867	7.8506	5.6915	5.2886	5.6984333	4.3376333	4.8973333	2.4638667	1.0022667	0.7100667	0.4476667	0.4590667	3.91947778
P	7.446	5.896	5.527	5.378	5.411	4.279	3.887	3.763	1.028	0.709	0.707	0.741	3.731
HUALHUAS	HUALHUAS				HUALHUAS				HUALHUAS				PROMEDIO
O	9.209	7.086	6.196	5.5418	4.3847667	4.3350333	4.3329	3.4362	0.7716	0.7674667	0.5909667	0.343	3.91622778
P	8.334	6.32	5.983	5.884	5.219	3.638	3.615	3.608	1.31	0.612	0.519	0.498	3.795
ACOLLINA	ULTIMO MUESTREO				SEGUNDO MUESTREO				PRIMER MUESTREO				PROMEDIO
O	8.973	8.068	6.133	5.259	4.7790667	4.1947	3.8874667	3.0234333	0.8095	0.8694	0.4834	0.4480667	3.91066945
P	8.638	7.084	6.629	6.445	4.348	3.829	3.653	3.568	0.639	0.56	0.559	0.559	3.87591667
INIA-FAO 433	ULTIMO MUESTREO				SEGUNDO MUESTREO				PRIMER MUESTREO				PROMEDIO
O	7.315	7.876	5.727	5.038	5.2564667	5.0826	3.6131333	2.8601667	0.7964333	0.6669667	0.5852333	0.4822667	3.77493889
P	8.0167	6.821	6.556	6.482	5.24	4.301	4.2	4.1	0.87	0.776	0.775	0.774	4.075975