



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRONÓMICA



**SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DEL RENDIMIENTO DEL
CULTIVO DE QUINUA EN TRES ÉPOCAS DE SIEMBRA CON EL
USO DEL MODELO AQUACROP EN TARACO-PUNO**

TESIS

PRESENTADA POR:

STHEFANY YESICA, TISNADO YUNGA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

PUNO – PERÚ

2020



DEDICATORIA

La presente Tesis se la dedico a Dios por darme sabiduría y guiarme por el camino correcto para así alcanzar mis sueños y objetivos.

A mi querida madre Genara, por haberme apoyado en cada momento de mi vida, por todas las enseñanzas y valores que me ha inculcado, gracias mamá por todo tu esfuerzo, por permitirme ser profesional y brindarme el amor más puro e infinito, eres el mejor regalo que la vida y Dios me pudo dar.

A mi compañero de vida, con quien iniciamos un largo camino, siempre supiste brindarme paciencia, apoyo, aliento, constancia en momentos de alegría y dificultad, gracias por acompañarme en cada decisión que tomo.

Sthefany Tisnado



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias y la Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica, a sus docentes, su personal administrativo que siempre estuvieron dispuestos a apoyarme durante mi formación profesional.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Dirección de Agrometeorología, por brindarme el apoyo logístico y técnico durante la ejecución de mi trabajo de investigación.

A mi director D. Sc. Luis Alfredo Palao Iturregui, por su dirección, asesoría y aporte ofrecido durante, la elaboración del proyecto de tesis.

Al Ing. Wilfredo Yzarra Tito, especialista en agrometeorología y co-asesor del presente proyecto de investigación, por su comprensión, orientación, su tiempo y la asesoría brindada permitiendo un buen aprovechamiento en el trabajo realizado.

Con mucho afecto a Ing. Carmen Reyes e Ing. Bernardino Tapia, quienes desde un inicio depositaron la confianza en mi persona para la ejecución del presente trabajo de investigación.

A los distinguidos miembros del jurado M. Sc. Elisban Uriel Huanca Quiroz, M. Sc. Alberto Choquecota Riva e Ing. Julio Mendoza Maica, por sus sugerencias y correcciones del presente trabajo de investigación.

Sthefany Tisnado



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 12

ABSTRACT..... 13

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO GENERAL..... 15

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 15

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES..... 16

2.2 CULTIVO DE QUINUA..... 17

2.3 UBICACIÓN TAXONOMICA DEL CULTIVO 18

2.4 DESCRIPCIÓN BOTANICA DE LA PLANTA 18

2.4.1 Planta 18

2.4.2 Raíz 18

2.4.3 Tallo 19

2.4.4 Hoja..... 19

2.4.5 Inflorescencia..... 19

2.4.6 Flores 20

2.4.7 Fruto..... 20



2.4.8	Semilla	20
2.5	FENOLOGÍA DEL CULTIVO	20
2.5.1	Emergencia	20
2.5.2	Dos hojas verdaderas	21
2.5.3	Cuatro hojas verdaderas	21
2.5.4	Seis hojas verdaderas	21
2.5.5	Ramificación	21
2.5.6	Inicio de Panojamiento	22
2.5.7	Panoja.....	22
2.5.8	Inicio de Floración	22
2.5.9	Floración	22
2.5.10	Grano lechoso	23
2.5.11	Grano pastoso	23
2.5.12	Maduración Fisiológica	23
2.6	REQUERIMIENTO TÉRMICOS E HÍDRICOS DEL CULTIVO DE QUINUA	24
2.6.1	Suelo	24
2.6.2	pH.....	24
2.6.3	Clima.....	24
2.6.4	Agua.....	25
2.6.5	Temperatura	25
2.6.6	Radiación	25
2.6.7	Fotoperiodo	25
2.6.8	Altitud	26
2.7	MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS	26
2.7.1	Modelo agrometeorologico Aquacrop	27
2.7.2	Productividad del agua.....	30



2.7.3	Balance hídrico en la zona radicular.....	31
2.7.4	Simulación del desarrollo del cultivo	32
2.7.5	Simulación de cobertura vegetal.....	33
2.7.6	Simulación de la transpiración del cultivo.....	33
2.7.7	Simulación de la producción de Biomasa aérea	34
2.7.8	Simulación del rendimiento cosechable	34
2.7.9	Componentes para la modelación del Aquacrop	35

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	LUGAR DE EXPERIMENTO	39
3.1.1.	Ubicación política.....	39
3.1.2.	Ubicación geográfica.....	39
3.2	ANÁLISIS DE SUELO	40
3.3	CLIMATOLOGÍA	41
3.3.1.	Temperatura.....	41
3.3.2.	Precipitación:	41
3.3.3.	Registro histórico 10 años.....	42
3.4.	MATERIAL DE ESTUDIO.....	44
3.5.	MATERIAL DE CAMPO.....	45
3.6	METODOLOGÍA.....	46
3.6.1	Diseño estadístico	46
3.6.2	Distribución de parcelas y tratamientos.....	46
3.6.3	Épocas de siembra	47
3.6.4	Conducción del experimento	48
3.6.5	Variables evaluadas	49
3.6.6	Determinación de la cobertura vegetal	50
3.6.7	Determinación de la biomasa.....	51



3.6.8	Determinación de la evapotranspiración del cultivo.....	52
3.6.9	Calibración del modelo Aquacrop	53
3.6.10	Validación del modelo Aquacrop	56

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	EFFECTO DE TRES ÉPOCAS DE SIEMBRA EN EL RENDIMIENTO DE TRES VARIEDADES DEL CULTIVO DE QUINUA	58
4.1.1	Biomasa fresca del cultivo de quinua	58
4.1.2	Biomasa seca del cultivo de quinua	61
4.1.3	Altura de planta del cultivo de quinua	63
4.1.4	Diámetro de panoja del cultivo de quinua	66
4.1.5	Rendimiento de grano del cultivo de quinua	68
4.2	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP.....	71
4.2.1	Calibración del modelo Aquacrop para el cultivo de quinua.....	71
4.2.3	Validación del modelo Aquacrop para el cultivo de quinua.....	82
V.	CONCLUSIONES.....	90
VI.	RECOMENDACIONES	91
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
ANEXOS.....		96

ÁREA: Ciencias Agrícolas

TEMA: Cambio Climático y Agricultura

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 16 de enero de 2020.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema del modelo Aquacrop	30
Figura 2.	Esquema del balance hídrico: a) Balance hídrico del suelo, considerando los flujos de entrada (precipitación, riego y ascenso capilar) y los flujos de salida (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda) en los límites de la zona radicular, b) Perfil del suelo en 12 compartimentos.....	31
Figura 3.	Interfaz del modelo AquaCrop.....	35
Figura 4.	Imagen satelital del campo experimental – CO-Taraco.....	39
Figura 5.	Registro de temperaturas durante la campaña agrícola 2017-2018.	41
Figura 6.	Precipitación acumulada durante la campaña agrícola 2017-2018.	42
Figura 7.	Climodiagrama, campaña agrícola 2017-2018, Taraco	43
Figura 8.	Climodiagrama, periodo 10 años, campaña agrícola 2017-2018, Taraco... ..	44
Figura 9.	Distribución de parcelas experimentales.....	47
Figura 10.	Interfaz del software Image canopy	51
Figura 11.	Procesamiento de la cobertura vegetal.....	51
Figura 12.	Peso de materia fresca y materia seca.....	52
Figura 13.	Interfaz del software ETo Calculator	53
Figura 14.	Interfaz del modelo con todas las variables de la zona de estudio.	54
Figura 15.	Interfaz del modelo con el módulo módulo de “crop development” o desarrollo del cultivo	55
Figura 16.	Diferencias estadísticas respecto a biomasa fresca entre las épocas de siembra.....	60
Figura 17.	Diferencias estadísticas respecto a biomasa seca entre las épocas de Siembra. 63	
Figura 18.	Diferencias estadísticas respecto a altura de planta entre las épocas de Siembra	65
Figura 19.	Diferencias estadísticas respecto diámetro de panoja entre las épocas de S...	68



Figura 20. Diferencias estadísticas respecto a rendimiento entre épocas de siembra ..	70
Figura 21. Interfaz con la simulación de la calibración para la variedad Blanca de Juli.	78
Figura 22. Rendimientos simulados y observados de quinua, primera época de siembra.	79
Figura 23. Rendimientos simulados y observados de quinua, segunda época de siembra.	80
Figura 24. Rendimientos simulados y observados de quinua, tercera época de siembra.	81
Figura 25. Comparación de la cobertura foliar (%) para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, primera época de siembra	84
Figura 26. Comparación de la cobertura foliar (%) para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, segunda época de siembra.....	85
Figura 27. Comparación de la cobertura foliar (%) para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, segunda época de siembra.....	86
Figura 28. Diferencias estadísticas del rendimiento de quinua en la validación de la primera época de siembra.	87
Figura 29. Diferencias estadísticas del rendimiento de quinua en la validación de la primera época de siembra.	88
Figura 30. Diferencias estadísticas del rendimiento de quinua en la validación de la tercera época de siembra.	89



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Parámetros de entrada para la simulación del modelo Aquacrop	36
Tabla 2.	Caracterización físico químico del suelo del campo experimental.....	40
Tabla 3.	Análisis de varianza para la biomasa fresca del cultivo de quinua.....	59
Tabla 4.	Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para la biomasa fresca del cultivo de quinua.	60
Tabla 5.	Análisis de varianza para la biomasa seca del cultivo de quinua.....	61
Tabla 6.	Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para la biomasa seca del cultivo de quinua.....	62
Tabla 7.	Análisis de varianza para la altura de planta del cultivo de quinua.	64
Tabla 8.	Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para la altura de planta del cultivo de quinua.	65
Tabla 9.	Análisis de varianza para el diámetro de panoja del cultivo de quinua	66
Tabla 10.	Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para el diámetro del cultivo de quinua.....	67
Tabla 11.	Análisis de varianza para el rendimiento de grano del cultivo de quinua	69
Tabla 12.	Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para el rendimiento de grano del cultivo de quinua	70
Tabla 13.	Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para la primera época de siembra, variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA.	75
Tabla 14.	Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para la segunda época de siembra, variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA.	76
Tabla 15.	Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para la tercera época de siembra, variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA.	77
Tabla 16.	Resultados de los estadísticos de la evolución de la cobertura foliar (%) para tres variedades de quinua, campaña Agrícola 2017-2018, Taraco.	83



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

CC	: Cobertura del dosel verde (porcentaje o fracción)
CGC	: Coeficiente de crecimiento del dosel
CCo	: Cobertura del dosel inicial al 90 % de la emergencia
CCpot	: Cobertura del dosel potencial
CCx	: Cobertura del dosel máxima
Dr	: Agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular
ET	: Evapotranspiración
ETo	: Evapotranspiración de referencia
Hi	: Índice de cosechaX
Hlo	: Índice de cosecha de referencia
Kc	: Coeficiente de cultivo
Kcc	: Coeficiente de cobertura
Ky	: Factor de respuesta de rendimiento
RAW	: Agua fácilmente aprovechable de la zona radicular del suelo
TAW	: Agua disponible total en el suelo (entre la capacidad de campo y el punto
Tr	: Transpiración del cultivo
WP	: Productividad del agua del cultivo para la biomasa (toneladas de biomasa por ha y por mm de agua transpirada o kg de biomasa por m ² de agua transpirada)
Y	: Rendimiento (tn/h o kg/ha)



RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el distrito de Taraco durante la campaña agrícola 2017-2018 con la finalidad de determinar el efecto de tres épocas de siembra en el rendimiento del cultivo de quinua; asimismo calibrar y validar el modelo Aquacrop. El diseño experimental fue un diseño completamente al azar, también se utilizó el software Aquacrop para simular rendimientos observados y simulado. Obteniendo así la primera época (25 de octubre) como la mejor época de siembra con un mejor comportamiento respecto a diámetro de planta 18.6 cm, altura promedio de 163.3 cm y un rendimiento de 3.28 tn/ha; por otra parte el modelo AquaCrop simulo la calibración con suficiente robustez obteniendo rendimientos para la primera época la variedad Blanca de Juli con 3.34 tn/ha y simulado de 3.09 tn/ha; para la segunda época la variedad Blanca de Juli con 2.90 tn/ha y simulado la variedad Salcedo INIA con 2.50 tn/ha; para la tercera época de siembra la variedad Blanca de Juli con 1.56 tn/ha y simulado la variedad Salcedo INIA con 1.15 tn/ha, resultando estos los valores más altos de la campaña agrícola; respecto a la validación se obtuvieron índices estadísticos óptimos para la variedad Pasankalla, resultando el coeficiente “r” con valores entre 0,91 y 0,97; el “RMSE” entre 16.59 y 19.94; el “d” entre 0,95 y 0,98 y el “EF” entre 0,76 y 0,93; la variedad Salcedo INIA, el coeficiente “r” se encuentra entre 0,90 y 0,95, el “RMSE” entre 13.55 y 18.77; el “d” entre 0,96 y 0,98 y el “EF” entre 0,82 y 0,92 y por último la variedad Blanca de Juli, el coeficiente “r” se encuentra entre 0,92 y 0,95; el “RMSE” entre 8.55 y 19.78; el “d” entre 0,96 y 0,97 y el “EF” entre 0,81 y 0,85.

Palabras Clave: AquaCrop, Calibración, Simulación, Validación.



ABSTRACT

This research work was developed in the district of Taraco during the 2017-2018 agricultural campaign in order to determine the effect of three sowing times on the yield of the quinoa crop; also calibrate and validate the Aquacrop model. The experimental design was a completely randomized design, the Aquacrop software was also used to simulate observed and simulated yields. Thus obtaining the first season (October 25) as the best planting season with a better performance regarding plant diameter 18.6 cm, average height of 163.3 cm and a yield of 3.28 tn/ha; On the other hand, the AquaCrop model simulated the calibration with sufficient robustness, obtaining yields for the first season of the Blanca de Juli variety with 3.34 tn/ha and a simulated 3.09 tn/ha; for the second season, the Blanca de Juli variety with 2.90 tons/ha and simulated the Salcedo INIA variety with 2.50 tons/ha; for the third sowing season, the Blanca de Juli variety with 1.56 tn/ha and simulated the Salcedo INIA variety with 1.15 tn/ha, resulting in the highest values of the agricultural campaign; Regarding the validation, optimal statistical indices were obtained for the Pasankalla variety, resulting in the coefficient "r" with values between 0.91 and 0.97; the "RMSE" between 16.59 and 19.94; the "d" between 0.95 and 0.98 and the "EF" between 0.76 and 0.93; the Salcedo INIA variety, the "r" coefficient is between 0.90 and 0.95, the "RMSE" between 13.55 and 18.77; the "d" between 0.96 and 0.98 and the "EF" between 0.82 and 0.92 and finally the Blanca de Juli variety, the coefficient "r" is between 0.92 and 0.95; the "RMSE" between 8.55 and 19.78; the "d" between 0.96 and 0.97 and the "EF" between 0.81 and 0.85.

Key Words: AquaCrop, Calibration, simulation, Validación



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En el Altiplano se prevé una variación en la estacionalidad de las precipitaciones que puede afectar el cultivo de la quinua, por lo que se requerirá buscar variedades de ciclo corto y promover la adopción de tecnologías de riego más eficientes para paliar los efectos de la escasez hídrica en la época de siembra (Sánchez y Olave, 2019), así como establecer una fecha de siembra oportuna garantiza rendimientos superiores, aumentando la productividad y mejoras en los ingresos de los productores. La agricultura de montaña depende mucho de la temporalidad de lluvias, los escasos de precipitación pluvial pueden ser fatal para los cultivos andinos (Castillo *et al.*, 2019), ante este panorama la respuesta del productor agrícola ante la variabilidad agroclimática es relevante, así como las medidas de adaptación tienen que resultar efectivas para mantener la productividad agrícola en condiciones de cambio climático. (Ahumada *et al.*, 2014)

La quinua se constituye como un cultivo estratégico para contribuir a la seguridad y soberanía alimentaria debido a su calidad nutritiva, su amplia variabilidad genética y su adaptabilidad (FAO, 2011). La generación de nuevos datos a través de métodos de investigación agronómicos tradicionales y su publicación no son suficientes para satisfacer las necesidades crecientes de información para la producción (Rojas *et al.*, 2004). Las decisiones estratégicas y tácticas tales como; cuándo plantar, regar, cómo y cuándo fertilizar y cuándo cosechar, son frecuentemente tomadas en base a supuestos empíricos, en base a los años de experiencia del agricultor e investigadores. Este desafío se vuelve cada vez más difícil de manejar, en un contexto donde las operaciones agrícolas aumentan en tamaño y complejidad (Jones, 2003).



Fleisher (2009), menciona que un modelo de simulación para el crecimiento de cultivos podría ser utilizado como una ayuda para la toma de decisiones a fin de determinar diferentes tasas de rendimiento en función de factores tales como; la variación de las poblaciones de plantas, tasas de aplicación de nitrógeno entre otros factores, lo que podría ayudar a un agricultor a decidir cuándo plantar, replantar las áreas dentro de un campo, cómo gestionar la tasa de aplicación de nitrógeno. Actualmente, las computadoras personales son ampliamente disponibles, existe un esfuerzo entre los investigadores en agricultura de proveer herramientas para ayudar a los productores y técnicos a manejar y sintetizar información. (Graeff *et al.*, 2012) La principal razón para usar herramientas informáticas como el caso de modelos computacionales es incrementar el beneficio y optimizar el manejo de los recursos, además de profundizar en el conocimiento sobre la respuesta de los cultivos a los factores ambientales (Ahuja *et al.*, 2002), Por lo que en el presente trabajo de investigación se planteó alcanzar los siguientes objetivos:

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Simular la respuesta del rendimiento del cultivo de quinua en tres épocas de siembra con el uso del modelo AQUACROP bajo las condiciones del distrito de Taraco-Puno.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el efecto de tres épocas de siembra en el rendimiento de tres variedades del cultivo de quinua.
- Calibrar y validar el modelo de simulación AQUACROP en el rendimiento del cultivo de quinua.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

Fajardo *et al.*, (2016) realizó el estudio que aborda la calibración y validación del modelo Aquacrop, bajo condiciones de un enfoque semi-cuantitativo para simular el cultivo de quinua en el Altiplano Boliviano bajo restricciones integradas de nutrientes y agua, obteniendo un comportamiento adecuado para las condiciones de producción de quinua y comprobando que el modelo puede ser aplicado con niveles de certidumbre, bajo diferentes niveles de fertilidad en varias condiciones ambientales obteniendo valores de RMSE entre 18.77 % a 39.89 %, mencionando que no se requiere la información detallada del contenido de nutrientes en el suelo, haciéndolo útil y aplicable para su uso en condiciones locales donde la información de suelos es limitada.

Borda (2011), señala que la productividad de quinua se expresa directamente en el rendimiento en función a la interacción de diversos factores térmicos e hídricos como: la temperatura, requerimiento hídrico, fertilidad, propiedades físicas de los suelos y por último al material genético. Encontrando rendimientos promedio para tres variedades de quinua (2051 – 1705 Kg/ha), donde resalta la variedad Sajama con el valor más alto e Inti Nayra el más bajo, mediante la simulación de los rendimientos para las tres variedades con el software AQUACROP, se evidenció que los rendimientos pronosticados son similares a los reales.

Alavi *et al.*, (2015) en el estudio de Simulación de la producción de Quinua en el Altiplano Boliviano con el modelo de Aquacrop con escenarios futuros generados por LARS-WG y QMP en las localidades de Patacamaya y Rio Mulatos, menciona que las



temperaturas máximas y mínimas se incrementan más en RCPs que en SREs, para los años 2030s y 2090s. Resaltando que la precipitación mensual no mostró cambios significantes durante la época seca y el número de días con heladas se reducen generando las probabilidades de periodos de helada que pueden dañar a la quinua (-3°C). AquaCrop estima que el ciclo promedio se reduciría en todas las localidades y escenarios. Además, indicaron que si las condiciones de manejo en el campo (riego a secano, poca fertilidad, etc.) son similares a las actuales la producción no varía mucho para SRE. Sin embargo para RCPs, en Patacamaya y Rio Mulatos la producción se reduciría en un rango de 0,1 a 0,2 Mg ha⁻¹.

2.2 CULTIVO DE QUINUA

FAO (2000), la quinua es una planta herbácea anual de amplia dispersión geográfica; presenta características peculiares en su morfología, coloración y comportamiento en diferentes zonas agroecológicas donde se cultiva, fue utilizada como alimento desde tiempos inmemoriales. Se calcula que su domesticación ocurrió hace más de 7 000 años antes de Cristo, su período vegetativo varía desde los 90 hasta los 240 días presenta enorme variación y plasticidad para adaptarse a diferentes condiciones ambientales, se cultiva desde el nivel del mar hasta los 4 000 msnm, desde zonas áridas, hasta zonas húmedas y tropicales, desde zonas frías hasta templadas y cálidas; muy tolerante a los factores abióticos adversos como son sequías, heladas, salinidad de suelos y otros que afectan a las plantas cultivadas (Mujica, *et al.*, 2013).



2.3 UBICACIÓN TAXONOMICA DEL CULTIVO

La quinua está ubicada taxonómicamente de la siguiente forma (Mujica, 2001).

División	:	Fanerógamas
Clase	:	Dicotiledóneas
Sub-clase	:	Angiospermas
Orden	:	Centrospermales
Familia	:	Chenopodiaceae
Género	:	Chenopodium
Sección	:	Chenopodia
Subsección	:	Cellulata
Especie	:	Chenopodium quinoa Willd.

2.4 DESCRIPCIÓN BOTANICA DE LA PLANTA

2.4.1 Planta

La quinua es una planta herbácea anual, dicotiledónea de amplia dispersión geográfica, con características peculiares en su morfología, coloración y comportamiento en diferentes zonas agroecológicas donde se cultiva (Apaza *et al.*, 2013).

2.4.2 Raíz

Es pivotante, vigorosa, profunda, bastante ramificada y fibrosa, la cual posiblemente le da resistencia a la sequía y buena estabilidad a la planta, se diferencia fácilmente la raíz principal de las secundarias que son en gran número, que confiere una apariencia de una gran cabellera variando con el tipo de suelo donde crece (Mujica *et al.*, 2013).



2.4.3 Tallo

Es cilíndrico y a medida que se aleja del suelo se vuelve anguloso, la corteza es firme y compacta formada por tejidos fuertes y lignificados, en los tallos jóvenes la médula es suave y cuando madura la médula es esponjosa y seca (Gómez y Aguilar, 2016).

2.4.4 Hoja

La lámina de la hoja tiene tres venas principales que se originan del peciolo, son más grandes en el follaje, más pequeñas en la inflorescencia y son polimórficas en la misma planta. Las hojas y las partes tiernas de la planta están generalmente cubiertas con una pubescencia vesicular, granular blanca, rosada o púrpura. Esta pubescencia granular contiene oxalato de calcio capaz de absorber agua del medio ambiente e incrementar la humedad relativa de la atmósfera, influenciando el comportamiento de las células guarda de las estomas; por lo tanto, en la transpiración (Gómez y Aguilar, 2016).

2.4.5 Inflorescencia

Es una panoja típica, constituida por un eje central, secundarios, terciarios y pedicelos que sostienen a los glomérulos así como por la disposición de las flores y por qué el eje principal está más desarrollado que los secundarios, ésta puede ser laxa (Amarantiforme) o compacta (glomerulada), existiendo formas intermedias entre ambas, la longitud de la panoja es variable, dependiendo de los genotipos, tipo de quinua, lugar donde se desarrolla y condiciones de fertilidad de los suelos (Mujica *et al.*, 2013).



2.4.6 Flores

Es una especie ginomonoica, es decir, tiene flores hermafroditas y pistiladas en la misma inflorescencia, las cuales puede ser sésiles o pistiladas y están agrupadas en glomérulos. La posición del glomérulo en la inflorescencia y la posición de las flores dentro del glomérulo, determinan el tamaño y el número de los granos o frutos (Gómez y Aguilar, 2016).

2.4.7 Fruto

Es un aquenio, tiene forma cilíndrica-lenticular, levemente ensanchado hacia el centro. Está constituido por el perigonio que envuelve a la semilla por completo, y contiene una sola semilla, de coloración variable (Apaza *et al.*, 2013).

2.4.8 Semilla

Presenta tres partes bien definidas que son: epispermo, embrión y perispermo. El epispermo, es la capa que cubre la semilla y está adherida al pericarpio. El embrión, está formado por dos cotiledones y la radícula que constituye aproximadamente, el 30% del volumen total de la semilla y envuelve al perispermo como un anillo (Gómez y Aguilar, 2016).

2.5 FENOLOGÍA DEL CULTIVO

2.5.1 Emergencia

La plántula sale del suelo y extiende las hojas cotiledonales y se observa en el surco las plántulas en forma de hileras nítidas, ocurre de los 7 a 10 días de la siembra (de acuerdo a la variedad). Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de las platas ha emergido (SENAMHI, 2014).



2.5.2 Dos hojas verdaderas

Cuando las hojas cotiledonales tienen forma lanceolada, aparecen dos hojas verdaderas extendidas que ya poseen forma romboidal y se encuentra en botón del siguiente par de hojas. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de la población tiene las dos hojas verdaderas (SENAMHI, 2014).

2.5.3 Cuatro hojas verdaderas

Se observa dos pares de hojas verdaderas extendidas y aún están presentes las hojas cotiledonales de color verde, encontrándose el botón foliar de las siguientes hojas en el ápice. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de la población tiene las cuatro hojas verdaderas (SENAMHI, 2014).

2.5.4 Seis hojas verdaderas

En esta fase se observan tres pares de hojas verdaderas extendidas y las hojas cotiledonales se tornan de color amarillento. En esta fase se nota claramente una protección del ápice vegetativo por las hojas más adultas, especialmente cuando la planta está sometida a bajas temperaturas, stress por déficit hídrico o salino. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de la población tiene las cuatro hojas verdaderas (SENAMHI, 2014).

2.5.5 Ramificación

Se observa ocho hojas verdaderas extendidas con presencia de hojas axilares hasta el tercer nudo. Se nota presencia de inflorescencia protegida por las hojas sin dejar al descubierto la panoja. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de la población se encuentra en la fase de ramificación (SENAMHI, 2014).



2.5.6 Inicio de Panojamiento

La inflorescencia va emergiendo del ápice de la planta, observándose alrededor aglomeración de hojas pequeñas, las cuales van cubriendo a la panoja en sus tres cuartas partes. Se aprecia un amarillamiento del primer par de hojas verdaderas y se produce una fuerte elongación del tallo, así como engrosamiento. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de la población se encuentra en inicio de panojamiento (SENAMHI, 2014)

2.5.7 Panoja

La inflorescencia sobresale con claridad por encima de las hojas, notándose los glomérulos que la conforman. Se puede observar en los glomérulos de la base los botones florales individualizados. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de la población se encuentra en panojamiento (SENAMHI, 2014).

2.5.8 Inicio de Floración

La flor hermafrodita apical se abre mostrando los estambres separados. Fase bastante sensible a la sequía y heladas; se puede notar en los glomérulos las anteras protegidas por el perigónio de un color verde limón. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales cuando el 50% de la población se encuentra en inicio de floración (SENAMHI, 2014).

2.5.9 Floración

La floración es cuando el 50% de las flores de la inflorescencia se encuentran abiertas. Esta fase es muy sensible a las heladas, pudiendo resistir solo hasta $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, debe observarse la floración a medio día, ya que en horas de la mañana y al atardecer se encuentran cerradas (SENAMHI, 2014).



2.5.10 Grano lechoso

La fase de grano lechoso es cuando los frutos que se encuentran en los glomérulos de la panoja, al ser presionados explotan y dejan salir un líquido lechoso. En esta fase el déficit hídrico es sumamente perjudicial para el rendimiento, disminuyéndolo drásticamente la producción. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales contando el número de plantas de cada parcela experimental que cumplan esta característica (SENAMHI, 2014).

2.5.11 Grano pastoso

La fase de grano pastoso es cuando los frutos al ser presionados presentan una consistencia pastosa de color blanco. Ataque de la segunda generación de Kcona Kcona (*Eurisacca spp*) causa daños considerables al cultivo, formando nidos y consumiendo el grano. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales contando el número de plantas de cada parcela experimental que cumplan esta característica (SENAMHI, 2014).

2.5.12 Maduración Fisiológica

Grano formado al presionar con las uñas, presenta resistencia a la penetración. El contenido de humedad del grano varía de 14 a 16%, el lapso comprendido de la floración a la madurez fisiológica viene constituir el período de llenado del grano. En esta etapa ocurre un amarillamiento completo de la planta y una gran defoliación. Esta observación se realiza visualmente en los surcos centrales contando el número de plantas de cada parcela experimental que cumplan esta característica (SENAMHI, 2014).



2.6 REQUERIMIENTO TÉRMICOS E HÍDRICOS DEL CULTIVO DE QUINUA

2.6.1 Suelo

La quinua prefiere un suelo franco, con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica, con pendientes moderadas y un contenido de nutrientes, puesto que es exigente en nitrógeno y calcio, moderadamente en fósforo y poco de potasio. También puede adaptarse a suelos francos arenosos, arenosos o franco arcilloso siempre que se le dote de nutrientes y no exista la posibilidad de encharcamiento del agua puesto que es muy susceptible al exceso de humedad sobre todo en los primeros estadios (FAO, 2000).

2.6.2 pH

El pH del suelo debe ser neutro o ligeramente alcalino, aunque algunas variedades procedentes de los salares en Bolivia, pueden soportar hasta pH 8, demostrando su carácter halófito; asimismo se ha encontrado quinua de suelos ácidos (pH 4,5) en Michiquillay y Cajamarca, Perú (Mujica *et al.*, 2013).

2.6.3 Clima

En cuanto al clima, la quinua por ser una planta muy plástica y tener amplia variabilidad genética se adapta a diferentes climas desde el desértico, caluroso y seco en la costa hasta el frío y seco de las grandes altiplanicies, pasando por los valles interandinos templados y lluviosos, llegando incluso hasta ceja de selva con mayor humedad relativa y sorprendentemente a la puna y zonas de grandes altitudes, por ello es necesario conocer que genotipos son los adecuados para cada una de las condiciones climáticas.

Su resistencia ontogénica a la sequía y al frío es muy variable pudiendo encontrar ecotipos que resisten a -8 °C y sobrevivir a 20 días a punto de marchitez permanente; así mismo la quinua muestra adaptación a varios fotoperiodos desde requerimientos de días



cortos para su florecimiento cerca del Ecuador hasta su insensibilidad a las condiciones de luz para su desarrollo en Chile (Mujica *et al.*, 2013).

2.6.4 Agua

La quinua es eficiente en el uso de agua, a pesar de ser una planta C3, puesto que posee mecanismos morfológicos, anatómicos, fenológicos y bioquímicos que le permiten no solo escapar al déficit de humedad, sino tolerar y resistir a la falta de humedad del suelo, a la quinua se le encuentra creciendo y dando producciones aceptables con precipitaciones mínimas de 200-250 mm anuales (Cárdenas, 1999). En el altiplano central una planta de quinua requiere 385 mm de agua para el periodo de 5.5 meses de crecimiento que es la cantidad aproximada de precipitación en la época húmeda de su área de producción (Tapia, 2014).

2.6.5 Temperatura

La quinua tolera un amplio rango de temperaturas, no siendo afectada por temperaturas ligeramente bajo 0 °C, excepto durante la formación de las flores, ya que las heladas esterilizan el polen, y puede tolerar altas temperaturas, pero no por encima de los 35 °C (Castillo y Bosque, 2013).

2.6.6 Radiación

La quinua soporta radiaciones extremas de las zonas altas de los andes, sin embargo, estas altas radiaciones permiten compensar las horas calor necesarias para cumplir con su periodo vegetativo y productivo (Frere, 1975)

2.6.7 Fotoperiodo

El fotoperiodo de la quinua es variable según indica (León, 2003), que el fotoperiodo de la quinua depende de su lugar de origen: Variedades que viene cerca de la



línea ecuatorial son cultivos de días cortos en dos aspectos de su desarrollo, necesitan por lo menos 15 días cortos (< que 10 horas de luz) para inducir la floración y también para la maduración de los frutos.

En este cultivo prospera adecuadamente con 12 horas de luz por día en el hemisferio sur, sobre todo en el altiplano Perú – Bolivia.

2.6.8 Altitud

La quinua se adapta desde el nivel del mar hasta más de 4000 m.s.n.m. sin embargo, el rango óptimo de desarrollo está entre los 2500 y 4000 m.s.n.m. (FAO, 2000).

2.7 MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS

Un modelo de simulación de cultivo representa de manera sencilla y sintética los procesos fisiológicos más importantes que gobiernan el crecimiento de la planta, utilizando ecuaciones matemáticas (Guevara, 2007), mediante parámetros y variables que interactúan entre sí. En general contienen un conjunto de ecuaciones que estiman la tasa de producción de biomasa y rendimiento a partir de los recursos capturados, como el dióxido de carbono, la radiación solar y el agua (Azam, Crout, y Bradley, 1994).

Los modelos de simulación de cultivos pueden ser útiles para diferentes propósitos; principalmente, interpretan los resultados experimentales y funcionan como herramientas de investigación agronómica para la síntesis del conocimiento de la investigación y como apoyo a la toma de decisiones en la gestión del sistema agrícola. (Steduto *et al.*, 2009); asimismo, permiten plantear prácticas óptimas de manejo en el cultivo, como la fecha de siembra, la selección de cultivares, la fertilización o el uso de agua y pesticidas (Boote *et al.*, 1996).



Según Steduto *et al.* (2012), los modelos de crecimiento de cultivo se pueden clasificar en: (i) impulsados por carbono, (ii) impulsados por radiación e (iii) impulsados por agua. Los modelos impulsados por agua establecen una relación lineal entre la tasa de crecimiento y la producción de la biomasa, en donde el principal parámetro es la productividad del agua (WP*). Bajo diversas condiciones climáticas, entre los modelos que relacionan el crecimiento y desarrollo del cultivo con el volumen de agua aplicada, así como con la nutrición, erosión, y salinidad se destacan los siguientes: EPIC, ALMANAC, APSIM, CROPGRO, DSSAT, ORYZA 2000 (Geerts, 2009), CropSyst, Aquacrop, etc. Muchos de estos modelos requieren un alto nivel de detalle en cuanto a los parámetros de entrada, por ello se han desarrollado estrategias para simplificar la descripción de algunos procesos fenológicos y fisiológicos, con la finalidad de facilitar la calibración y validación en cualquier lugar del mundo (Fernández, 2013).

2.7.1 Modelo agrometeorológico Aquacrop

AquaCrop es un modelo descriptivo, desarrollado por la División de Tierra y Agua de la FAO, que simula la biomasa y el rendimiento potencial cosechable de un cultivo en función a la disponibilidad de agua (Fernández, 2013). AquaCrop también permite la simulación de la respuesta del rendimiento al agua bajo diferentes condiciones de manejo agrícola y ambiental, considerándose muy útil cuando el agua es el factor limitante, además permite determinar épocas de siembra óptimas de acuerdo a las condiciones de clima, suelos, cultivo y manejo de campo. (Steduto *et al.*, 2012).

El modelo ha sido utilizado para simular el crecimiento de diversos cultivos incluyendo algodón, maíz, trigo, cebada, girasol, tomate, papa y quinua y ha sido validado en diversas locaciones en el norte de América, Europa, sur y este de África; estudios que consiguieron simular satisfactoriamente los rendimientos de los cultivos y la producción



de biomasa, la productividad del agua del suelo bajo condiciones de secano, riego completo, deficitario y estrés por fertilidad del suelo (Steduto *et al.*, 2012).

Steduto *et al.* (2012) describen como FAO, a finales de los años setenta, abordó la relación entre el rendimiento del cultivo y el uso del agua proponiendo una ecuación sencilla que relacionaba la respuesta del rendimiento a la evapotranspiración como se expresa a continuación:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = Ky \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right)$$

Ecuación (1)

Dónde: Y_x y Y_a son los rendimientos máximo y real, ET_x y ET_a son la evapotranspiración máxima y real, y Ky es el factor de la respuesta del rendimiento que representa el efecto de una disminución de la evapotranspiración sobre las pérdidas del rendimiento.

La separación de ET en Tr y E evita el efecto de confusión del uso no productivo del agua, que es importante especialmente durante la cobertura incompleta del suelo, y condujo a la ecuación conceptual en el núcleo del motor de crecimiento Aquacrop.

$$\mathbf{B} = \mathbf{WP}_b * \Sigma \mathbf{Tr} \quad \text{Ecuación}$$

(2)

Dónde: B es la biomasa acumulada producida (kg por m), Tr es la transpiración del cultivo (mm o m³ por unidad de superficie), con la suma respecto al tiempo en el que se produce la biomasa; y WP_b es el parámetro de productividad del agua de biomasa.

En la mayoría de los cultivos, sólo una parte de la biomasa producida se destina a la producción del rendimiento (Y), y la relación entre el rendimiento del cultivo y la biomasa se conoce como índice de cosecha (HI), por tanto:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{HI} * \mathbf{B} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Los procesos subyacentes que culminan en B y HI se diferencian claramente entre sí. En consecuencia, la separación del Y en B y HI permite considerar los efectos de las condiciones ambientales y el estrés en B y HI por separado.

Llegando a la conclusión que el modelo trabaja en función del agua disponible para realizar la simulación de biomasa y posteriormente del rendimiento cumpliendo el suelo la función de un reservorio de agua donde los registros de ingresos y egresos de agua al sistema permitirán calcular posteriormente el volumen de agua retenido y disponible en la zona radicular (Fernández, 2013).

Según las ecuaciones 1, 2 y 3 se muestra la relación entre cultivo-agua-rendimiento y esta ha sido mejorada desde 1979. (Steduto *et al.*, 2007).

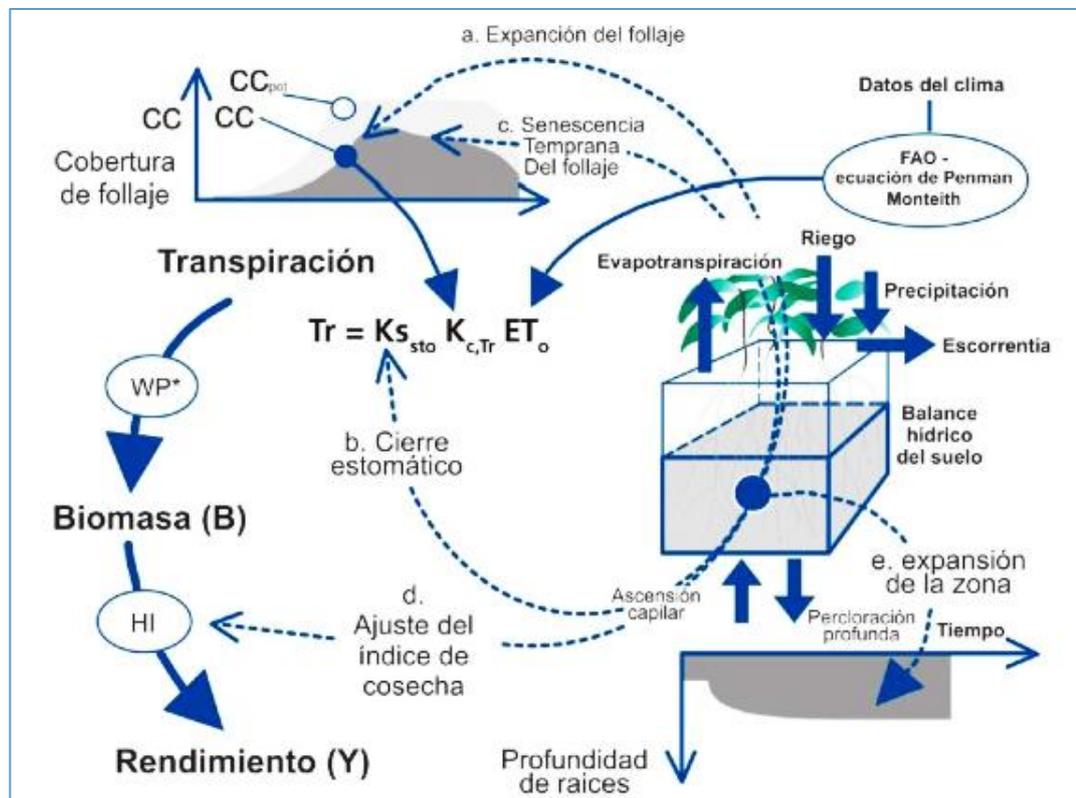


Figura 1. Esquema del modelo Aquacrop

Fuente: Steduto *et al.* (2012)

2.7.2 Productividad del agua

El modelo, al trabajar en función del agua disponible para la simulación de biomasa y el rendimiento (Fernández 2013), toma como referencia para la simulación la eficiencia en el uso del agua para la producción. Para ello se hace una distinción en la productividad del agua en dos criterios expuestos a continuación.

- La productividad del agua con relación a la biomasa total (WP), hace referencia a las unidades de biomasa que puede llegar a ser producida por unidad de agua transpirada por la planta. Es expresada en kilogramos de biomasa por metro cubico de agua transpirada.

- La relación entre el producto cosechado y la evapotranspiración es denominada Productividad de agua Evapotranspirada, este se interpreta entre la obtención de rendimiento alcanzado en kilogramos de producto cosechado por agua evapotranspirada.

2.7.3 Balance hídrico en la zona radicular

El suelo ocupado por el sistema radicular cumple la función de un reservorio de agua. Al mantener un registro de los ingresos (lluvia, riego, ascenso capilar) y egresos (escorrentía superficial, evapotranspiración, percolación profunda) de agua al sistema se consigue calcular el volumen de agua retenido en la zona radicular (Steduto *et al.* 2009).

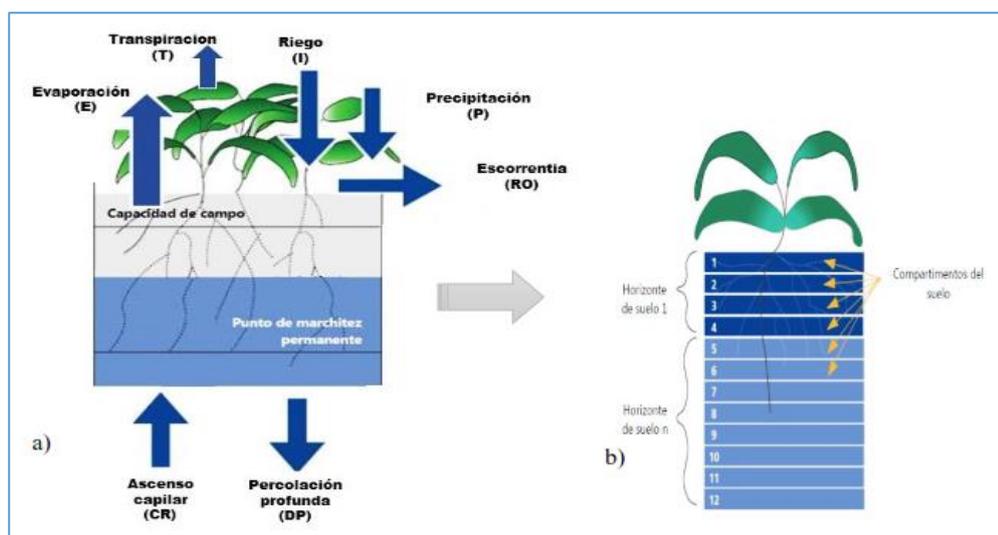


Figura 2. . Esquema del balance hídrico: a) Balance hídrico del suelo, considerando los flujos de entrada (precipitación, riego y ascenso capilar) y los flujos de salida (escorrentía, evapotranspiración y percolación profunda) en los límites de la zona radicular, b) Perfil del suelo en 12 compartimentos.

Fuente: Porras, Z (2019).



2.7.4 Simulación del desarrollo del cultivo

Según Steduto, *et al.* (2009), AquaCrop no realiza la simulación del índice de área foliar, sino el desarrollo del follaje el cual se expresa como la cobertura del dosel (CC), la fracción de la superficie del suelo cubierto por el dosel varía entre 0 (antes de la emergencia) a un máximo (CCX), que puede estar cerca del 100%, esto depende del tipo de cultivo y la densidad de siembra; asimismo, menciona que la cobertura es una característica crucial de AquaCrop. Debido a que la expansión, el envejecimiento, la conductancia y senescencia son las claves determinantes de la cantidad de agua transpirada, que a su vez determina la cantidad de biomasa producida.

El desarrollo del dosel para condiciones no limitantes (CC_{pot}) se basa en el uso de tres parámetros: la cobertura del dosel inicial después de la emergencia (CCO), la máxima cobertura del dosel alcanzada (CCX), y el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) (Steduto *et al.*, 2009).

Después de haber alcanzado el inicio de la senescencia del dosel, la disminución de la cobertura de dosel (CC) se simula con un coeficiente de decaída del dosel (CDC) y cuando el agotamiento de humedad en la zona radicular (D_r) cae por debajo de los umbrales de agua, el estrés afecta a la expansión del dosel, la K_s para la expansión del dosel ($K_s \text{ exp}$) empieza a caer por debajo de uno para reducir la CGC efectiva, y el desarrollo del dosel se ralentiza por ultimo cuando la zona radicular alcanza la parte superior del umbral por la senescencia acelerada dosel, CDC se incrementa en expansión de dosel, dando lugar a declives dosel más rápidos y más tempranos (Bradford, 1982).



2.7.5 Simulación de cobertura vegetal

El modelo utiliza la cobertura vegetal como referencia del desarrollo vegetativo del cultivo. La cobertura vegetal (Canopy Cover – CC) representa a la fracción o porcentaje de suelo cubierto por vegetación.

Los siguientes parámetros son utilizados para la simulación:

- CCo: cobertura vegetal al 90% de emergencia
- CCx: máxima cobertura durante el desarrollo vegetativo
- CGC: Coeficiente de crecimiento de cobertura, describe el crecimiento de la cobertura vegetal desde CCo hasta CCx
- CDC: Coeficiente de declinación de cobertura, describe la reducción de la cobertura vegetal desde la senescencia de las hojas

2.7.6 Simulación de la transpiración del cultivo

La evapotranspiración, descrita por (Allen, 1998) corresponde a un concepto que engloba dos procesos separados en los cuales se pierde agua, la evaporación y la transpiración, en este proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor y, por lo tanto, se elimina de la superficie del evaporador y esta superficie vaporizada puede cubrir varias superficies como lagos, ríos, aceras y pisos y en el caso de la transpiración vegetal consiste en la vaporización del agua líquida contenida en el tejido vegetal y su remoción en forma de vapor hacia la atmosfera, pérdida que se da principalmente mediante el tejido estomático.

Los tres factores principales que afectan la evapotranspiración engloban parámetros correspondientes al clima; radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento; al cultivo; variedad, fase fenológica, resistencia a la transpiración, altura, vigor, cobertura vegetal, etc. y a las condiciones de manejo y desarrollo del mismo; como

fertilidad del suelo, condiciones particulares de cada estrato del perfil, presencia y control de plagas y enfermedades, riego, etc.

2.7.7 Simulación de la producción de Biomasa aérea

Hsiao *et al.*, (2009) mencionan que la normalización de WP considera dos principales factores ambientales: la demanda evaporativa de la atmósfera (ETo) y la concentración de dióxido de carbono del aire (CO₂) teniendo como año de referencia, el 2000, estos dos factores ocasionan un impacto importante en la productividad del agua, definida como la biomasa producida a causa del agua transpirada; por otro lado la normalización hace que WP* se hace aplicable a diversos lugares y temporadas, ya que incluye las variaciones de ETo, y en lapso de tiempo de años, incluye el aumento de CO₂.

La ecuación correspondiente a la producción de biomasa aérea es la siguiente:

$$B = WP * \sum Tr$$

2.7.8 Simulación del rendimiento cosechable

Desde el inicio de la floración, el índice de cosecha (HI) aumenta de manera gradual hasta alcanzar su valor referencial (HIo) al momento de madurez fisiológica. Es durante este periodo que se va formando el producto cosechable o rendimiento, un periodo acortado a consecuencia de una inducción temprana en la senescencia resultaría en una inadecuada fotosíntesis y con ello una reducción en el índice de cosecha. La ecuación correspondiente al índice de cosecha y rendimiento es indicada en la sección.

$$Y = HI * B$$

2.7.9 Componentes para la modelación del Aquacrop

AquaCrop es un modelo dinámico que simula el rendimiento que puede alcanzar los cultivos como una función del consumo de agua, por ello fueron además incorporados un conjunto de componentes adicionales al modelo, referentes al clima, el cultivo, el suelo y el manejo del campo, (Raes, 2017).

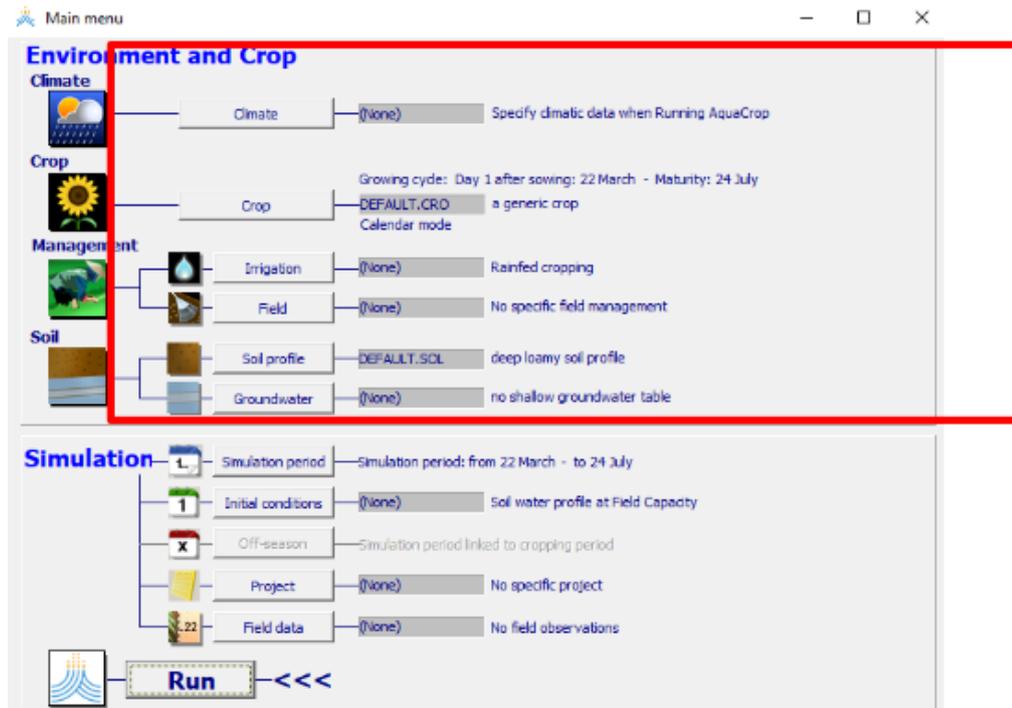


Figura 3. : Interfaz del modelo AquaCrop.

Fuente: Elaborado a partir del software

Para simular el crecimiento y el rendimiento de los cultivos, el modelo Aquacrop tiene considera cuatro componentes básicos: clima, cultivo, suelo y riego que se detalla en la tabla 1.

Tabla 1. : Parámetros de entrada para la simulación del modelo Aquacrop

PARAMETROS DE ENTRADA PARA LA SIMULACION	
Clima	Temperatura mínima del aire
	Temperatura máxima del aire
	Precipitación
	Demanda de evaporación
	Concentración de dióxido de carbono
Cultivo	Fenología
	Cobertura de dosel
	Profundidad de raíces
	Transpiración de cultivo
	Producción de biomasa
Suelo	Rendimiento de cultivo
	Índice de cosecha
Manejo	Características físicas del suelo
	Características de la capa freática
Manejo	Manejo de campo
	Manejo de riego

Fuente: Elaboración propia

Alarcón (2015) describe algunos parámetros de acuerdo a los módulos establecidos por el software principalmente relacionados con el desarrollo del ciclo vegetativo.

1. **Fecha de siembra (Cultivo):** Este parámetro permite especificar el día del año en el cual se siembra el cultivo y para iniciar la simulación se considera un día después (Alarcón, 2015).
2. **Cobertura de dosel inicial, CCo (Cultivo):** este parámetro se utiliza para describir la expansión de la cobertura dosel en los primeros días del



desarrollo fenológico; asimismo se considera la densidad de planta por unidad experimental llevado a hectárea

3. **Cobertura del dosel máximo, CCx (Cultivo):** este parámetro describe el porcentaje máximo de cobertura del dosel bajo condiciones óptimas relacionado con el desarrollo vegetativo del cultivo (Alarcón, 2015).

4. **Días a dosel máximo, Max CC (Cultivo):** este parámetro se considera en días calendario que demora el cultivo en alcanzar el nivel máximo de cobertura del dosel coincidiendo con la maduración (Alarcón, 2015).

5. **Duración del ciclo (Cultivo):** Este parámetro permite especificar cuál es la duración del ciclo de desarrollo del cultivo en días calendario (Alarcón, 2015).

6. **Índice de Cosecha (Cultivo):** La partición de la biomasa en la porción de rendimiento se simula mediante el índice de cosecha (HI). El usuario proporciona el índice de cosecha (HI) de referencia, pero el valor que realmente tome el HI puede variar, pues el estrés por agua puede alterar el HI, bien sea negativa o positivamente, dependiendo del tiempo, la severidad y duración del estrés (Alarcón, 2015).

7. **Riegos (Prácticas de Manejo):** AquaCrop tiene un sub-módulo de riego que permite especificar las características del método de riego utilizado en el cultivo. Dentro de las opciones disponibles se puede especificar la no existencia de un método de riego manual (el agua en la zona de raíces proviene entonces de la lluvia), se le puede proporcionar al módulo un cronograma de riego específico (especificando la cantidad de riego por día) o se puede programar automáticamente el riego especificando una condición límite (Alarcón, 2015).



8. **Fertilidad (Prácticas de Manejo):** el porcentaje de fertilidad es considerada para la relación entre los rendimientos observados y los rendimientos óptimos. Este parámetro puede ser calibrado analizando la razón entre una parcela del cultivo bajo las condiciones normales de producción y otra con las condiciones óptimas (Raes, *et al.* 2017 citado por Alarcón, 2015).

Ante este panorama el modelo tiene como finalidad la utilidad por investigadores, ingenieros consultores, organismos gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, y diversos tipos de asociaciones de agricultores, diseñado para adaptarse a la necesidad de los economistas especialistas en política que utilizan modelos simples para la planificación y el análisis de escenarios. (Steduto, *et al.* 2012)

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LUGAR DE EXPERIMENTO

El trabajo de investigación se realizó, en propiedad de la estación convencional de Taraco perteneciente al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Puno, a 74.5 Km al noroeste de Puno, con las siguientes características:

3.1.1. Ubicación política

- Región: Puno
- Provincia: Huancané
- Distrito: Taraco

3.1.2. Ubicación geográfica

- Altura: 3819 m.s.n.m.
- Latitud Sur: 15° 17' 54''
- Longitud Oeste: 69° 48' 44''



Figura 4. : Imagen satelital del campo experimental – CO-Taraco

Fuente: Google Earth

3.2 ANÁLISIS DE SUELO

Antes de iniciar el establecimiento de parcelas experimentales, se realizó una calicata representativa para obtener muestras de suelo por cada horizonte para analizarlos en el Laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) con el objetivo de conocer las condiciones físico-químicas del suelo, estos valores justamente refieren a los requerimientos del modelo que están limitados y enfocados a las propiedades del suelo que puedan afectar el balance hídrico durante la simulación. Los resultados se presentan en la Tabla N°2.

Tabla 2. : Caracterización físico químico del suelo del campo experimental

Parámetros	Unidad de medida	Horizonte 1	Horizonte 2	Horizonte 3	Horizonte 4
Longitud de horizonte	M	0,13	0,30	0,30	0,47
Arena	%	53	77	91	95
Limo	%	27	5	1	3
Arcilla	%	20	18	8	2
Clase Textural		Fr. Ar. A.	Fr. Ar.	A.	A.
pH	(1:1)	7,01	7,13	7,90	7,73
C.E.	dS/m	0,14	0,13	0,08	0,07
CaCO ₃	%	0	0	0	0
M.O.	%	1,41	0,53	0,34	0,12
P	ppm	18,2	18,3	4,7	6,6
K	ppm	189	148	133	166
CIC	meq/100 g	10,72	13,76	6,44	6,40
Ca ⁺²	meq/100 g	7,45	10,19	4,83	4,79
Mg ⁺²	meq/100 g	2,58	2,98	1,12	1,12
K ⁺	meq/100 g	0,41	0,29	0,27	0,27
Na ⁺	meq/100 g	0,28	0,30	0,23	0,22
Al ⁺³ + H ⁺	meq/100 g	0	0	0	0
Suma de Cationes	meq/100 g	10,72	13,76	6,44	6,40
Suma de Bases	meq/100 g	10,72	13,76	6,44	6,40
Sat. De Bases	%	100	100	100	100
Capacidad de campo	%	18,78	15,77	9,86	8,42
Punto de Marchitez Permanente	%	10,16	7,96	3,83	2,81
Densidad Aparente	g/cc	1,26	1,42	1,79	1,62
Nitrógeno Amoniacal	ppm	8,4	16,80	16,80	14,00
Nitrógeno Nítrico	ppm	0,74	0,00	0,00	0,00

3.3 CLIMATOLOGÍA

La información climatológica durante la campaña agrícola 2017-2018, del campo experimental se obtuvo de la estación meteorológica automática con fines agrícolas que fue instalada en las parcelas experimentales.

3.3.1. Temperatura

Según los datos obtenidos de la EMA, se observa que durante la campaña agrícola 2017 – 2018, los valores máximos de temperatura se alcanzaron en noviembre, llegando a 19.0 °C, mientras los valores mínimos fueron registrados en abril y mayo, con temperaturas de -3.62 °C, tal como se muestra en la figura N° 05.

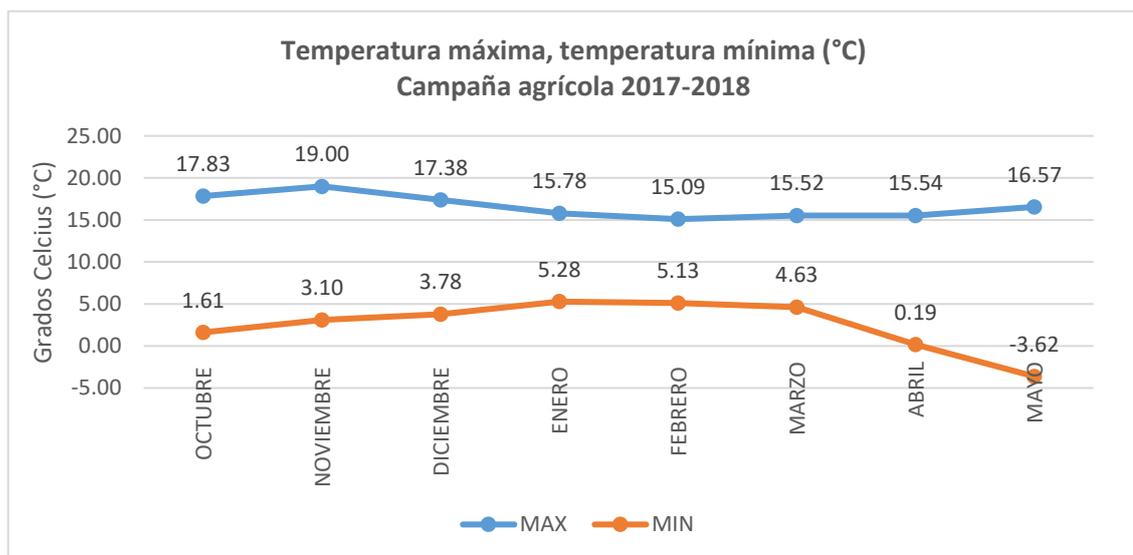


Figura 5. Registro de temperaturas durante la campaña agrícola 2017-2018.

3.3.2. Precipitación:

El registro de la precipitación coincide con la información de la EMA instalada en las parcelas experimentales, registrándose valores acumulados de 105.2, 100.1 y 117.3 mm de precipitación durante los meses de enero, febrero y marzo, estos valores son característicos de la temporada lluviosa. Sin embargo, en los meses de octubre y

noviembre se presenta registros de precipitación pluvial reducidos de 32.9 mm, considerando que la disponibilidad de agua es una limitante para la producción del cultivo de quinua afectando las fases iniciales y determinantes según época de siembra, figura 06.

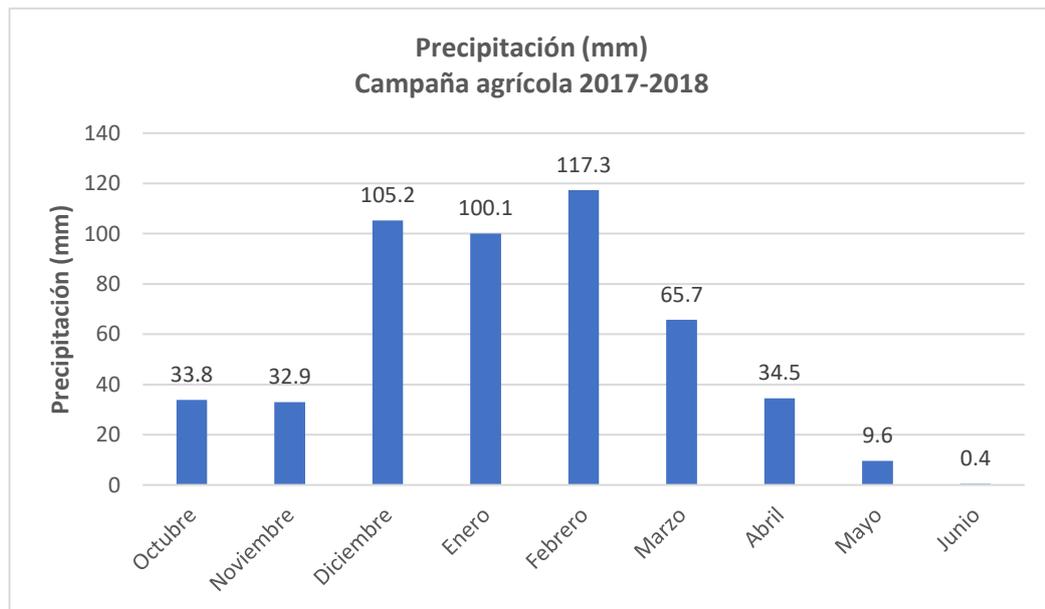


Figura 6. Precipitación acumulada durante la campaña agrícola 2017-2018.

3.3.3. Registro histórico 10 años

En la figura 07 se muestra el registro de datos meteorológicos para la campaña agrícola 2017-2018, indicando que entre los meses de febrero y marzo se registró precipitaciones con acumulados mayores a 100 mm, considerándose que este es un periodo muy húmedo; por el contrario los acumulados menores a 100 mm mensuales, con respecto a la tendencia de la temperatura media, ha generado un periodo húmedo, el cual se ubica en los meses de agosto hasta el mes de abril; asimismo el grafico muestra un periodo seco durante los meses de julio hasta agosto y mayo a junio, este es el resultado del cruce de las líneas de temperatura media y la precipitación acumulada.

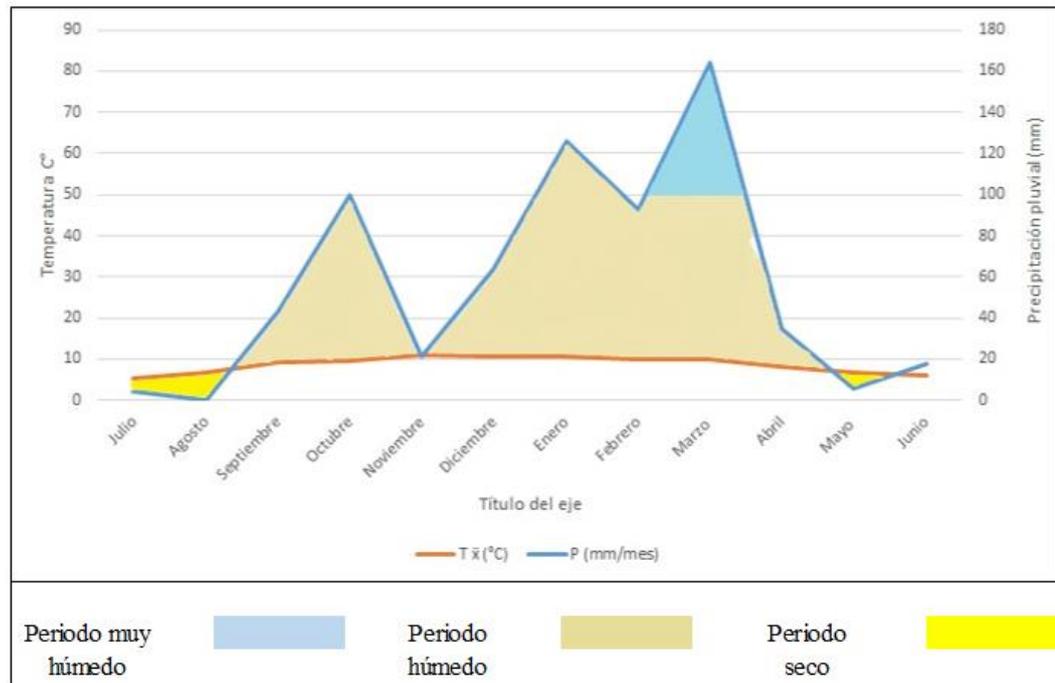


Figura 7. Climodiagrama, campaña agrícola 2017-2018, Taraco

En la figura 08, entre los meses diciembre a marzo se registró precipitaciones mayores a 100 mm, por lo que se considera como periodo muy húmedo; por otro lado, las precipitaciones menores a 100 mm mensuales con el cruce de la temperatura media, genera un periodo húmedo, esos se ubican en los meses de octubre hasta abril, además observamos el periodo seco, durante los meses de julio hasta septiembre y mediados de abril a junio

Realizando la comparación de la campaña agrícola 2017-2018 podemos observar que la precipitación con mayor acumulado se registró a mediados del mes de octubre hasta el mes de febrero, considerando una disminución de las mismas en el mes de noviembre, sin embargo, estos valores se encuentran dentro del periodo húmedo; por otro lado, el periodo húmedo se considera de agosto a mayo. Además, se observa que el periodo seco tuvo una duración de julio hasta agosto y mayo a junio donde el periodo

seco tuvo un comportamiento semejante a los valores promedio de 10 años tal como se muestra en la figura 08.

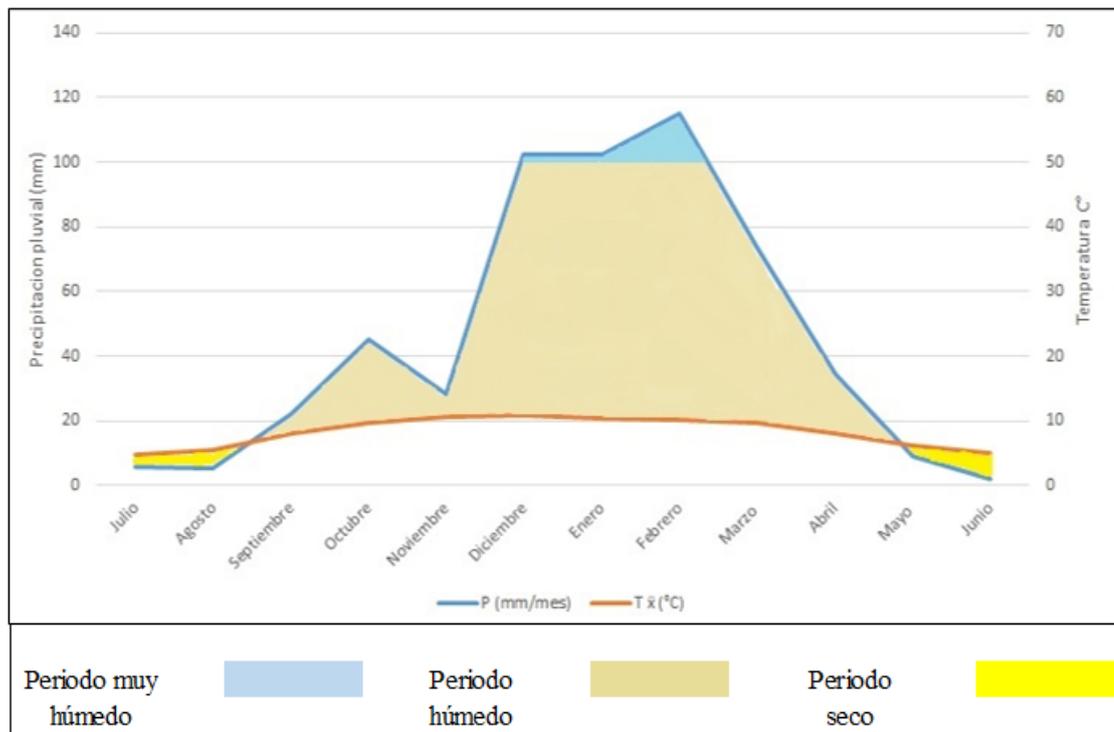


Figura 8. Climodiagrama, periodo 10 años, campaña agrícola 2017-2018, Taraco

3.4. MATERIAL DE ESTUDIO

Para el presente proyecto de investigación se utilizó las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, las cuales se describe a continuación.

a) **Variedad Blanca de Juli:** Selección de ecotipos locales de Juli-Puno grano mediano con 1.4 a 1.8 de diámetro, de color blanco, semidulce, tipo de panoja glomerulada algo laxa, periodo vegetativo 160 a 170 días (semitardia), rendimiento 2500 Kg/ha, tolerancia intermedia al mildiu. (FAO, 2000)

b) **Variedad Pasankalla:** La planta posee una altura de 1.30 a 1.40m, la forma de la panoja es glomerulada, el color de pericarpio es plomo claro, con rendimiento promedio de 3.0 t/ha y el contenido de saponina es de 0.00% (Zanabria y Mamani, 2017) INIA 415 – Pasankalla variedad tardía, su mejor



desarrollo se logra en la zona agroecológica Suni del altiplano, entre los 3815 y 3900 msnm, con clima frío seco, precipitación pluvial de 400 a 550 mm y temperatura de 4 °C a 15 °C, ligeramente susceptible a las bajas temperaturas, tolerante a la sequía y tolerante intermedio al exceso de la humedad. La variedad INIA – 415 – Pasankalla obtienen 3.5 t/ha de rendimiento (Mujica *et al.*, 2013).

c) **Variedad Salcedo INIA:** Esta variedad se obtuvo por la selección surco-panoja a partir de la introducción de material genético de la cruce de variedades “real boliviana x sajama”, en la estación experimental de Patacamaya, alcanza una altura de 1.80m, grano grande de 1.8 a 2 mm de diámetro de color blanco, panoja glomerulada, periodo vegetativo de 160 días (precoz), rendimiento 2500 a 3500 Kg. /ha, resistente a heladas (- 2°C), tolerante al mildiu (Mujica *et al.*, 2013).

3.5. MATERIAL DE CAMPO

Equipos y herramientas

a) Equipos

Tractor agrícola con implementos de roturación y surcado, estufa, balanza electrónica, balanza de precisión, cámara digital, calculadora y computadora.

b) Herramientas

Pala, piquillo, rastrillo, wincha métrica de 3.0 y 30.0 metros y segadera.

c) Otros materiales

Sacos, bolsas de papel kraft, bandejas, etiquetas, estacas de madera, tablero, sobres de manila, yeso, cordel, cuaderno de campo y lápiz, lapicero.



3.6 METODOLOGÍA

3.6.1 Diseño estadístico

El trabajo de investigación fue desarrollado bajo el Diseño Completamente al Azar (DCA), con 03 tratamientos, 03 repeticiones; haciendo un total de 09 unidades experimentales por época de siembra. Para el análisis de varianza se utilizó el nivel de significación de $\alpha=0.05$ y para la comparación de promedios la prueba de Tukey, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y con el siguiente modelo aditivo lineal:

$$Y = U + A_i + B_j + E_{ij}$$

Donde:

Y = Variable respuesta

U = Media de la muestra

A_i = efecto del i-ésimo tratamiento

B_j = efecto del j-ésimo bloque

E_{ij} = efecto del error experimental

3.6.2 Distribución de parcelas y tratamientos

a) Características del campo experimental

- Largo del campo experimental: 22 m
- Ancho del campo experimental: 47 m
- Área total del campo experimental: 1,034 m²
- Calle del experimento: 1.0m

b) Bloque

- Número de bloque: 3
- Largo: 22 m

- Ancho: 16 m
- c) Parcelas**
- Número de parcelas: 09
- Ancho: 4.8m
- Largo: 6m
- Distancia entre parcelas: 1 m
- Área neta de parcela: 28.8 m²

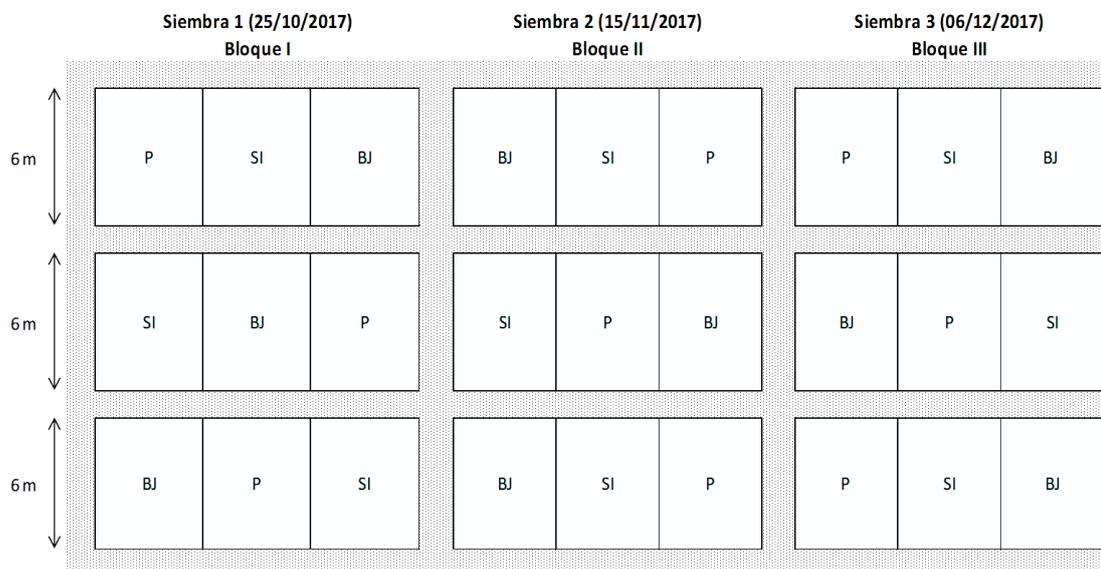


Figura 9. Distribución de parcelas experimentales

3.6.3 Épocas de siembra

Es importante considerar la época de siembra como factor de estudio debido a que el ciclo vegetativo de las diferentes variedades del cultivo, se exponen al riesgo de ser afectadas por el incremento o disminución de temperaturas, ausencia de precipitación, veranillos o periodos de sequias, todos estos factores ambientales, ocasionan un retraso o aceleramiento del desarrollo fenológico; asimismo este es un factor determinante para reflejar los rendimientos.



Fechas establecidas:

Primera época de siembra: 25/10/17

Segunda época de siembra: 15/11/17

Tercera época de siembra: 06/12/17

3.6.4 Conducción del experimento

a) **Preparación del terreno.** - La preparación del terreno se realizó el 23 de octubre de 2017, se utilizó un tractor agrícola para realizar las labores de aradura, rastra y surcado del terreno considerando una profundidad de 20 cm y distancia de 0.45m.

b) **Demarcación del campo experimental.** - Para la demarcación del campo experimental se utilizaron estacas, yeso, cordel y wincha para la distribución de bloques

c) **Siembra.** – Para la siembra se prepararon sobres con 28.8 gr de semilla por unidad experimental, la siembra se realizó a chorro continuo, considerando el distanciamiento entre surco de 0.45 m y 6 m de largo de cada línea. Al momento del tapado de las semillas se procuró que éstas quedaran a no más de 2 cm de profundidad.

d) **Control de malezas.** - El control de mala hierba se realizó manualmente, aprovechando la humedad del suelo después de la lluvia. Las malezas presentes fueron: Chiriro (*Bidens pilosa*), Nabo silvestre (*Brassica campestris*), Trébol carretilla (*Medicago hispida*), Diente de león (*Taraxacum officinalis*), Cebadilla (*Bromus unioloides*), Bolsa de pastor (*Capsella bursapastoris*), Kora o malva (*Malvastrum capitatum Saret*)



e) **Desahíje.** - Esta labor se realizó también según cada época de siembra, es decir la labor de desahíje en distintas fechas toda esta labor para generar un equilibrio en la densidad de la quinua de tal forma que se dejó solo 15 plantas por metro lineal.

f) **Control fitosanitario.** - En cuanto a las plagas no se presentó ninguno por encima del umbral de daño económico, se observó la mosca minadora en la fase de ramificación por las altas temperaturas que se presentaron durante el desarrollo de las plantas de la primera época de siembra, algunas larvas de *Eurysacca quinoae* en la fase de madurez fisiológica. En cuanto a las enfermedades se observó la presencia de *Peronospora variabilis*, con severidad e incidencia baja.

g) **Cosecha de la quinua.** - La cosecha se realizó de forma manual, cuando el cultivo llegó a su madurez fisiológica por época de siembra, realizándose una evaluación previa principalmente a los surcos centrales evitando el efecto de borde; asimismo, se realizó el conteo de plantas para su respectiva evaluación biométrica por unidad experimental.

3.6.5 Variables evaluadas

a) **Fenología del cultivo.**

La evaluación fenológica del cultivo por épocas de siembra y tres variedades instaladas, es indispensable para el trabajo de simulación, ya que esta información determina el efecto de épocas de siembra, por otro lado, conforma parte de la data ingresada para la calibración del modelo agrometeorológico, es por ello que la evaluación ha sido realizada de manera semanal por unidad experimental.



b) Altura de planta (cm)

Este dato se registró a la madurez fisiológica del cultivo, tomando 10 plantas al azar de los surcos centrales por unidad experimental. La medida se estableció desde la base del tallo hasta el ápice de panoja central y se expresó en centímetros (Rojas & Padulosi, 2013).

c) Diámetro de panoja principal (cm)

Se midió el diámetro de panoja con la ayuda de una regla vernier, el dato se tomó de la parte media de la panoja en la etapa de madurez fisiológica, tomando 10 plantas de los surcos centrales por unidad experimental.

d) Evaluación de los rendimientos

A la fecha de maduración se realizó el corte de las plantas iniciando con los surcos centrales de los cuales se determinó el peso de planta, peso de panoja, rendimiento de grano por surcos centrales y surcos laterales, posterior a ello se realizó el trillado para la obtención del rendimiento final.

3.6.6 Determinación de la cobertura vegetal

La estimación de la cobertura vegetal es importante en el estudio del crecimiento de la planta, la toma de fotografías facilita la obtención de medidas temporales y espaciales de la cubierta del dosel. Este dato ha sido utilizado para la calibración del modelo AquaCrop.

Para la obtención de datos de cobertura vegetal en las unidades experimentales se han realizado la toma de fotografías aéreas con una frecuencia semanal a fin de estimar la cobertura vegetal en porcentaje. Para ello utilizo un cuadrante con las medidas de 1 x 0.45 m en la que se considera 1m de longitud y 0.45 m de distanciamiento entre surcos, posteriormente se realizó el cálculo de la cobertura vegetal haciendo uso del software Canopy cover desarrollado por el CIP (Centro Internacional de la Papa), este programa

aplica un algoritmo de segmentación simple, basado en un índice de vegetación en la región visible del espectro y un valor umbral para discriminar la vegetación verde sana y otros elementos de la imagen.

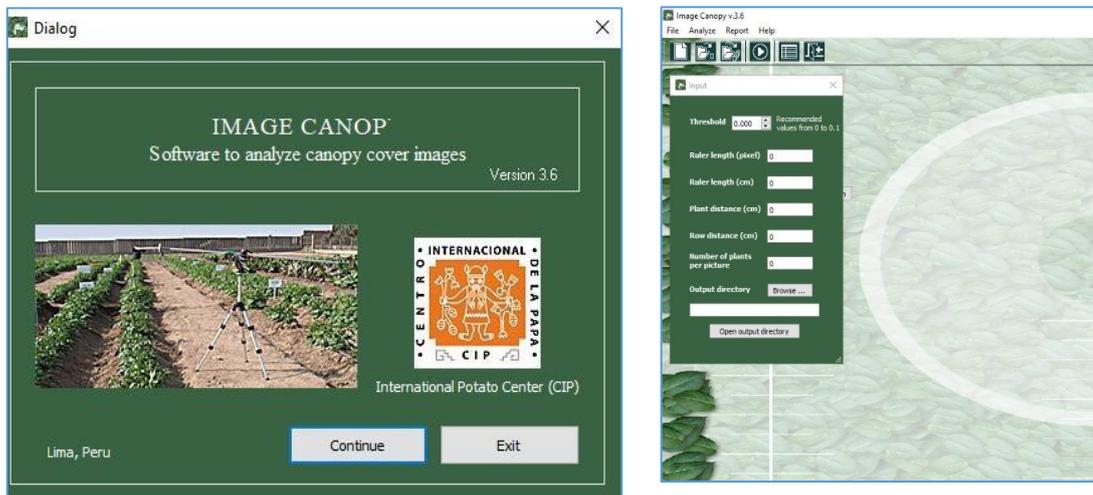


Figura 10. Interfaz del software Image canopy

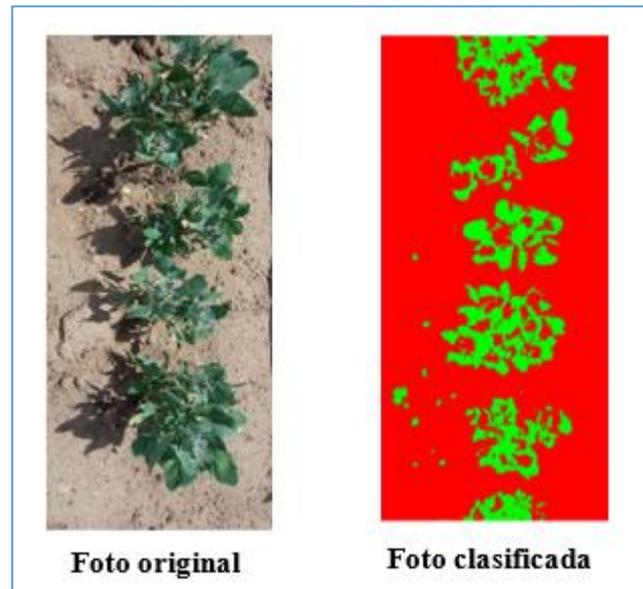


Figura 11. Procesamiento de la cobertura vegetal

3.6.7 Determinación de la biomasa

Para obtener la información de biomasa por encima del nivel del suelo, se realizó la toma de muestras de manera mensual, por cada unidad experimental. El procedimiento consistió en la extracción de tres plantas para posteriormente

obtener el peso de materia fresca y después llevarlas a una estufa a 75 °C por 75 horas, terminado el tiempo establecido se vuelve a pesar para obtener el peso de la materia seca. Este dato es ingresado para la calibración del modelo Aquacrop ya que se requiere el desarrollo de la biomasa aérea seca a lo largo del periodo vegetativo.



Figura 12. Peso de materia fresca y materia seca

3.6.8 Determinación de la evapotranspiración del cultivo

Para la determinación de la evapotranspiración potencial que se requiere para el modelamiento agrometeorológico se utilizó el software “ETo Calculator” desarrollado por la FAO, el cual solicita como parámetros de entrada la temperatura máxima y mínima, velocidad del viento a los 2m por encima de la superficie del suelo, heliofanía, y la humedad relativa media, obteniendo así el valor de la ETo diaria para el cultivo de quinua.

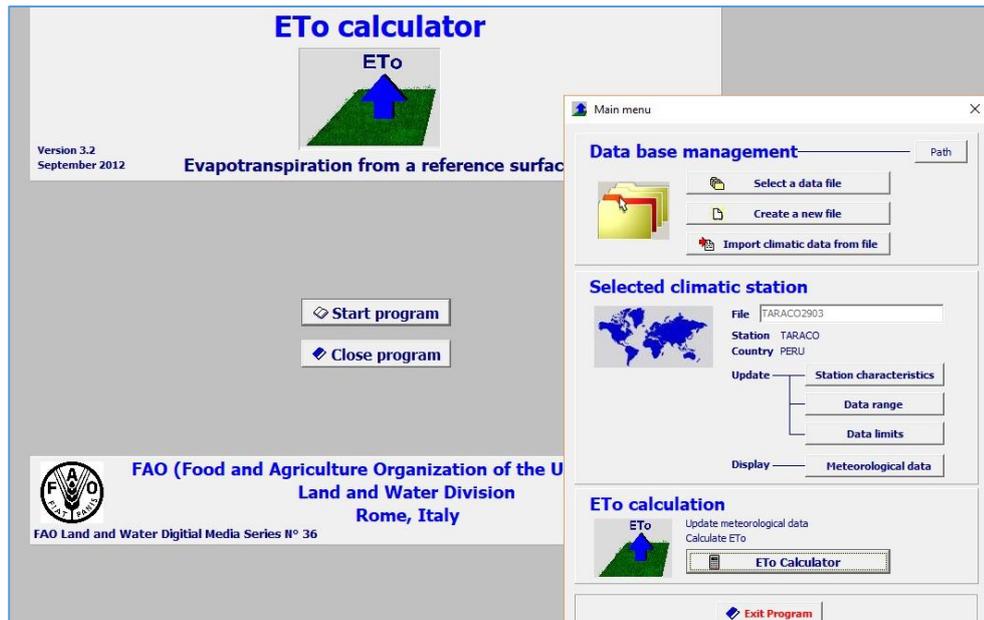


Figura 13. Interfaz del software ETo Calculator

3.6.9 Calibración del modelo Aquacrop

El modelo Aquacrop considera diferentes variables para ser calibradas, así como parámetros que pueden ser conservativos y no conservativos. Los parámetros no conservativos pueden ser ajustados para una mayor exactitud del modelo en base a la respuesta que tengan al manejo agronómico y respuestas dadas en campo, los parámetros conservativos corresponden a cualidades inherentes al cultivo y pueden ser ajustadas para distintas variedades o cultivares de una especie.

Las observaciones en campo se ingresan en un archivo de “Field data” – información de campo, que permite ingresar la fecha de las observaciones junto a la data de cobertura vegetal, biomasa aérea y contenido de agua en el suelo a una profundidad específica. Estas observaciones son luego tabuladas para ser comparadas con las mismas variables simuladas por el modelo para las condiciones de suelo, clima y manejo ingresadas para la temporada de simulación correspondiente.

Es en este punto donde empieza el ajuste de parámetros del modelo, empezando por parámetros no conservativos que permiten ajustar la fenología y el ciclo de vida del cultivo para que los resultados de la simulación coincidan con las observaciones de campo. Esto es posible gracias al módulo de “crop development” – desarrollo de cultivo, que permite ajustar variables como la cobertura inicial, la cobertura máxima, desarrollo radicular e inicio y duración de la floración.

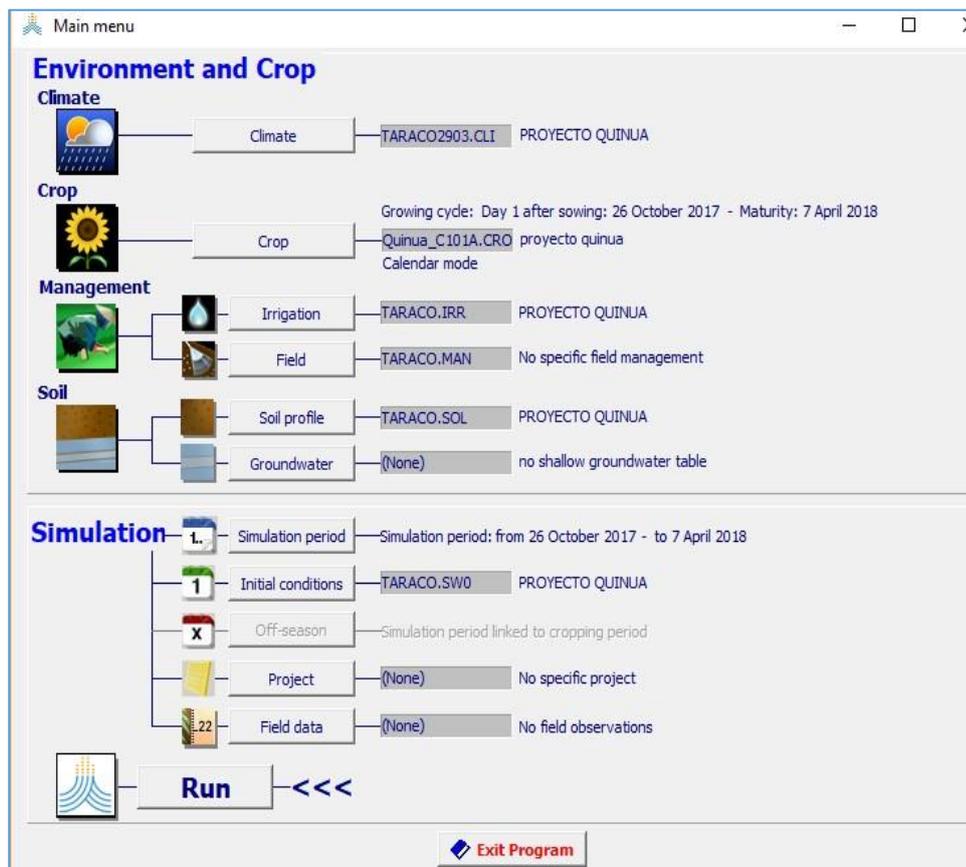


Figura 14. Interfaz del modelo con todas las variables de la zona de estudio.

El tiempo designado a “yield formation” o formación de la cosecha también se ve afectado por el largo del ciclo vegetativo, por ello, la ocurrencia de déficit hídrico durante la última etapa del periodo vegetativo del cultivo pudo afectar la formación de biomasa derivada para el órgano cosechado afectando los rendimientos finales. Lo mencionado tendría mayor efecto en la Blanca de Juli que presenta un

ciclo de mayor extensión a comparación de las otras variedades.

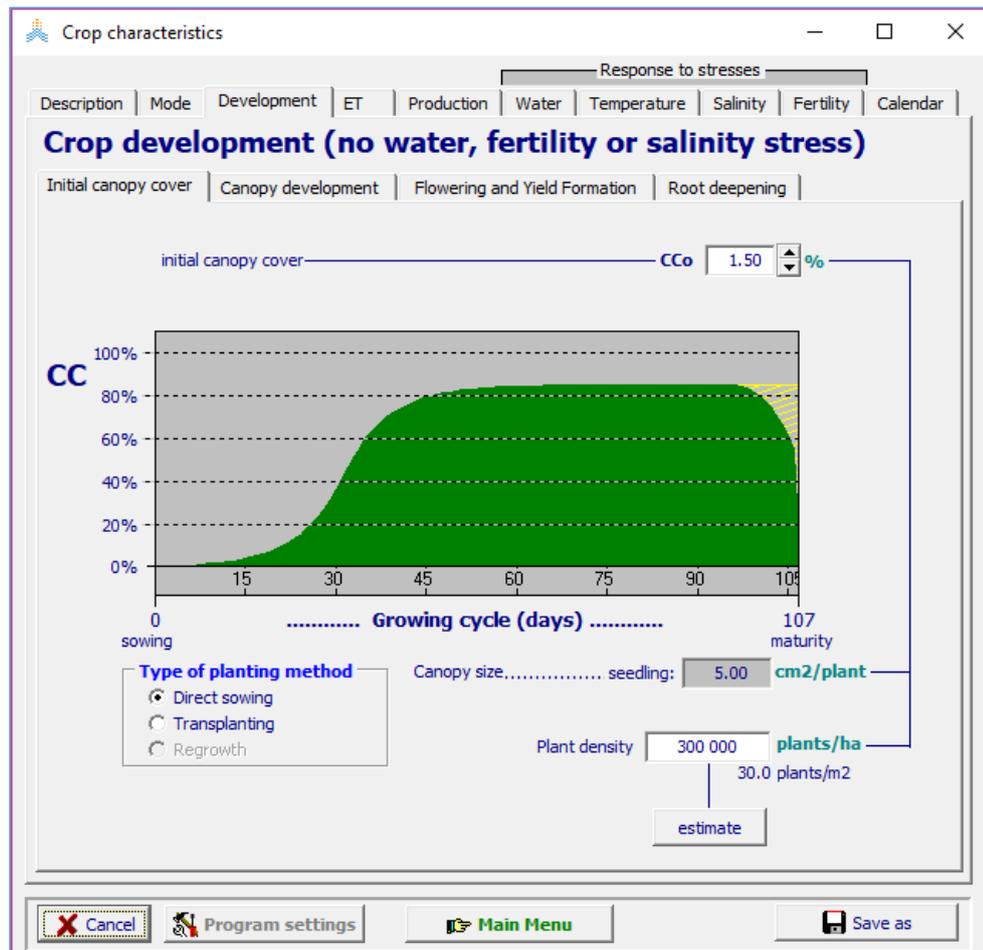


Figura 15. Interfaz del modelo con el módulo de “crop development” o desarrollo del cultivo

Es necesaria la simulación constante durante todo este proceso, como indicado por Steduto *et al.* (2012) es un proceso de prueba y error. En la zona de trabajo, Distrito de Taraco, la época de siembra de quinua se concentra en el mes de octubre y en la región suele abarcar periodos entre los meses de septiembre y octubre. La siembra tardía, realizada el 15 de noviembre y 06 de diciembre, permitió evaluar el periodo en que la frecuencia y volúmenes de lluvia se ven reducidos en la última fase del ciclo vegetativo del cultivo, esto, junto a un periodo de baja precipitación durante el mes de marzo-abril, dieron la oportunidad de evaluar en cada variedad el efecto del estrés hídrico en su desarrollo regular.

3.6.10 Validación del modelo Aquacrop

El modelo Aquacrop se validó considerando los criterios como índices estadísticos; donde se realizó la comparación de los datos observados con los obtenidos por simulación de cada uno de los tratamientos, usando los siguientes indicadores estadísticos:

3.6.10.1 Coeficiente de correlación de Pearson (r)

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es un índice de dependencia lineal entre dos variables; sus valores adimensionales varían de menos uno a uno. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

Dónde: r, coeficiente de correlación de Pearson; σ_{xy} , covarianza de “x, y”; y $\sigma_x \sigma_y$, desviación estándar de “x” e “y”.

3.6.10.2 Cuadrado Medio del Error (RMSE)

Para validar el modelo se utilizaron diferentes índices estadísticos como la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) (Ecuación 2), el índice de concordancia (D-index) (Ecuación 3) y el coeficiente de determinación (r^2).

$$\text{RMSE} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{M} \quad (2)$$

En las ecuaciones de RMSE e índice de concordancia, “n” representa el número de observaciones, “ P_i ” es la observación predicha, “ O_i ” es la observación medida, donde $P'_i = P_i - M$ y $O'_i = O_i - M$, siendo “M” la media de la variable observada. RMSE normalizado entrega una medida en porcentaje de la diferencia relativa de los datos simulados en comparación con los observados. La simulación se considera

como excelente, con un RMSE normalizado menor de 10%, es bueno cuando el RMSE normalizado es superior a 10% pero menor que 20%, es justo si el RMSE normalizado es mayor que 20% y menor 30% y deficiente si es mayor a 30% (Willmott C. , 1982).

3.6.10.3 Índice de concordancia (d)

El índice de concordancia propuesto por Willmott *et al.* (1985), se estimó de acuerdo estadístico d, en donde si este índice es cercano a uno, mejor será la comparación entre las dos variables (simulada y observada).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (3)$$

3.6.10.4 Eficiencia del modelo (EF)

Para probar la calidad del modelo, se utilizó la eficiencia del modelo (EF- no dimensional). El cual es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos.

Moriasi *et al.*, (2007) menciona que el EF se acerca a uno cuando la varianza residual es mucho menor que la varianza de datos medidos, mientras que los valores negativos de EF indican que la media es un mejor estimador que el modelo.

$$EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - M)^2} \right] \quad (4)$$

En las ecuaciones de RMSE, índice de concordancia, y eficiencia del modelo, “n” representa el número de observaciones, “Pi” es la observación predicha, “Oi” es la observación medida, P’i= Pi-M y O’i=Oi-M, siendo “M” la media de la variable observada.



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EFECTO DE TRES ÉPOCAS DE SIEMBRA EN EL RENDIMIENTO DE TRES VARIEDADES DEL CULTIVO DE QUINUA

La respuesta de un cultivo a las condiciones de campo se presenta como la manifestación de las interacciones del potencial genético del cultivo y la interacción de este frente al medio influenciado por el manejo agronómico dado en campo (Johnson *et al.* 1955, Ledent 2007). Es por ello que para tener referencia respecto al desarrollo del cultivo de quinua se evaluó características agronómicas los cuales afectan directamente al rendimiento del cultivo, las características han sido evaluadas y a continuación analizadas:

4.1.1 Biomasa fresca del cultivo de quinua

El análisis de varianza para la biomasa fresca del cultivo de quinua (Tabla 03), en donde se observa que existe una diferencia estadística significativa entre las épocas de siembra (E), explicando que la biomasa fresca del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra fueron diferentes, lo cual nos da a entender que las épocas de siembra influyeron de manera diferente en la biomasa fresca del cultivo de quinua. Entre las variedades de quinua (V), no hubo diferencia estadística, indicando que la biomasa fresca del cultivo de quinua con las diferentes variedades de quinua en estudio no fueron diferentes, lo cual nos indica que las diferentes variedades de quinua no influyeron en la biomasa fresca del cultivo de quinua. Asimismo, no se encontró diferencia estadística en la interacción de las épocas de siembra (E) por las variedades de quinua (V) lo cual explica que estos factores actúan de forma independiente sobre la biomasa fresca del

cultivo de quinua. El coeficiente de variabilidad es de 13.72%.

Tabla 3. Análisis de varianza para la biomasa fresca del cultivo de quinua.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft 0.05	Ft 0.01	Sig.	Pr > F
Época de Siem. (E)	2	865.7302	432.8651	5.51	3.55	6.01	*	0.0136
Variedad de Q. (V)	2	12.1148	6.0574	0.08	3.55	6.01	ns	0.9261
Interacción E * V	4	46.1033	11.5258	0.15	2.93	4.58	ns	0.9621
Error experimental	18	1414.7114	78.5951					
TOTAL	26	2338.6597						
C.V.= 13.72%		Media = 64.60						

La prueba de comparaciones de Tukey ($p \leq 0.05$) se muestra en la tabla 04, para el promedio de biomasa fresca del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra, indica que hubo diferencias estadísticas entre las tres épocas de siembra, en donde la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo mayor biomasa fresca del cultivo de quinua con 72.487 tn/ha, el cual fue estadísticamente superior a las demás épocas de siembra; seguido por la tercera época de siembra (06 de diciembre) con un promedio de biomasa fresca de 61.852 tn/ha, y por último tenemos la primera época de siembra (25 de octubre) que tuvo el más bajo promedio con 59.458 tn/ha de biomasa fresca del cultivo de quinua.

Tabla 4. Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para la biomasa fresca del cultivo de quinua.

Orden de merito	Época de siembra	Biomasa fresca (tn/ha)	Tukey Agrupado
1	Segunda época 15 – noviembre	72.487	a
2	Tercera época 06 – diciembre	61.852	ab
3	Primera época 25 – octubre	59.458	b

Como hubo diferencias estadísticas en las épocas de siembra sobre la biomasa fresca en el cultivo de quinua, se ha realizado un gráfico con el fin de conocer las diferencias numéricas entre las épocas de siembra (figura 16), en donde se observa que, la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo mayor biomasa fresca con 72.487 tn/ha, seguido por la tercera época de siembra (06 de diciembre) con un promedio de biomasa fresca de 61.852 tn/ha, y por ultimo tenemos la primera época de siembra (25 de octubre) que tuvo el más bajo promedio con 59.458 tn/ha de biomasa fresca del cultivo de quinua.

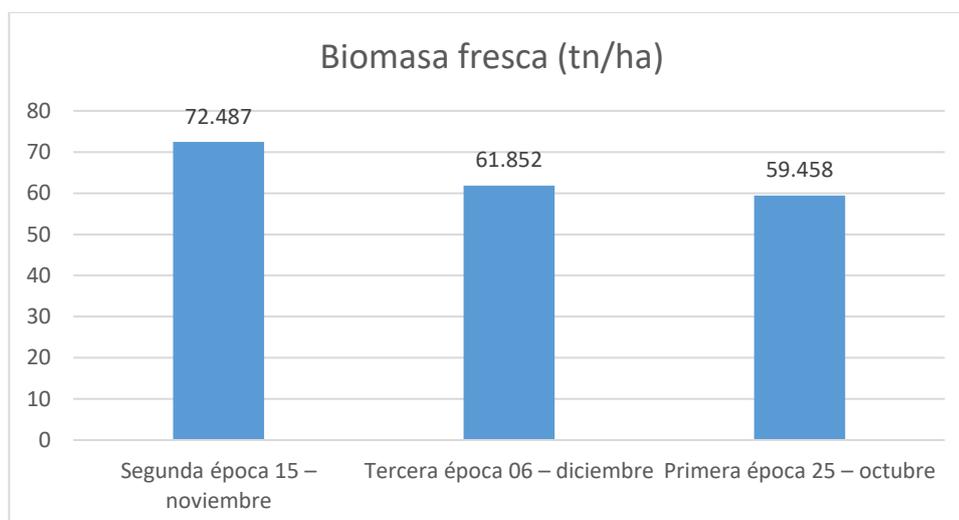


Figura 16. Diferencias estadísticas respecto a biomasa fresca entre las épocas de siembra

4.1.2 Biomasa seca del cultivo de quinua

El análisis de varianza para la biomasa seca del cultivo de quinua (tabla 05), en donde se observa que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las épocas de siembra (E), explicando que la biomasa seca del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra fueron diferentes, lo cual nos da a entender que las épocas de siembra influyeron de manera diferente en la biomasa seca del cultivo de quinua. Entre las variedades de quinua (V), no hubo diferencia estadística, indicando que la biomasa seca del cultivo de quinua con las diferentes variedades de quinua en estudio no fueron diferentes, lo cual nos indica que las diferentes variedades de quinua no influyeron en la biomasa seca del cultivo de quinua. Asimismo, no se encontró diferencia estadística en la interacción de las épocas de siembra (E) por las variedades de quinua (V) lo cual explica que estos factores actúan de forma independiente sobre la biomasa seca del cultivo de quinua. El coeficiente de variabilidad es de 12.43%.

Tabla 5. Análisis de varianza para la biomasa seca del cultivo de quinua

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft 0.05	Ft 0.01	Sig.	Pr > F
Época de Siem. (E)	2	3067.4339	1533.7169	178.5	3.55	6.01	**	<.0001
Variedad de Q. (V)	2	1.0248	0.5124	0.06	3.55	6.01	ns	0.9423
Interacción E * V	4	11.7160	2.9290	0.34	2.93	4.58	ns	0.8468
Error experimental	18	154.6328	8.5907					
TOTAL	26	3234.8075						
C.V.= 12.43%		Media = 23.57						

La prueba de comparaciones de Tukey ($p \leq 0.05$) se muestra en la tabla 06, para el promedio de biomasa seca del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra, indica que hubo diferencias estadísticas entre las tres épocas de siembra, en donde se puede observar que, la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo mayor biomasa seca del cultivo de quinua con 38.617 tn/ha, el cual fue estadísticamente superior a las demás épocas de siembra; seguido por la primera época de siembra (25 de octubre) con un promedio de biomasa seca de 16.863 tn/ha, y que es similar estadísticamente por la tercera época de siembra (06 de diciembre) que tuvo el más bajo promedio con 15.237 tn/ha de biomasa seca del cultivo de quinua.

Tabla 6. : Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para la biomasa seca del cultivo de quinua

Orden de merito	Época de siembra	Biomasa seca (tn/ha)	Tukey Agrupado
1	Segunda época 15 – noviembre	38.617	a
2	Primera época 25 – octubre	16.863	b
3	Tercera época 06 – diciembre	15.237	b

Como hubo diferencias estadísticas en las épocas de siembra sobre la biomasa seca en el cultivo de quinua, se ha realizado un gráfico con el fin de conocer las diferencias numéricas entre las épocas de siembra (figura 17), en donde se observa que, la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo mayor biomasa seca del cultivo de quinua con 38.617 tn/ha, el cual muy superior a las demás épocas de siembra y superando por un gran margen; seguido por la primera época de siembra (25 de octubre) con un promedio de biomasa seca de 16.863 tn/ha, y por ultimo tenemos la tercera época de siembra (06 de diciembre) que tuvo el más bajo promedio con 15.237 tn/ha de biomasa seca del cultivo de quinua.

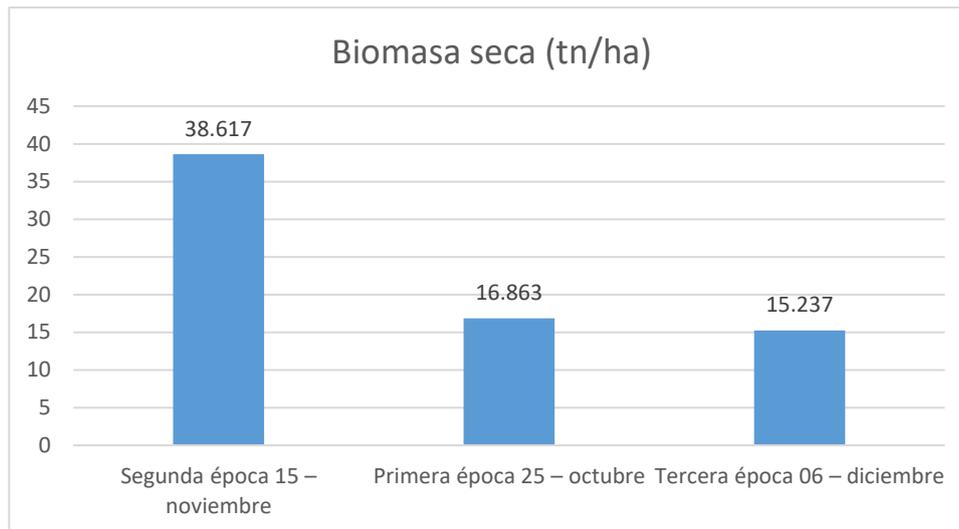


Figura 17. Diferencias estadísticas respecto a biomasa seca entre las épocas de Siembra.

4.1.3 Altura de planta del cultivo de quinua

El análisis de varianza para la altura de planta del cultivo de quinua (tabla 07), en donde se observa que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las épocas de siembra (E), explicando que la altura de planta del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra fueron diferentes, lo cual nos da a entender que las épocas de siembra influyeron de manera diferente en la altura de planta del cultivo de quinua. Entre las variedades de quinua (V), no hubo diferencia estadística, indicando que la altura de planta del cultivo de quinua con las diferentes variedades de quinua en estudio no tuvo diferencia, lo cual nos indica que las diferentes variedades de quinua no influyeron en la altura de planta del cultivo de quinua. Asimismo, no se encontró diferencia estadística en la interacción de las épocas de siembra (E) por las variedades de quinua (V) lo cual explica que estos factores actúan de forma independiente sobre la altura de planta del cultivo de quinua. El coeficiente de variabilidad es de 8.68%.



Tabla 7. Análisis de varianza para la altura de planta del cultivo de quinua.

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft 0.05	Ft 0.01	Sig.	Pr > F
Época de Siem. (E)	2	7709.1385	3854.5693	26.11	3.55	6.01	**	<.0001
Variedad de Q. (V)	2	33.0585	16.5293	0.11	3.55	6.01	ns	0.8947
Interacción E * V	4	303.2015	75.8004	0.51	2.93	4.58	ns	0.7268
Error experimental	18	2657.7867	147.6548					
TOTAL	26	10703.185						
C.V.= 8.68%		Media = 139.96						

La prueba de comparaciones de Tukey ($p \leq 0.05$) se muestra en la tabla 08, para el promedio de altura de planta del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra, indica que hubo diferencias estadísticas entre las tres épocas de siembra, en donde se puede observar que, la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo un mayor promedio de altura de planta del cultivo de quinua con 185.8 cm, el cual es estadísticamente similar a la primera época de siembra (25 de octubre) con un promedio de 157.1 cm (06 de diciembre), para el resultado obtenido de esta época se puede corroborar por lo reportado por (Pineda, 2017), que obtiene una altura de planta de 145.9 con la variedad Salcedo INIA; seguido por la tercera época de siembra que tuvo el más bajo promedio con 117.0 cm de altura de planta siendo el último en promedio de altura de planta del cultivo de quinua.

Tabla 8. Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para la altura de planta del cultivo de quinua.

Orden de merito	Época de siembra	Altura de planta (cm)	Tukey Agrupado
1	Segunda época 15 – noviembre	185.8	a
2	Primera época 25 – octubre	157.1	a
3	Tercera época 06 – diciembre	117.0	b

Como hubo diferencias estadísticas en las épocas de siembra sobre la altura de planta en el cultivo de quinua, se ha realizado un gráfico con el fin de conocer las diferencias numéricas entre las épocas de siembra (figura 18), en donde se observa que, la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo un mayor promedio de altura de planta en el cultivo de quinua con 185.8 cm, seguido por la primera época de siembra (25 de octubre) con un promedio de 157.1 cm, y el último lugar se encuentra la tercera época de siembra (06 de diciembre) que tuvo el más bajo promedio con 117.0 cm de altura de planta del cultivo de quinua.

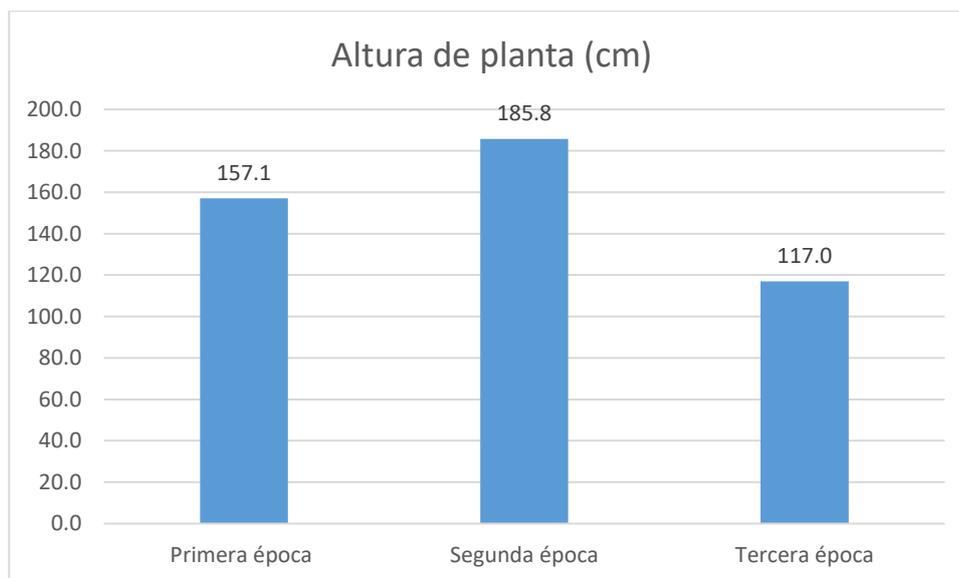


Figura 18. Diferencias estadísticas respecto a altura de planta entre las épocas de Siembra

4.1.4 Diámetro de panoja del cultivo de quinua

El análisis de varianza para el diámetro de panoja del cultivo de quinua (tabla 09), en donde se observa que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las épocas de siembra (E), explicando que el diámetro de panoja del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra fueron diferentes, lo cual nos da a entender que las épocas de siembra influyeron de manera diferente en el diámetro de panoja del cultivo de quinua. Entre las variedades de quinua (V), no hubo diferencia estadística, indicando que el diámetro de panoja del cultivo de quinua con las diferentes variedades de quinua en estudio no tuvo diferencia, lo cual nos indica que las diferentes variedades de quinua no influyeron en el diámetro de panoja del cultivo de quinua. Asimismo, no se encontró diferencia estadística en la interacción de las épocas de siembra (E) por las variedades de quinua (V) lo cual explica que estos factores actúan de forma independiente sobre el diámetro de panoja de la quinua. El coeficiente de variabilidad es de 17.88%.

Tabla 9. Análisis de varianza para el diámetro de panoja del cultivo de quinua

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft 0.05	Ft 0.01	Sig.	Pr > F
Epoca de Siem. (E)	2	405.2119	202.6059	32.51	3.55	6.01	**	<.0001
Variedad de Q. (V)	2	0.0452	0.0226	0.00	3.55	6.01	ns	0.9964
Interaccion E * V	4	42.3081	10.5770	1.70	2.93	4.58	ns	0.1945
Error experimental	18	112.18	6.2322					
TOTAL	26	559.74519						
C.V.= 17.88%		Media = 13.96						

La prueba de comparaciones de Tukey ($p \leq 0.05$) se muestra en la tabla 10, para el promedio del diámetro de panoja del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra, indica que hubo diferencias estadísticas entre las tres épocas de siembra, en donde se puede observar que, la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo mayor diámetro de panoja del cultivo de quinua con 18.68 cm, el cual fue estadísticamente superior a las demás épocas de siembra; seguido por la primera época de siembra (25 de octubre) con un promedio de diámetro de panoja de 14.01 cm, y por último tenemos la tercera época de siembra (06 de diciembre) que tuvo el más bajo promedio con 9.19 cm de diámetro de panoja del cultivo de quinua. (Blanco, 2009) indica que el diámetro de panoja varía en un rango de 2.9 a 19.4 cm según un ensayo de análisis de diversidad genética del germoplasma de quinua de Bolivia

Tabla 10. Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para el diámetro del cultivo de quinua

Orden de merito	Época de siembra	Diámetro de panoja (cm)	Tukey Agrupado
1	Segunda época 15 – noviembre	18.68	a
2	Primera época 25 – octubre	14.01	b
3	Tercera época 06 – diciembre	9.19	c

Como hubo diferencias estadísticas en las épocas de siembra sobre el diámetro de panoja en el cultivo de quinua, se ha realizado un gráfico con el fin de conocer las diferencias numéricas entre las épocas de siembra (figura 19), en donde se observa que, la segunda época de siembra (15 de noviembre) tuvo un mayor promedio de diámetro de panoja del cultivo de quinua con 18.68 cm, seguido por la primera época de siembra (25 de octubre) con un promedio de 14.01 cm, y en más bajo diámetro de panoja fue obtenido

por la tercera época de siembra (06 de diciembre) con un promedio de 9.19 cm de diámetro de panoja del cultivo de quinua.

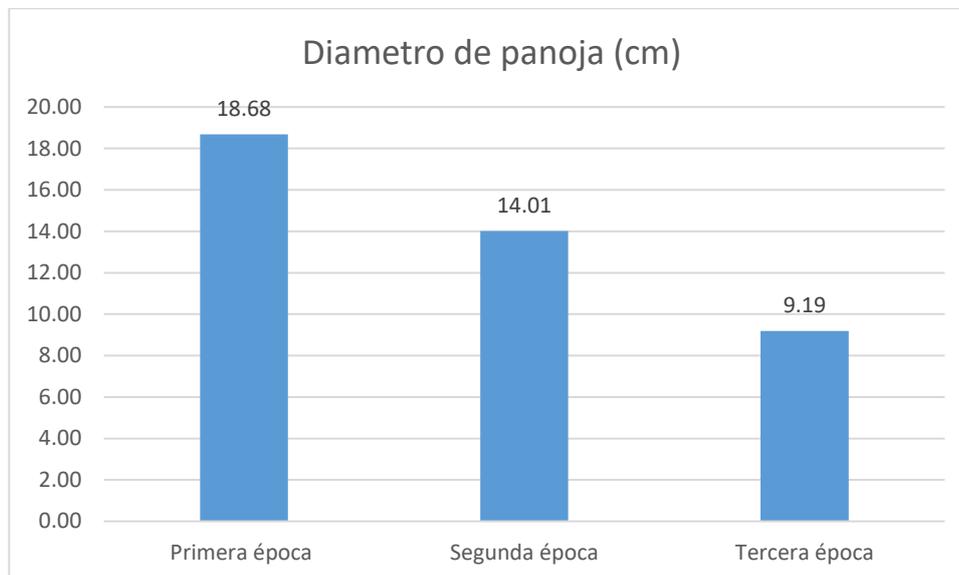


Figura 19. Diferencias estadísticas respecto diámetro de panoja entre las épocas de S.

4.1.5 Rendimiento de grano del cultivo de quinua

El análisis de varianza para el rendimiento de grano del cultivo de quinua (tabla 11), en donde se observa que existe una diferencia estadística altamente significativa entre las épocas de siembra (E), explicando que el rendimiento de grano del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra fueron diferentes, lo cual nos da a entender que las épocas de siembra influyeron de manera diferente en el rendimiento de grano del cultivo de quinua. Entre las variedades de quinua (V), no hubo diferencia estadística, indicando que el diámetro de panoja del cultivo de quinua con las diferentes variedades de quinua en estudio no tuvo diferencia, lo cual nos indica que las diferentes variedades de quinua no influyeron en el rendimiento de grano del cultivo de quinua. Asimismo, no se encontró diferencia estadística en la interacción de las épocas de siembra (E) por las variedades de quinua (V) lo cual explica que estos factores actúan de forma independiente sobre el rendimiento de grano de la quinua. El coeficiente de variabilidad es de 21.54%.



Tabla 11. Análisis de varianza para el rendimiento de grano del cultivo de quinua

F.V.	G.L.	S.C.	C.M.	Fc	Ft 0.05	Ft 0.01	Sig.	Pr > F
Época de Siem. (E)	2	152.3283	76.1641	38.91	3.55	6.01	**	<.0001
Variedad de Q. (V)	2	7.3081	3.6540	1.87	3.55	6.01	ns	0.1834
Interacción E * V	4	11.9669	2.9917	1.53	2.93	4.58	ns	0.2362
Error experimental	18	35.2384	1.9577					
TOTAL	26	206.84167						
C.V.= 21.54%		Media = 6.495						

La prueba de comparaciones de Tukey ($p \leq 0.05$) se muestra en la tabla 12, para el promedio del rendimiento de grano del cultivo de quinua con las diferentes épocas de siembra, indica que hubo diferencias estadísticas entre las tres épocas de siembra, en donde se puede observar que, la primera época de siembra (25 de octubre) tuvo mayor rendimiento de grano del cultivo de quinua con 3.28 tn/ha, el cual fue estadísticamente superior a las demás épocas de siembra; seguido por la segunda época de siembra (15 de noviembre) con un promedio rendimiento de grano de 2.74 tn/ha, y por último tenemos la tercera época de siembra (06 de diciembre) que tuvo el más bajo promedio con 1.41 tn/ha de rendimiento de grano del cultivo de quinua.

Tabla 12. Prueba de significancia de Tukey ($P \leq 0.05$) en épocas de siembra para el rendimiento de grano del cultivo de quinua

Orden de merito	Época de siembra	Rendimiento de grano (tn/ha)	Tukey Agrupado
1	Primera época 25 – octubre	3.28	a
2	Segunda época 15 – noviembre	2.74	b
3	Tercera época 06 – diciembre	1.41	c

Como hubo diferencias estadísticas en las épocas de siembra sobre el rendimiento de grano en el cultivo de quinua, se ha realizado un gráfico con el fin de conocer las diferencias estadísticas entre las épocas de siembra (figura 20), en donde se observa que, la primera época de siembra tuvo mayor rendimiento de grano en el cultivo de quinua con 3.28 tn/ha con la variedad Blanca de Juli; este resultado resulta semejante por (Molina, 2016) donde resalta un alto rendimiento de la variedad Blanca de Juli (4,931 kg/ha), seguido por la segunda época de siembra con un promedio rendimiento de grano de 2.74 tn/ha con la variedad , y el más bajo rendimiento de grano fue obtenido por la tercera época de siembra con 1.41 tn/ha de rendimiento de grano del cultivo de quinua.

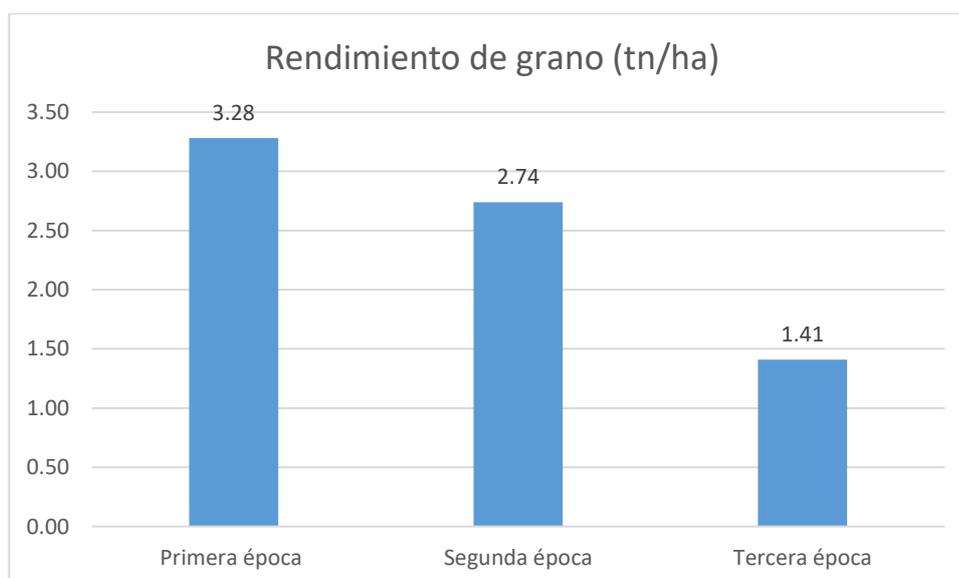


Figura 20. Diferencias estadísticas respecto a rendimiento entre épocas de siembra



4.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP

4.2.1 Calibración del modelo Aquacrop para el cultivo de quinua

La calibración del modelo Aquacrop fue realizada utilizando la información recolectada de campo experimental para las variables cobertura del dosel (CCo), coeficiente de crecimiento del dosel (CGC), coeficiente de disminución del dosel (CDC), cobertura máxima del dosel (CCx), índice de cosecha de referencia (HIo), productividad del agua (WP*), umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel, umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel, forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana, coeficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo, tiempo de florecimiento, duración de la etapa de florecimiento, tiempo máximo de cobertura del dosel, tiempo de senescencia, tiempo de cosecha, máxima profundidad de las raíces y tiempo de la profundidad máxima de enraizamiento, considerando los días calendario durante el ciclo vegetativo.

Para la cobertura del dosel del promedio de plántulas (Cco) al 90% de emergencia, los valores fueron muy similares siendo el porcentaje diario de cobertura de 5 para las tres variedades Pasankalla, Salcedo INIA y Blanca de Juli. Para la variable Coeficiente de crecimiento del dosel (CDG), los valores de calibración fueron similares, siendo de 9,0% para la variedad Pasankalla y de 9,1% para Salcedo INIA y Blanca de Juli, respectivamente. El valor del Coeficiente de disminución del dosel (CDC) fue similar para las tres variedades; 7,1% para Blanca de Juli; 7,3 para Salcedo INIA y 7,5 para Pasankalla; una situación similar se presentó para la variable Cobertura máxima del dosel (CCx) cuyo valor fue de 85% para las variedades Pasankalla y Salcedo INIA y de 88% para la variedad de Blanca de Juli (Tablas 13; 14 y 15).



En cuanto al Índice de cosecha de referencia (HIo) se observaron ligeras diferencias entre las tres variedades, siendo los valores obtenidos de la primera época de siembra con la calibración de 36,0% para la variedad Pasankalla, 41,0% para la variedad Salcedo INIA y 31% para Blanca de Juli; para la segunda época de siembra con la calibración de 36,0% para la variedad Pasankalla, 32,0% para la variedad Salcedo INIA y 38% para Blanca de Juli; para la tercera época de siembra con la calibración de 19,0% para la variedad Pasankalla, 20,0% para la variedad Salcedo INIA y 20% para Blanca de Juli; por otro lado, la Productividad del agua normalizada por ETo y CO₂ (WP*) se consideró con un parámetro conservativo establecido por la FAO y los estudios de simulación según, Raes *et al.* (2018) con el valor de 10,5 g/m.

Los umbrales determinados para la calibración de las tres épocas de siembra, fueron semejantes para las tres variedades; siendo estos valores de 0,25 para el Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel; 3,0 para la Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático; 0,85 para el Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana; 3,0 para la Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana; 1,1 para el Coeficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo; sin embargo, para la variable Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel fue de 0,55.

En cuanto a la calibración de días calendario para la primera época de siembra, se observaron ligeras diferencias para el desarrollo fisiológico como tiempo de florecimiento, la variedad Salcedo INIA fue la que obtuvo el valor más bajo con 82 días, mientras que para la variedad Pasankalla obtuvo 86 días y para la variedad Blanca de Juli se obtuvieron 84 días. Para la variable Duración de la etapa de florecimiento, se



observaron ligeras diferencias entre las variedades en estudio, siendo la variedad Salcedo INIA la que obtuvo 20 días, seguida por la variedad Blanca de Juli con 24 días, mientras la variedad Pasankalla 20 días. Para la variable Tiempo de senescencia, la variedad Blanca de Juli fue la que obtuvo el valor más bajo con 133 días, seguida de la variedad Salcedo INIA con 139 y Pasankalla con 139 días. En cuanto a la variable Tiempo de cosecha, fue la variedad Pasankalla la que registró la menor cantidad de días con 162 días; seguida de la variedad Salcedo INIA con 168 días y, finalmente, la variedad Blanca de Juli con 170 días de tiempo de cosecha.

En cuanto a la calibración de días calendario para la segunda época de siembra, se observaron ligeras diferencias para el desarrollo fisiológico como tiempo de florecimiento, la variedad Salcedo INIA con 83 días, mientras que para la variedad Pasankalla obtuvo 83 días y para la variedad Blanca de Juli se obtuvieron 81 días. Para la variable Duración de la etapa de florecimiento, se observaron ligeras diferencias entre las variedades en estudio, siendo la variedad Salcedo INIA la que obtuvo los mayores días de duración de dicha etapa con 29 días, seguida por la variedad Blanca de Juli con 27 días, mientras la variedad Pasankalla fue la de menor duración del florecimiento con 18 días. Para la variable Tiempo de senescencia, la variedad Blanca de Juli fue la que obtuvo los valores más altos de calibración con 142 días, seguida de la variedad Salcedo INIA con 140 y Pasankalla con 125 días. En cuanto a la variable Tiempo de cosecha, fue la variedad Pasankalla la que registró la mayor cantidad de días con 176 días; seguida de la variedad Salcedo INIA con 162 días y, finalmente, la variedad Blanca de Juli con 176 días de tiempo de cosecha.

En cuanto a la calibración de días calendario de la tercera época de siembra, se observaron ligeras diferencias para el desarrollo fisiológico como tiempo de florecimiento, la variedad Salcedo INIA fue la que obtuvo el valor más bajo con 89 días,



mientras que para la variedad Pasankalla obtuvo 91 días y para la variedad Blanca de Juli se obtuvieron 91 días. Para la variable Duración de la etapa de florecimiento, se observaron ligeras diferencias entre las variedades en estudio, siendo la variedad Salcedo INIA la que obtuvo los menores días de duración de dicha etapa con 21 días, seguida por la variedad Blanca de Juli con 25 días, mientras la variedad Pasankalla fue la de menor duración del florecimiento con 26 días. Para la variable Tiempo de senescencia, la variedad Blanca de Juli fue la que obtuvo los valores con 141 días, seguida de la variedad Salcedo INIA con 143 y Pasankalla con 141 días. En cuanto a la variable Tiempo de cosecha, fue la variedad Pasankalla la que registró la menor cantidad de días con 151 días; seguida de la variedad Salcedo INIA con 161 días y, finalmente, la variedad Blanca de Juli con 150 días de tiempo de cosecha.

El desarrollo de Máxima profundidad de las raíces, fue similar para las tres variedades siendo de 1 m; en tanto, el Tiempo de la profundidad máxima de enraizamiento fue muy similar para las tres variedades, siendo de 80 días para la variedad Pasankalla y de 81 días para las variedades Salcedo INIA y Blanca de Juli (Tablas 13, 14 y 15).

Tabla 13. Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para la primera época de siembra, variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA.

PRIMERA EPOCA-BLOQUES DE CALIBACION				
Del Cultivo	Datos de Entrada	Unidad	Valores de Calibración	
			Pasankalla	Blanca de Juli
Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (Cco)		% día ⁻¹	0.25	0.3
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)		%	0.10	0.09
Coefficiente de disminución del dosel (CDC)		%	0.11	0.10
Cobertura máxima del dosel (CCx)		%	0.85	0.85
Índice de cosecha de referencia (HIo)		%	38	41
Productividad del agua normalizada por ET _o y CO ₂ (WP*)		g/m ²	10	10
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p upper)		-	0.25	0.25
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p lower)		-	0.60	0.55
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)		-	3	3
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (p upper)		-	0.65	0.65
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (S)		-	3	3
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (p upper)		-	0.65	0.65
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)		-	3	3
Coefficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo (K _{cb medio})			1.1	1.1
Tiempo de florecimiento		días	86	84
Duración de la etapa de florecimiento		días	24	20
Tiempo máximo de cobertura del dosel		días	86	87
Tiempo de senescencia		días	133	139
Tiempo de cosecha		días	162	170
Máxima profundidad de las raíces		m	1	1
Tiempo de la profundidad máxima de enraizamiento, días calendario		días	69	74

Tabla 14. Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para la segunda época de siembra, variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA.

SEGUNDA EPOCA-BLOQUES DE CALIBRACION				
Del Cultivo	Datos de Entrada	Unidad	Valores de Calibración	
			Pasankalla	Salcedo INIA
Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (Cco)		% día ⁻¹	0.3	0.3
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)		%	0.14	0.08
Coefficiente de disminución del dosel (CDC)		%	0.20308	0.08
Cobertura máxima del dosel (CCx)		%	0.85	0.80
Índice de cosecha de referencia (HIo)		%	36	32
Productividad del agua normalizada por ETo y CO ₂ (WP*)		g/m ²	10.5	10.5
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p upper)		-	0.25	0.25
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p lower)		-	0.55	0.55
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)		-	3	3
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (p upper)		-	0.65	0.65
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (S)		-	3	3
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (p upper)		-	0.65	0.65
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)		-	3	3
Coefficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo (K _{cb,medio})			1.1	1.1
Tiempo de florecimiento		días	83	81
Duración de la etapa de florecimiento		días	18	26
Tiempo máximo de cobertura del dosel		días	86	81
Tiempo de senescencia		días	125	140
Tiempo de cosecha		días	162	176
Máxima profundidad de las raíces		m	1	1
Tiempo de la profundidad máxima de enraizamiento, días calendario		días	75	79
				82

Tabla 15. Parámetros calibrados del modelo AquaCrop para la tercera época de siembra, variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA.

TERCERA EPOCA-BLOQUES DE CALIBRACION				
Del Cultivo	Datos de Entrada	Unidad	Valores de Calibración	
			Pasankalla	Salcedo INIA
Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (Cco)		% día ⁻¹	0.3	0.3
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)		%	0.10	0.16
Coefficiente de disminución del dosel (CDC)		%	0.08	0.2
Cobertura máxima del dosel (CCx)		%	0.85	0.85
Índice de cosecha de referencia (HIo)		%	19	20
Productividad del agua normalizada por ETo y CO ₂ (WP*)		g/m ²	10	10.5
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p upper)		-	0.25	0.25
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p lower)		-	0.55	0.55
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)		-	3	3
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (p upper)		-	0.65	0.65
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (S)		-	3	3
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (p upper)		-	0.65	0.65
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)		-	3	3
Coefficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo (K _{cb,medio})			1.1	1.1
Tiempo de florecimiento		días	91.0	59.0
Duración de la etapa de florecimiento		días	26.0	11.0
Tiempo máximo de cobertura del dosel		días	74.0	59.0
Tiempo de senescencia		días	141.0	143.0
Tiempo de cosecha		días	151.0	161.0
Máxima profundidad de las raíces		m	1.0	1.0
Tiempo de la profundidad máxima de enraizamiento, días calendario		días	74.0	48.0
				73.0

Después de haber concluido con la simulación para la calibración la variedad Blanca de Juli muestra un periodo vegetativo más largo a diferencia de las variedades Salcedo INIA y Pasankalla, las cuales mantuvieron un periodo vegetativo donde la senescencia inició a partir de los 157 días, resultando un mejor ajuste de los datos observados en campo.

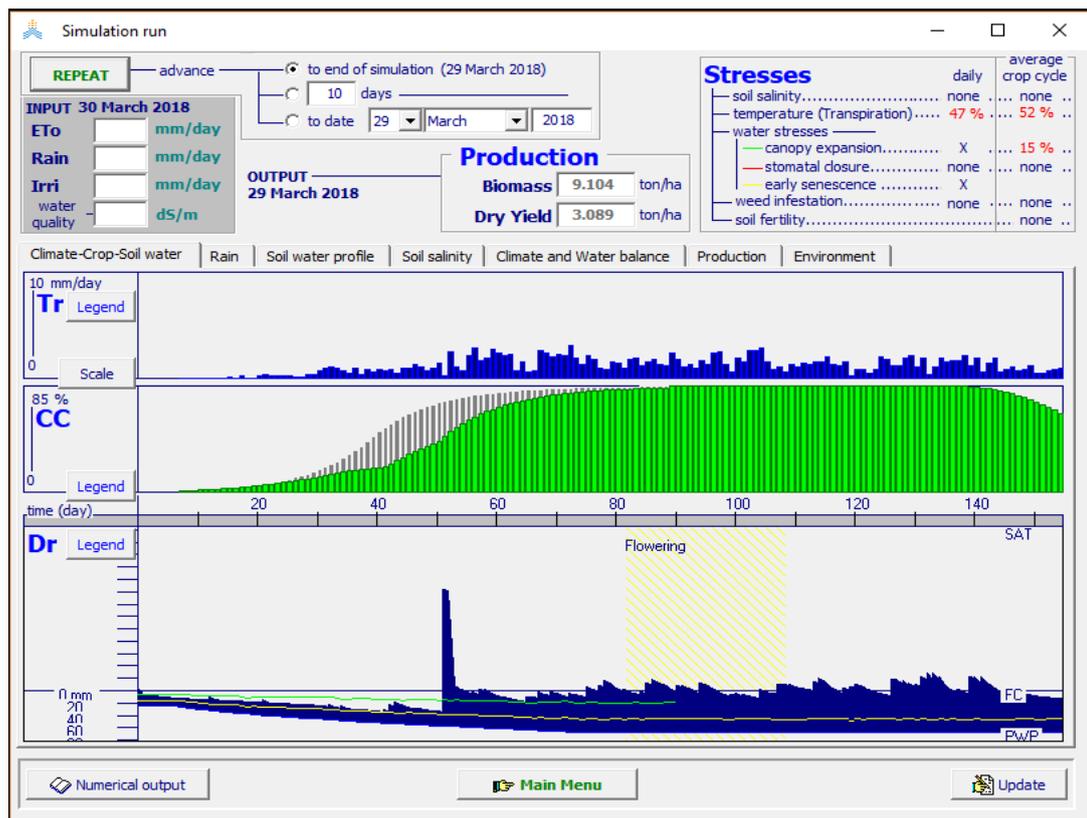


Figura 21. Interfaz con la simulación de la calibración para la variedad Blanca de Juli.

a. Resultado del rendimiento de grano a partir de la calibración para la primera época de siembra

Para el presente estudio de investigación se instalaron las parcelas de calibración en las cuales se realizó la colecta de datos de entrada para el ajuste de modelamiento; asimismo las condiciones de manejo de estas parcelas fueron las más implementadas respecto a las labores culturales, abonamiento, aplicación de riego complementario en el

tiempo oportuno; debido a que estas son consideradas como datos para determinar la parametrización de calibración del modelo.

Para la primera época de siembra la variedad Blanca de Juli obtuvo el rendimiento más alto con 3.34 tn/ha, seguido por la variedad pasankalla con 3.30 tn/ha y por último la variedad Salcedo INIA con 3.20 tn/ha. Los rendimientos simulados de las parcelas de calibración la variedad Blanca de Juli con 3.09 tn/ha, la variedad Pasankalla con 2.19 tn/ha y por último la variedad Salcedo INIA con 2.30 tn/ha, a continuación, en la figura 22 se muestra el resultado de rendimiento obtenido en las parcelas de calibración observadas y la simuladas en Aquacrop respectivamente.

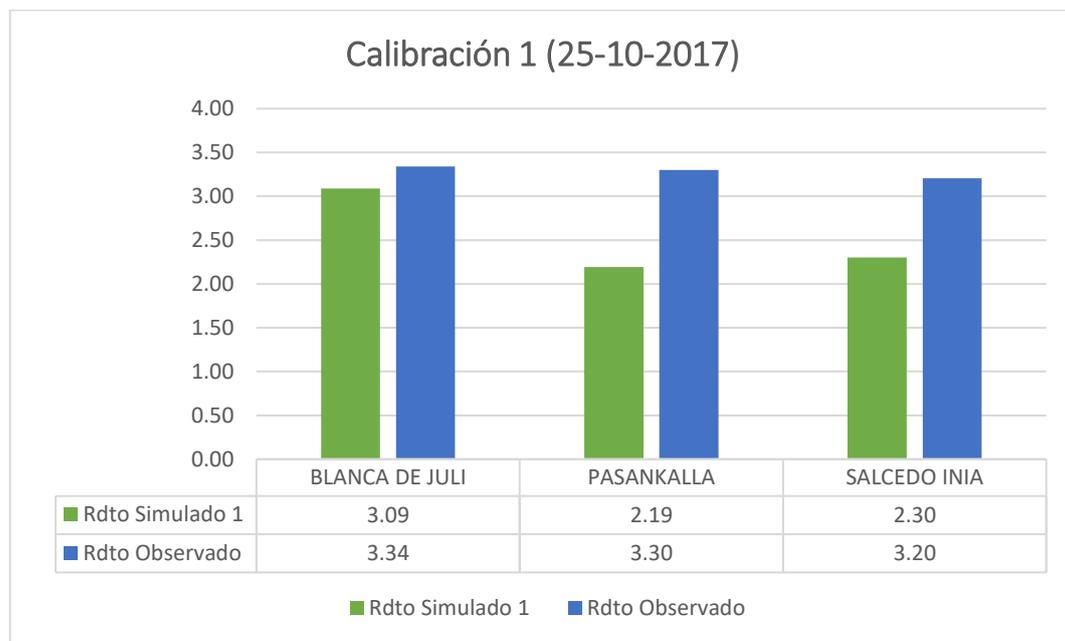


Figura 22. Rendimientos simulados y observados de quinua, primera época de siembra.

b. Resultado del rendimiento de grano a partir de la calibración para la segunda época de siembra

Para la segunda época de siembra la variedad Blanca de Juli obtuvo el rendimiento más alto con 2.90 tn/ha, seguido por la variedad Salcedo INIA con 2.91 tn/ha y por último la variedad Pasankalla con 2.40 tn/ha. Los rendimientos simulados de las parcelas de calibración la variedad Salcedo INIA obtuvo el rendimiento más alto con 2.50 tn/ha, seguido de la variedad Blanca de Juli con 2.35 y por último la variedad Pasankalla con 1.92 tn/ha, en la figura 23 se muestra el resultado de rendimiento obtenido en las parcelas de calibración observadas y la simuladas en Aquacrop respectivamente.

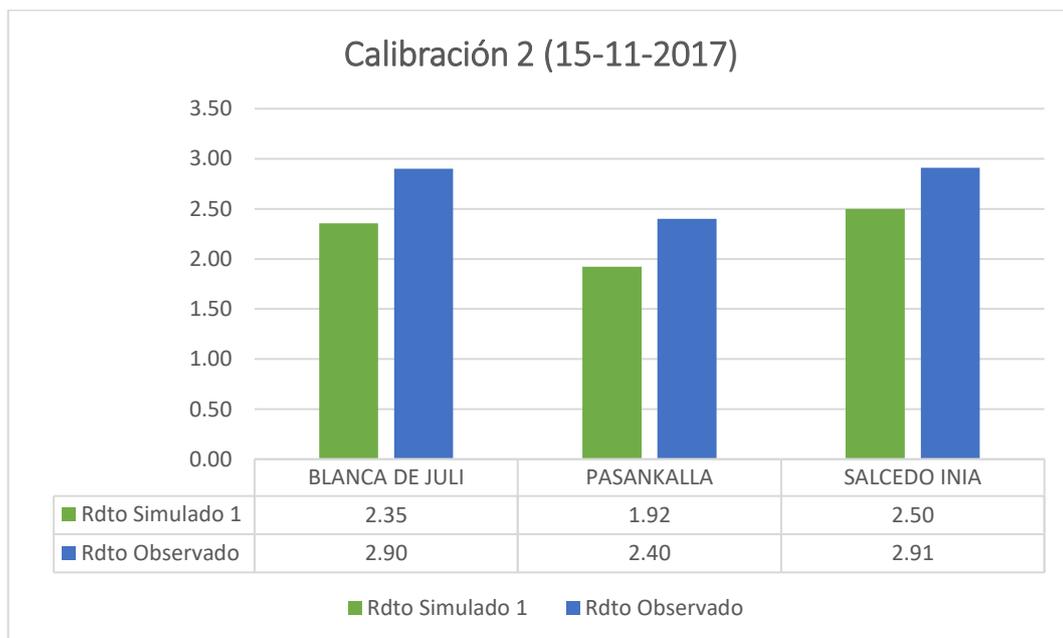


Figura 23. Rendimientos simulados y observados de quinua, segunda época de siembra.

c. Resultado del rendimiento de grano a partir de la calibración para la tercera época de siembra

Para la tercera época de siembra la variedad Blanca de Juli obtuvo el rendimiento más alto con 1.56 tn/ha, seguido por la variedad Salcedo INIA con 1.39 tn/ha y por último la variedad Pasankalla con 1.30 tn/ha. Los rendimientos alcanzados con la simulación del modelo de las parcelas de calibración la variedad Salcedo INIA obtuvo el rendimiento más alto con 1.15 tn/ha, seguido por la variedad Pasankalla con 1.15 tn/ha y por último la variedad Blanca de Juli con 0.95 tn/ha, a continuación, en la figura 24 se muestra el resultado de rendimiento obtenido en las parcelas de calibración observadas y la simuladas en Aquacrop respectivamente.

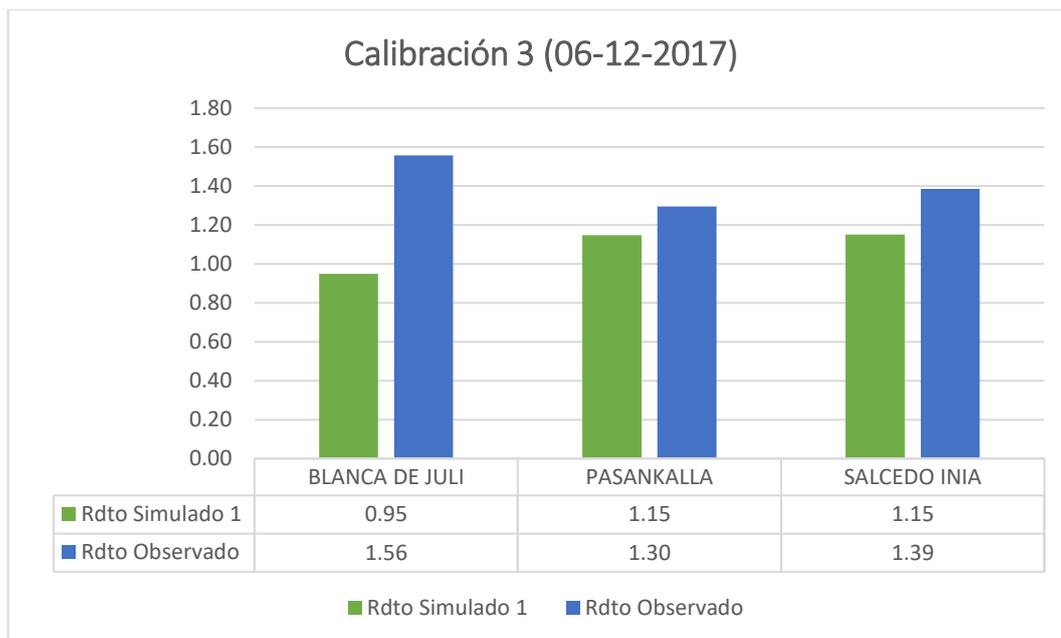


Figura 24. Rendimientos simulados y observados de quinua, tercera época de siembra.



4.2.3 Validación del modelo Aquacrop para el cultivo de quinua

Con el fin de medir la precisión con la que el modelo AquaCrop puede reproducir la variable de cobertura foliar observadas, se utilizaron los valores obtenidos en la calibración (Tablas 13, 14 y 15), y fueron probados en las tres repeticiones de cada variedad de quinua y para cada época de siembra, y se comparó con las observaciones registradas en campo.

En la Tabla 16, se muestran los resultados de los estadísticos de la evolución de la cobertura foliar (%) para tres variedades de quinua. Donde “n” es el número de parcelas por época de siembra y variedad, “r” es el coeficiente de Pearson, el cual es un índice de dependencia lineal entre dos variables y varía de menos uno a uno, “RMSE”, es el Cuadrado Medio del Error, el cual entrega una medida en porcentaje de la diferencia relativa de los datos simulados en comparación con los observados, “d” es el índice de concordancia, el cual indica que si es cercano a uno, mejor será la comparación entre las dos variables (simulada y observada) y “EF” es la Eficiencia del modelo, el cual determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos.

Para la variedad Pasankalla, el “r” se encuentra entre 0,91 y 0,97; el “RMSE” entre 16.59 y 19.94; el “d” entre 0,95 y 0,98 y el “EF” entre 0,76 y 0,93. Para la variedad Salcedo INIA, el “r” se encuentra entre 0,90 y 0,95, el “RMSE” entre 13.55 y 18.77; el “d” entre 0,96 y 0,98 y el “EF” entre 0,82 y 0,92. Para la variedad Blanca de Juli, el “r” se encuentra entre 0,92 y 0,95; el “RMSE” entre 8.55 y 19.78; el “d” entre 0,96 y 0,97 y el “EF” entre 0,81 y 0,85 (ver tabla 16). (Geerts, 2009) halló un NRSME del 16%; EF de 0.85 en variedades de quinua sembradas en diferentes condiciones de Bolivia.

Tabla 16. Resultados de los estadísticos de la evolución de la cobertura foliar (%) para tres variedades de quinua, campaña Agrícola 2017-2018, Taraco.

Variedad	Época de siembra	n	r	RMSE	d	EF
Blanca de Juli	25/10/2017	3	0.92	19.1	0.96	0.81
	15/11/2017	3	0.99	8.55	0.99	0.98
	6/12/2017	3	0.94	19.78	0.97	0.85
Pasankalla	25/10/2017	3	0.91	19.94	0.95	0.76
	15/11/2017	3	0.97	16.59	0.98	0.93
	6/12/2017	3	0.93	19.77	0.95	0.86
Salcedo INIA	25/10/2017	3	0.90	18.46	0.96	0.82
	15/11/2017	3	0.99	13.55	0.98	0.92
	6/12/2017	3	0.95	18.77	0.97	0.88

En la figura 25, se observa la validación de la Cobertura foliar correspondiente a la primera época de siembra para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, donde se visualiza diferencias entre las tres variedades seleccionadas por época de siembra hasta alcanzar la cobertura foliar máxima. Los valores del cuadrado medio del error (RMSE) se encontraron entre 18.46 y 19.94 indicándonos que el modelo tiene semejanza en relación a la simulación ya la toma de imágenes que han sido recopiladas de las parcelas experimentales y procesadas a través del software Image Canopy. con respecto al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) se obtuvieron valores de 0,81; 0,76 y 0,82 respectivamente.

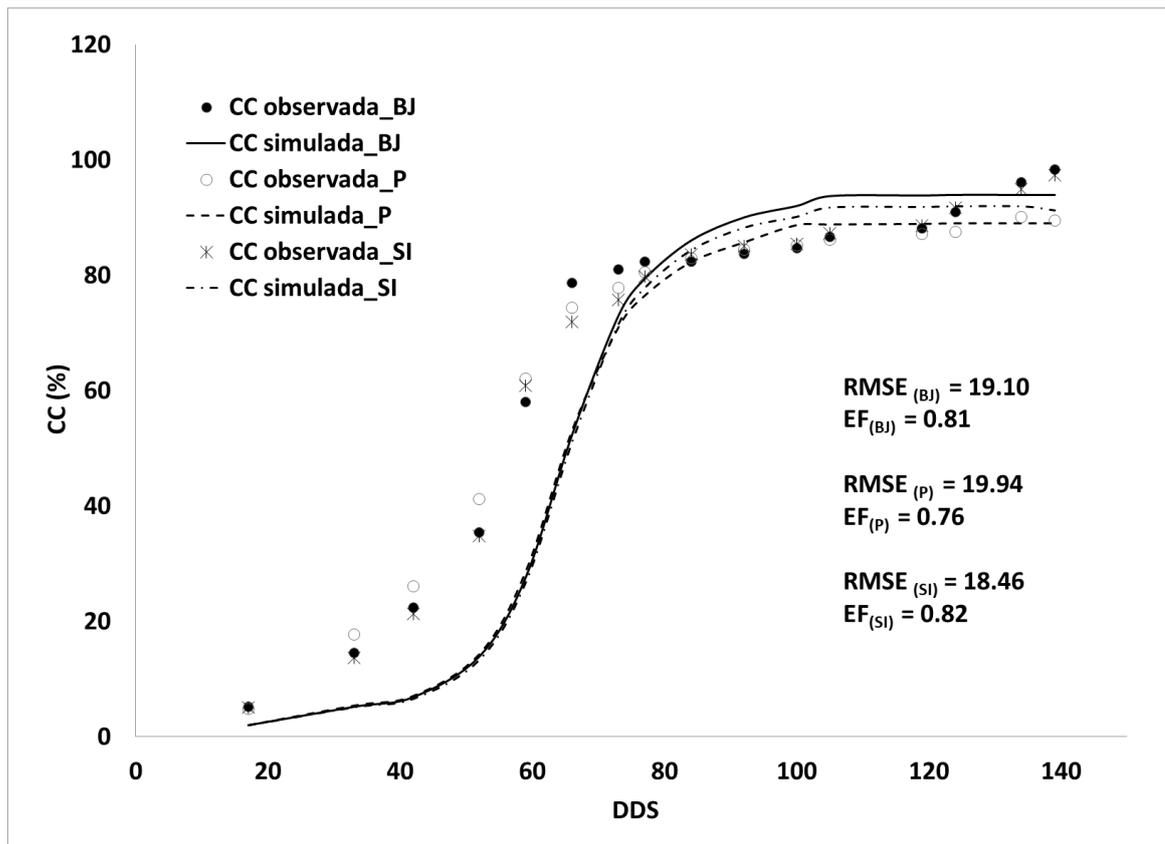


Figura 25. Comparación de la cobertura foliar (%) para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, primera época de siembra

En la figura 26, se observa la validación de la Cobertura foliar correspondiente a la segunda época de siembra para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, donde se visualiza diferencias entre las tres variedades seleccionadas por época de siembra hasta alcanzar la cobertura foliar máxima. Los valores del cuadrado medio del error (RMSE) se encontraron entre 8.55 y 16.59 indicándonos que el modelo tiene semejanza en relación a la simulación ya la toma de imágenes que han sido recopiladas de las parcelas experimentales y procesadas a través del software Image Canopy. con respecto al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) se obtuvieron valores de 0,98; 0,93 y 0,95 respectivamente.

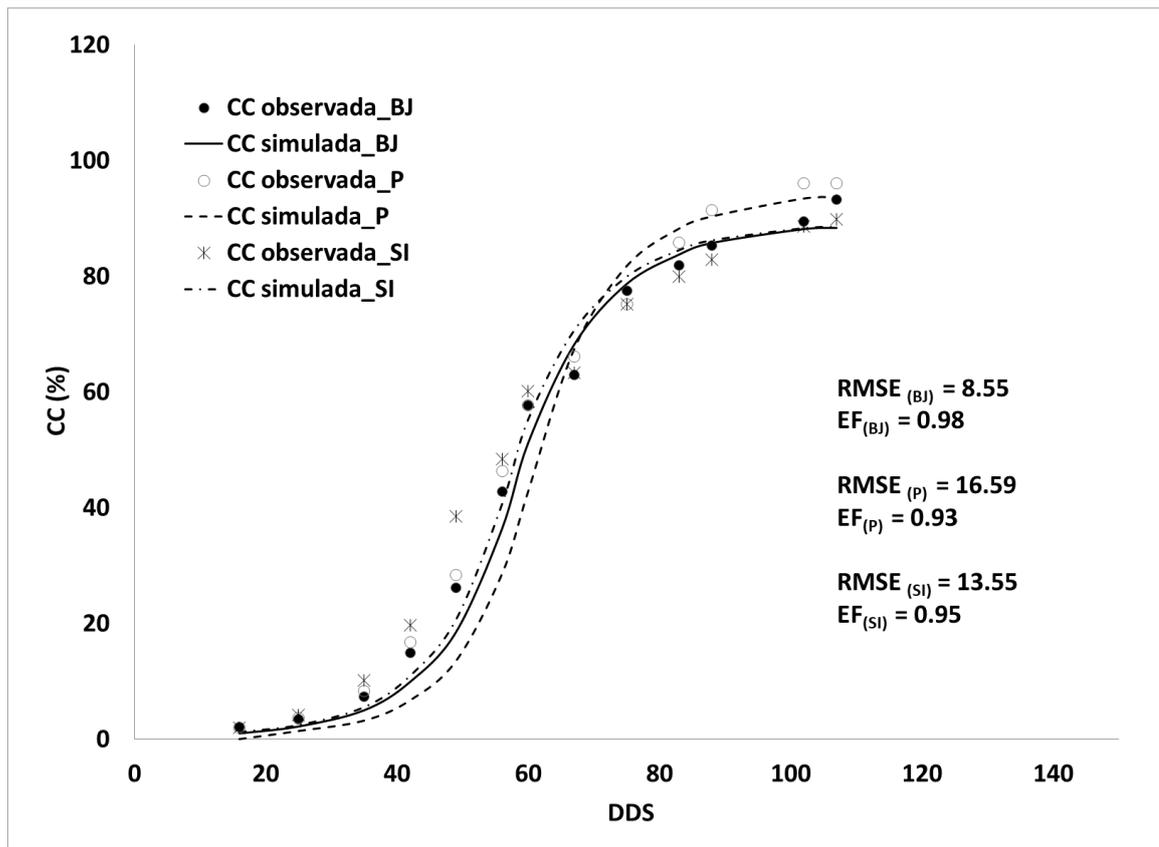


Figura 26. Comparación de la cobertura foliar (%) para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, segunda época de siembra

En la figura 27, se observa la validación de la Cobertura foliar correspondiente a la tercera época de siembra para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, donde se visualiza diferencias entre las tres variedades seleccionadas por época de siembra hasta alcanzar la cobertura foliar máxima. Los valores del cuadrado medio del error (RMSE) se encontraron entre 18.4 y 24.94 indicándonos que el modelo tiene semejanza en relación a la simulación, con respecto al coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) se obtuvieron valores de 0,91; 0,85 y 0,92 respectivamente.

(Geerts, 2009) en el estudio realizado en el altiplano boliviano bajo condiciones de riego deficitario halla el valor del NRSME de 25%; EF de 0.85; R2 de 0.88 en la localidad de Patacamaya.

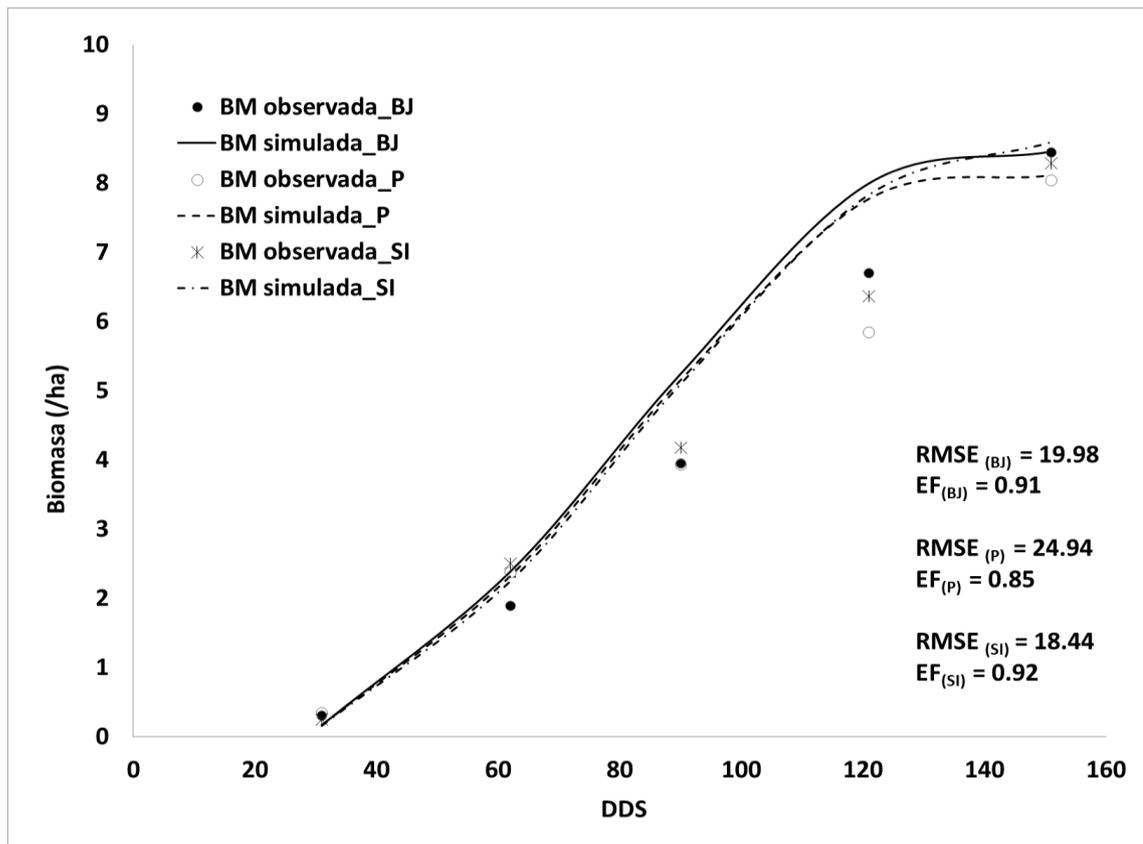


Figura 27. Comparación de la cobertura foliar (%) para las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, segunda época de siembra.

El desarrollo vegetativo de las variedades Blanca de Juli, Pasankalla y Salcedo INIA, para tres épocas de siembra, mediante la validación de cobertura se observa que el modelo Aquacrop simula un rápido desarrollo de canopia en relación a la información que ha sido obtenida en campo, (Geerts *et al.*, 2016) menciona que una mayor acumulación de unidades de transpiración y biomasa infiere en el rendimiento alcanzado por el cultivo, es por ello que este valor en la parametrización de la calibración para el cultivo se debe considerar primordial; asimismo, lo descrito se relaciona con el estudio donde prueba niveles de fertilidades y apreció una ligera sobrestimación de la biomasa en los tratamientos sin fertilización tanto bajo riego como a secano (Fajardo *et al.*, 2016).

Por otro lado, para la validación de rendimientos obtenidos se tomó en cuenta la calibración realizada con los pasos descritos en el capítulo de calibración, donde se evaluó el desempeño estadístico del software a fin de validar los datos obtenidos de las parcelas experimentales durante la campaña 2017-2018 en el distrito de Taraco, Huancané.

a. Respuesta del rendimiento de grano para la validación del modelo Aquacrop para la primera época de siembra

El experimento demostró la diferencia en la obtención del rendimiento final, obteniendo así la variedad Blanca de Juli con el rendimiento más alto con 2.85 tn/ha, seguido por la variedad Pasankalla con 2.78 tn/ha y por último la variedad Salcedo INIA con 2.74 tn/ha. Los rendimientos alcanzados con la simulación del modelo de las parcelas de validación la variedad Salcedo INIA obtuvo el rendimiento más alto con 2.74 tn/ha, seguido por la variedad Blanca de Juli con 2.72 tn/ha y por último la variedad Pasankalla con 2.71tn/ha, tal como se muestra en la figura 28.

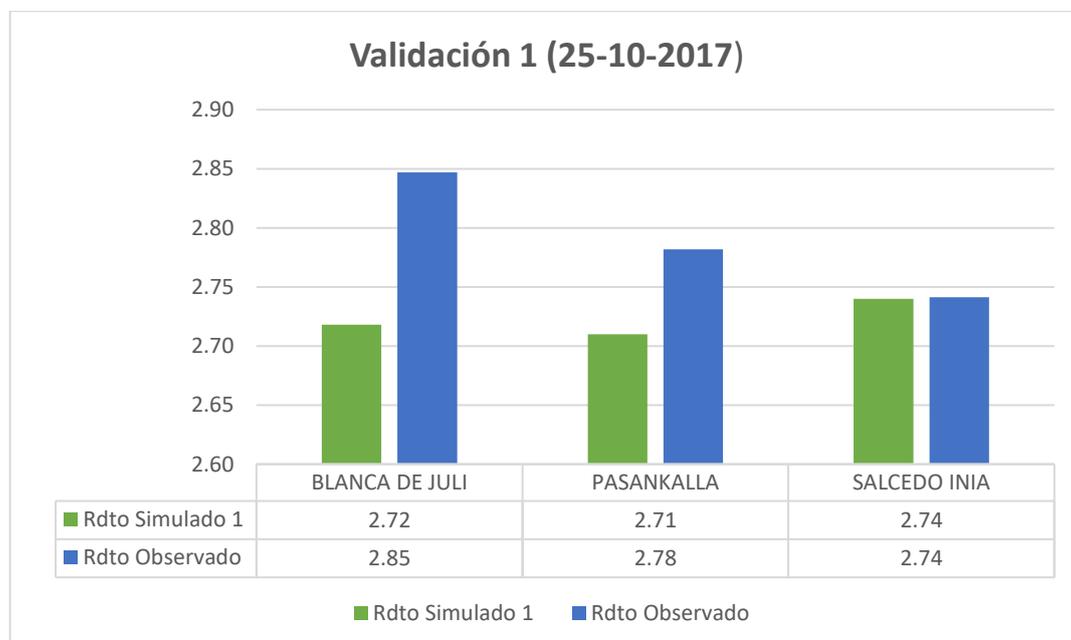


Figura 28. Diferencias estadísticas del rendimiento de quinua en la validación de la primera época de siembra.

b. Respuesta del rendimiento de grano para la validación del modelo Aquacrop para la segunda época de siembra

El experimento demostró la diferencia en la obtención del rendimiento final, obteniendo así la variedad Blanca de Juli con el rendimiento más alto con 2.35 tn/ha, seguido por la variedad Salcedo INIA con 2.21 tn/ha y por último la variedad Pasankalla con 1.73 tn/ha. Los rendimientos alcanzados con la simulación del modelo de las parcelas de validación, la variedad Blanca de Juli obtuvo el rendimiento más alto con 2.41 tn/ha, seguido por la variedad Salcedo INIA con 1.74 tn/ha y por último la variedad Pasankalla con 1.71tn/ha, tal como se muestra en la figura 29.

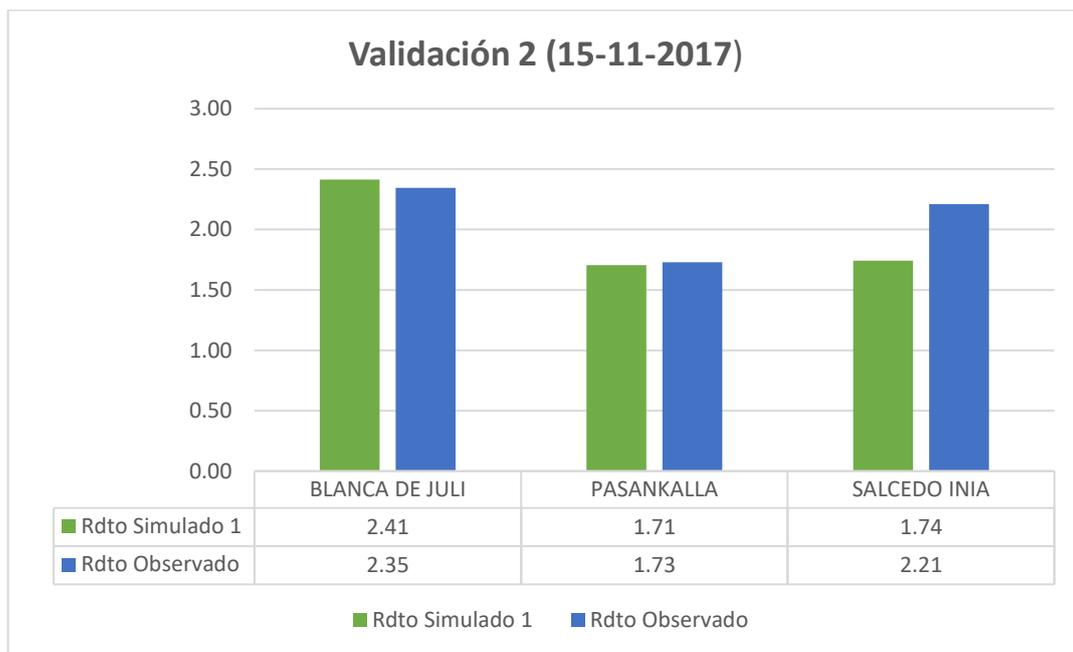


Figura 29. Diferencias estadísticas del rendimiento de quinua en la validación de la primera época de siembra.

c. Respuesta del rendimiento de grano para la validación del modelo Aquacrop para la tercera época de siembra

El experimento demostró la diferencia en la obtención del rendimiento final, obteniendo así la variedad Blanca de Juli obtuvo el rendimiento más alto con 1.59 tn/ha, seguido por la variedad Salcedo INIA con 1.42 tn/ha y por último la variedad Pasankalla con 0.92 tn/ha. Los rendimientos alcanzados con la simulación del modelo de las parcelas de validación la variedad Blanca de Juli obtuvo el rendimiento más alto con 1.55 tn/ha, seguido por la variedad Salcedo INIA con 1.22 tn/ha y por último la variedad Pasankalla con 0.86 tn/ha, a continuación, en la figura 30 se muestra el resultado de rendimiento obtenido en las parcelas de validación observadas y la simuladas en Aquacrop respectivamente.

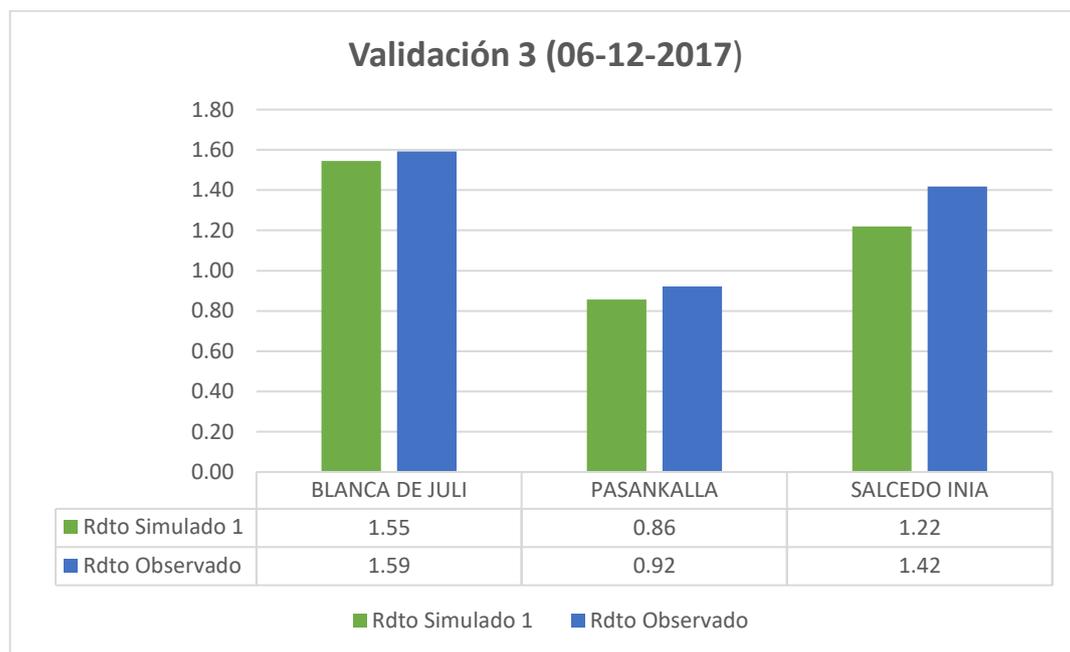


Figura 30. : Diferencias estadísticas del rendimiento de quinua en la validación de la tercera época de siembra.



V. CONCLUSIONES

Los resultados de la presente investigación dan a conocer que la mejor época de siembra bajo las condiciones del distrito de Taraco es la primera época instalada el 25 de octubre, obteniendo un mejor comportamiento respecto a diámetro de planta alcanzando 18.6 cm, una altura promedio de 163.3 cm y un rendimiento óptimo de 3.28 tn/ha, seguido de la segunda época de siembra (15 de noviembre) con 2.74 tn/ha y por último la tercera época de siembra (06 de diciembre) con 1.41 tn/ha.

AquaCrop simuló la calibración con suficiente robustez el efecto de las épocas de siembra para el cultivo de quinua, demostrando ser sensible a los cambios por época y variedades obteniendo rendimientos para la primera época la variedad Blanca de Juli con 3.34 tn/ha y simulado de 3.09 tn/ha; para la segunda época la variedad Blanca de Juli con 2.90 tn/ha y simulado la variedad Salcedo INIA con 2.50 tn/ha; para la tercera época de siembra la variedad Blanca de Juli con 1.56 tn/ha y simulado la variedad Salcedo INIA con 1.15 tn/ha, resultando estos los valores más altos del proyecto de investigación; asimismo para la validación se obtuvieron índices estadísticos óptimos para la variedad Pasankalla, resultando el coeficiente “r” con valores entre 0,91 y 0,97; el “RMSE” entre 16.59 y 19.94; el “d” entre 0,95 y 0,98 y el “EF” entre 0,76 y 0,93; la variedad Salcedo INIA, el coeficiente “r” se encuentra entre 0,90 y 0,95, el “RMSE” entre 13.55 y 18.77; el “d” entre 0,96 y 0,98 y el “EF” entre 0,82 y 0,92 y por último la variedad Blanca de Juli, el coeficiente “r” se encuentra entre 0,92 y 0,95; el “RMSE” entre 8.55 y 19.78; el “d” entre 0,96 y 0,97 y el “EF” entre 0,81 y 0,85.



VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar este tipo de investigación por tres a cinco campañas agrícolas consecutivas a fin de obtener mayor precisión en los datos de calibración para el modelamiento agrometeorológico y que este pueda ser validado con la información de campo, con el propósito de generar pronósticos de rendimiento del cultivo con mayor confiabilidad.

Para el estudio de simulación con el modelo Aquacrop se recomienda considerar el análisis de suelo periódicamente o por fase fenológica para la determinación de coeficientes hídricos; asimismo, trabajar con diferentes regímenes de riego durante el desarrollo vegetativo para una mejor interpretación de la relación suelo-planta-agua y obtener la productividad de agua para el cultivo de quinua.

Se recomienda considerar el trabajo de modelamiento de cultivos para estimación y predicción de rendimiento bajo escenarios del cambio climático con diferentes concentraciones de CO₂ para futuros años tales como: 2030, 2050, 2090 con la finalidad de que esta pueda ser una herramienta más para los tomadores de decisiones en la región del altiplano.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja , L., Ma, L., & Howell, T. (2002). Agricultural system models in field research and techno logy transfer.
- Ahumada , R., Velázquez, G., Flores, E., & Romero, J. (2014). Impactos potenciales del cambio climático en la producción de maíz. *Investigación y Ciencia*,, 48-53. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67431579007>
- Alarcón Alcántara, L. D. (2015). *Efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz amarillo duro bajo condiciones de La Molina utilizando el modelo Aquacrop*. UNALM.
- 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 QMP. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 7-13.
- Allen, R. P. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for. *FAO Irrigation and drainage paper*, pág. 56.
- Apaza, V., Cáceres, G., Estrada, R., & Pinedo, R. (2013). Catalogo de variedades comerciales de quinua en el Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria. 76 p.
- Azam, A., Crout, S., & Bradley, R. (1994). Perspectives of modeling resourcecapture by crops. ResourceCapture by Crops. Proceedings of the 52nd Univ. of Nottingham Eastern School. Nottingham University Press. pp. 125–140.
- Blanco, H. (2009). *Participacion comunitaria en la evaluacion de las características agronomica de variedades y lineas mejoradas de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) en el Municipio de Quime*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Boote, K., Jones, J., & Pickering, N. (1996). Usos potenciales y limitaciones de los modelos de cultivo. *Agron J.* pp 704-716.
- Borda Laura, A. M. (2011). *Analisis de productividad y componentes del rendimiento de tres variedades de quinua (Chenopodium quinoa willd.) en la comunidad Callapa-altiplano central*. UMSA.



- Bradford, K. &. (1982). Physiological responses to moderate water stress. *Physiological Plant Ecology II. New York.*
- Cárdenas, J. (1999). Selección de cultivares de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) por su resistencia a la sequía. Tesis Ing. Agr. Universidad Nacional de San Agustín, Perú. 95 p.
- Castillo , I. Y., González, R. F., Hervis, G. G., Hirán , R. L., & Cisneros, Z. E. (2019). Impacto del cambio climático en el rendimiento del maíz sembrado en suelo Ferralítico Rojo compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*, 49-60.
- Castillo, C. y. (2013). La quinua y la UMSA: Avances de la investigación científica. Documento científico final en conmemoración al año internacional de la quinua. La Paz, Bolivia. 252 p.
- Fajardo, H., García, M., Raes, D., & Van Gaelen, H. (2016). Validación Del Modelo Aquacrop Para Diferentes Niveles De Fertilidad En El Cultivo De Quinoa En El Altiplano Boliviano. *CINTEX*, 31-52.
- FAO. (2000). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Santiago, Chile. .
- FAO. (2011). Quinoa: An ancient crop to contribute to world food security.
- Fernández, M. (2013). *Efectos del cambio climático en el rendimiento de tres cultivos mediante el uso del modelo Aquacrop*. FONADE, IDEAM y BID, Bogotá.
- Fleisher, D. (2009). Crop Models - In Open Field.
- Frere, M. R. (1975). Estudio agroclimatológico dela zona andina (Informe técnico) Proyecto Inter.-institucional, FAO/UNESCO/OMM. 29-51 pp.
- Geerts, S. y. (2009). El riego deficitario como estrategia en la finca para maximizar la productividad del agua de los cultivos en áreas secas. *Gestión del agua agrícola*. 1275-1284.
- Gómez, L., & Aguilar, E. (2016). Guía del cultivo de quinua. Primera edición. Lima, Universidad Nacional Agraria La Molina. 121 p.
- Graeff, S., Link, J., Binder, J., & Claupein, W. (2012). Crop models as decision support systems in crop production.



- Guevara, E. (2007). La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. INTA EEA Pergamino. pp.15-37.
- Hsiao et al. ((2009)). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Journal of Agronomy, Volumen 101*.
- Jones, J. (2003). The DSSAT cropping system model.
- León, J. M. (2003). Hibridación y comparación de la F1 con sus progenitores en tres cultivares de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en Puno. Tesis Ing. Agro. FCA-UNA. Puno, Perú. P. 34-36 p.
- Molina, S. M. (2016). *Evaluación fenológica y variación del rendimiento de cultivares nativos de quinua (Chenopodium quinoa Willdenow) en tres zonas agroecológicas de Puno*.
- MoriasI, D. e. (2007). MoriasI, D.N., et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.
- Mujica, A. (2001). Origen y descripción de la quinua. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. FAO. Universidad Nacional del Altiplano. Puno. En: Quinoa, Ancestral Cultivo Andino, Alimento del Presente y Futuro. Santiago de Chile, Chile.
- Mujica, A., Suquilada, M., Chura, E., Ruiz, E., León, A., Cutipa, S., & Ponce, C. (2013). Producción orgánica de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Universidad Nacional del Altiplano, FINCAGRO. Puno, Perú.*, 118.
- Pineda, H. R. (2017). *Evaluación de helada, en quinua (Chenopodium quinoa Willd) en dos variedades con riego por aspersión, en la comunidad de Huarza del distrito de Pucara-Lampa Puno*.
- Porras Jorge, Z. (2019). *Desempeño del modelo Aquacrop para el cultivo de arroz bajo condiciones de humedecimiento y secado alternados en La Molina, Perú*.
- Raes, D. S. (2017). Chapter 2 . Users guide. En AquaCrop version 6.0 Reference manual. pp 302.



- Rojas, J. L., Soto, E., & Carrasco. (2004). Study on social, environmental and economic impacts of quinoa promotion in Bolivia.
- Sánchez, M. M., & Olave, J. (2019). Review: Can climate change affect production of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) crop on Chilean Altiplano. *Idesia (Arica)*.
- SENAMHI. (2014). (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). *Protocolo de observación fenológica y biométrica para los cultivos de maíz, papa, quinua y alcachofa*. Lima, Perú., 32 pp.
- Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2007). *On the conservative behavior of biomass water productivity*.
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012.). Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. FAO, Rome, Italy., pp 500.
- Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy*. pp. 426-437.
- Tapia, M. C. (2014). Razas de Quinuas del Perú de los Andes al mundo. Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 173 p.
- Willmott, C. (1982). Algunos comentarios sobre la evaluación del desempeño del modelo. *Boletín de la Sociedad Meteorológica Americana*, 1309-1313.
- Willmott, C., Ackleson, S., Davis, R., Feddes, J., Klink, K., Legates, D., & Rowe, C. (1985). Estadísticas para la evaluación y comparación de modelos. *Revista de Investigación Geofísica: Océanos*, 8995-9005.
- Xu, L. &. (2004). Predicted versus measured photosynthetic water-use efficiency of crop stands under dynamically changing field environments. *J. Exp. Bot, Issue 55* ., 55.
- Zanabria, E., & Mamani, F. (2017). *Granos andinos nutraceuticos: Quinua, Cañihua y Kiwicha en Perú y Bolivia*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Zurita Silva, A. J., Zurita Silva, A., Jacobsen, S. E., Razzaghi, F., Álvarez Flores, R., Ruiz, K. B., . . . Silva Ascencio, H. (2014). *Respuestas a la sequía y adaptación de la Quinua*.



ANEXOS



ANEXO 1. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de octubre, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2017	10	1	0.0	19.4	-3.2	4.9
2017	10	2	0.0	15.6	-5.8	4.3
2017	10	3	0.0	17.0	-3.8	4.5
2017	10	4	0.0	18.0	-3.2	4.7
2017	10	5	0.0	20.0	-2.4	5
2017	10	6	0.0	20.6	-1.4	5.1
2017	10	7	0.0	19.2	0.2	4.7
2017	10	8	0.0	19.0	0.4	4.7
2017	10	9	0.0	19.6	-0.6	4.9
2017	10	10	0.0	18.8	-0.2	4.7
2017	10	11	8.2	19.4	0.8	4.8
2017	10	12	0.0	17.8	3.4	4.2
2017	10	13	0.0	16.8	6.2	3.7
2017	10	14	28.4	15.4	3.0	3.8
2017	10	15	29.2	12.2	3.6	3.1
2017	10	16	2.4	14.6	4.8	3.5
2017	10	17	1.4	15.6	5.5	3.6
2017	10	18	0.0	16.2	2.2	4.1
2017	10	19	0.0	18.4	1.8	4.6
2017	10	20	0.0	17.8	2.8	4.4
2017	10	21	0.0	16.8	4.6	4
2017	10	22	0.0	18	3.4	4.4
2017	10	23	0.0	18.4	5.8	4.2
2017	10	24	0.0	18.2	1.8	4.6
2017	10	25	30.2	19.0	2.2	4.7
2017	10	26	0.0	17.0	2.4	4.3
2017	10	27	0.0	18.4	2.6	4.6
2017	10	28	0.0	19.8	3.6	4.8
2017	10	29	0.0	18.8	3.8	4.5
2017	10	30	0.0	19.0	4.0	4.6
2017	10	31	0.0	17.8	2.0	4.5

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI



ANEXO 2. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de noviembre, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2017	11	1	0.0	17.8	3.8	4.3
2017	11	2	0.0	20.4	0.8	5.1
2017	11	3	0.0	20.0	2.8	4.9
2017	11	4	0.0	19.8	4.4	4.7
2017	11	5	0.0	19.6	3.2	4.8
2017	11	6	4.0	18.4	5.4	4.3
2017	11	7	0.0	17.8	4.6	4.3
2017	11	8	0.0	18.2	4.0	4.4
2017	11	9	0.0	18.4	3.4	4.7
2017	11	10	0.0	18.8	3.8	4.8
2017	11	11	0.0	18.8	0.8	5
2017	11	12	4.6	13.8	6.4	4.5
2017	11	13	0.0	16.8	5.0	3.3
2017	11	14	0.0	18.6	3.2	4.4
2017	11	15	4.4	18.8	6.4	4.4
2017	11	16	0.0	18.2	6.4	4.5
2017	11	17	0.0	19.4	3.0	4.5
2017	11	18	0.0	18.4	2.4	5
2017	11	19	0.0	18.6	2.0	4.9
2017	11	20	0.0	18.2	4.4	5.1
2017	11	21	0.0	18.8	-0.2	5
2017	11	22	0.0	20.6	-0.4	5.1
2017	11	23	0.0	19	-0.2	5.3
2017	11	24	0.0	20.8	1.2	5.1
2017	11	25	0.0	21.4	2.6	5.2
2017	11	26	3.4	22.4	3.8	5.3
2017	11	27	1.2	19.0	4.8	5.4
2017	11	28	3.4	17.0	6.4	4.6
2017	11	29	0.0	16.4	6.2	4.2
2017	11	30	0.0	19.8	4.8	4.1

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI



ANEXO 3. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de diciembre, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2017	12	1	0.0	19.0	3.4	5
2017	12	2	0.0	18.8	0.2	5
2017	12	3	0.0	17.0	4.8	4.7
2017	12	4	1.6	18.2	3.8	4.2
2017	12	5	3.2	16.0	4.8	4.6
2017	12	6	13.2	16.8	6.0	4.1
2017	12	7	7.0	16.4	5.0	4.5
2017	12	8	0.0	16.6	3.8	4
2017	12	9	0.0	18.4	6.4	3.8
2017	12	10	0.0	18.4	2.6	4.9
2017	12	11	0.0	18.2	4.0	4.7
2017	12	12	0.0	18.4	3.4	4.7
2017	12	13	0.0	18.8	1.0	5
2017	12	14	0.0	17.4	1.4	5
2017	12	15	0.0	18.4	5.2	4.2
2017	12	16	0.0	19.0	0.8	4.5
2017	12	17	0.0	18.2	3.8	4.5
2017	12	18	0.0	14.8	1.8	4.9
2017	12	19	0.0	16.8	4.2	3.8
2017	12	20	4.0	19.0	6.4	4.1
2017	12	21	10.8	16.0	6.2	4.6
2017	12	22	1.0	17.8	6.4	3.9
2017	12	23	0.0	19.2	5.0	4.3
2017	12	24	0.0	17.8	5.4	4.7
2017	12	25	0.0	17.4	5.4	4.4
2017	12	26	0.0	16.8	4.8	4.5
2017	12	27	12	13.2	6.2	4.1
2017	12	28	0.0	15.4	4.4	3.4
2017	12	29	11.2	13.4	5.2	3.9
2017	12	30	0.0	14.4	5.0	3.4
2017	12	31	0.0	17.4	5.0	3.5

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI



ANEXO 4. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de enero, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2018	1	1	10.2	17.0	7.0	3.9
2018	1	2	0.0	16.8	6.6	3.9
2018	1	3	6.2	15.8	6.4	3.7
2018	1	4	0.0	16.2	6.8	3.8
2018	1	5	0.0	18.4	2.8	4.7
2018	1	6	6.4	18.4	5.8	4.4
2018	1	7	1.4	15.8	5.8	3.8
2018	1	8	0.0	14.2	6.4	3.3
2018	1	9	15.2	16.4	6.0	3.9
2018	1	10	0.0	16.4	4.6	4.1
2018	1	11	9.4	13.8	5.4	3.8
2018	1	12	10.0	13.0	6.0	3.6
2018	1	13	0.0	15.2	5.6	4.2
2018	1	14	0.0	15.4	4.8	4.2
2018	1	15	2.4	13.6	5.8	4.2
2018	1	16	0.0	15.4	6.0	3.6
2018	1	17	0.0	16.4	4.8	4.2
2018	1	18	4.6	14.0	5.8	4.1
2018	1	19	18	15.4	5.4	3.4
2018	1	20	9.0	15.6	5.8	3.1
2018	1	21	3.0	15.2	4.8	3.7
2018	1	22	2.2	15.4	4.0	3.8
2018	1	23	0.0	16.8	6.0	3.3
2018	1	24	10.0	15.6	5.6	3.7
2018	1	25	2.8	14.4	4.8	4
2018	1	26	0.0	16.4	3.0	3.4
2018	1	27	0.0	16.2	2.2	3.7
2018	1	28	15.2	16.6	3.8	3.7
2018	1	29	0.0	14.8	5.4	3.8
2018	1	30	0.0	17.2	5.0	3.9
2018	1	31	0.0	17.4	5.6	4

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI



ANEXO 5. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de febrero, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2018	2	1	0.0	13.8	7.2	3.1
2018	2	2	2.0	11.8	6.4	2.7
2018	2	3	2.2	14.6	5.0	4
2018	2	4	1.8	15.4	5.4	3.7
2018	2	5	0.0	16.8	7.4	3.8
2018	2	6	0.0	17.0	7.0	3.9
2018	2	7	12.8	17.8	6.2	4.1
2018	2	8	1.4	15.2	5.8	3.6
2018	2	9	1.6	13.6	5.4	3.3
2018	2	10	18	13.2	6.8	3
2018	2	11	1.4	12.8	4.8	3.2
2018	2	12	3.4	14.4	6.2	3.3
2018	2	13	0.0	13.8	6.0	3.2
2018	2	14	3.6	14.8	6.2	3.4
2018	2	15	0.0	15.0	5.0	3.6
2018	2	16	18.2	15.2	5.8	3.6
2018	2	17	10.2	15.4	5.6	3.6
2018	2	18	0.0	17.2	4.4	4.1
2018	2	19	0.0	16.8	2.8	4.2
2018	2	20	0.0	17.2	1.6	4.4
2018	2	21	5.2	15.8	4.8	3.8
2018	2	22	6.0	10.2	6.0	2.3
2018	2	23	5.0	14.4	4.0	3.6
2018	2	24	0.0	14.2	4.4	3.5
2018	2	25	0.0	14.6	1.8	3.8
2018	2	26	0.0	15.4	3.0	3.8
2018	2	27	0.0	16.4	5.8	3.7
2018	2	28	0.0	18.0	2.8	4.4

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI



ANEXO 6. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de marzo, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2018	3	1	28.4	16.8	2.4	4.2
2018	3	2	1.0	14.8	5.2	3.5
2018	3	3	6.4	16.4	5.4	3.8
2018	3	4	5.4	16.6	6.4	3.7
2018	3	5	3.8	14.2	5.4	3.3
2018	3	6	30.2	16.8	4.8	3.9
2018	3	7	11.2	12.6	3.8	3.1
2018	3	8	13.2	14.6	5.0	3.4
2018	3	9	2.8	16.4	6.0	3.6
2018	3	10	0.0	15.4	5.8	3.4
2018	3	11	0.0	16.4	5.0	3.7
2018	3	12	3.0	15.8	6.0	3.5
2018	3	13	1.4	16.4	6.8	3.5
2018	3	14	36.4	14	7.2	2.9
2018	3	15	2.4	16.4	6.2	3.6
2018	3	16	12.8	12.8	6.0	2.8
2018	3	17	0.0	14.8	7.0	3.1
2018	3	18	0.0	16.6	6.6	3.5
2018	3	19	0.0	15.0	3.2	3.5
2018	3	20	2.8	15.0	4.0	3.5
2018	3	21	0.0	14.4	6.8	3
2018	3	22	0.0	16.4	1.8	3.9
2018	3	23	0.0	16.2	3.2	3.7
2018	3	24	0.0	16.8	3.8	3.8
2018	3	25	0.0	14.4	3.8	3.3
2018	3	26	0.0	14.8	3.6	3.4
2018	3	27	0.0	16.4	2.8	3.7
2018	3	28	0.0	17.0	3.4	3.8
2018	3	29	0.0	17.2	4.4	3.7
2018	3	30	2.8	14.8	-0.4	3.7
2018	3	31	0.0	15.0	2.0	3.5

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI



ANEXO 7. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de abril, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2018	4	1	0.0	16.6	-0.4	3.9
2018	4	2	0.0	17.0	-1.4	4.1
2018	4	3	0.0	17.2	3.0	3.8
2018	4	4	0.0	17.0	4.2	3.6
2018	4	5	0.0	17.2	1.8	3.8
2018	4	6	0.0	15.4	-0.2	3.6
2018	4	7	0.0	15	-1.0	3.6
2018	4	8	0.0	16.8	-0.4	3.9
2018	4	9	0.0	15.6	-1.8	3.7
2018	4	10	0.0	16.0	1.0	3.6
2018	4	11	0.0	15.8	-1.4	3.7
2018	4	12	0.0	16.8	-1.8	3.9
2018	4	13	0.0	14.0	-2.8	3.5
2018	4	14	0.0	14.4	0.2	3.3
2018	4	15	0.0	15.8	-5.2	3.9
2018	4	16	0.0	16.4	-4.4	3.9
2018	4	17	0.0	17.4	-1.6	3.9
2018	4	18	0.0	14.4	-0.8	3.3
2018	4	19	0.0	16.8	-4.0	3.9
2018	4	20	0.0	16.6	-1.6	3.7
2018	4	21	0.0	15.2	-3.2	3.6
2018	4	22	0.0	17.4	-0.2	3.7
2018	4	23	0.0	16.8	4.8	3.3
2018	4	24	4.2	14.0	-0.2	1.6
2018	4	25	4.4	14.6	4.8	2.8
2018	4	26	0.0	14.8	4.4	2.9
2018	4	27	1.8	16.6	1.6	3.4
2018	4	28	24.6	15	1.4	2.9
2018	4	29	0.0	15.2	4.0	3
2018	4	30	0.0	16.0	-0.4	3.4

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI



ANEXO 8. Información meteorológica diaria correspondiente al mes de mayo, campaña agrícola 2017-2018.

Año	Mes	Día	Precipitación	T° Max	T° Min	ETo
2018	5	1	0.0	15.6	-1.2	3.5
2018	5	2	0.0	17.8	0.2	3.6
2018	5	3	0.0	16.8	1.0	3.6
2018	5	4	4.0	16.8	0.8	3.7
2018	5	5	0.0	15.0	4.8	3.6
2018	5	6	0.0	15.8	1.0	3.4
2018	5	7	0.0	14.4	0.8	3.3
2018	5	8	1.6	16.6	-1.0	3.5
2018	5	9	0.0	17.0	0.6	3.2
2018	5	10	0.0	16.8	2.0	3.5
2018	5	11	0.0	17.4	-2.2	3.5
2018	5	12	0.0	16.2	1.8	3.6
2018	5	13	0.0	17.4	-3.2	3.5
2018	5	14	0.0	17.0	-7.4	3.5
2018	5	15	0.0	15.4	-7.2	3.8
2018	5	16	0.0	15.6	-5.8	3.9
2018	5	17	0.0	16.8	-5.4	3.5
2018	5	18	0.0	16.2	-7.8	3.5
2018	5	19	0.0	16.8	-6.2	0.5
2018	5	20	0.0	15.8	-5.2	3.5
2018	5	21	0.0	16.4	-6.4	3.6
2018	5	22	0.0	17.4	-5.2	3.5
2018	5	23	0.0	17.0	-3.8	3.5
2018	5	24	0.0	17.2	-3.4	3.6
2018	5	25	0.0	15.2	-2.8	3.4
2018	5	26	0.0	16.8	-3.0	3.4
2018	5	27	0.0	16.4	-4.8	3
2018	5	28	0.0	17.4	-5.00	3.4
2018	5	29	0.0	16.8	-5.4	3.5
2018	5	30	0.0	17.0	-9.0	3.6
2018	5	31	0.0	16.4	-8.8	3.6

Fuente: Información registrada en la Estación Meteorológica Automática-SENAMHI

ANEXO 9. Recopilación del desarrollo fenológico correspondiente a las parcelas de la primera época de siembra, campaña agrícola 2017-2018.

PRIMERA ÉPOCA DE SIEMBRA (25-10-17)	TRATAMIENTO	SIEMBRA	EMERGENCIA	DOS HOJAS VERDADERAS	CUATRO HOJAS VERDADERAS	SEIS HOJAS VERDADERAS	RAMIFICACIÓN	PANOJA	FLORACION	GRANO LECHOSO	GRANO PASTOSO	MADURACIÓN	COSECHA
BLANCA DE JULI	C101-A	25-Oct	1-Nov	10-Nov	18-Nov	28-Nov	3-Dic	28-Dic	15-Ene	12-Feb	15-Mar	7-Abr	18-Abr
BLANCA DE JULI	C101-S.A	25-Oct	1-Nov	10-Nov	18-Nov	28-Nov	3-Dic	28-Dic	17-Ene	15-Feb	17-Mar	9-Abr	18-Abr
PASANKALLA	C102-A	25-Oct	1-Nov	8-Nov	16-Nov	27-Nov	6-Dic	30-Dic	28-Ene	18-Feb	16-Mar	3-Abr	18-Abr
PASANKALLA	C102-S.A	25-Oct	1-Nov	8-Nov	16-Nov	27-Nov	6-Dic	5-Ene	31-Ene	21-Feb	20-Mar	5-Abr	18-Abr
SACEDO INIA	C103-A	25-Oct	1-Nov	7-Nov	13-Nov	25-Nov	1-Dic	2-Ene	25-Ene	20-Feb	21-Mar	7-Abr	18-Abr
SALCEDO INIA	C103-S.A	25-Oct	1-Nov	7-Nov	14-Nov	25-Nov	1-Dic	31-Dic	23-Ene	18-Feb	20-Mar	5-Abr	18-Abr
PASANKALLA	V101	25-Oct	1-Nov	10-Nov	16-Nov	27-Nov	3-Dic	28-Dic	17-Ene	15-Ene	13-Mar	5-Abr	18-Abr
SALCEDO INIA	V102	25-Oct	1-Nov	8-Nov	16-Nov	27-Nov	6-Dic	30-Dic	17-Ene	18-Feb	13-Mar	11-Abr	18-Abr
BLANCA DE JULI	V103	25-Oct	1-Nov	10-Nov	16-Nov	27-Nov	3-Dic	28-Dic	17-Ene	18-Feb	13-Mar	13-Abr	18-Abr
SALCEDO INIA	V201	25-Oct	1-Nov	8-Nov	15-Nov	26-Nov	6-Dic	30-Dic	17-Ene	18-Feb	13-Mar	11-Abr	18-Abr
BLANCA DE JULI	V202	25-Oct	1-Nov	10-Nov	16-Nov	27-Nov	3-Dic	28-Dic	16-Ene	18-Feb	13-Mar	11-Abr	18-Abr
PASANKALLA	V203	25-Oct	1-Nov	8-Nov	15-Nov	27-Nov	6-Dic	30-Dic	17-Ene	15-Ene	18-Mar	3-Abr	18-Abr
BLANCA DE JULI	V301	25-Oct	1-Nov	10-Nov	18-Nov	29-Nov	6-Dic	30-Dic	17-Ene	18-Feb	15-Mar	13-Abr	18-Abr
PASANKALLA	V302	25-Oct	1-Nov	10-Nov	19-Nov	27-Nov	1-Dic	25-Dic	15-Ene	16-Ene	18-Mar	3-Abr	18-Abr
SALCEDO INIA	V303	25-Oct	1-Nov	10-Nov	18-Nov	29-Nov	6-Dic	30-Dic	17-Ene	18-Feb	13-Mar	11-Abr	18-Abr

ANEXO 10. Recopilación del desarrollo fenológico correspondiente a las parcelas de la segunda época de siembra, campaña agrícola 2017-2018.

SEGUNDA ÉPOCA DE SIEMBRA (15- 11-17)	TRATAMIENTO	SIEMBRA	EMERGENCIA	DOS HOJAS VERDADERAS	CUATRO HOJAS VERDADERAS	SEIS HOJAS VERDADERAS	RAMIFICACIÓN	PANOJA	FLORACIÓN	GRANO LECHOSO	GRANO PASTOSO	MADURACIÓN	COSECHA
PASANKALLA	C101-A	15-Nov	23-Nov	27-Nov	6-Dic	14-Dic	20-Dic	18-Ene	3-Feb	12-Mar	1-Abr	3-May	23-May
PASANKALLA	C101-S.A	15-Nov	25-Nov	29-Nov	8-Dic	14-Dic	20-Dic	20-Ene	5-Feb	10-Mar	30-Mar	6-May	23-May
BLANCA DE JULI	C102-A	15-Nov	23-Nov	27-Nov	6-Dic	16-Dic	23-Dic	25-Ene	12-Feb	15-Mar	4-Abr	10-May	23-May
BLANCA DE JULI	C102-S.A	15-Nov	23-Nov	27-Nov	6-Dic	16-Dic	23-Dic	25-Ene	12-Feb	15-Mar	4-Abr	10-May	23-May
SALCEDO	C103-A	15-Nov	23-Nov	27-Nov	6-Dic	16-Dic	23-Dic	25-Ene	7-Feb	13-Mar	5-Abr	15-May	23-May
SALCEDO	C103-S.A	15-Nov	23-Nov	27-Nov	5-Dic	16-Dic	23-Dic	23-Ene	7-Feb	13-Mar	5-Abr	15-May	23-May
BLANCA DE JULI	V101	15-Nov	27-Nov	6-Dic	8-Dic	16-Dic	23-Dic	25-Ene	7-Feb	15-Mar	4-Abr	10-May	23-May
SALCEDO	V102	15-Nov	23-Nov	27-Nov	8-Dic	16-Dic	23-Dic	25-Ene	12-Feb	13-Mar	5-Abr	15-May	23-May
PASANKALLA	V103	15-Nov	27-Nov	6-Dic	10-Dic	16-Dic	22-Dic	20-Ene	8-Feb	12-Mar	1-Abr	15-May	23-May
SALCEDO	V201	15-Nov	23-Nov	27-Nov	6-Dic	16-Dic	20-Dic	23-Ene	7-Feb	13-Mar	5-Abr	15-May	23-May
PASANKALLA	V202	15-Nov	27-Nov	6-Dic	8-Dic	14-Dic	27-Dic	22-Ene	7-Feb	12-Mar	1-Abr	8-May	23-May
BLANCA DE JULI	V203	15-Nov	27-Nov	6-Dic	6-Dic	16-Dic	23-Dic	25-Ene	7-Feb	15-Mar	4-Abr	20-May	23-May
BLANCA DE JULI	V301	15-Nov	23-Nov	27-Nov	6-Dic	16-Dic	23-Dic	23-Ene	10-Feb	13-Mar	5-Abr	22-May	23-May
SALCEDO	V302	15-Nov	27-Nov	6-Dic	10-Dic	16-Dic	23-Dic	23-Ene	10-Feb	10-Mar	5-Abr	15-May	23-May
PASANKALLA	V303	15-Nov	27-Nov	6-Dic	10-Dic	23-Dic	25-Dic	25-Ene	8-Feb	13-Mar	1-Abr	8-May	23-May

ANEXO 11. Recopilación del desarrollo fenológico correspondiente a las parcelas de la tercera época de siembra, campaña agrícola 2017-2018.

TERCERA ÉPOCA DE SIEMBRA (06-12-17)	TRATAMIENTO	SIEMBRA	EMERGENCIA	DOS HOJAS VERDADERAS	CUATRO HOJAS VERDADERAS	SEIS HOJAS VERDADERAS	RAMIFICACIÓN	PANOJA	FLORACION	GRANO LECHOSO	GRANO PASTOSO	MADURACIÓN	COSECHA
SALCEDO INIA	C101-A	6-Dic	16-Dic	25-Dic	6-Ene	14-Ene	20-Ene	7-Feb	26-Feb	15-Mar	18-Abr	18-May	31-May
SALCEDO INIA	C101-S.A	6-Dic	16-Dic	25-Dic	6-Ene	14-Ene	20-Ene	7-Feb	26-Feb	15-Mar	18-Abr	18-May	31-May
BLANCA DE JULI	C102-A	6-Dic	16-Dic	23-Dic	5-Ene	10-Ene	22-Ene	8-Feb	26-Feb	21-Mar	11-Abr	11-May	31-May
BLANCA DE JULI	C102-S.A	6-Dic	16-Dic	23-Dic	5-Ene	10-Ene	22-Ene	8-Feb	26-Feb	21-Mar	11-Abr	11-May	31-May
PASANKALLA	C103-A	6-Dic	16-Dic	20-Dic	30-Dic	8-Ene	17-Ene	5-Feb	12-Feb	10-Mar	12-Abr	18-May	31-May
PASANKALLA	C103-S.A	6-Dic	16-Dic	20-Dic	30-Dic	8-Ene	17-Ene	5-Feb	12-Feb	10-Mar	12-Abr	18-May	31-May
PASANKALLA	V101	6-Dic	16-Dic	20-Dic	30-Dic	8-Ene	17-Ene	5-Feb	15-Feb	8-Mar	10-Abr	11-May	31-May
SALCEDO INIA	V102	6-Dic	16-Dic	23-Dic	6-Ene	14-Ene	20-Ene	7-Feb	26-Feb	16-Mar	18-Abr	18-May	31-May
BLANCA DE JULI	V103	6-Dic	16-Dic	25-Dic	5-Ene	10-Ene	22-Ene	6-Feb	26-Feb	21-Mar	15-Abr	14-May	31-May
SALCEDO INIA	V201	6-Dic	16-Dic	25-Dic	30-Dic	14-Ene	20-Ene	7-Feb	24-Feb	19-Mar	18-Abr	16-May	31-May
PASANKALLA	V202	6-Dic	16-Dic	20-Dic	6-Ene	8-Ene	17-Ene	5-Feb	15-Feb	21-Mar	11-Abr	12-May	31-May
BLANCA DE JULI	V203	6-Dic	16-Dic	23-Dic	5-Ene	10-Ene	22-Ene	7-Feb	26-Feb	18-Mar	18-Abr	15-May	31-May
PASANKALLA	V301	6-Dic	16-Dic	20-Dic	30-Dic	8-Ene	17-Ene	5-Feb	19-Feb	10-Mar	18-Abr	14-May	31-May
SALCEDO INIA	V302	6-Dic	16-Dic	23-Dic	6-Ene	14-Ene	20-Ene	7-Feb	26-Feb	21-Mar	18-Abr	18-May	31-May
BLANCA DE JULI	V303	6-Dic	16-Dic	25-Dic	6-Ene	10-Ene	22-Ene	8-Feb	26-Feb	15-Mar	11-Abr	11-May	31-May

ANEXO 12. Análisis físico químico de suelos correspondiente a parcelas de la primera época de siembra LASPAF-UNALM

ANÁLISIS DE SUELOS - CARACTERIZACIÓN

Solicitante : SENAMHI

Departamento : PUNO Provincia : HUANCANE
Distrito : TARACO Predio :
Referencia : H.R. 63580-065C-18 Fecha : 28/05/18

Número de Muestra Lab Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	Al ³⁺ + H ⁺ meq/100g			
7130 Parcela I, Hz O, Prof 13cm	7.01	0.14	0.00	1.41	18.2	189	53	27	20	Fr.Ar.A.	10.72	7.45	2.58	0.41	0.28	0.00	10.72	10.72	100
7131 Parcela I, Hz A, Prof 30cm	7.13	0.13	0.00	0.53	18.3	148	77	5	18	Fr.A.	13.76	10.19	2.98	0.29	0.30	0.00	13.76	13.76	100
7132 Parcela I, Hz B, Prof 30cm	7.90	0.08	0.00	0.34	4.7	133	91	1	8	A.	6.44	4.83	1.12	0.27	0.23	0.00	6.44	6.44	100
7133 Parcela I, Hz C, Prof 47cm	7.73	0.07	0.00	0.12	6.6	166	95	3	2	A.	6.40	4.79	1.12	0.27	0.22	0.00	6.40	6.40	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra Lab Claves	C.C. %	P.M. %	Nitrogeno Amoniacal ppm	Nitrogeno Nitrico ppm	D.A. g/cc
7130 Parcela I, Hz O, Prof 13cm	18.78	10.16	8.40	0.74	1.26
7131 Parcela I, Hz A, Prof 30cm	15.77	7.98	16.80	0.00	1.42
7132 Parcela I, Hz B, Prof 30cm	9.86	3.83	16.80	0.00	1.79
7133 Parcela I, Hz C, Prof 47cm	8.42	2.81	14.00	0.00	1.62

Dr. Sady García Bendeza
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 12. Análisis físico químico de suelos correspondiente a parcelas de la segunda época de siembra LASPAF-UNALM

Solicitante : SENAMHI

Departamento : PUNO Provincia : HUANCANE
Distrito : TARACO Predio :
Referencia : H.R. 63581-065C-18 Fecha : 28/05/18

Número de Muestra Lab Claves	pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺ meq/100g	Mg ²⁺ meq/100g	K ⁺ meq/100g	Na ⁺ meq/100g	Al ³⁺ + H ⁺ meq/100g			
7134 Parcela II, Hz O, Prof 13cm	7.80	0.21	0.00	1.74	29.6	294	61	21	18	Fr.A.	11.52	8.48	2.03	0.64	0.37	0.00	11.52	11.52	100
7135 Parcela II, Hz A, Prof 15cm	8.07	0.25	1.00	1.17	17.0	152	55	23	22	Fr.Ar.A.	12.80	9.61	2.30	0.36	0.53	0.00	12.80	12.80	100
7136 Parcela II, Hz B, Prof 30cm	8.35	0.21	0.50	0.23	4.4	77	89	5	6	A.	8.00	6.76	0.82	0.16	0.26	0.00	8.00	8.00	100
7137 Parcela II, Hz C, Prof 47cm	8.12	0.56	1.00	0.28	5.2	84	69	23	8	Fr.A.	9.60	7.82	1.30	0.21	0.28	0.00	9.60	9.60	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra Lab Claves	C.C. %	P.M. %	Nitrogeno Amoniacal ppm	Nitrogeno Nitrico ppm	D.A. g/cc
7134 Parcela II, Hz O, Prof 13cm	17.90	9.47	11.20	0.99	1.39
7135 Parcela II, Hz A, Prof 15cm	18.72	10.12	19.60	0.00	1.30
7136 Parcela II, Hz B, Prof 30cm	8.94	3.18	14.00	0.51	1.67
7137 Parcela II, Hz C, Prof 47cm	14.48	7.07	16.80	0.73	1.59

Dr. Sady García Bendeza
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

ANEXO 13. Preparación de terreno para la instalación del experimento, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 14. Aporque del cultivo de quinua, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 15. Control fitosanitario del cultivo de quinua, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 16. Desahijé y deshierbo de parcelas experimentales del cultivo de quinua, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 17. Estación Meteorológica Automática para el registro de datos en condiciones de desarrollo del cultivo de quinua, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 18. Maduración del cultivo de quinua, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 19. Cosecha de parcelas experimentales correspondiente a la primera época de siembra del cultivo de quinua, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 20. Cosecha de parcelas experimentales correspondiente a la segunda época de siembra del cultivo de quinua, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 21. Evaluación, peso de plantas de surcos centrales para la estimación del índice de cosecha, campaña agrícola 2017-2018, Taraco.



ANEXO 22. Peso de granos por surcos centrales para la estimación de rendimiento campaña agrícola 2017-2018, Taraco.

