

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“RENDIMIENTO Y BIOMASA CON EL MODELO AQUACROP EN  
DOS VARIEDADES DE CAMOTE CON DIFERENTES SUMINISTROS  
DE AGUA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÍCOLA**

**DANIEL ARTURO CAREY MACHCO**

**LIMA – PERÚ**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**

**“RENDIMIENTO Y BIOMASA CON EL MODELO AQUACROP EN  
DOS VARIEDADES DE CAMOTE CON DIFERENTES SUMINISTROS  
DE AGUA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

Presentado por:

**BACH. DANIEL ARTURO CAREY MACHCO**

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO  
Presidente

Mg. Sc. MIGUEL ÁNGEL SÁNCHEZ DELGADO  
Asesor

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ  
Miembro

Mg. Sc. ROLANDO PERCY EGÚSQUIZA BAYONA  
Miembro

Dr. JESÚS ABEL MEJÍA MARCACUZCO  
Co-Asesor

LIMA – PERU

2021

*Al sueño de mi padre...*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres, Antonio Carey y María Machco. Muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron y, por, sobre todo, me apoyaron constantemente para alcanzar mis metas...*

*A mi patrocinador, el Mg. Sc. Miguel Sánchez Delgado por haberme tenido la paciencia del mundo y por brindarme la confianza e invaluable soporte durante todo el desarrollo de la tesis...*

*A mi alma máter, la Universidad Nacional Agraria La Molina, la cual a través de la Facultad de Ingeniería Agrícola me brindó lo necesario para convertirme en profesional...*

*A mi tío Nicanor Ramírez, por todo el apoyo brindado, incluso antes de mi ingreso a la universidad...*

*A mi equipo de investigación: Lucia, Duaner y Kelyn, fue un gusto realizar esta investigación a su lado, gran equipo...*

*A todos aquellos familiares y amigos por los consejos, apoyo y ánimos brindados durante esta etapa de mi vida...*

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>x</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1. MODELO DE SIMULACION DE CULTIVOS .....	4
2.1.1. Antecedentes del modelo AquaCrop .....	5
2.1.2. Descripción del modelo AquaCrop .....	7
2.1.3. Componentes estructurales del modelo AquaCrop .....	8
2.1.4. Relaciones funcionales del modelo AquaCrop .....	12
2.1.5. Aplicaciones del modelo AquaCrop .....	20
2.2. RAICES TUBEROSAS .....	22
2.2.1. Planta de camote .....	23
2.2.2. Morfología de la planta de camote .....	24
2.2.3. Valor nutricional y usos del camote .....	26
2.2.4. Características agronómicas del camote .....	28
2.2.5. Producción nacional y mundial de camote .....	30
2.3. ZONAS ARIDAS .....	32
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1. UBICACIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL .....	35
3.2. CARACTERÍSTICAS DEL CLIMA .....	36
3.3. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO .....	36
3.4. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE RIEGO .....	36
3.5. VARIEDADES DE CAMOTE EN ESTUDIO .....	37
3.6. SOPORTE LOGICO COMPLEMENTARIO .....	38
3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	38
3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	40
3.9. SIEMBRA, LABORES CULTURALES Y COSECHA .....	42

3.10. FENÓLOGIA DEL CULTIVO.....	44
3.11. PROGRAMACION DE RIEGO.....	45
3.12. MONITOREO DE HUMEDAD EN EL SUELO .....	45
3.13. CRECIMIENTO DEL CULTIVO .....	46
3.13.1. Evolución de biomasa seca .....	46
3.13.2. Evolución del grado de cobertura.....	47
3.14. RENDIMIENTO Y BIOMASA TOTAL EN COSECHA .....	47
3.15. CALIBRACION DEL MODELO AQUACROP.....	48
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>51</b>
4.1. DATOS DE ENTRADA PARA LA CALIBRACION DEL MODELO .....	51
4.1.1. Componente clima.....	51
4.1.2. Componente suelo .....	52
4.1.3. Componente manejo .....	54
4.1.4. Componente cultivo.....	56
4.2. GRADO DE COBERTURA.....	65
4.3. BIOMOSA SECA .....	71
4.4. RENDIMIENTO SECO .....	77
4.5. HUMEDAD EN EL SUELO .....	83
4.6. DATOS Y PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL CULTIVO DE CAMOTE CALIBRADOS CON AQUACROP.....	86
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>89</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>90</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>98</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición nutricional de los principales tubérculos y raíces .....	27
Tabla 2. Características agronómicas de los principales tubérculos y raíces .....	29
Tabla 3. Superficie sembrada, producción y rendimiento promedio de los principales países productores de camote en 2016.....	30
Tabla 4. Superficie sembrada, producción y rendimiento promedio de los principales cultivos en el país, campaña 2015-16.....	32
Tabla 5. Características de las variedades de camote en estudio.....	37
Tabla 6. Softwares usados en la investigación .....	38
Tabla 7. Descripción de los tratamientos .....	39
Tabla 8. Contenido de nutrimentos totales aportados al camote en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .....	43
Tabla 9. Tratamientos y su influencia en el parámetro a calibrar.....	50
Tabla 10. Análisis físico-químico de suelo del área experimental en la UNALM.....	53
Tabla 11. Parámetros no conservativos del suelo necesarios para el modelo .....	53
Tabla 12. Calendario de riego de la lámina real (mm) recibida en cada tratamiento .....	54
Tabla 13. Lamina total de riego aplicada por tratamiento .....	55
Tabla 14. Análisis de la calidad de agua de riego.....	55
Tabla 15. Duración de las fases fenológicas del camote en semanas .....	56
Tabla 16. Grado de cobertura (%) obtenido en cada muestreo realizado en el cultivo de camote, variedad huambachero.....	57
Tabla 17. Grado de cobertura (%) obtenido en cada muestreo realizado en el cultivo de camote, variedad paramonguino .....	58
Tabla 18. Análisis estadístico de la evolución de grado de cobertura (%) observado en el cultivo de camote, variedad huambachero.....	58
Tabla 19. Análisis estadístico de la evolución de grado de cobertura (%) observado en el cultivo de camote, variedad paramonguino .....	58
Tabla 20. Biomasa fresca en $\text{Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ obtenida en cada muestreo previo a cosecha .....	59
Tabla 21. Rendimiento fresco en $\text{Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ obtenido en cada muestreo previo a cosecha .....	59
Tabla 22. Biomasa fresca ( $\text{Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y rendimiento fresco ( $\text{Tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) recogido durante la cosecha.....	60
Tabla 23. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de biomasa fresca del cultivo de camote.....	60
Tabla 24. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de rendimiento fresco del cultivo de camote.....	61

Tabla 25. Contenido de materia seca (%) del rendimiento y biomasa aérea en cada muestreo realizado.....	61
Tabla 26. Biomasa seca (B) en $Tn \cdot ha^{-1}$ obtenida en cada muestreo previo a cosecha.....	62
Tabla 27. Rendimiento seco (Y) en $Tn \cdot ha^{-1}$ obtenido en cada muestreo previo a cosecha..	62
Tabla 28. Datos de biomasa seca (B, $Tn \cdot ha^{-1}$ ), rendimiento seco (Y, $Tn \cdot ha^{-1}$ ) e índice de cosecha (HI), durante la cosecha.....	63
Tabla 29. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de B ( $Tn \cdot ha^{-1}$ ) del cultivo de camote .....	63
Tabla 30. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de Y ( $Tn \cdot ha^{-1}$ ) del cultivo de camote .....	64
Tabla 31. Resultados de los estadísticos de la evolución del grado de cobertura simulado para $T_o$ en las dos variedades de camote en estudio.....	67
Tabla 32. Resultados de los estadísticos de la evolución del grado de cobertura simulado para $T_a$ , $T_b$ y $T_c$ en las dos variedades de camote en estudio.....	71
Tabla 33. Resultados de los estadísticos de la evolución de la B simulada para el tratamiento $T_o$ en las dos variedades de camote en estudio.....	73
Tabla 34. Resultados de los estadísticos de la evolución de la B simulada para $T_a$ , $T_b$ y $T_c$ en las dos variedades de camote en estudio.....	77
Tabla 35. Resultados de los estadísticos de la evolución del Y simulado para el tratamiento $T_o$ en las dos variedades de camote en estudio .....	79
Tabla 36. Resultados de los estadísticos de la evolución del Y simulado para $T_a$ , $T_b$ y $T_c$ en las dos variedades de camote en estudio. ....	82
Tabla 37. Resultados de los estadísticos de la evolución del contenido de humedad en el suelo simulada para $T_o$ y $T_a$ para dos variedades de camote .....	85
Tabla 38. Resultados de la parametrización del cultivo de camote en La Molina, Lima, para AquaCrop.....	87
Tabla 39. Información de temperatura máxima ( $^{\circ}C$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2” .....	98
Tabla 40. Información de temperatura mínima ( $^{\circ}C$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2” .....	99
Tabla 41. Información de humedad relativa (%) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2” .....	100
Tabla 42. Información de velocidad de viento ( $m \cdot s^{-1}$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2” .....	101
Tabla 43. Información de radiación solar ( $W \cdot m^{-2}$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2” .....	102

Tabla 44. Información de radiación solar ( $W \cdot m^{-2}$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2” .....	103
Tabla 45. Información de evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) calculada por día usando el método FAO Penman-Monteith (Allen et al. 1998).....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del modelo <i>AquaCrop</i> .....	7
Figura 2. Componentes y parámetros funcionales del modelo.....	8
Figura 3. Interfaz en la web para cálculo de propiedades hidráulicas del suelo. ....	10
Figura 4. Interfaz del módulo cultivo .....	11
Figura 5. Esquema de cálculo del modelo <i>AquaCrop</i> .....	13
Figura 6. Representación esquemática del desarrollo de dosel durante la fase de expansión de dosel .....	14
Figura 7. Desarrollo del dosel afectado por estreses.....	15
Figura 8. Resumen de los factores que afectan la simulación de CC .....	16
Figura 9. Factores que afectan la simulación de la transpiración del cultivo.....	17
Figura 10. Factores que afectan la simulación de la producción de biomasa seca.....	18
Figura 11. Ajuste de $HI_0$ por insuficiente cubierta verde.....	19
Figura 12. Factores que afectan la simulación del rendimiento final del cultivo.....	20
Figura 13. Tipos de hábitos de crecimiento en camote.....	23
Figura 14. Morfología de la planta de camote.....	25
Figura 15. Capacidad de uso de cada parte de la planta de camote.....	27
Figura 16. Clasificación de zonas en América Latina según el IA y el RA.....	33
Figura 17. Localización del campo experimental (Coordenadas UTM).....	35
Figura 18. Esqueje de camote.....	38
Figura 19. Diseño experimental.....	39
Figura 20. Procedimiento de captura de imágenes digitales para determinación de la cobertura de dosel.....	47
Figura 21. Diagrama de flujo seguido en el proceso de calibración y validación de un cultivo con el modelo <i>AquaCrop</i> .....	49
Figura 22. Variación diaria de a) temperatura y humedad relativa, b) velocidad de viento e intensidad de radiación solar, y c) $ET_0$ y precipitación. ....	52
Figura 23. Tiempo térmico acumulado ( $^{\circ}C$ ) del camote.....	57
Figura 24. Humedad volumétrica (%) del suelo.....	64
Figura 25. Evolución observada y simulada del grado de cobertura (CC) de la variedad huambachero en $T_0$ .....	66
Figura 26. Evolución observada y simulada del grado de cobertura (CC) de la variedad paramonguina en $T_0$ .....	66
Figura 27. Grado de relación de la cobertura promedio simulada y observada en $T_0$ .....	67

Figura 28. Evolución del CC simulado y observado, y su grado de relación en la variedad huambachero para los tratamientos a) T <sub>a</sub> , b) T <sub>b</sub> y c) T <sub>c</sub> .....	69
Figura 29. Evolución del CC simulado y observado, y su grado de relación en la variedad paramonguino para los tratamientos a) T <sub>a</sub> , b) T <sub>b</sub> y c) T <sub>c</sub> .....	70
Figura 30. Evolución de la B simulada y observada para el tratamiento T <sub>o</sub> en las variedades huambachero y paramonguino.....	72
Figura 31. Grado de relación de la B simulada y observada en T <sub>o</sub> .....	73
Figura 32. Evolución de la B simulada y observada, y su grado de relación en la variedad huambachero para los tratamientos a) T <sub>a</sub> , b) T <sub>b</sub> y c) T <sub>c</sub> .....	74
Figura 33. Evolución de la B simulada y observada, y su grado de relación en la variedad paramonguina para los tratamientos a) T <sub>a</sub> , b) T <sub>b</sub> y c) T <sub>c</sub> .....	75
Figura 34. Evolución del Y simulado y observado para el tratamiento T <sub>o</sub> en las variedades huambachero y paramonguino.....	78
Figura 35. Grado de relación del Y simulado y observado en T <sub>o</sub> .....	79
Figura 36. Evolución del Y simulado y observado, y su grado de relación en la variedad huambachero para los tratamientos a) T <sub>a</sub> , b) T <sub>b</sub> y c) T <sub>c</sub> .....	80
Figura 37. Evolución del Y simulado y observado, y su grado de relación en la variedad paramonguina para los tratamientos a) T <sub>a</sub> , b) T <sub>b</sub> y c) T <sub>c</sub> .....	81
Figura 38. Contenido total de agua medido y simulado hasta 0.30 m de profundidad.....	84
Figura 39. Grado de relación entre contenido total de agua medido y simulado hasta 0.30 m de profundidad.....	85
Figura 40. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento testigo T <sub>o</sub> .....	105
Figura 41. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento deficitario T <sub>a</sub> .....	105
Figura 42. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento deficitario T <sub>b</sub> .....	106
Figura 43. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento deficitario T <sub>c</sub> .....	106
Figura 44. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramonguino, tratamiento testigo T <sub>o</sub> .....	107
Figura 45. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramonguino, tratamiento testigo T <sub>a</sub> .....	107
Figura 46. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramonguino, tratamiento testigo T <sub>b</sub> .....	108
Figura 47. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramonguino, tratamiento testigo T <sub>c</sub> .....	108

Figura 48. Resultado del análisis de suelo del campo experimental llevado a cabo en el LAASMA de la UNALM .....	109
Figura 49. Resultado del análisis del agua de riego llevado a cabo en el LAASMA de la UNALM.....	109
Figura 50. Preparación e instalación del sistema de riego .....	110
Figura 51. Acondicionamiento del terreno y siembra del camote .....	110
Figura 52. Labores culturales y manejo del cultivo.....	111
Figura 53. Monitoreo del cultivo .....	111
Figura 54. Fotografías de la cobertura de dosel en la variedad huambachero .....	112
Figura 55. Fotografías de la cobertura de dosel en la variedad paramonguino.....	112
Figura 56. Cosecha del cultivo de camote.....	112

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: INFORMACIÓN CLIMÁTICA.....	98
ANEXO 2: RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN AQUACROP.....	105
ANEXO 3: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO.....	109
ANEXO 4: REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	110

## RESUMEN

*La presente investigación se desarrolló entre los meses de octubre de 2016 a marzo de 2017, con el objetivo de modelar la respuesta de rendimiento y biomasa total en dos variedades del cultivo de camote con diferentes suministros de agua con el modelo AquaCrop. La investigación se realizó en una parcela experimental del Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicada en el distrito de La Molina, en Lima, Perú. El campo experimental se dividió en dos módulos, uno para cada variedad. En cada módulo se distribuyeron aleatoriamente 5 repeticiones de 4 tratamientos diferenciados por el suministro de agua. El análisis estadístico de las observaciones de campo no mostró diferencia significativa entre tratamientos, sin embargo, la información recogida fue de mucha utilidad para la calibración del modelo. A partir del modelamiento, cada variedad fue separada como una clase varietal distinta debido a la diferencia mínima de uno a más parámetros conservativos. La evolución de las variables cobertura verde (CC), biomasa total seca (B) y rendimiento seco (Y), así como de la humedad contenida en el suelo a 30 centímetros de profundidad, simuladas por AquaCrop fueron similares a los valores observados en campo. Tomando como criterio los índices estadísticos:  $R^2$ , NRMSE, EF y d, con valores desde aceptables hasta buenos en cada uno de ellos, se pudo comprobar que el modelo es capaz de reproducir las variables observadas de forma confiable en el cultivo de camote*

**Palabras claves:** *modelos de simulación, AquaCrop, cobertura verde, materia seca, camote.*

## ABSTRACT

*This research was developed between the months of October 2016 to March 2017, with the objective of modeling the response of yield and total biomass in two varieties of sweet potato crop with different water supplies with the AquaCrop model. The research was carried out in an experimental plot of the Department of Water Resources of the Faculty of Agricultural Engineering of the Universidad Nacional Agraria La Molina, located in the district of La Molina, in Lima, Perú. The experimental field was divided into two modules, one for each variety. In each module, 5 repetitions of 4 treatments differentiated by water supply were randomly distributed. The statistical analysis of the field observations did not show a significant difference between treatments, however, the information collected was very useful for the calibration of the model. From the modeling, each variety was separated as a different varietal class due to the minimum difference of one or more conservative parameters. The evolution of the variables green canopy cover (CC), total dry biomass (B) and dry yield (Y), as well as the moisture contained in the soil at a depth of 30 centimeters, simulated by AquaCrop, were similar to the values observed in the field. Taking as a criterion the statistical indices: R<sup>2</sup>, NRMSE, EF and d, with values ranging from acceptable to good in each of them, it was possible to verify that the model is capable of reproducing the variables observed reliably in the sweet potato crop.*

**Keywords:** *simulation models, AquaCrop, green canopy cover, dry matter, sweet potato.*

## I. INTRODUCCIÓN

Se prevé que para el 2050 la población mundial será de nueve mil setecientos millones de habitantes, 30 por ciento más de lo que es en la actualidad (United Nations, 2015). Este crecimiento poblacional generará que gran parte de la humanidad pase hambre o este insuficientemente alimentada.

Si esto se confabula con la escasez del recurso hídrico, el problema se intensifica. Para el 2030, las extracciones mundiales de agua dulce habrán excedido la capacidad de suministro en más del 40 por ciento y cerca de cuatro mil millones de personas vivirán en áreas de alto estrés hídrico (WRG, 2012). Connor y Koncagül (2014) señalan al sector agrícola como principal consumidor de agua. Aproximadamente el 70 por ciento de las extracciones de agua dulce en el mundo, y más del 90 por ciento en los países menos desarrollados (80 por ciento en Perú), se usan para riego. Pero la disponibilidad de agua para el riego puede tener que reducirse en muchas regiones, en favor del rápido aumento de los usos del agua para la industria, el consumo y los fines ambientales.

Con la creciente demanda de agua de riego para producir más alimentos y la creciente competencia en los sectores que utilizan agua, el mundo enfrenta el desafío de producir más alimentos con menos agua. Este objetivo se cumplirá solo si se buscan estrategias adecuadas para un uso más eficiente del agua en la agricultura. Una estrategia importante es aumentar la productividad del agua (es decir, producir más cosechas por volumen de agua empleado) en la agricultura. Por tal motivo, la FAO desarrolló en el 2009 un modelo de simulación de crecimiento de los cultivos para mejorar la productividad del agua en condiciones de secano y regadío, al que denominó *AquaCrop*.

El modelo *AquaCrop*, presentado en este documento, es un modelo centrado principalmente en la simulación del nivel de dosel (o cobertura verde de la planta), de la biomasa del cultivo alcanzable y el rendimiento cosechable en respuesta al agua disponible. El modelo se enfoca en el agua porque es un impulsor clave de la producción agrícola y porque el crecimiento continuo de la población humana y el crecimiento de la industrialización y estándares de

vida en todo el mundo exigen una mayor proporción de nuestros recursos hídricos finitos, convirtiendo al agua en un factor cada vez más crítico

Hasta la fecha, existen diversas investigaciones que analizan y evalúan el funcionamiento del modelo *AquaCrop* para diversos cultivos por todo el planeta tierra, bajo diferentes condiciones meteorológicas y de manejo. Sin embargo, aún existen cultivos que no han sido tan explorados, como los cultivos de raíz, entre ellos el camote. Si bien es cierto, ya se ha parametrizado el modelo para el camote (Rankine *et al.*, 2015), aun es necesario un mayor número de trabajos enfocados en esta especie para un mayor ajuste de los parámetros evaluados.

El camote (*Ipomoea batatas L.*) es un importante cultivo productor de alimentos y forraje, ocupa el tercer lugar entre los tubérculos y raíces tuberosas en el mundo, después de la papa y la yuca. Debido a su similitud con la papa suelen llamarlo “papa dulce”. Es una especie que va adquiriendo participación en el mercado por su alta productividad, bajos costos de producción, rusticidad y rentabilidad. El camote se cultiva a nivel mundial en un área mayor a los ocho millones de hectáreas con una producción y rendimiento promedio de 100 millones de toneladas y  $12.2 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ , respectivamente (Prakash *et al.*, 2018). En el Perú, el camote ocupa una superficie de 10 mil hectáreas con una producción de 270 mil toneladas y un rendimiento promedio de  $18.4 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Santamaría *et al.*, 2016).

Por tal, esta investigación tiene como fin simular el crecimiento o desarrollo de dos variedades de camote bajo disponibilidad variable de agua en condiciones de La Molina en Lima, Perú, con el objetivo de calibrar el modelo *Aquacrop* para el cultivo de raíz en mención.

### **OBJETIVO PRINCIPAL**

- Modelar la respuesta del rendimiento y biomasa total de dos variedades locales de camote con AquaCrop con lámina del 100% ETo y de 50% ETo, bajo el sistema de riego por goteo.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Elaborar una base de datos con información climática, de suelo, de manejo y del cultivo, para su uso como datos de entrada del modelo *AquaCrop*.

- Evaluar la evolución de cobertura de dosel verde (CC), biomasa seca (B) y rendimiento seco (Y) de dos variedades del cultivo de camote: huambachero y paramonguino.
- Comparar los valores registrados de humedad en el suelo durante toda la fase de campo con lo simulado por el modelo.
- Calibrar los parámetros del modelo mediante el análisis comparativo de las variables CC, B e Y, entre lo observado en campo y lo obtenido con el modelo *AquaCrop*.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. MODELO DE SIMULACION DE CULTIVOS

Wadsworth (1997) define al modelo como un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Birta y Arbez (2013) exploran la noción de modelo bajo un contexto de sistema, previamente identificado y con un problema por resolver. Se entiende por sistema a una entidad compleja formada por diversos individuos y por una serie de funciones y relaciones entre estos (Mosterín, 1978). En pocas palabras, un modelo representa de forma simplificada o abstraída un sistema real.

El uso de estos modelos, usualmente llamado modelación, ayudan a comprender el funcionamiento de sistemas de toda índole y asumen diferente grado de complejidad dependiendo de los objetivos a lograr (Wadsworth 1997). Su utilidad radica no sólo en reproducir la realidad, sino porque simplifica y permite que los procesos más importantes sean identificados, estudiados y pronosticados (Addiscott 1993).

La modelación comenzó a tener importancia en agronomía y en otras áreas biológicas donde la realidad se compone de un gran número de componentes y procesos que interactúan a través de una amplia gama de niveles de organización. Es así, que surgen los modelos de simulación de cultivos los cuales permiten describir mediante una mezcla de teoría bien establecida y sólidas relaciones empíricas, los diferentes procesos y mecanismos que interactúan dentro del sistema cultivo-entorno, y que permite representar conceptualmente una simplificación del sistema, como por ejemplo un cultivo interactuando con las variables de clima, suelo y prácticas de manejo (Hernández *et al.*, 2009).

A partir de Barrett y Nearing (1998) se infiere que desde su aparición en la década de los 50, los modelos de simulación de cultivos se han ido desarrollando de tal manera que hoy en día se han convertido en una herramienta importante para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los sistemas agrícolas. La aparición a mediados de los 90 de la tecnología informática permitió una mayor utilización de estos modelos para el

estudio y resolución de problemas específicos como: desarrollo y crecimiento de los cultivos, evaluación de respuesta a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés, predicción de pérdidas por erosión, lixiviación de pesticidas, contaminación del ambiente, calentamiento global de la atmósfera, y demás.

Hoy en día, numerosos modelos de cultivos han sido desarrollados por diferentes grupos de trabajo y cada uno de ellos tienen fortalezas y debilidades para predecir las variables de respuesta (Salvagiotti *et al.*, 2003). No obstante, la capacidad relativa de los modelos existentes y la credibilidad de sus resultados es todavía un aspecto importante a valorar. Esto está asociado, según Dourado-Neto *et al.*, (1998), a la indisponibilidad de datos apropiados para la validación del modelo y, a lo inadecuado de las representaciones de los procesos e interacciones del sistema cultivo-entorno. Por lo tanto, es muy importante antes de adoptar uno u otro modelo para aplicaciones agrícolas y/o medioambientales que se realice un trabajo exhaustivo de evaluación y validación de estos.

Hasta el día de hoy son muchos los modelos de simulación de cultivos que han sido evaluados y validados en distintas regiones del mundo. Dentro de toda esta gama de modelos encontramos los específicos para un cultivo en particular como, el *LINTUL-POTATO* y el *SUBSTOR-Potato* en el caso de la papa, el *RiceGrow* y *ORYZA2000* orientado al arroz y, el *SPOTCOMS* asociado al camote, entre otros. Por otro lado, pueden ser genéricos ya que pueden ser aplicados a varias especies mediante la utilización de parámetros específicos para cada cultivo, entre ellos: (a) el *APSIM*, desarrollado por la Unidad de Investigación en Sistemas de Producción Agrícola en Australia, (b) el *CropSyst*, liberado por el Departamento de Ingeniería de Sistemas Biológicos de la Universidad Estatal de Washington, (c) el *DDSAT*, el cual se desarrolló inicialmente bajo los auspicios de la Red Internacional de Sitios de Referencia para la Transferencia Agrotecnológica, y (d) el *AquaCrop*, establecido por la FAO y el cual tiene la particularidad de ser de libre acceso.

### **2.1.1. Antecedentes del modelo AquaCrop**

La gran complejidad de las respuestas que presentan los cultivos a los déficits hídricos a menudo ha llevado al uso de funciones de producción empírica como la opción más práctica para evaluar la respuesta del rendimiento del cultivo al agua Steduto *et al.*, (2009b). Es así que la FAO, al elaborar el *Documento 33 de Riego y Drenaje* (Doorenbos y Kassam, 1979) establece un hito en la predicción de la respuesta del rendimiento al agua de los cultivos anuales y perennes, a través de la ecuación (1).

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

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

Smith y Steduto (2012) señalan que este procedimiento de cálculo de respuesta tuvo gran acogida entre profesionales enfocados a la producción de cultivos, y fue usado a nivel de campo, región y nación. Prosiguen acotando su utilidad en la actualidad, cuando se requiere una primera aproximación rápida de la merma en el rendimiento relacionado con restricciones de agua, especialmente cuando se tienen que considerar simultáneamente cultivos herbáceos, arbóreos y vides. Sin embargo, esta primera aproximación tiene limitantes como la falta de precisión debido a que toma al agua como única variable influyente en la estimación del rendimiento y, deja de lado a otras como el efecto de los nutrientes, las distintas variedades cultivadas, las labores de campo, etc.

Posteriormente, la FAO revisa el *Documento 33* en pro de mejorar la productividad del agua usando los avances teóricos y empíricos en la relación cultivo-agua, y así poder enfrentar la escasez de agua. Una consulta a las principales instituciones científicas, académicas y organizaciones gubernamentales de todo el planeta condujo a un marco de revisión que trata los cultivos de campo y hortalizas por separado de los cultivos arbóreos, dado el diferente nivel de conocimiento y las complejidades adicionales involucradas en la determinación del rendimiento de este último. Para cultivos herbáceos, la decisión fue desarrollar un modelo de simulación de una estructura adecuada basada en conceptos trazables a la ecuación (1) para su uso en la planificación, gestión y análisis de escenarios (Steduto *et al.*, 2009b).

Una vez apartado los cultivos arbóreos de los herbáceos, se procedió a examinar los modelos ya existentes de este último, los cuales simulaban la respuesta del rendimiento al agua. No obstante, dichos modelos contenían una estructura muy compleja y con un elevado número de variables y parámetros de entrada que dificultaban su uso en la mayoría de los usuarios finales como asociaciones de usuarios de agua, ingenieros consultores, administradores de granjas, etc. Muchas de estas variables, que en su mayoría son de uso más familiar para los científicos, como por ejemplo el LAI (índice de área foliar), no estaban fácilmente disponible para la amplia gama de cultivos y lugares del mundo. Todo lo anterior desencadenó en el

desarrollo de un nuevo modelo que brindaba un balance óptimo entre precisión, robustez y simplicidad, y al que la FAO denominó *AquaCrop* (Steduto *et al.*, 2009a).

### 2.1.2. Descripción del modelo AquaCrop

Steduto *et al.*, (2009b) definen al modelo *AquaCrop* como resultado de un refinamiento de la ecuación (1). En la figura 1 se muestra el diagrama de evolución de *AquaCrop*, teniendo como base la incorporación de algunos postulados. Por un lado, la evapotranspiración (ET) se separa en evaporación del suelo (E) y transpiración del cultivo ( $T_r$ ) para evitar el efecto de confusión del uso no productivo de agua (E). Esto es particularmente importante cuando la cubierta del dosel del suelo es incompleta y E puede ser el componente principal de ET. Por otro lado, el rendimiento cosechable (Y) se expresa como una función de la biomasa (B) y el índice de cosecha (HI) para distinguir entre los efectos de estrés ambiental en B de aquellos en HI. La separación de estos dos tipos de efectos, que difieren fundamentalmente, hace posible introducir enlaces funcionales basados en procesos fisiológicos subyacentes. Los cambios descritos llevaron a la ecuación (2) a ser el núcleo del motor de crecimiento en *AquaCrop*.

$$Y = B \cdot HI \quad (2)$$

$$B = WP \cdot \sum Tr \quad (3)$$

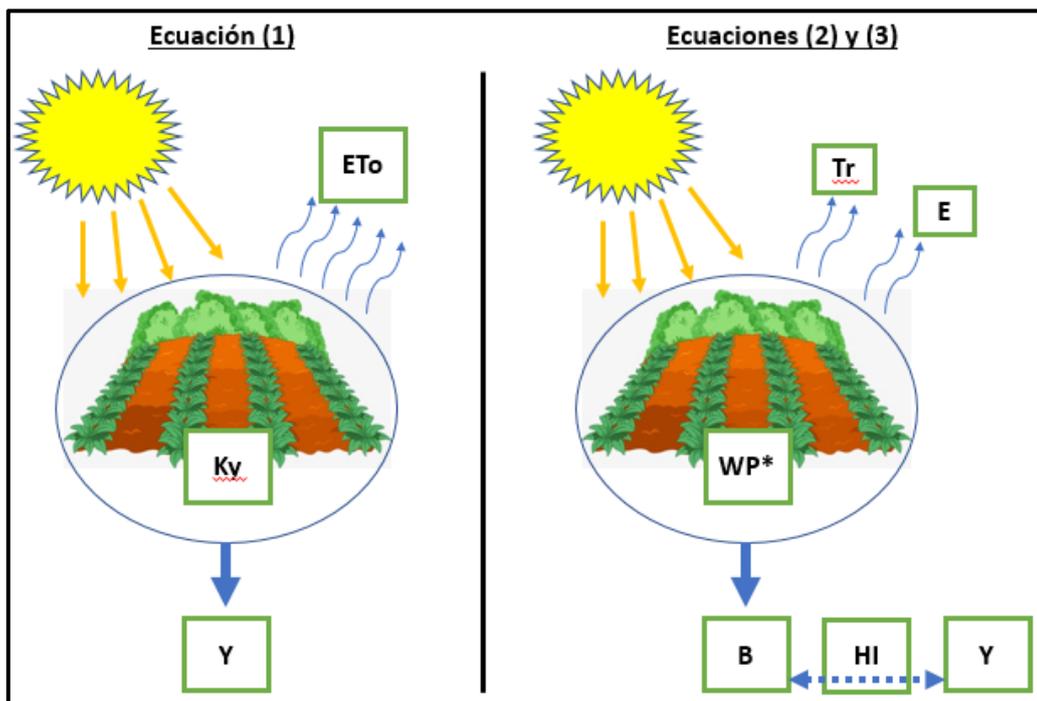
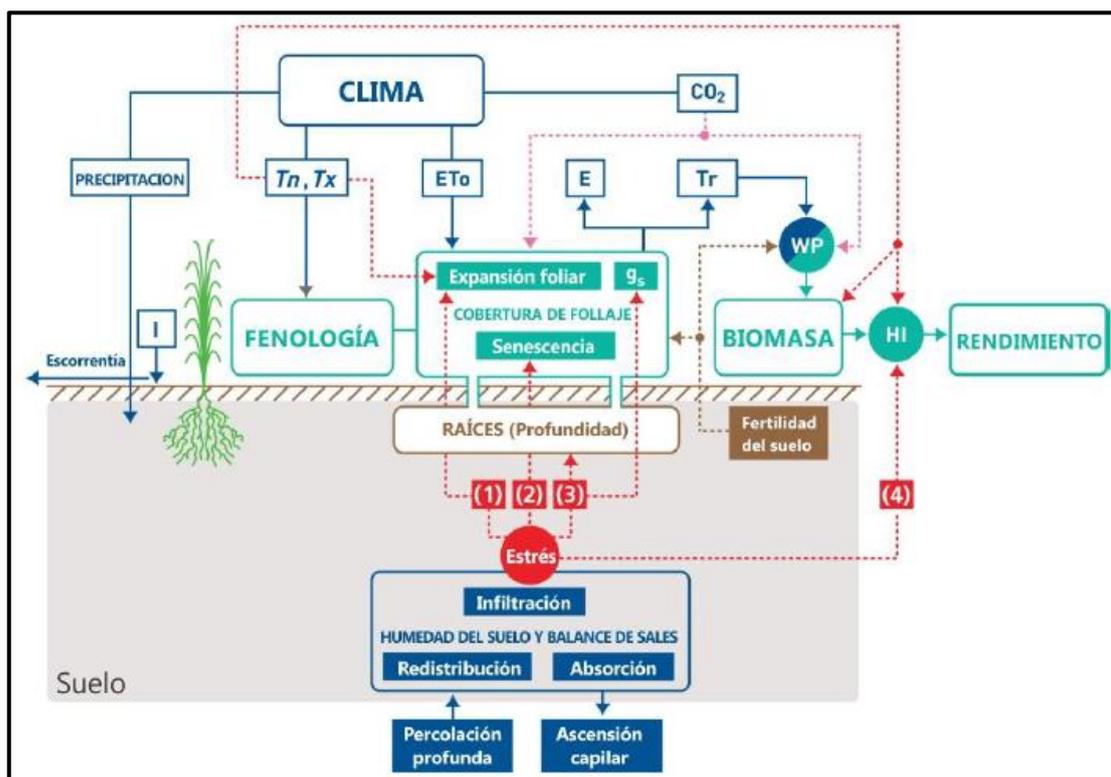


Figura 1. Evolución del modelo *AquaCrop*

Por su lado, la ecuación (3) introduce pasos de tiempo diarios para tener en cuenta los cambios dinámicos en el suministro de agua, la evaporación del suelo, la transpiración del cultivo y la temperatura del aire, en contraste con el uso de la ecuación (1) el cual se usa estacionalmente o para diferentes fases de crecimiento por las cuales pasa todo cultivo (Steduto *et al.*, 2009b). Pasar de la ecuación (1) a la (2) y (3) hace que el modelo sea más robusto y más aplicable, debido al comportamiento conservador del parámetro productividad del agua (WP) cuando se normaliza (WP\*) para las condiciones climáticas (Steduto *et al.*, 2007). Hasta aquí, es importante señalar que ambas ecuaciones (2) y (3) son expresiones de un motor de crecimiento impulsado por el agua en términos del diseño del modelo de cultivo.

Así mismo, *AquaCrop* es un modelo de simulación de cultivos que abarca el continuo *planta-suelo*. Este sistema es afectado por condiciones que se detallan en capítulos posteriores. Sin embargo, a manera de síntesis se podría decir que la planta absorbe agua y nutrientes del suelo, y es afectado por las condiciones climáticas y de manejo del hombre.



**Figura 2. Componentes y parámetros funcionales del modelo.**

FUENTE: Extraído de Steduto *et al.*, (2012).

### 2.1.3. Componentes estructurales del modelo AquaCrop

De forma similar a otros modelos, *AquaCrop* tiene una estructura que abarca el continuo *suelo-planta-atmósfera* (figura 2). Incluye el *suelo*, con su balance hídrico; la *planta*, con

sus procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento; y la *atmósfera*, con su régimen térmico, lluvia, demanda evaporativa y concentración de dióxido de carbono. Así mismo, toma en cuenta las *prácticas de manejo* enfatizando el riego, pero también considerando la fertilidad del suelo, especialmente el nitrógeno, y los aspectos relacionados con el agua, como los límites del suelo y los acolchados, ya que afectan el equilibrio hídrico, el desarrollo y el crecimiento de los cultivos. Las plagas, enfermedades y malezas no son consideradas en el desenvolvimiento del modelo.

A continuación, una breve descripción de los cuatro módulos que componen el modelo. Para una descripción más detallada de los mismos se sugiere revisar (Steduto *et al.*, 2012).

#### a. Clima

Para cada día del período de simulación, el ambiente atmosférico del cultivo se especifica en el componente climático de *AquaCrop*, con cinco variables de entrada requeridas: temperaturas diarias máximas y mínimas del aire, precipitación diaria, demanda evaporativa diaria de la atmósfera expresada como  $ET_o$ , y la concentración media anual de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en la atmósfera. Mientras que los primeros cuatro se obtienen o derivan de datos de estaciones meteorológicas, la concentración de  $CO_2$  utiliza los registros del Observatorio Mauna Loa en Hawai (Steduto *et al.*, 2009a). Para el caso de próximos escenarios de cambio climático se debe usar otros archivos de  $CO_2$  con la composición atmosférica proyectada o usar las estimaciones del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) disponible en la interfaz clima del modelo (Raes, 2017).

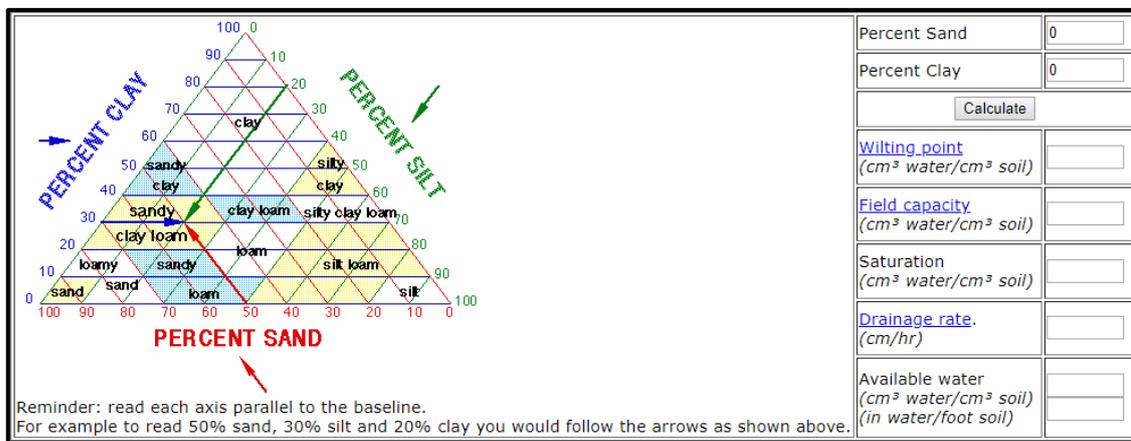
El régimen de temperaturas incide en el desarrollo de los cultivos (fenología) por medio de los grados días acumulados (GDD). Los efectos adicionales de temperaturas más extremas son la reducción de WP (por tanto, la acumulación de biomasa) cuando el clima es demasiado frío, y reducción de la polinización (por ende, del HI) cuando el clima es demasiado frío o cálido. La precipitación y la  $ET_o$ , junto al riego, son aspectos determinantes del balance de agua de la zona radicular del suelo y del estrés hídrico. La concentración atmosférica de  $CO_2$  incide en la WP, la expansión del dosel y la conductancia estomática.

Por consistencia y como norma, la  $ET_o$  debe calcularse a partir de la radiación solar diaria, la temperatura, la humedad y los datos del viento siguiendo los procedimientos descritos en el Documento 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998). A partir de la versión 5.0, *AquaCrop* tiene encajado el *ETo Calculator*, software libre que incluye todas las rutinas necesarias para

calcular la  $ET_0$ , descritas en el *Documento 56* (Raes, 2017). El programa acepta datos del clima dados en una amplia variedad de unidades y si no se tiene el set completo de datos se puede estimar a partir de datos promedio mensuales o de 10 días, y hacer aproximaciones cuando faltan una o varias clases de datos requeridos del clima. Esto permite que se ejecute simulaciones aproximadas incluso cuando los datos del clima son mínimos. Sin embargo, se debe tener cuidado para evitar usar inapropiadamente la versatilidad del programa, ya que a más elementos del clima falten menos fiables serán los resultados simulados y los parámetros derivados de *AquaCrop*.

## b. Suelo

En *AquaCrop*, el suelo se describe mediante un perfil de suelo y las características de la capa freática (si lo hubiera). El perfil se configura como horizontes en dirección vertical de profundidad variable, permitiendo hasta cinco capas de textura diferente. Las características hidráulicas consideradas para cada una de las capas son: el contenido de humedad del suelo en el punto de saturación (SAT), capacidad de campo (FC), punto de marchitez permanente (PWP) y conductividad hidráulica en saturación (Ksat). En base a estas características, el modelo *AquaCrop* deriva otros parámetros que rigen la evaporación del suelo, el drenaje interno, la percolación profunda, la escorrentía superficial y el ascenso capilar. En caso de que falten algunos valores de los primeros cuatro parámetros, el modelo proporciona valores indicativos para todas las clases de texturas del triángulo USDA, o el usuario puede estimar las características hidráulicas de acuerdo con la clase textural (granulometría primaria) a través de las funciones de *pedo-transferencia* (Saxton *et al.*, 1986) en la red (figura 3). Estas funciones no explican las diferencias en la agregación del suelo y deben considerarse aproximaciones, por lo tanto, deberían ajustarse en base a propios datos y experiencia.

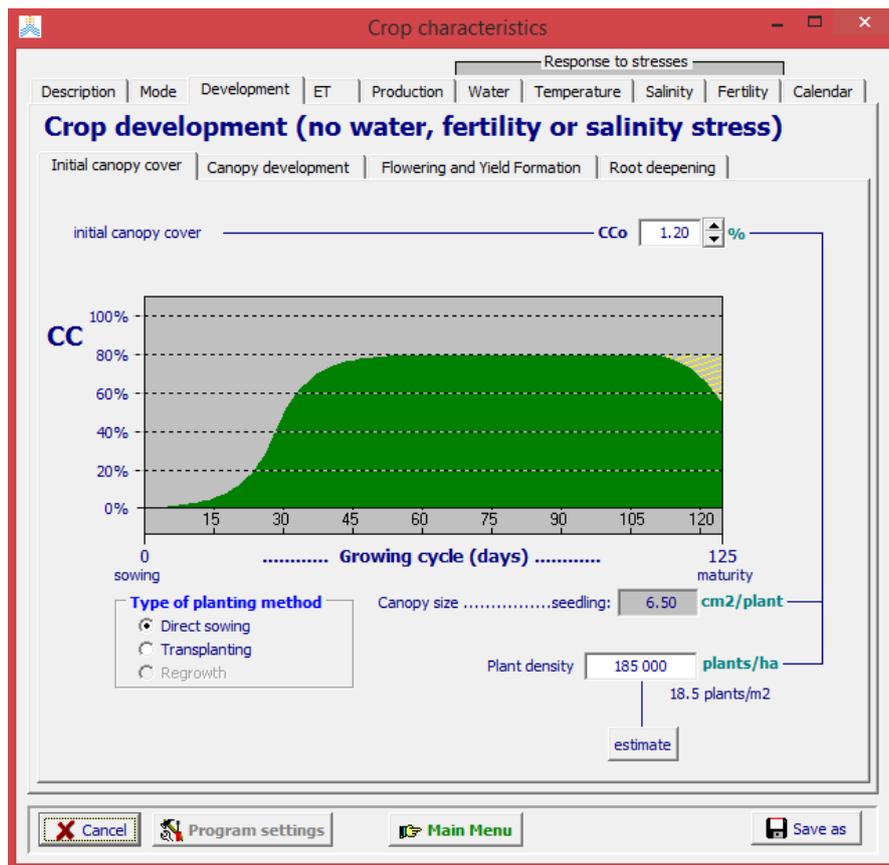


**Figura 3. Interfaz en la web para cálculo de propiedades hidráulicas del suelo.**  
FUENTE: Extraído de Nelson (1997)

Por otro lado, las características de la napa freática que se tienen en cuenta son su profundidad debajo de la superficie del suelo y su salinidad. Éstas pueden permanecer constantes durante la estación o variar a lo largo del período de simulación. Así mismo, es importante especificar si existe una capa del suelo que detiene la profundización de las raíces y señalar el porcentaje de gravas del suelo (si lo hubiera).

### c. Cultivo

El módulo cultivo del modelo tiene los siguientes componentes: fenología, cubierta verde del dosel, profundidad de enraizamiento, transpiración del cultivo, producción de biomasa y rendimiento cosechable. En condiciones normales, el cultivo crece y se desarrolla a través de las etapas fenológicas de su ciclo, acumulando biomasa. Sin embargo, los cultivos suelen responder a situaciones de estrés, en *AquaCrop* se toma en cuenta los generados por la falta o exceso de agua de riego, por las temperaturas extremas del ambiente, por la salinidad del suelo y por la infertilidad del suelo.



**Figura 4. Interfaz del módulo cultivo**

FUENTE: Extraído del modelo *AquaCrop*

En la figura 4 se admira la interfaz del módulo cultivo en el modelo *AquaCrop*. En la pestaña *Description* se puede seleccionar el modo *limited set* (condición óptima) o *full set* (añade los

parámetros de estrés). El modelo puede simularse en días calendario o en grados días acumulados (GDD), esto se puede manipular en la opción *Mode*. Al interior de la ventana *Development* encontramos variables como tipo de plantación, densidad de planta, cobertura inicial ( $CC_0$ ) y máxima ( $CC_x$ ), duración de las etapas fenológicas, inicio de formación del rendimiento y profundidad máxima de raíces. En *Production* aparecen los parámetros conservativos, productividad de agua normalizada ( $WP^*$ ) e índice de cosecha (HI), los cuales varían de acuerdo a la especie de cultivo o a una clase varietal específica de ella. La transpiración máxima del cultivo ( $K_{cTr,x}$ ) para la cobertura completa se modifica en la pestaña *ET*, esta influye en el coeficiente  $K_{e_x}$  el cual determina el agua evaporada por el suelo.

Las respuestas al estrés se manipulan en las ventanas *Water*, *Temperature*, *Salinity* y *Fertility*, cada una de ellas con umbrales que determinarán que tanto efecto tiene el estrés sobre el desarrollo óptimo del cultivo. Cabe señalar que las situaciones de estrés, exceptuando el déficit hídrico, pueden ser consideradas o no de acuerdo a la disponibilidad de información recolectada en campo para la evaluación correspondiente del modelo.

#### d. Manejo del cultivo

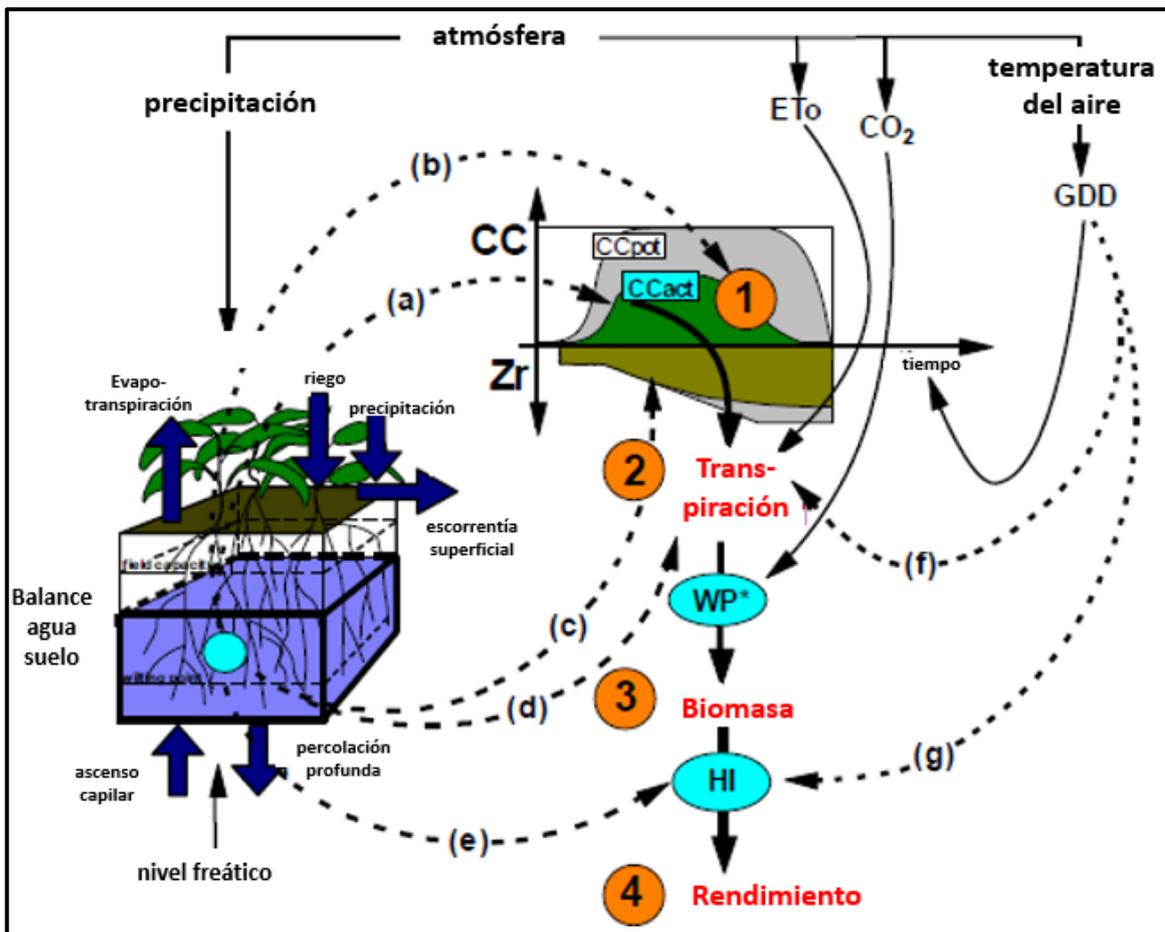
El componente de manejo en *AquaCrop* tiene dos categorías: el manejo de campo (limitado a ciertos aspectos y relativamente sencillo en los enfoques) y el manejo de riego (bastante completo en sus diversas características). En el primero se puede definir: el nivel de fertilidad, que va desde casi óptimo hasta pobre, y la práctica de acolchados y terraplenes de control. En la gestión del agua hay opciones para seleccionar, la agricultura de secano (sin riego) o bajo riego suplementario (aspersión, goteo o superficial, ya sea por surcos o inundación). El usuario puede definir su propio calendario de riego en términos de tiempo, profundidad y calidad del agua de riego para cada aplicación, o permitiendo que el modelo genere automáticamente el calendario basado en un intervalo de tiempo fijo, profundidad fija por aplicación, o agotamiento de agua permisible. Una característica adicional es la estimación de los requerimientos hídricos completos de un cultivo en un clima determinado.

#### **2.1.4. Relaciones funcionales del modelo AquaCrop**

La figura 5 esquematiza los procesos de cálculo que ejecuta *AquaCrop* entre los diferentes componentes del modelo. En cuatro pasos que son fáciles de entender, y que hacen que el

enfoque de modelado sea transparente, se simula el rendimiento del cultivo final. Todo el proceso se ejecuta en tiempo diario.

Como primer paso se ajusta la cobertura verde (CC) del cultivo. A partir del CC, el modelo ejecuta la transpiración ( $T_r$ ) tomando en cuenta la variable climática ET y los coeficientes de estrés. La productividad de agua normalizada ( $WP^*$ ) permite el cálculo de la biomasa acumulable (B) a partir de la  $T_r$ . Finalmente se obtiene el rendimiento al multiplicar B con el índice de cosecha de referencia ( $HI_0$ ).



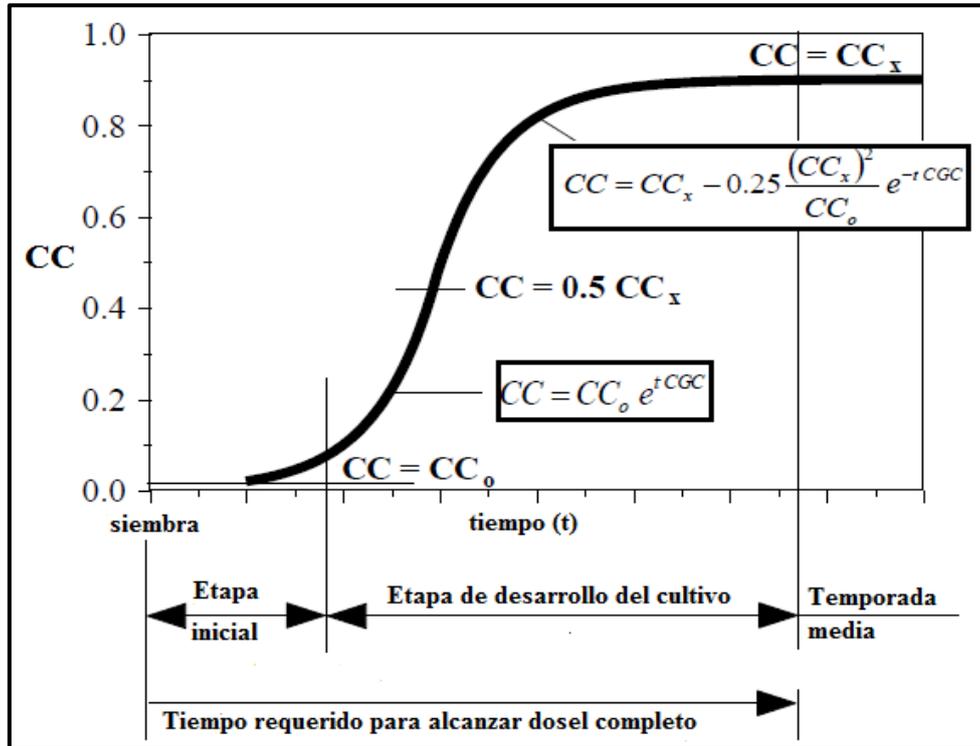
**Figura 5. Esquema de cálculo del modelo AquaCrop**

FUENTE: Extraído de Raes (2017)

#### a. Desarrollo del dosel

Una de las características clave de *AquaCrop* que lo distingue de otros modelos existentes, es el uso de la variable cobertura del suelo verde fraccional (CC) en lugar del índice de área foliar (IAF) para el cálculo de la transpiración. Esto simplifica significativamente la simulación, permitiendo al usuario ingresar valores reales de CC, incluso aquellos estimados

a simple vista. Además, CC puede obtenerse fácilmente también a través de percepción remota, ya sean imágenes satelitales u obtenidas por una cámara fotográfica a mano.



**Figura 6. Representación esquemática del desarrollo de dosel durante la fase de expansión de dosel**

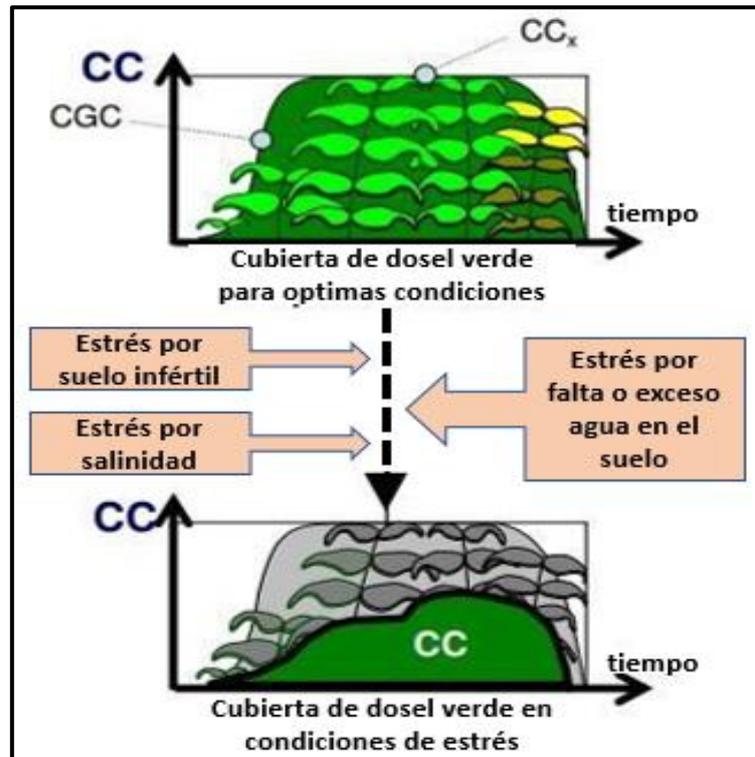
FUENTE: Extraído de Raes (2017)

La cubierta del dosel en la germinación ( $CC_0$ ) es muy pequeña (generalmente alrededor del uno por ciento) y resulta de la multiplicación de la densidad de la planta por la cubierta inicial media del dosel por plántula ( $cc_0$ ). Durante la etapa de expansión, CC aumenta. Esto se describe mediante un coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) y en dos etapas como se observa en la figura 6. La cobertura máxima del dosel ( $CC_x$ ) que se alcanzará en la mitad de la temporada, varía según el tipo de cultivo y la densidad de siembra (generalmente alrededor del 75 al 100 por ciento). A fines de la temporada, la cubierta verde del dosel disminuye debido a la senescencia. Esta reducción de CC se simula bajo la ecuación 4 que tiene como factor principal al coeficiente de declinación del dosel (CDC).

$$CC = CC_x \left[ 1 - 0.05 \left( e^{\frac{3.33CDC}{CC_x + 2.29} t} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

Como primer paso se ajusta la cobertura verde (CC) del cultivo. A partir del CC, el modelo ejecuta la transpiración ( $T_r$ ) tomando en cuenta la variable climática ET y los coeficientes de estrés. La productividad de agua normalizada ( $WP^*$ ) permite el cálculo de la biomasa

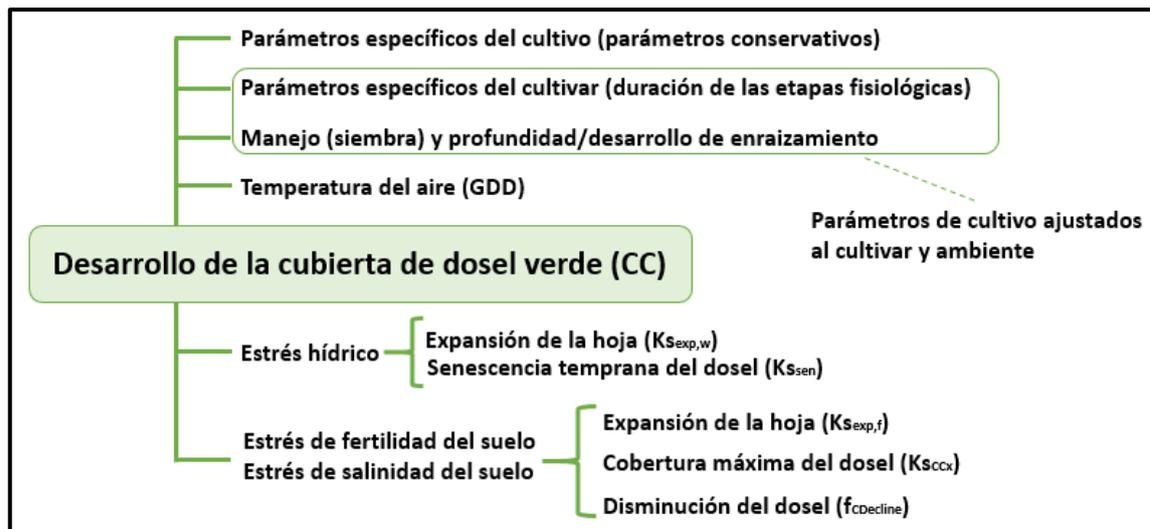
acumulable (B) a partir de la  $T_r$ . Finalmente se obtiene el rendimiento al multiplicar B con el índice de cosecha de referencia ( $HI_0$ ).



**Figura 7. Desarrollo del dosel afectado por estreses**  
 FUENTE: Extraído de Raes (2017)

Al ejecutar una simulación en situación de estrés, el desarrollo del dosel puede ser bastante diferente del desarrollo en condiciones no limitativas (figura 7). El efecto del estrés hídrico en CC se describe mediante dos coeficientes de estrés hídrico ( $K_s$ ). Hay un  $K_s$  para la expansión de la hoja ( $K_{s_{exp,w}}$ ) con CGC como parámetro de cultivo objetivo, y un  $K_s$  para la disminución temprana del dosel ( $K_{s_{sen}}$ ) con CDC como parámetro de cultivo objetivo. Cuando el contenido de agua en la zona de la raíz ( $W_r$ ) cae por debajo del umbral para la expansión de la hoja,  $K_{s_{exp,w}}$  se vuelve más pequeño que 1 y la expansión del dosel disminuye. Cuando el contenido de agua en la zona de la raíz cae por debajo del umbral para el declive temprano del dosel,  $K_{s_{sen}}$  se vuelve más pequeño que 1 y se activa el declive del dosel.

En la figura 8 se ofrece una descripción general de todos los factores que afectan la simulación del desarrollo de la cubierta de dosel verde. Notar la ausencia de un análisis detallado del efecto de estrés salino y estrés por infertilidad del suelo, debido a que no se tomaron en cuenta en la presente investigación, sin embargo, es importante mencionarlos ya que influyen en el desarrollo del CC.



**Figura 8. Resumen de los factores que afectan la simulación de CC**

FUENTE: Extraído de Raes (2017)

## b. Transpiración del cultivo

La transpiración del cultivo se calcula multiplicando la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) con el coeficiente de transpiración del cultivo ( $K_{c_{Tr}}$ ) y considerando el estrés hídrico ( $K_s$ ) y el coeficiente de estrés por frío ( $K_{s_{Tr,x}}$ ), que son 1 cuando el estrés no induce el cierre estomático (ecuación 5).

$$Tr = K_s(K_{s_{Tr,x}} \cdot K_{c_{Tr}})ET_o \quad (5)$$

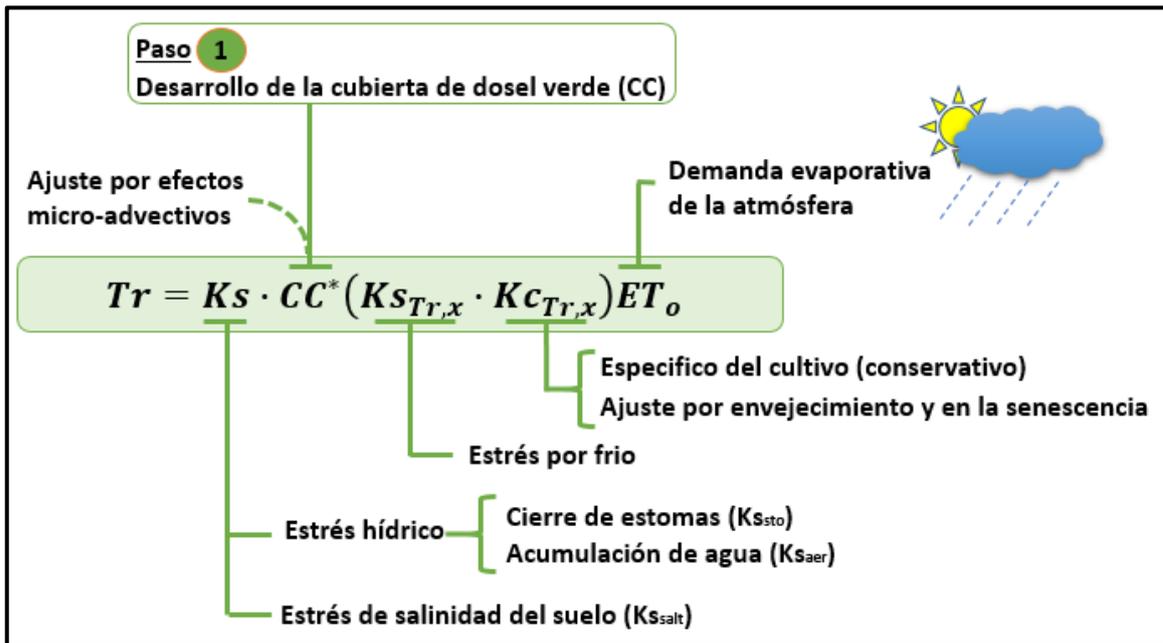
Donde el coeficiente de transpiración del cultivo ( $K_{c_{Tr}}$ ) es proporcional a la cubierta verde del dosel (CC):

$$K_{c_{Tr}} = K_{c_{Tr,x}} \cdot CC^* \quad (6)$$

El coeficiente de cultivo para la máxima transpiración del cultivo  $K_{c_{Tr,x}}$ , es determinado por las características que distinguen al cultivo con una cubierta de dosel completa, de la hierba de referencia. Para la mayoría de los cultivos  $K_{c_{Tr,x}}$  está en el rango de 1.05 a 1.20 y se ajusta hacia abajo para el envejecimiento a lo largo del ciclo del cultivo y severamente una vez que se desencadena la senescencia. El  $CC^*$  es la cubierta de dosel ajustada por los efectos micro-advectivos entre filas.

Los grados días que se pueden acumular en un día se utilizan como indicador de estrés por frío en la transpiración del cultivo. Para simular el efecto del estrés por frío, se considera un coeficiente de estrés por temperatura para la transpiración del cultivo ( $K_{s_{Tr}}$ ). Su parámetro objetivo es  $K_{c_{Tr,x}}$ . Por otro lado, el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo se

simula mediante un coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ) con  $K_{c_{Tr,x}}$  como parámetro de cultivo objetivo. Si el estrés se debe a una escasez de agua, se considera un coeficiente de estrés hídrico del suelo para el cierre de estomas ( $K_{s_{sto}}$ ). Si el estrés se debe a un exceso de agua, se considera un coeficiente de estrés hídrico del suelo para la acumulación de agua o una aireación deficiente ( $K_{s_{aer}}$ ). Cuando el contenido de agua en la zona de la raíz cae por debajo del umbral de  $K_{s_{sto}}$ , o está por encima del umbral de  $K_{s_{aer}}$ , el coeficiente de estrés se vuelve más pequeño que 1 y la transpiración del cultivo disminuye.



**Figura 9. Factores que afectan la simulación de la transpiración del cultivo**

FUENTE: Extraído de Raes (2017)

Una visión general de todos los factores que afectan la simulación de la transpiración del cultivo se ofrece en la figura 9. El desarrollo del dosel del cultivo (CC) se discutió en la sección previa y el efecto del estrés por salinidad no se detalla dado que no se consideró en la evaluación del modelo.

### c. Biomasa

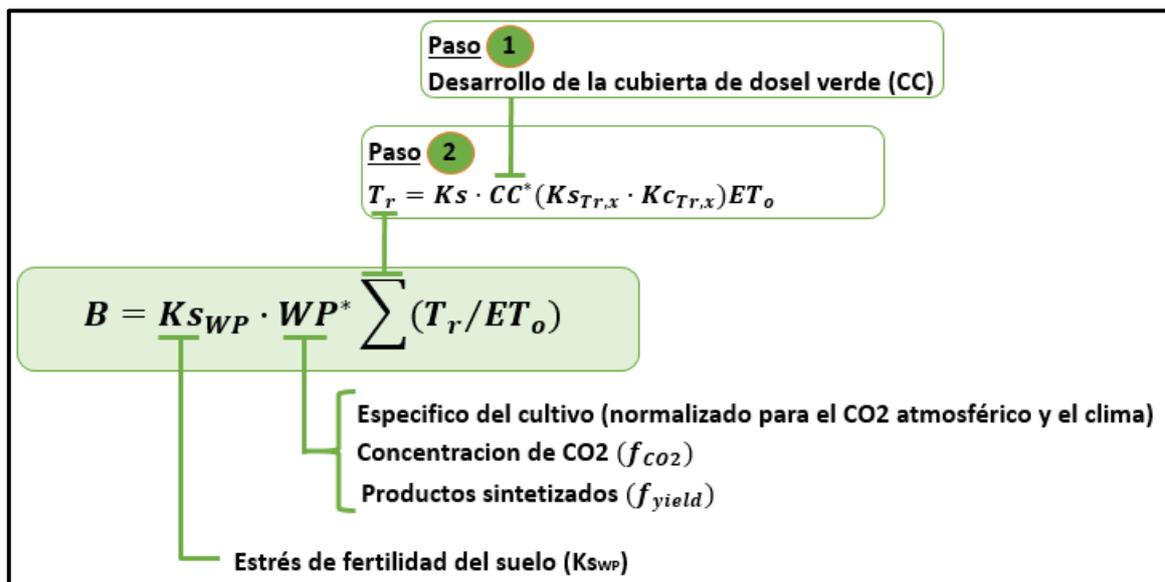
Al separar la transpiración del cultivo ( $T_r$ ) de la evaporación del suelo ( $E$ ), *AquaCrop* evita el efecto de confusión del consumo no productivo de agua ( $E$ ). El dosel verde de la planta representa la fuente de transpiración, que se traduce en una cantidad proporcional de biomasa producida a través de la productividad de agua normalizada ( $WP^*$ ). Este efecto de normalización de la productividad del agua invita a formular nuevamente la ecuación (2)

para el cálculo de la producción de biomasa (B) en función de la cantidad acumulada de agua transpirada y la WP\* (ecuación 7).

$$B = WP^* \cdot \sum \left( \frac{Tr_i}{ET_{o_i}} \right) \quad (7)$$

El objetivo de la normalización es hacer que la productividad del agua (WP) sea aplicable a diversas ubicaciones, estaciones y concentraciones de CO<sub>2</sub>. La normalización del clima (ubicación, estación) se obtiene al dividir la cantidad diaria de agua transpirada (T<sub>r</sub>) con la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) para ese día. La normalización para el CO<sub>2</sub> consiste en considerar la productividad del agua para una concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> de referencia de 369.41 ppm (la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera para el año 2000). Este valor de WP\* se ajusta para niveles de CO<sub>2</sub> distintos al de su valor de referencia, con un factor de corrección para CO<sub>2</sub> (f<sub>CO2</sub>). Así también, si los productos sintetizados durante la formación del rendimiento son lípidos o proteínas, en lugar de carbohidratos, el modelo ajusta WP\* con un coeficiente de reducción (f<sub>yield</sub>).

En la figura 10 se aprecia una descripción general de todos los factores que afectan la simulación de biomasa seca producida. El desarrollo del dosel del cultivo y la transpiración del cultivo se discutieron en secciones previas, mientras que el efecto de la fertilidad del suelo solo se cita en el diagrama para evitar caer en el error de no tomarlo en cuenta en otra posible investigación.



**Figura 10. Factores que afectan la simulación de la producción de biomasa seca**

FUENTE: Extraído de Raes (2017).

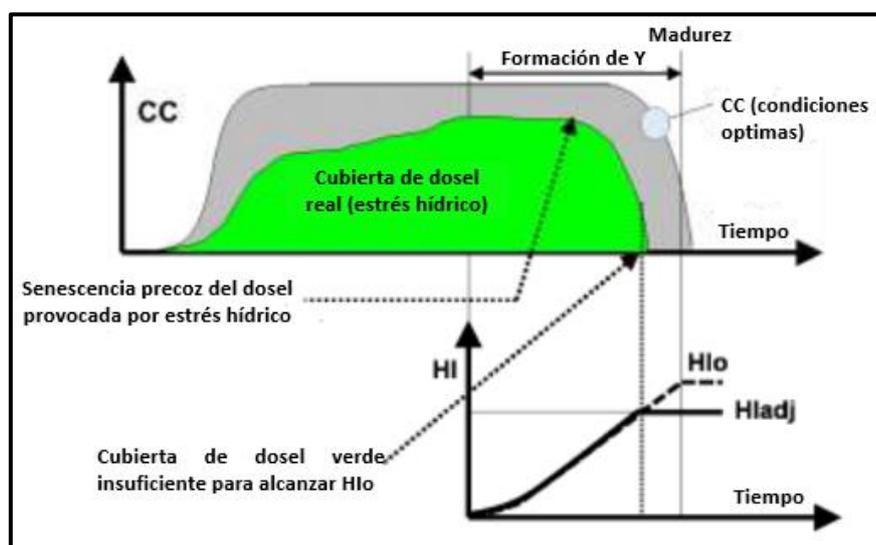
#### d. Rendimiento

*AquaCrop* no calcula la división de biomasa en varios órganos (hojas, raíces, flores, etc.). Esta elección evita lidiar con la complejidad y las incertidumbres asociadas con los procesos de particionamiento, que se encuentran entre los menos entendidos en fisiología de cultivos y son más difíciles de modelar. En cambio, *AquaCrop* solo realiza la partición del rendimiento final (Y) de la biomasa seca simulada (B), a partir de un índice de cosecha (HI), como se observó en la ecuación (1).

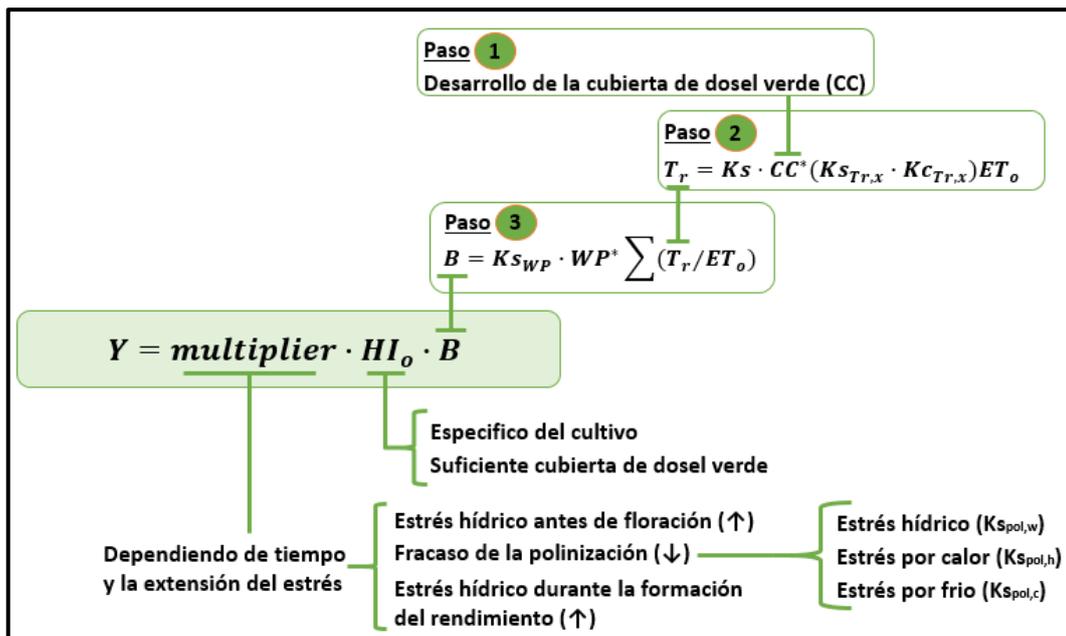
El usuario solo debe proporcionar un HI de referencia ( $HI_0$ ) para cada cultivo (y varietal cuando esté justificado). Para raíces y tubérculos, el aumento de HI comienza en la formación de tubérculos o en el agrandamiento de las raíces. Cuando la acumulación de HI es rápida, el cultivo podría haber alcanzado su  $HI_0$  antes del final del ciclo de cultivo. Las tensiones de agua y temperatura durante el ciclo de crecimiento podrían alterar la HI de su valor de  $HI_0$ . El efecto de las tensiones en HI se simula con la ayuda de un multiplicador (*multiplier*) cuyo valor se ajusta continuamente a la fuerza de las distintas tensiones (ecuación 8).

$$HI = multiplier \cdot HI_0 \quad (8)$$

Si el estrés hídrico es severo, desencadena la senescencia temprana del dosel. Por lo tanto, la cubierta del dosel verde (CC) restante puede caer por debajo de un valor umbral mínimo, por debajo del cual el HI ya no puede aumentar. Como resultado, el HI que se alcanza al final del ciclo de cultivo puede ser más pequeño que  $HI_0$  (figura 11).



**Figura 11. Ajuste de  $HI_0$  por insuficiente cubierta verde**  
FUENTE: Extraído de Raes (2017)



**Figura 12. Factores que afectan la simulación del rendimiento final del cultivo**

FUENTE: Extraído de Raes (2017)

En la figura 12 se ofrece una visión general de todos los factores que afectan la simulación del rendimiento final del cultivo. Los pasos 1, 2 y 3 se relataron previamente. El efecto del de las tensiones se resume en el factor *multiplier*, este tiene como parámetro objetivo el  $HI_o$ . Cabe señalar que no solo es negativo el efecto que resulta de este, por el contrario, puede ocurrir también un efecto positivo sobre el  $HI_o$  generando un aumento en su valor final. Hay incremento en el  $HI_o$  si el estrés afecta la expansión de la hoja, debido a la disminución de la competencia del crecimiento de las hojas con el crecimiento reproductivo. En contraste, existe reducción si el estrés induce al cierre estomático, ya que la reducción correspondiente en el suministro de asimilados es lo que desacelerará el aumento en  $HI$ .

### 2.1.5. Aplicaciones del modelo AquaCrop

Usado como herramienta de planificación, *AquaCrop* ayuda en la toma de decisiones en la gestión de la agricultura, ya sea de secano, por riego, o por la combinación de ambos. Visitando el portal de la FAO en la web, nos topamos con algunos de los principales empleos que tiene el aplicativo *AquaCrop*.

La utilidad que en estos momentos muchos investigadores y estudiantes le dan al *software* es como herramienta para entender las respuestas de los cultivos al efecto del cambio climático inminente (como herramienta científica). Periodos extensos de sequía, mayor presencia de tormentas asesinas (abundantes lluvias), y olas extremas de calor son algunos

de las adversidades que nos azotaran en los próximos años. Estas circunstancias tendrán una secuela, en términos de producción, en la gran mayoría de los cultivos que se producen alrededor del mundo. Estos efectos que repercuten en el desarrollo normal de los cultivos se podrán simular con *AquaCrop* (Vanuytrecht *et al.*, 2011). Esto nos proporcionara predicciones de cambios en el rendimiento y en los requerimientos hídricos. Al respecto, una investigación muy interesante es la que nos presenta Sutton *et al.*, (2013), en ella *AquaCrop* simula una reducción de rendimiento alrededor del 10 al 30 por ciento de muchos cultivos para el año 2050, entre ellos el algodón, tomate, papa y otros. Ante esto, proponen posibles estrategias de adaptación en el manejo del cultivo.

Los rendimientos reales en campo, finca o regiones suelen ser en ocasiones distintos a los rendimientos potenciales. Así, *AquaCrop* también puede ejecutar simulaciones con información disponible de varios años (el estándar es 30), precisando el rendimiento alcanzable para cada año. De esta manera comparamos la productividad a largo plazo bajo diferentes sistemas de producción, determinando la brecha de rendimiento (rendimiento potencial menos real). Las posibles razones de las brechas de rendimiento seguirán las pistas brindadas por los resultados de los diferentes años. Entre las posibilidades están la baja fertilidad del suelo, plagas, enfermedades, limitaciones por malas hierbas, restricciones socioeconómicas o variedades de cultivos de bajo rendimiento, por citar algunas. Un clarísimo ejemplo de este enfoque de uso del modelo se describe en Calviño y Sadras (2002), quienes evalúan, con apoyo del *AquaCrop*, las limitaciones del rendimiento del trigo en una región, variando los escenarios. Si a esto se le suma el uso de sistemas de información geográfica (GIS), se podrían desarrollar mapas de brechas de rendimiento para las regiones.

Por último, un grupo de usuarios, concretamente especialistas en riego e ingenieros consultores, emplean el modelo *AquaCrop* para generar planes de riego para obtener la producción máxima posible. De la misma manera se esmeran en desarrollar estrategias, en condiciones de estrés hídrico para maximizar la productividad del agua, como el uso del riego deficitario, manejo de la fertilización, o el ajuste de fechas de siembra, entre otras.

Hay muchas más aplicaciones de *AquaCrop* que se pueden utilizar de formas prácticas y que se revelarán a medida que los usuarios alrededor del mundo incorporen este modelo de simulación en sus evaluaciones de la respuesta del rendimiento del cultivo al agua.

## 2.2. RAICES TUBEROSAS

Se debe tener mucha precaución al momento de identificar una raíz tuberosa, ya que es muy común confundirlas con los tubérculos como la papa (*Solanum tuberosum*) o la mashua (*Tropaeolum tuberosum*). Los tallos son el órgano de reserva de nutrientes en el caso de los tubérculos. En cambio, las raíces tuberosas almacenan sus nutrientes dentro de la misma raíz. Otra diferencia es la forma de propagación vegetativa. De cada sección de un tubérculo cortado nacerá una nueva planta, esto no se da en las raíces tuberosas. Por el contrario, estas crecen a partir de esquejes (fragmentos del tallo). Varían también en su composición de carbohidratos. A pesar de las diferencias, las raíces tuberosas y los tubérculos constituyen una parte sustancial del suministro de alimentos del mundo y también son una fuente importante de alimentos para animales y productos industriales (CGIAR, 1996).

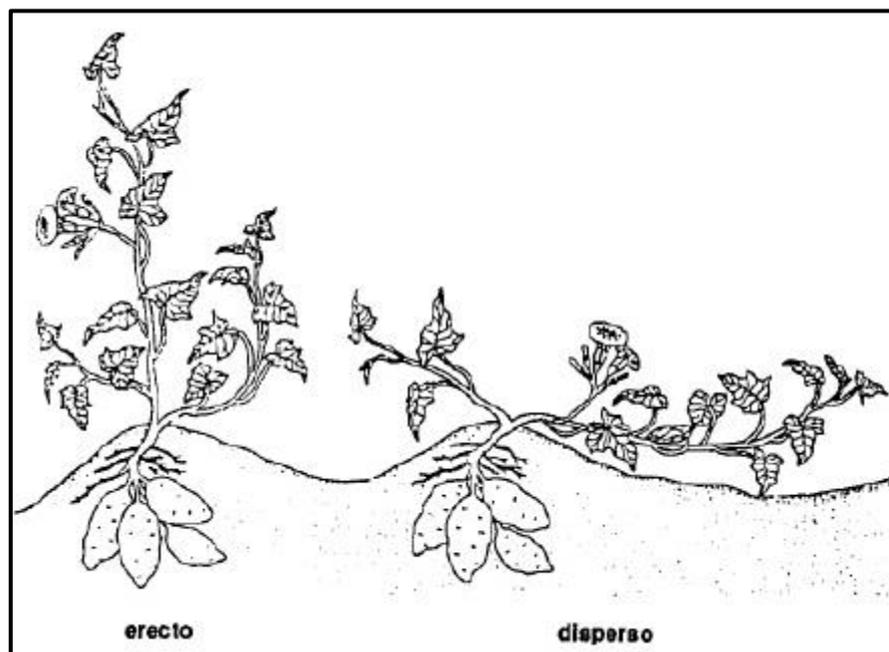
Los cultivos de raíces engrosadas se cultivan ampliamente en las regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo y son un alimento básico para más de 400 millones de personas (FAO, 2010). En los países del África, se producen alrededor de 240 millones de toneladas anuales, cubriendo alrededor de 23 millones de hectáreas, superando el valor agregado de otros alimentos básicos del lugar, como los cereales (Sanginga, 2015). África solo es superado en producción por el continente asiático, este último genera el 43 por ciento (10 más que África) de la producción mundial de cultivos de raíces tuberosas (Chandrasekara y Kumar, 2016). En las islas del Pacífico aún son componentes de importancia crítica en muchas dietas, en particular para las grandes poblaciones rurales que aún prevalecen en la zona (FAO, 2010).

Scott *et al.*, (2000) señalan que durante esta primera parte del siglo XXI, los cultivos de raíces, junto a los tubérculos, continuarán desempeñando un papel significativo en los países en desarrollo por cuatro razones. Prolongarán su contribución a los requerimientos de energía y nutrición de más de 2 mil millones de personas que viven en los países en auge. Debido a su producción y consumo por los hogares más pobres y con más inseguridad alimentaria a nivel mundial. Por ser fuente importante de ingreso y empleo en zonas rurales y marginales, inclusive para las mujeres. Por último, a su adaptación a un amplio rango de usos específicos: desde seguridad alimentaria básica hasta uso comercial, desde la alimentación humana hasta la alimentación animal, desde lo anteriormente expuesto hasta la obtención de materia prima para usos industriales, y desde su uso directo como alimentos frescos hasta la extracción de productos procesados de alto nivel.

Entre las especies más conocidas a nivel mundial dentro de la familia de cultivos de raíces están la yuca o mandioca (*Manihot esculenta*), la mauka (*Mirabilis expansa*), el ñame (*Dioscorea alata*), la uncucha (*Xanthosoma sagittifolium*), el apio nabo (*Apium graveolens var. rapaceum*), la dalia (*Dahlia spp.*), la beterraga o remolacha (*Beta vulgaris*) y el protagonista de esta investigación, el camote (*Ipomoea batatas*).

### 2.2.1. Planta de camote

El camote o también conocido como batata, boniato o papa dulce, forma parte de la familia de plantas *Convolvulaceae*. Como tal es una planta trepadora herbácea cultivada en muchos países del mundo. Si bien es cierto es un cultivo perenne, la batata es cultivada como una planta anual usando esquejes o guías para su propagación. Su hábito de crecimiento es predominantemente disperso, con tallos que se expanden de manera horizontal sobre el suelo, aunque en ocasiones suele ser erecto (figura 13).



**Figura 13. Tipos de hábitos de crecimiento en camote**

FUENTE: Extraído de Huamán (1992)

Los primeros registros del cultivo de camote datan del año 750 a. de C. en Perú, aunque la evidencia arqueológica muestra que el cultivo de la batata podría haber comenzado alrededor de 2500 a 1850 a. de C. (Ugent y Peterson, 1988). Para el tiempo en que Cristóbal Colón arribó al continente americano, en el siglo XV, el camote estaba bien establecida como planta alimenticia en América del Sur y Central. Colón trasladó batatas de vuelta a España, introduciéndolos en las papilas gustativas y los jardines de Europa. Los europeos se

refirieron a la batata como la papa. No fue hasta después de la década de 1740 que los colonos estadounidenses comenzaron a utilizar el término camote para distinguirlo de la papa blanca según detalla O'Brien (1972).

En los últimos años, la producción de batata ha atraído una atención considerable en algunos países. La razón del creciente interés en la batata es evidente a la luz de la escasez de alimentos. Instituciones como el CIP (*International Potato Center*) vienen realizando trabajos de implementación del cultivo de camote en distintas regiones del mundo, dada la fuente económica y concentrada de energía alimentaria que representa la planta.

### **2.2.2. Morfología de la planta de camote**

Si bien la planta de camote es muy variable en cuanto a su morfología, Huamán (1992) trató de recopilar lo más característico del cultivo de raíz tropical. A continuación, un resumen de este ensayo.

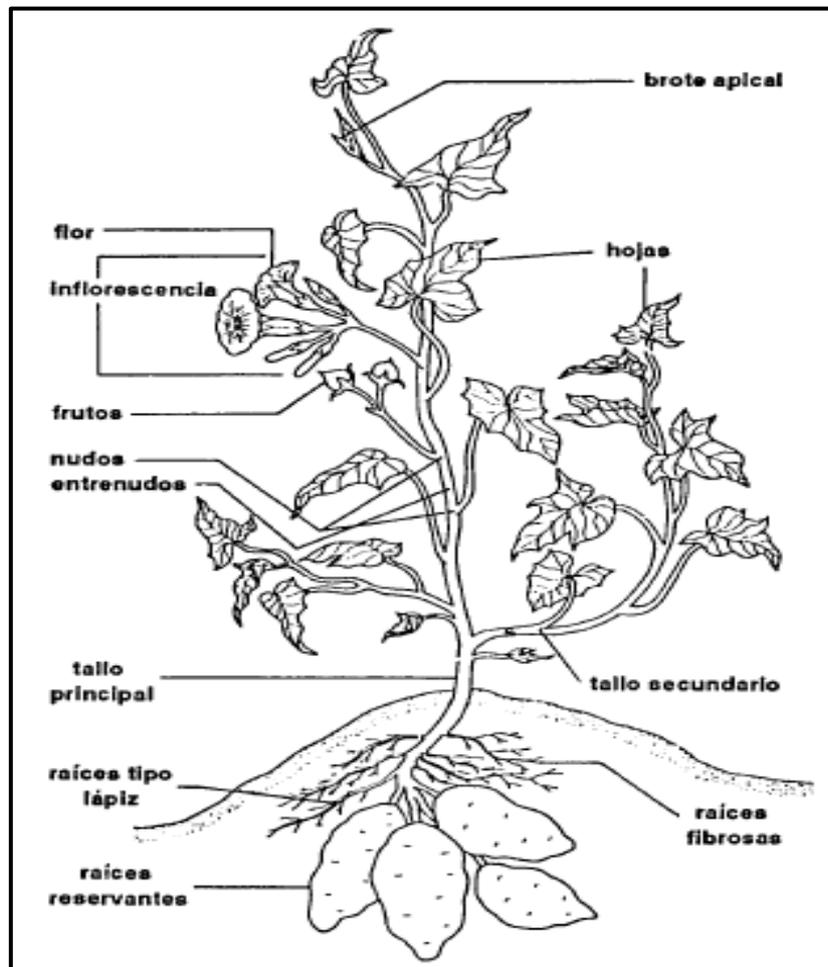
De la planta de camote crecen numerosas hojas simples y se acomodan alternadamente en espiral sobre los tallos. La base de las hojas suele tener dos lóbulos casi rectos o redondeados. No presentan vaina y cuentan con un pecíolo largo de hasta 20 cm, y coloración y vellosoidad semejante al tallo. El limbo ligeramente muy desarrollado contiene nervios de color verde o morado, irradiantes al salir del pecíolo. La forma del limbo es generalmente acorazonada, aunque hay variedades con hojas enteras, hendidas y muy lobuladas.

Los tallos o guías tienen forma cilíndrica y una longitud dependiente del hábito de crecimiento y de la disponibilidad de agua en el suelo. Las variedades de crecimiento erecto son de aproximadamente un metro de largo mientras que los muy rastreros pueden alcanzar hasta cinco metros de longitud. La extensión de los entrenudos puede variar de corta a muy larga y, según el diámetro del tallo, pueden ser delgados o muy gruesos. El color de los tallos varía de totalmente verde a totalmente pigmentado con antocianinas (color rojo - morado).

De acuerdo a la variedad, las plantas de camote pueden florecer en cantidad, escasamente o simplemente no florecer. La flor de la batata es bisexual. Además del cáliz y la corola, contienen los estambres que son los órganos masculino o androceo y el pistilo que es el órgano femenino o gineceo. El cáliz consiste de cinco sépalos, dos exteriores y tres interiores, que permanecen adheridos al eje floral después que los pétalos se secan y caen. La corola consiste de cinco pétalos que se unen en forma de embudo. El limbo es

generalmente de color lila o morado blanquecino con la garganta (el interior del tubo) de color rojizo o morado.

El fruto del camote es una capsula más o menos esférica con una punta terminal, y puede ser lampiña o velluda. La capsula una vez madura se torna de color marrón. Cada capsula contiene de una a cuatro semillas ligeramente aplanadas en un lado y convexas en el otro. La forma de la semilla puede ser irregular, ligeramente angular, o redondeada. El color varía desde marrón a negro y el tamaño es de aproximadamente tres milímetros. La germinación de la semilla es difícil y requiere de escarificación por desgaste mecánico o por tratamiento químico. Las semillas de batata no tienen un periodo de reposo, pero mantienen su viabilidad por muchos años.



**Figura 14. Morfología de la planta de camote**

*FUENTE:* Extraído de Huamán (1992)

La zona radicular del camote está compuesta de raíces fibrosas y reservantes. Las raíces fibrosas absorben nutrientes y agua, y mantienen a la planta. Las raíces reservantes almacenan los productos fotosintéticos. El sistema radicular de las plantas que se obtienen

por propagación vegetativa se inicia con las raíces adventicias. Conforme la planta madura, se producen raíces de tipo lápiz que tienen alguna lignificación. Otras raíces que no tienen lignificación, son carnosas, engruesan bastante y se les llama raíces reservantes.

La parte comercial de la batata son las raíces reservantes. Un corte transversal de la raíz reservante muestra la piel, la corteza, el anillo del cambio y la medula. La cantidad de látex que se forma en el anillo de cambio depende del estado de madurez de la raíz reservante, de la variedad y de la humedad del suelo durante el cultivo de la planta. La formación de las raíces reservantes puede ser como un racimo alrededor del tallo. Si el pedúnculo que une la raíz al tallo está ausente o es muy corto, las raíces forman un racimo cerrado. Si el pedúnculo es más o menos largo forman un racimo abierto. En otros cultivares, las raíces reservantes se forman a una distancia considerable del tallo y pueden ser dispersas o muy dispersas. La superficie de las raíces reservantes generalmente es lisa, pero algunos cultivares muestran defectos tales como piel de cocodrilo, venas prominentes, constricciones horizontales y hendiduras longitudinales o surcos.

En general, todas las partes del camote difieren de acuerdo a la variedad. Este se debe a que el camote ha ido adaptándose a diversas condiciones logrando así diversas formas. Es así que existen numerosas variedades que se diferencian tanto por la forma de la planta como por el color de piel de la raíz reservante y el color y textura de su pulpa.

### **2.2.3. Valor nutricional y usos del camote**

Según señalan Bastidas y De La Cruz (2010), el camote es una de las plantas de mayor valor en los trópicos y subtrópicos, por ser fuente principal de calorías, y de contenido de vitaminas y minerales. Este valor nutricional se debe al gran aporte energético que contienen sus raíces reservantes. La tabla 1 muestra la comparación nutricional entre el camote y sus principales bienes sustitutos: la papa y la yuca. El camote no tiene nada que envidiar las características nutritivas que aportan sus ya mencionados bienes sustitutos. Incluso, las variedades amarillas y anaranjadas de la raíz de batata contienen una alta cantidad de vitamina A.

Por otro lado, se sabe también que el camote es muy rico en compuestos fenólicos, pigmentos como antocianinas y betacarotenos. Su contenido de aminoácidos es bien balanceado, incluso con un mayor porcentaje de lisina que el arroz y el trigo. Sin embargo, los aminoácidos de la proteína del camote son deficientes en cisteína, metionina y leucina, pero rico en ácidos aspártico y glutámico.

**Tabla 1. Composición nutricional de los principales tubérculos y raíces**

	Camote	Papa	Yuca
Energía (Kcal)	115	103	162
Proteína (g)	1.4	2.0	0.8
Grasa (g)	0.2	0.4	0.2
Carbohidrato (g)	27.2	23.3	39.3
Fibra (g)	0.9	0.7	1.1
Calcio (mg)	26	6	25
Fosforo (mg)	33	52	52
Hierro (mg)	2.5	0.4	0.5
Zinc (mg)	0.3	0.3	0.2
Vitaminas	A y C	C	C

FUENTE: Extraído de Félix (2000)

En los últimos años se ha relacionado el consumo del camote con la disminución de enfermedades crónicas como el cáncer y problemas hepáticos, debido a su alta concentración de antioxidantes naturales. Su consumo es altamente recomendado en casos de desnutrición y afecciones gastrointestinales como úlceras estomacales, gastritis y colitis pues es un alimento de fácil digestión. La FAO (2010) acotó que la batata es una buena fuente de energía, que el cuerpo necesita para mantenerse activo.



**Figura 15. Capacidad de uso de cada parte de la planta de camote**

FUENTE: Extraído del portal web del CIP

Si bien es cierto la raíz reservante es la fuente principal de nutrientes, cada parte de la planta puede ser utilizada también (figura 15). En algunos países, las puntas de las ramas se utilizan como vegetales, muy nutritivas en las ensaladas. Las ramas forman una excelente fuente de forraje verde para el ganado, ya sea fresco o como ensilaje para las épocas secas. El abono depositado por los ganados alimentados con este forraje será muy rico en nutrientes para el suelo. Así mismo aporta de una u otra manera en la producción de leche y derivados. Por último, el desarrollo de variedades con alto contenido de materia seca, almidón, caroteno y antocianina ha abierto nuevas perspectivas en aplicaciones industriales, aparte del uso tradicional como alimento. Los productos industriales como el almidón, la glucosa líquida, el ácido cítrico, el glutamato de sodio y el etanol se producen a partir de las raíces de batata en varios países.

#### **2.2.4. Características agronómicas del camote**

El camote es una planta perenne de ciclo relativamente largo, aunque en ocasiones es de ciclo rápido. Su duración depende de la variedad y las condiciones ecológicas en que se desarrolle. Generalmente su ciclo de crecimiento oscila entre tres y ocho meses. Se distinguen tres periodos de crecimiento. El primero que va desde la brotación hasta la aparición de las primeras raíces de almacenamiento (entre 40 y 60 días). Un segundo periodo que toma la posta del primero y llega hasta el máximo desarrollo foliar (hasta los 80 o 120 días después del trasplante). Un tercer y último periodo que se prolongará hasta la cosecha (desarrollo total de las raíces tuberosas), es decir hasta alrededor de los 140 o 160 días luego de la siembra.

Su reproducción puede darse en dos formas. Una sexual que requiere el uso de la verdadera semilla, la cual se forma luego de la unión del polen con el ovulo. En este caso, se da un intercambio de genes cuando la semilla germina, naciendo plantas totalmente diferentes a los progenitores. Este método es de mayor interés para los científicos genetistas y tienen como fin la obtención de nuevos clones con mejores características. Por otro lado, está la reproducción asexual que mayormente se da por propagación de esquejes. Esta vía es la más fácil, económica y rápida de reproducción del camote, a pesar de que puede presentar algunos inconvenientes cuando no se toman las precauciones debidas en el manejo y selección del material de trasplante.

El camote al ser una planta tropical no soporta las bajas temperaturas. La temperatura media idónea para que el cultivo se desarrolle sin ningún tipo de alteración debe ser superior a los

24 °C. La temperatura mínima de crecimiento es 15 °C y la máxima es 35 °C según Gajanayake *et al.*, (2015). La humedad relativa debe rondar del 70 al 90 por ciento y contar con condiciones de buena luminosidad. Soporta bien el calor y tolera los fuertes vientos debido a su condición de rastrero y a la flexibilidad de sus tallos. La precipitación que requiere debe estar en el rango de 750 a 1250 mm al año. Si bien es cierto que el camote es considerado relativamente resistente a la sequía, no hay que dejar de mencionar que el cultivo requiere de bastante humedad en el suelo durante las primeras etapas de desarrollo.

Esta planta acepta diferentes tipos de suelo. No obstante, de este grupo amplio de suelos hay algunos que le brindan mejores condiciones al cultivo. Se sabe que el suelo debe tener buen drenaje con más de 25 centímetros de profundidad. Cuando el suelo es demasiado plástico, las raíces alcanzan profundidades de hasta un metro de longitud, provocando que las raíces de almacenamiento engrosen poco. Así mismo, un suelo desprovisto de las cantidades necesarias de elementos nutrientes o con la composición desequilibrada, según las exigencias del cultivo, lógicamente no permite la obtención de buenos resultados; mientras que, por el contrario, un suelo demasiado fértil, con contenido alto de nitrógeno, tampoco produce buenos resultados, en este caso se estimula el desarrollo vegetativo y es limitada la tuberización. El suelo debe ser ligeramente ácido o neutros con un pH óptimo que circula de 5.6 a 6.6, evitando afecciones bacterianas.

**Tabla 2. Características agronómicas de los principales tubérculos y raíces**

Características	Camote	Papa	Yuca	Ñame
Período de crecimiento (meses)	3 - 8	3 - 7	9 - 24	8 - 11
Planta anual o perenne	Perenne	Anual	Perenne	Anual
Precipitación óptima (cm)	75 - 125	50 - 75	100 - 150	115
Temperatura óptima (°C)	> 24	15 - 18	25 - 29	30
Resistente a la sequía	Si	No	Si	Si
pH óptimo	5.6 - 6.6	5.5 - 6.0	5 - 6	-
Fertilidad orgánica	Baja	Alta	Baja	Alta
Materia orgánica requerida	Baja	Alta	Baja	Alta
Material de siembra	Estaca	Tubérculo	Tallo	Tubérculo
Tiempo de almacenamiento en el suelo	Largo	Corto	Largo	Largo
Duración en postcosecha	Corta	Larga	Corta	Larga

FUENTE: Extraído de Horton (1988)

La tabla 2 muestra un resumen de las características más sobresalientes de la planta de camote y las compara con otras raíces tuberosas como la yuca o el ñame, o con el tubérculo papa. Esta comparación se fundamenta en que son competencia directa (costo de oportunidad) en los mercados de todo el mundo.

### 2.2.5. Producción nacional y mundial de camote

Las batatas se cultivan y consumen alrededor de todo el mundo. Muchos países lo cultivan principalmente para el mercado interno, por lo que la participación del cultivo en el mercado mundial es relativamente baja. Los camotes han registrado un crecimiento desde 2012 y su comercio está aumentando. El camote se cultiva en un área mayor a los ocho millones de hectáreas en el mundo, produciendo algo más de 100 millones de toneladas con un rendimiento promedio de 12.20 tn·ha<sup>-1</sup> (Prakash *et al.*, 2018).

**Tabla 3. Superficie sembrada, producción y rendimiento promedio de los principales países productores de camote en 2016**

<u>Continentes</u>	<u>País</u>	<u>Superficie sembrada</u>		<u>Producción</u>		<u>Rendimiento</u>
		Miles de hectáreas	%	Miles de toneladas	%	0 tn/ha
<b>Mundo</b>	<b>Total</b>	<b>8623.97</b>	<b>100</b>	<b>105190.5</b>	<b>100</b>	<b>12.2</b>
<b>Asia</b>	<b>Total</b>	<b>3913.67</b>	<b>45.38</b>	<b>78595.55</b>	<b>74.72</b>	<b>20.08</b>
	China	3281.52	38.05	70570.94	67.09	21.51
	Indonesia	137.06	1.59	2270.62	2.16	16.57
	India	130	1.51	1472	1.4	11.32
	Vietnam	120.64	1.4	1269.3	1.21	10.52
	Filipinas	84.75	0.98	529.47	0.5	6.25
<b>África</b>	<b>Total</b>	<b>4187.77</b>	<b>48.56</b>	<b>21316.86</b>	<b>20.27</b>	<b>5.09</b>
	Nigeria	1546.56	17.93	3916.69	3.72	2.53
	Tanzania	759.54	8.81	3822.87	3.63	5.03
	Uganda	482.24	5.59	2126.99	2.02	4.41
	Angola	186.01	2.16	1830.91	1.74	9.84
	Madagascar	137.51	1.59	1113.18	1.06	8.1
	Etiopía	130	1.51	1939.76	1.84	14.92
	Ruanda	135.58	1.57	919.12	0.87	6.78
<b>América</b>	<b>Total</b>	<b>362.13</b>	<b>4.2</b>	<b>4319.81</b>	<b>4.11</b>	<b>11.93</b>
	Haití	116.87	1.36	650.35	0.62	5.56
	USA	66.09	0.77	1430.9	1.36	21.65
	Brasil	47.57	0.55	669.45	0.64	14.07
	Cuba	54.51	0.63	594.38	0.57	10.9
<b>Europa</b>	<b>Total</b>	<b>2.63</b>	<b>0.03</b>	<b>52.18</b>	<b>0.05</b>	<b>19.83</b>
	Portugal	1.05	0.01	22.9	0.02	21.8
	España	0.79	0.01	13.52	0.01	17.04
<b>Oceanía</b>	<b>Total</b>	<b>157.77</b>	<b>1.83</b>	<b>906.1</b>	<b>0.86</b>	<b>5.74</b>

FUENTE: Cálculos basados en FAOSTAT (2016) pero extraídos de Prakash *et al.*, (2018)

La tabla 3 muestra el área sembrada, la producción y el rendimiento promedio de los principales países productores de camote en la tierra en el 2016. El continente africano ocupa

la primera plaza dentro de los mayores contribuyentes de áreas sembradas con camote, aportando el 48 por ciento del área total sembrada en el mundo. Sin embargo, debido a su bajo rendimiento ( $5 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) su producción es baja, con una participación del 20 por ciento en la producción total en el mundo. El continente asiático es el segundo más grande en términos de área (45 por ciento) y el primero en términos de producción (74 por ciento) de camote con un rendimiento de  $20 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  en promedio. En producción, China está muy por encima del resto del mundo con algo de más de 70 millones de toneladas de camote producidos, sin embargo, la mayor parte de la producción es destinada a la alimentación animal. Los países americanos tienen un 4.2 por ciento del área que produce el 4.1 por ciento (tercer rango) de la producción mundial.

Debido a las bajas tasas de producción en Europa, países como Gran Bretaña, Francia, España, entre otros, se ven obligados a importar estos productos. En 2014, Europa importó 124 mil toneladas de camote, de las cuales siete mil toneladas se destinaron al consumo. Las importaciones de esta especie exótica se han duplicado en cinco años. Estados Unidos es el mayor proveedor, con una participación de mercado del setenta por ciento. Honduras, quien produce camote durante todo el año, exporta a Los Países Bajos y Canadá.

En Perú, la situación es similar, casi la totalidad de la producción es para el mercado interno, incluso gran porcentaje es para consumo del agricultor. En la tabla 4 se observa la comparación, en términos de área sembrada, producción y rendimiento promedio del camote con los cultivos más importantes del país. La primera observación es que, a pesar de contar con una de las superficies sembradas más bajas, la producción del camote es alta llegando a estar en el cuarto lugar de cultivos con mayor producción en la temporada 2015-16, solo por debajo de la papa ( $869.2 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), el arroz ( $645.7 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y el maíz amarillo ( $304.2 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

Según *AgroData Perú*, de la poca cantidad de camote que se exporta del país, la mayor parte tiene como destino Los Estados Unidos (recibió despachos por US\$ 207 000), Chile (US\$ 124 000), Países Bajos (US\$ 102 000) y Ecuador (US\$ 27 000), esto durante el primer bimestre del 2017. Durante este periodo nuestro país despachó 858 706 kilos de camote por un valor de US\$ 470 457. El volumen representa un 27 por ciento más que los 633 615 kilos que se exportaron en igual periodo del 2016 por un valor de US\$ 298 907. Entre los principales exportadores figuran las empresas: *Prima Farms SAC* con 44 por ciento del total de envíos, seguido de *Biological Sources SAC* (22 por ciento), *Matfal EIRL* (11 por ciento),

*D Matfal Foods Company EIRL* (9 por ciento), *Coproimpex SAC* (4 por ciento) y varios otros de menor cuantía que juntos suman 11 por ciento.

**Tabla 4. Superficie sembrada, producción y rendimiento promedio de los principales cultivos en el país, campaña 2015-16**

<u>Cultivo</u>	<u>Superficie sembrada</u>		<u>Producción</u>	<u>Rendimiento</u>
	Miles de hectáreas	%	Miles de toneladas	tn/ha
<b>Nacional</b>	<b>1830,9</b>	<b>100</b>	-	-
<b>Cereales</b>	<b>1081,4</b>	<b>59.1</b>		
Trigo	116,5	6.3	0,2	4.6
Maíz amarillo	209,2	11.4	304,2	4.9
Arroz	328,3	17.9	645,7	6.5
<b>Hortalizas</b>	<b>33,1</b>	<b>1.8</b>		
Tomate	4,0	0.01	66,5	44.6
Zanahoria	5,2	0.01	46,5	24.4
Cebolla	11,1	0.01	152,2	46.6
<b>Raíces y tubérculos</b>	<b>381,4</b>	<b>20.8</b>		
Papa	258,2	14.1	869,2	18.9
Yuca	74,8	0.04	60,4	11.5
Camote	10,1	0.01	271,2	18.4
Olluco	24,9	0.02	21,8	7.8
<b>Legumbres</b>	<b>189,3</b>	<b>10.3</b>		
Frijol	56,7	0.03	6,4	1.3
Arveja	62,8	0.03	0,2	0.9

FUENTE: datos extraídos de Santamaría *et al.*, (2016)

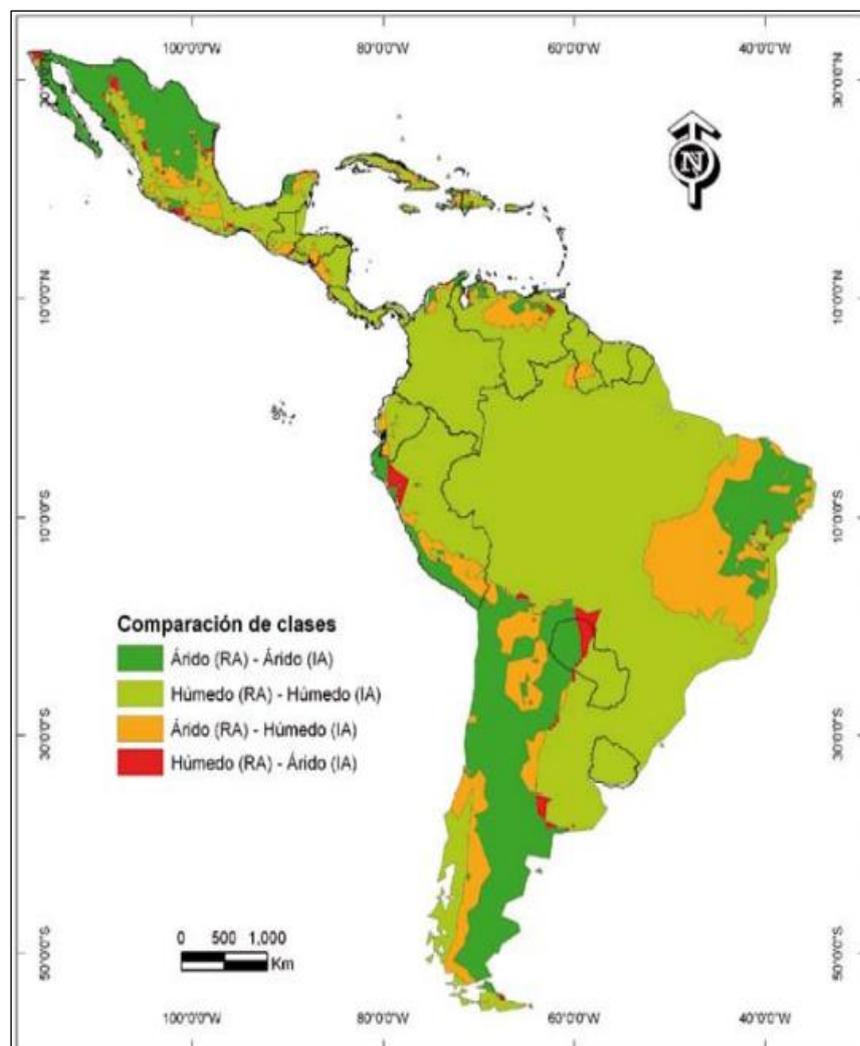
### 2.3. ZONAS ARIDAS

Tarango (2005) considera un área como árida si percibe una precipitación pluvial media anual menor a los 350 mm, y como semiárida si recibe entre 350 y 600 mm anuales. Ambos casos evidencian un déficit hídrico ya que la demanda evaporativa anual supera significativamente a la precipitación promedio anual. Estas regiones están caracterizadas por insuficiencia de agua, con una distribución errática de las lluvias, que ocurre en pocos eventos y de manera torrencial (en algunos casos). Estas condiciones limitan el desarrollo sustancial de actividades agropecuarias.

Para Brunel *et al.*, (2006) el ambiente de estos territorios se caracteriza por su alto nivel de radiación y una diferencia relevante entre la temperatura del día y la noche. La radiación infrarroja nocturna del suelo es un factor importante por su efecto de reducir la temperatura superficial del suelo, que llega a sus valores más bajos en la madrugada. Durante el día la

intensa insolación brinda un relativo incremento en la radiación global entrante, pero la radiación infrarroja saliente de la superficie del suelo genera una baja en la energía almacenada en el suelo, con el consecuente incremento en la radiación neta.

Para la evaluación de la aridez presente en América Latina, la Verbist *et al.*, (2010) elaboró un mapa de zonas áridas en la región (figura 16). Esta creación se basó en la utilización de indicadores que caracterizan la disponibilidad de recursos hídricos en todos los países del continente, evidenciando ofertas efectivas y demandas hídricas que existen, desde el punto de vista climático. Por un lado, el índice de aridez (IA) nos determina la relación existente entre precipitación y evapotranspiración de referencia, en temporadas anuales (aunque en agricultura la determinación mensual es más efectiva). Por otro lado, el régimen de aridez (RA) nos señala cuantos meses del año son considerados secos.



**Figura 16. Clasificación de zonas en América Latina según el IA y el RA**  
FUENTE: Extraído de Verbist *et al.*, (2010)

Se observa que gran parte de la región se encuentra en condiciones húmedas tanto en IA como en RA, sin embargo, es sabido también que estas zonas presentan insuficiencia física de agua (falta de infraestructura para el buen aprovechamiento del recurso hídrico), como, por ejemplo, gran parte del territorio amazónico. Así mismo podemos apreciar que aproximadamente el 20 por ciento de la región es azotada por condiciones áridas. Entre estas zonas afectadas están el este de Brasil, una gran parte de Argentina, el norte de Chile y México, y todo el litoral peruano. Es precisamente nuestro país quien alberga un 5 por ciento (abarca alrededor de 200 000 km<sup>2</sup>) de la superficie total de América Latina en condiciones áridas, solo superado por Brasil, Argentina y México.

Esta condición de aridez ha determinado que la agricultura en la costa peruana dependa casi exclusivamente de los sistemas de riego. En este sentido, el agua para riego es captada por derivación de los ríos y almacenada en grandes reservorios. Unos canales de regadío extensos y complejos, muchos de los cuales datan de la época prehispánica, la conducen desde las zonas altas hasta los valles. También se aprovecha el agua subterránea, bombeando el agua freática con bombas a motor a través de pozos.

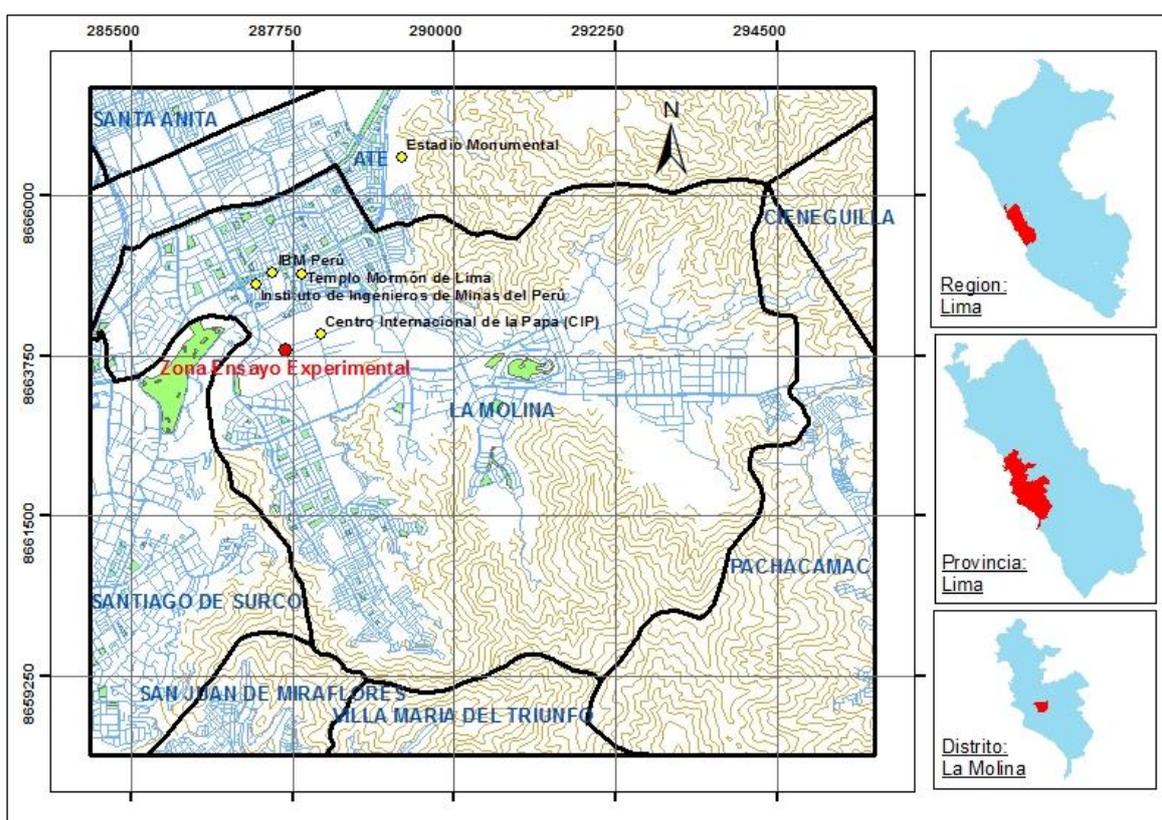
En la actualidad, el desarrollo económico del país se debe en parte al crecimiento de la agricultura de exportación. Esta se da precisamente en la costa peruana, por presentar los suelos más productivos del Perú, gracias a su calidad y su topografía plana (más de un millón de hectáreas aptas para el cultivo, la mayoría con infraestructura de riego). Debido a esto y a su clima templado se pueden obtener dos cosechas anuales (aunque esto dependerá de la disponibilidad de agua y de otras condiciones relacionadas con el clima y con aspectos económicos). Además, la corta distancia a los puertos garantiza un acceso relativamente fácil a los mercados internacionales, especialmente a los del hemisferio norte (Eguren 2002).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN DEL CAMPO EXPERIMENTAL

La fase de campo de la investigación se llevó a cabo en el Campo Agrícola Experimental del DRH de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), del 8 de octubre del 2016 al 15 de marzo del 2017. Dicho terreno se sitúa en las coordenadas geográficas siguientes:

- Latitud - :  $12^{\circ}04'49.5''\text{S}$
- Longitud - :  $76^{\circ}57'5.1''\text{O}$
- Altitud - : 233 m.s.n.m.



**Figura 17. Localización del campo experimental (Coordenadas UTM)**

El lugar cuenta con una topografía plana (con una pendiente menor al dos por ciento) y acceso sencillo por encontrarse inmediatamente después de la entrada principal del recinto

universitario. Anteriormente el campo estuvo sembrado de maíz, pero lleva algo más de un año en descanso.

Por otro parte, el distrito de La Molina en Lima-Perú (ubicación del campo experimental), está considerado como una zona árida debido a la reducida lamina de precipitación y altas tasas de evapotranspiración que presenta el lugar. Además, la zona prácticamente atraviesa todo el año por temporadas secas (ausencia de lluvias durante todo el año).

### **3.2. CARACTERÍSTICAS DEL CLIMA**

Para determinar las condiciones climáticas en las cuales se desarrolló el experimento (periodo primavera-verano) se tomó información de la estación meteorológica automática (Davis Vantage Pro2) ubicada en el Laboratorio de Recursos Hídricos de la UNALM, aproximadamente a unos 100 metros del campo experimental. Se proporcionaron datos promedios horarios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, así como datos de precipitación. Todas las variables medidas (excepto la precipitación) sirvieron para calcular la evapotranspiración de referencia diaria ( $ET_0$ ) utilizando el método FAO *Penman-Monteith* (Allen *et al.*, 1998) y el paquete tecnológico *ET<sub>0</sub> Calculator* incrustado en el *AquaCrop* (Raes, 2017).

### **3.3. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO**

De acuerdo con los datos recopilados de CISMID (2010) el perfil del suelo en el sector central del distrito de La Molina está constituido predominantemente por suelos arcillosos limosos y arenosos en los estratos superficiales, los cuales llegan hasta 50 metros de profundidad en promedio. Téngase en cuenta que mientras la sección se aproxima a las laderas de los cerros se va presentando mayor concentración de gravas, probablemente de origen coluvial.

Para un análisis más riguroso de las características físico-químicas del suelo en la parcela experimental se tomó una muestra representativa del campo, la cual fue llevada al Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente (LAASMA) de la UNALM.

### **3.4. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE RIEGO**

En la experimentación se usó agua de riego proveniente del río Rímac, el cual llega a las instalaciones de la UNALM a través de uno de los laterales del canal Ate. Durante todo el

recorrido se pueden encontrar muchos tramos sin revestir y acumulación de residuos sólidos, por lo que fue necesario realizar un análisis de la calidad del agua. Para esto se tomó una muestra representativa de agua y se envió al LAASMA.

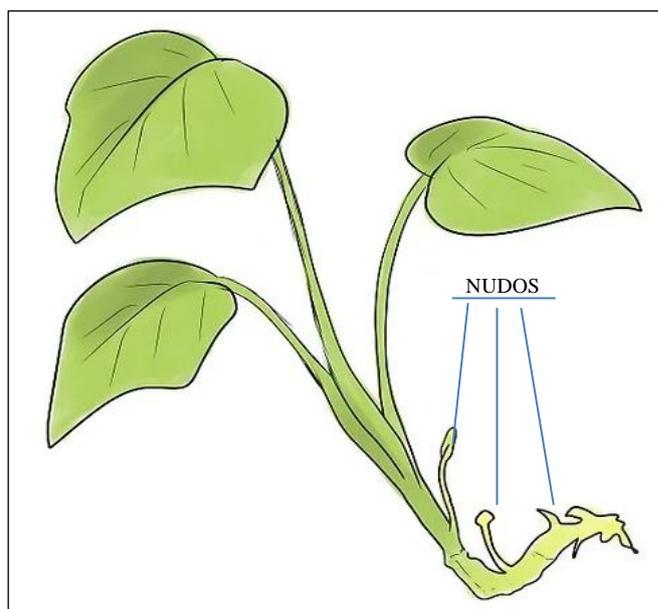
### 3.5. VARIEDADES DE CAMOTE EN ESTUDIO

En esta investigación se emplearon dos cultivares populares de camote de la costa central del Perú: el huambachero y el paramonguino. Ambas variedades son de periodo vegetativo extenso (120 a 150 días para su cosecha) y con rendimientos por encima del promedio. En la tabla 5 se muestran los rasgos más resaltantes de cada uno de los cultivares.

La siembra se dio por medio de esquejes o guías (figura 18) que median de 30 a 40 centímetros. Estos fueron traídos desde el norte de lima y, contaban con seis a diez nudos cada uno. Fueron sumergidos durante algunos minutos en una solución de Activol (Ácido Giberélico), estimulando el crecimiento en longitud de los brotes y quedando listo para su trasplante.

**Tabla 5. Características de las variedades de camote en estudio**

	<b>Huambachero</b>	<b>Paramonguino</b>
Origen (valle)	Huacho	Paramonga
Periodo vegetativo (meses)	4.5 – 5.5	4 – 5
Habito de crecimiento	semi-postrado	postrado
Altura de planta (cm)	60	50
Tallos	gruesos de color morado	color verdoso
Hojas	lobulada	cordada
Color de la piel	morado oscuro	amarillo claro
Color de la pulpa	anaranjado claro	blanquecino
Forma de raíz reservante	elíptica	largo irregular
Tamaño de raíz reservante	mediana	Grande
Rendimiento (tn·ha <sup>-1</sup> )	30 - 50	25 – 40
Materia seca (%)	30 - 32	25 – 28
Reacción a plagas	Resistente al nematodo del nudo y medianamente susceptible a insectos chupadores.	No tan resistente a las larvas como la <i>marmara</i> o a insectos como la mosca blanca y otras.
Calidad culinaria	Se usa para sancochado y asado y para la industria de hojuelas.	Su principal uso es para la industria, ya sea para frituras o para harina.



**Figura 18. Esqueje de camote**

### 3.6. SOPORTE LOGICO COMPLEMENTARIO

Los *softwares* usados en la investigación se especifican en la tabla 6. Cabe señalar que los detalles del modelo *AquaCrop* se muestran en el capítulo 2.1.

**Tabla 6. Softwares usados en la investigación**

<b>Software</b>	<b>Versión</b>	<b>Descripción</b>
	v.18.0 (2010)	Sirvió para vectorizar las imágenes de cobertura de dosel (CC).
	v.10	Usado para el manejo estadístico de los resultados.
	v.16.0 (2016)	Utilizado para el procesamiento de datos.
	v.1.0	Fue utilizado para el cálculo del grado de cobertura de dosel (CC)
	v.16.0 (2016)	Usado para redacción del documento de tesis.

### 3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL

Los muestreos realizados en el experimento se evaluaron a partir de un diseño completamente aleatorio (DCA). El diseño consta de cuatro tratamientos diferenciados en la aplicación de agua al cultivo con cinco repeticiones para cada uno de ellos (tabla 7). Al tratamiento testigo o de referencia ( $T_0$ ), se le aplicó el 100 por ciento de la demanda hídrica

del cultivo esperando obtener la máxima producción posible. Los otros tres tratamientos ( $T_a$ ,  $T_b$  y  $T_c$ ) registran una aplicación de agua al 50 por ciento de los requerimientos hídricos, diferenciándose, estas, en la fecha de inicio del riego deficitario.

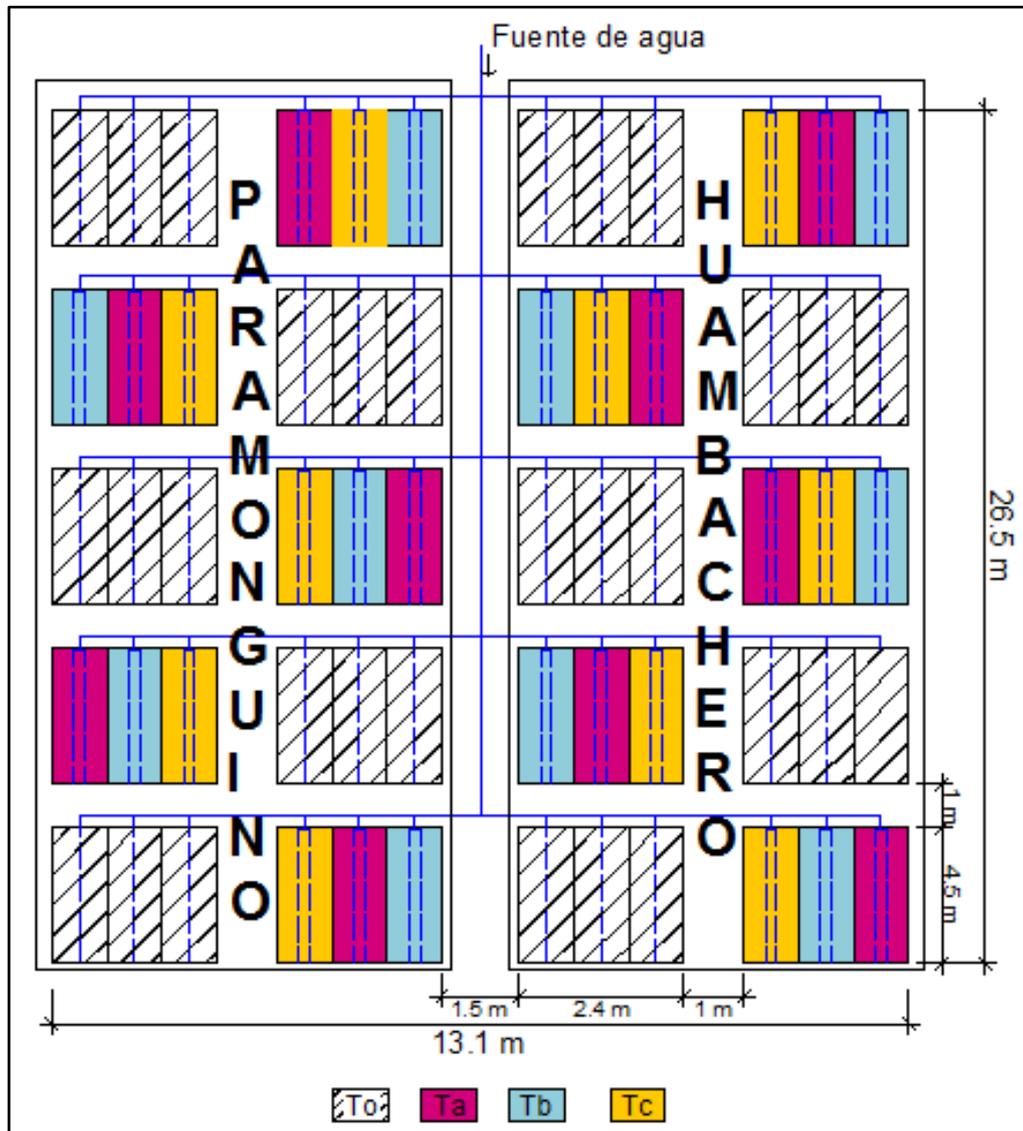


Figura 19. Diseño experimental

Tabla 7. Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Riego	Fecha de inicio de tratamiento
$T_o$	Recupera el 100% de $ET_o$	-
$T_a$	Recupera el 50% de $ET_o$	Día 23
$T_b$	Recupera el 50% de $ET_o$	Día 33
$T_c$	Recupera el 50% de $ET_o$	Día 45

El campo cuenta con una extensión de 216 m<sup>2</sup> como área efectiva de ensayo, sin incluir los bordes del campo. Fue dividido en dos módulos. Uno para la variedad huambachero y otro para la variedad paramunguino. Estos módulos están separados por una franja de 1.5 metros de ancho donde se encuentran instalados los arcos de riego. Dentro de cada módulo se

disponen de diez parcelas de 13.2 m<sup>2</sup>, distanciadas un metro. Cinco de ellas para el tratamiento testigo y las otra cinco para el riego deficitario. Cada parcela está compuesta por tres hileras de 0.8 m de ancho por 4.5 m de largo. En cada hilera se trasplantaron 15 esquejes de camote separados 0.3 metros uno de otro. Cada parcela testigo fue tomada como unidad experimental, mientras que en las parcelas con déficit hídrico cada una de las hileras será una unidad experimental. En la figura 19 se puede observar la distribución de las unidades experimentales en sus respectivos módulos de ensayo.

### **3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

Un tratamiento descriptivo simple de los datos recopilados en campo es el punto de partida en el analisis estadístico, poniendo de manifiesto peculiaridades y regularidades existentes entre los datos y sintetizandolos en gráficos o en un reducido número de parámetros de posicion y dispersion de la media como la desviacion estandar. Se han usado estas tecnicas para representar los parametros siguientes: biomasa y rendimiento fresco, biomasa total seca (B), rendimiento seco (Y) y cobertura de dosel (CC).

Para la inferencia estadistica se usó el analisis de varianza (ANVA), método que compara medias. Tras realizar el ANVA, obtuvimos el valor estadistico F de Snedecor y el nivel de significacion ( $\alpha$  o p valor). En esta investigacion se tomó como niveles de significacion  $p \geq 0.05$  no significativo,  $0.01 \leq p \leq 0.05$  significativo y  $p < 0.01$  muy significativo. Se empleo la prueba de Tukey para estimar si las diferencias entre tratamientos son significativas o no. El ANVA se uso para los parametros biomasa total seca (B), rendimiento seco (Y) y cobertura de dosel (CC) obtenidos en campo.

Por ultimo, para evaluar la precisión del modelo se usaron los siguientes indicadores estadisticos, según lo recomendado en la guia del modelo (Raes *et al.*, 2018).

#### **a. Coeficiente de Determinación (R<sup>2</sup>)**

Este coeficiente interpreta la magnitud de la varianza dada por el modelo en comparación con la varianza total observada en campo. El rango en el cual varia este coeficiente va de 0 a 1, considerándose una buena agregación de los datos simulados con los observados mientras más cerca se encuentre del valor 1.

Se consideró aceptable las simulaciones del modelo cuando este coeficiente muestre valores por encima de 0.5 (Moriassi *et al.*, 2007).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)(S_i - MS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - MS)^2}} \right]^2 \quad (8)$$

donde:  $R^2$ : coeficiente de determinación; S: valores simulados; O: valores observados; MS: valor medio de los valores simulados; MO: valor medio de los valores observados; n: número de observaciones.

Una desventaja del  $R^2$  es que solo cuantifica la dispersión, lo que conlleva a que un modelo que sobreestime o subestime las observaciones de campo pueden tener un buen coeficiente de determinación.

#### b. Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)

El NRMSE se expresa en % y es un indicador de diferencia relativa entre los datos observados y los obtenidos por el modelo, permitiendo que el modelo sea comprobado bajo un amplio rango de condiciones.

Valores de NRMSE por debajo del 10 por ciento considera al modelo excelente, entre 10 y 20 por ciento es bueno, aceptable si está en el rango de 20 y 30 por ciento y, pobre si es mayor a 30 por ciento (Jamieson, 1991).

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \times 100 \quad (9)$$

donde: NRMSE: raíz del error cuadrático medio normalizado;  $\bar{O}$ : media de los datos observados; S: valores simulados; O: valores observados; n: número de observaciones.

#### c. Eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF)

La EF es un indicador usado para describir la precisión predictiva de modelos siempre que haya datos observados para comparar los resultados del modelo. Mide la robustez del modelo y su rango va de  $-\infty$  a 1. Un EF de 1 indica coincidencia perfecta entre los datos simulados y observados, un valor de 0 se da cuando las predicciones del modelo son tan próximas como el valor medio observado y un EF negativo ocurre cuando la media de las observaciones tiene una mejor predicción de lo que resulta en el modelo.

Para que el modelo quede calibrado deben obtenerse valores de EF por encima de 0 para cada una de las variables en estudio (Montoya *et al.*, 2016).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2} \quad (10)$$

donde: EF: eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; MO: valor medio de los n valores observados; S: valores simulados; O: valores observados; n: número de observaciones.

d. Índice de agregación de Willmott (d)

Definido como la relación existente entre el error cuadrático medio y el error potencial, este último representa valor más grande que la diferencia al cuadrado puede alcanzar. El rango de este estadístico oscila entre 0 y 1, donde 0 indica que no existe ajuste alguno y 1 señala un ajuste perfecto entre los valores predichos por el modelo y los datos observados.

El criterio establecido para este índice estadístico es obtener valores por encima de 0.65 en el proceso de calibración del modelo (Montoya *et al.*, 2016).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - MO| + |O_i - MO|)^2} \quad (11)$$

donde: d: índice de agregación de Willmott; MO: valor medio de los n valores observados; S: valores simulados; O: valores observados; n: número de observaciones

Los métodos estadísticos usados en el análisis de los datos se llevaron a cabo en los paquetes informáticos: *Microsoft Excel* (Microsoft Office Professional Edición 2016, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) y el *STATISTICS* (v. 10 para Windows, Analytical Software Inc., Tallahassee, FL, USA). Mientras que los valores estadísticos usados para evaluar la precisión del modelo fueron extraídos del mismo *AquaCrop* al realizar las simulaciones.

### **3.9. SIEMBRA, LABORES CULTURALES Y COSECHA**

El terreno se preparó apropiadamente para evitar mermas en el rendimiento del cultivo. Para esto, dos semanas previas a la siembra, con ayuda de maquinaria agrícola, se subsoló y luego se rastreó el campo de tal manera que el suelo quedó bien mullido. La profundidad del suelo que se aró fue de 30 a 40 cm proporcionando una buena aireación y humedad, características sustanciales para el óptimo desarrollo del camote.

La siembra se realizó el día 8 de octubre de 2016 con material de trasplante proveniente del norte de Lima. El marco de plantación fue de 0.30 por 0.80 metros a 20 centímetros de profundidad formando una densidad de plantación de 4.2 raíces reservantes por metro cuadrado. En cada golpe se sembró un esqueje apoyándolo en la costilla del surco y

cubriendo esta con tierra a lampa. Se enterró de dos a tres nudos por guía quedando fuera solamente de 10 a 15 centímetros de esta.

Previo al trasplante, se dio el riego de asiento, brindando la humedad necesaria (hasta capacidad de campo) que requiere la planta para echar raíces y producir nuevos tallos. A partir de ahí los riegos complementarios se dieron de manera alternada, un día sí y otro no (sin tomar en cuenta los domingos), en función de la lámina evaporada medida en el taque evaporímetro Clase “A”. En el caso del tratamiento testigo se reponía el 100 por ciento la lámina evaporada; mientras que en los restantes tres tratamientos solo el 50 por ciento. Es importante señalar que debido a los efectos del fenómeno El Niño hubo días que no se proporcionó riego al cultivo, sobre todo los meses de enero y febrero del 2017.

Para atender las necesidades nutrimentales en las distintas etapas de desarrollo del cultivo se usó fertirriego. De acuerdo al análisis del suelo y los requerimientos del cultivo se estableció un plan de fertilización a través del riego (cantidad de fertilizante y frecuencia de uso), evitando el estrés del cultivo debido al déficit de abonos inorgánicos. El detalle de proporción de nutrientes al suelo en el periodo de experimentación a partir de fertirriego en la tabla 8.

**Tabla 8. Contenido de nutrimentos totales aportados al camote en kg·ha<sup>-1</sup>**

<b>Producto</b>	<b>N</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>S</b>
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	116.16				
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	24	122			
KCl			240		
MgSO <sub>4</sub>				20	15
<b>Total</b>	<b>140.16</b>	<b>122</b>	<b>240</b>	<b>20</b>	<b>15</b>

Otras labores fueron el deshierbe a mano de malezas durante los primeros 90 días del cultivo, dado que las plantas aun no llegaban a cubrir la totalidad del campo. El trabajo de aporque se realizó en dos fechas, el 28 de octubre (20 DDT) y el 18 de noviembre (41 DDT) del 2016, asegurando el crecimiento de raíces y la conservación de la humedad durante más tiempo. La fumigación con TIFON 4E (*Chlorpyrifos*) debido a la presencia de plagas, como la “cigarrita verde”, se realizó en dos oportunidades.

Por último, la cosecha se realizó en dos días, primero la variedad paramanguina el 14 de marzo del 2018 y al día siguiente la variedad huambachero. Hay que señalar que se hizo una poda total de la parte aérea el 7 y 8 de marzo para propiciar el ensanchamiento de las raíces de almacenamiento. Tanto la parte aérea como las raíces reservantes fueron muestreadas

manualmente. Para el caso del rendimiento se muestreo toda la unidad experimental, mientras que para la biomasa aérea solo se tomó como muestra tres plantas por unidad experimental. Como indicio para la cosecha se tomó el amarillamiento, la desecación de hojas y tallos, y la abundante defoliación de la parte baja de la planta.

### 3.10. FENÓLOGIA DEL CULTIVO

Se dio seguimiento a dos plantas (en condiciones óptimas) por modulo (por variedad) para verificar la evolución del desarrollo del cultivo, determinando, semanalmente (todos los viernes), el estado fenológico en el que se encontraba el cultivo.

El camote tiene los siguientes estados fenológicos según Onwueme y Charles (1994): (a) una fase inicial en la que las raíces fibrosas crecen ampliamente y hay un crecimiento moderada de los tallos; (b) una fase intermedia cuando los brotes crecen extensamente y se inicia la tuberización de las raíces, así mismo, un aumento tremendo en el área cubierta por follaje ocurre durante esta fase; y (c) una fase final cuando se da el abultamiento de las raíces tuberosas y muy poco crecimiento adicional de los brotes y las raíces fibrosas, la cobertura de dosel se mantiene constante al principio de esta fase y luego empieza a disminuir. Parece que la duración respectiva de estas tres fases en el camote puede variar según el cultivar y las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla.

En el modelo *AquaCrop*, el cálculo de los *grados-día de crecimiento acumulado* (GDD) es importante si se quiere comparar la duración de las fases fenológicas del camote en distintas zonas. McMaster y Wilhelm (1997) señalan que los GDD definen el desarrollo de las fases fenológicas en función de las condiciones acumulativas de la temperatura del ambiente y la calculan de forma diaria mediante los valores máximos y mínimos de la temperatura del aire.

$$GDD = \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - T_b \quad (12)$$

Con las siguientes restricciones:

$$\text{Si } \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) < T_b, \text{ entonces } \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) = T_b$$

$$\text{Si } \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) > T_s, \text{ entonces } \left( \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) = T_s$$

Donde: GDD: grados-días de crecimiento (°C),  $T_{max}$ : temperatura máxima diaria (°C),  $T_{min}$ : temperatura mínima diaria (°C),  $T_b$ : temperatura base o cero de vegetación (°C) y  $T_s$ :

temperatura superior, es decir la temperatura máxima del aire por encima del cual el desarrollo del cultivo cesa.

Para el camote, la mayoría de autores han usado una temperatura base ( $T_b$ ) que oscila entre 15 y 17 °C y una temperatura superior ( $T_s$ ) que va entre 30 y 35 °C (Romero y Baigorria, 2008; Villordon *et al.*, 2009; Gajanayake *et al.*, 2015; Rankine *et al.*, 2015). Para esta investigación se optó por usar una  $T_b=15$  °C y una  $T_s=35$  °C para describir el tiempo térmico acumulado en la batata.

### **3.11. PROGRAMACION DE RIEGO**

La determinación de las necesidades de agua de los cultivos se efectuó mediante el método del tanque evaporímetro de clase “A”, descrito en Vásquez *et al.*, (2017). Los datos de evaporación del tanque ( $E_o$ ) afectados por un coeficiente del tanque ( $K_p$ ) nos proporcionaron la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ). No se tomó en cuenta los  $K_c$  debido a falta de información.

Las lecturas de evaporación del tanque, ubicado a unos 200 metros aproximadamente del campo experimental, fueron tomadas los días que se iban a regar, previo al riego. El coeficiente del tanque se determinó a partir de Doorenbos y Pruitt (1977) quienes establecen valores de  $K_p$  para evaporaciones medidas bajo diferentes condiciones (humedad relativa, viento, radio de cultivo o suelo desnudo y ambiente del tanque). Es necesario señalar que como la precipitación efectiva en la zona es escasa, la frecuencia y cantidad de cada nuevo riego estarán dirigidas exclusivamente a reponer la pérdida debido a la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ).

### **3.12. MONITOREO DE HUMEDAD EN EL SUELO**

La medida de agua en el suelo se realizó a lo largo de todo el experimento. Se usaron los métodos gravimétrico y volumétrico. El primero consistió en recolectar semanalmente una muestra de suelo, a 30 centímetros de profundidad, con ayuda de un barreno espiral para luego pesarla en una balanza eléctrica, obteniendo el peso fresco de la muestra. Luego se introduce la muestra a un horno a 105 °C obteniéndose el peso seco. Finalmente se restó el peso seco del peso fresco de la muestra, obteniendo la cantidad de humedad de la muestra. Tal resultado puede ser expresado volumétricamente si el resultado se multiplica por la densidad del suelo.

Por otro lado, el registro de humedad volumétrica o método indirecto se llevó a cabo con ayuda de un *data logger* Em50G, el cual almacenaba las mediciones que se obtenían cada media hora por medio de uno sensores GS1 *Decagon*. Los sensores fueron instalados a 15 y 30 cm de profundidad del suelo, dos en el módulo huambachero y otros dos en el paramonguino. El funcionamiento de estos sensores se basa en que emplean un campo electromagnético para medir la permitividad dieléctrica del medio que los rodea. El sensor suministra una onda oscilante de 70 MHz (tal frecuencia minimiza los efectos de salinidad y de textura) hacia las puntas que se cargan acorde al dieléctrico del material. La carga almacenada es proporcional al sustrato dieléctrico y al contenido volumétrico de agua del sustrato. El sensor mide la carga y da salida a un valor en bruto que se correlaciona fuertemente al contenido volumétrico del agua. Esta data se perdió inadvertidamente, por lo que solo se usó la humedad obtenida manualmente para el contraste con la simulación de este parámetro en *AquaCrop*.

### **3.13. CRECIMIENTO DEL CULTIVO**

Para cada uno de los tratamientos hídricos se efectuaron de dos a tres muestreos de material vegetal (biomasa), previos a la cosecha. Las fechas de muestreo fueron distintas para cada variedad de camote. En el caso del huambachero el 09/01/2017 (94 DDT), el 30/01/2017 (115 DDT) y el 20/02/2017 (136 DDT); mientras que las fechas para el paramonguino fueron el 27/01/2017 (112 DDT) y el 17/02/2017 (133 DDT).

Así mismo, se tuvieron fechas de muestreo de la cobertura de dosel de tres plantas seleccionadas por cada tratamiento/variedad. La periodicidad de muestreo para este caso fue de entre 1 a 3 semanas y se logró mediante el uso de una cámara digital.

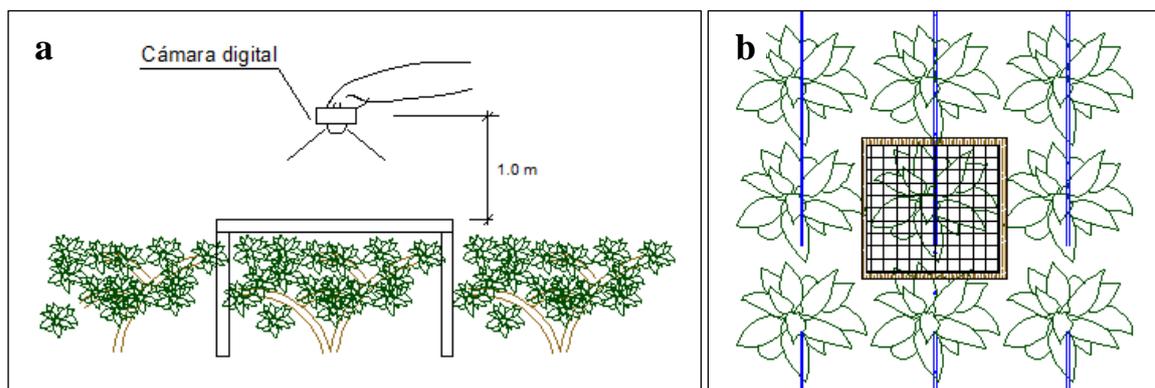
#### **3.13.1. Evolución de biomasa seca**

En cada muestreo previo a la cosecha se seleccionó y extrajo tres plantas enteras situadas dentro de la zona afectada por cada tratamiento/variedad. El procesado de las plantas se realizó en laboratorio, separando la biomasa aérea (hojas y tallos) de la subterránea (raíces reservantes). De cada parte se midió el peso fresco. Luego el porcentaje de materia seca se determinó utilizando una muestra representativa de cada parte (aérea o subterránea) y de cada variedad en estudio. Las muestras representativas (previamente pesadas) se cortaron en pequeños trozos y fueron embolsadas en sobres de papel *kraft* previamente rotuladas. Se colocaron en el horno a 70 °C y permanecieron allí hasta peso constante (peso seco).

Finalmente, estos valores fueron transformados a porcentajes. Estos valores porcentuales sirvieron para determinar los pesos secos de la biomasa aérea y subterránea (rendimiento).

### 3.13.2. Evolución del grado de cobertura

El grado de cobertura (CC) o comúnmente llamado cobertura de dosel se determinó a partir de imágenes capturadas con una cámara digital compacta, tomadas a baja altura (alrededor de un metro) sobre las plantas seleccionadas, como se muestra en la figura 20a.



**Figura 20. Procedimiento de captura de imágenes digitales para determinación de la cobertura de dosel**

Se utilizó una cámara fotográfica digital *Canon*, modelo *PowerShot SX60 HD* de resolución 16 Mpx, y de tamaño de sensor de 6.17x4.55mm. Para la captura de las fotografías se colocó un plano enmallado sobre las plantas de camote (figura 20b) selectas en un inicio. Por encima de la malla se tomó la imagen. Las imágenes captadas fueron procesadas primero en *AutoCAD* (v. 10 para Windows, Autodesk Inc., Mill Valley, CA, USA) y luego en *SisCob* (v. 1.0 para Windows, Embrapa, Brasilia, DF, Brasil) determinando así la cobertura de dosel verde.

### 3.14. RENDIMIENTO Y BIOMASA TOTAL EN COSECHA

El 14 y 15 de marzo del 2017 se efectuó, de forma manual, la cosecha de las variedades de camote paramonguino y huambachero respectivamente. El cultivo de camote se encontraba en la etapa fenológica de maduración. Había transcurrido una semana desde que se realizó la poda (el 7 y 8 de marzo del 2017) de la parte aérea de las plantas, correspondiendo esta labor a los 151 DDT en el caso del paramonguino y 152 DDT para el huambachero. Estos últimos datos son importantes para el modelado ya que serán la fecha final de la simulación, por lo que es importante mencionarlos.

Se muestreo toda la unidad elemental en el caso del rendimiento, mientras que para la biomasa aérea solo tres plantas por unidad experimental, obteniendo en total 5 repeticiones para cada tratamiento/variedad. La densidad poblacional de 4.2 plantas·m<sup>-2</sup>, el peso de la masa aérea (hojas y tallos) y el peso de la masa subterránea (raíces reservantes) permitieron el cálculo del rendimiento del camote fresco, así como la biomasa total fresca.

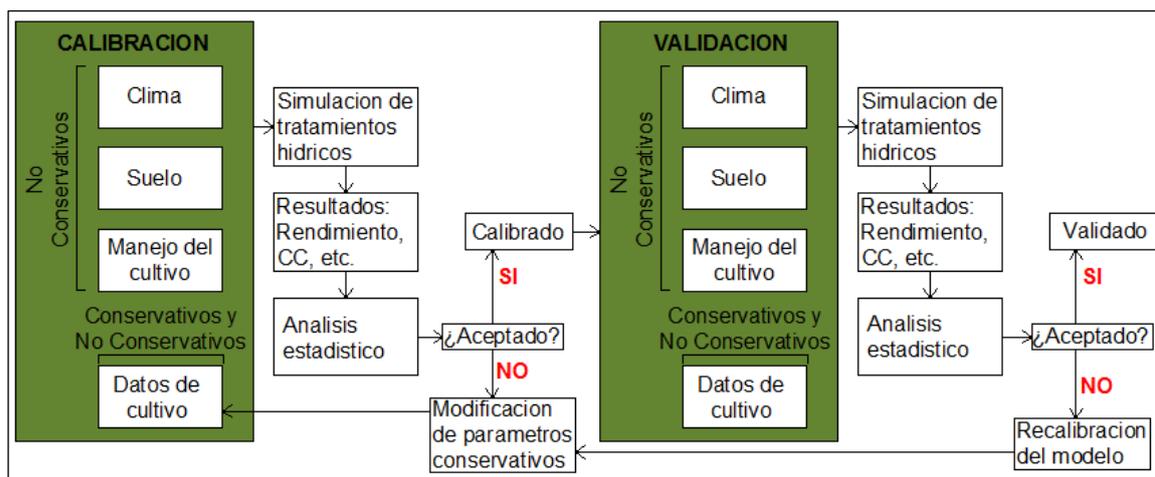
Ya en laboratorio, se determinó la biomasa seca (B) y el rendimiento seco (Y) a partir del parámetro porcentaje de materia seca. Esta variable se obtuvo, como ya se hizo previamente en los muestreos antes de la cosecha, mediante la desecación de una muestra representativa en un horno a 70 °C por 72 horas. Con estos datos se obtuvo el índice de cosecha (HI).

$$HI = \frac{B}{Y} \quad (13)$$

### **3.15. CALIBRACION DEL MODELO AQUACROP**

Para cada cultivo y sus respectivas variedades se debe calibrar y validar el modelo *AquaCrop* en diferentes condiciones edafoclimáticas y de manejo. La figura 21 muestra el diagrama de flujo que se sigue en un proceso de calibración y validación del modelo para un cultivo. Cuando no se cumplen los criterios de análisis establecidos previamente se concluye que el modelo no está calibrado o validado, según la etapa del proceso. En consecuencia, se vuelve al inicio del diagrama, pero actuando, en este caso, sobre los parámetros conservativos del módulo de cultivo. Aquí es necesario conocer la influencia que tienen los parámetros del modelo en la simulación del crecimiento y desarrollo del cultivo. Por ejemplo, se sabe que, ante una pequeña variación en algunos parámetros conservativos, como la productividad del agua (WP), los resultados de simulación cambian consideradamente.

En nuestro caso, al contar con un solo juego de datos, correspondiente a un periodo de cultivo de camote, nos centramos en el proceso de calibración del camote, por lo que la validación quedará pendiente para una investigación posterior. Esta investigación próxima deberá realizarse en condiciones distintas de clima, suelos y manejo del cultivo para la validación del modelo para las dos variedades de camote usadas en este trabajo.



**Figura 21. Diagrama de flujo seguido en el proceso de calibración y validación de un cultivo con el modelo AquaCrop**

Se tomó como punto de partida los valores calibrados de los parámetros necesarios para la simulación del cultivo de camote descritos en Rankine *et al.*, (2015). A pesar de que en la investigación previamente citada se simuló bajo condiciones de clima, manejo y suelo distintas a las de la zona de ensayo (Jamaica) y con cultivares distintos al usado (*Ganja*, *Uplifta* y *Yellow Belly*), la información que brindó fue de gran ayuda ya que permitió disponer de un primer nivel de aproximación a la hora de calibrar para las condiciones de la UNALM.

Los resultados obtenidos en campo de CC, evolución y cosecha de biomasa seca (B) y de rendimiento seco (Y), y evolución del agua en el suelo, se compararon con los resultados de las simulaciones. Todo lo anterior permitió determinar el comportamiento del modelo *AquaCrop* bajo diferentes situaciones de aporte hídrico en el cultivo de camote.

Los parámetros relacionados al desarrollo de cobertura de dosel quedaron calibrados cuando los resultados simulados se asemejaron a las observaciones de campo recogidas de las unidades elementales regadas con el tratamiento testigo  $T_0$  (reposición del 100%  $ET_0$ ). Para calibrar el resto de parámetros fueron necesarios comparaciones repetitivas entre los valores simulados y los observados en los tratamientos deficitarios  $T_a$ ,  $T_b$ , y  $T_c$  (reposición del 50%  $ET_0$ ). El detalle de los parámetros calibrados relacionado con el tratamiento usado para su calibración se puede observar en la tabla 9.

Se conoce que los parámetros de crecimiento de un cultivo están separados en dos categorías de acuerdo a su variación ante condiciones diferentes. Por un lado, los no conservativos (varían) y los conservativos (no varían), estos últimos pueden variar, en cierto grado, para algunas variedades dentro de una especie de cultivo. Hsiao *et al.*, (2012) establecen el

termino clase varietal para designar las variedades de un cultivo con parámetros conservativos muy similares, diferenciándolos de las variedades de la misma especie, pero que difieren de forma limitada en uno o más parámetros conservativos.

**Tabla 9. Tratamientos y su influencia en el parámetro a calibrar**

Parámetro	T <sub>o</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>b</sub>	T <sub>c</sub>
Temperatura base (T <sub>b</sub> )	X	-	-	-
Temperatura superior (T <sub>s</sub> )	X	-	-	-
Cobertura al 90% de emergencia (CC <sub>o</sub> )	X	-	-	-
Coefficiente de crecimiento de dosel (CGC)	X	-	-	-
Cobertura máxima del dosel (CC <sub>x</sub> )	X	-	-	-
Coefficiente de disminución del dosel (CDC)	X	-	-	-
Coefficiente de cultivo para la transpiración en cobertura máxima (K <sub>Cr,x</sub> )	X	-	-	-
Índice de cosecha de referencia (HI <sub>o</sub> )	X	-	-	-
Productividad del agua normalizada (WP*)	X	-	-	-
Umbrales del coeficiente de estrés hídrico para expansión de hoja (K <sub>Sexp,w</sub> )	-	X	X	X
Umbral del coeficiente de estrés hídrico para disminución temprana del dosel (K <sub>Ssen</sub> )	-	X	X	X
Umbral del coeficiente de estrés hídrico para cierre de estomas (K <sub>Ssto</sub> )	-	X	X	X
Coefficiente de estrés hídrico en HI	-	X	X	X
Fenología	X	-	-	-

Por ejemplo, Hsiao *et al.*, (2009) parametrizaron el índice de cosecha de referencia (HI<sub>o</sub>) para diferentes variedades del maíz en 48 por ciento, estableciéndose una clase varietal conformada por todas esas variedades. Sin embargo, Abedinpour *et al.*, (2009) establecieron un HI<sub>o</sub> de 34 por ciento para otra variedad del maíz, determinando una clase varietal distinta al establecido por Hsiao *et al.*, (2009).

Para esta investigación, luego de haber calibrado los parámetros del modelo para las dos variedades de camote en estudio, se deberá evaluar si constituyen una sola clase varietal o difieren en uno más parámetros conservativos.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

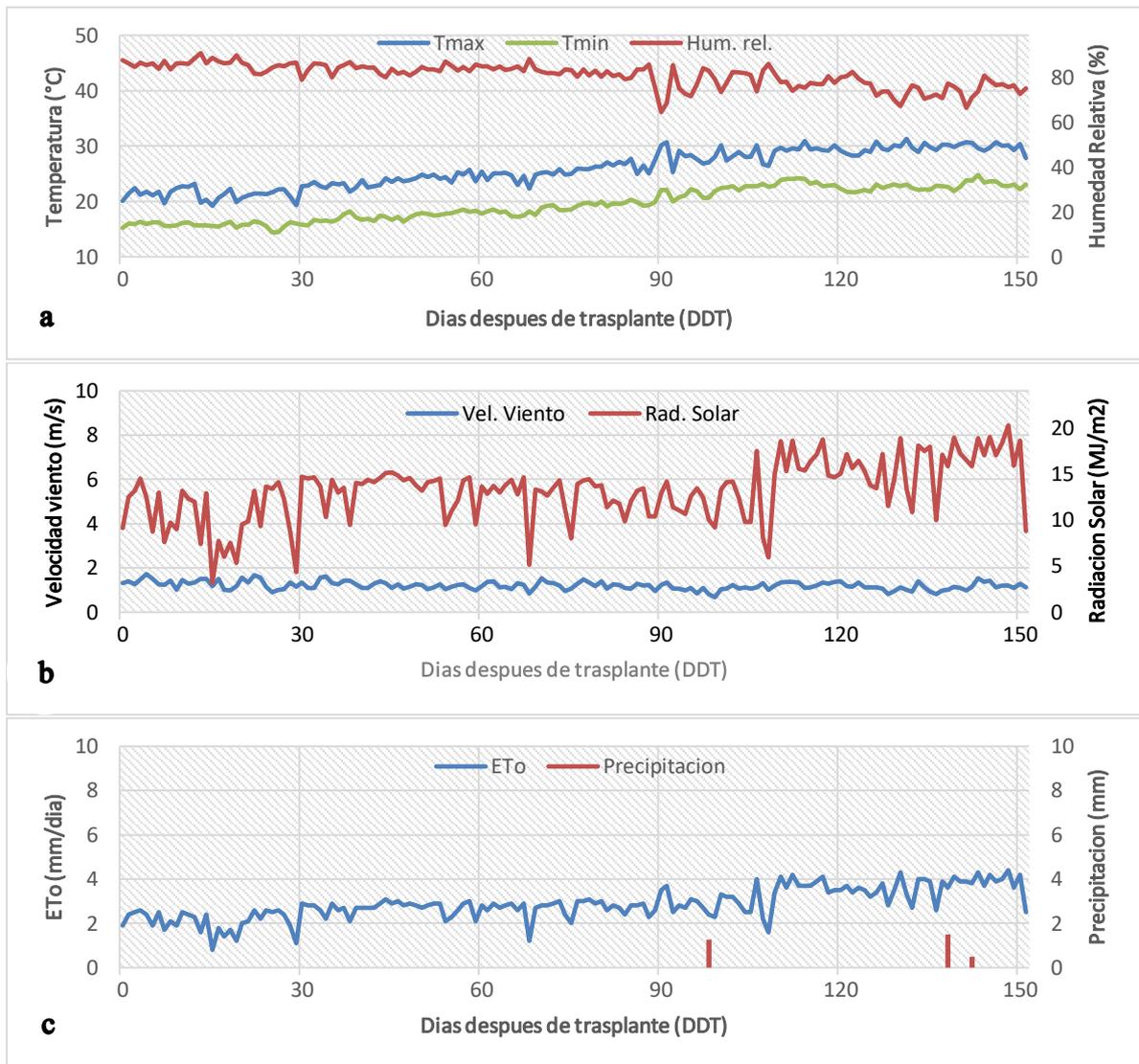
### 4.1. DATOS DE ENTRADA PARA LA CALIBRACION DEL MODELO

El modelo *AquaCrop* tiene 4 componentes bajo los cuales funciona: el clima, el suelo, el manejo y los parámetros del cultivo, este último es el módulo que contiene a los parámetros conservativos. A continuación, se presentan los datos recopilados en esta investigación para el ajuste del modelo *AquaCrop* en dos variedades de camote, ordenados de acuerdo a los componentes del modelo.

#### 4.1.1. Componente clima

El modelo requiere datos diarios de temperaturas máximas y mínimas, de precipitación y de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ). Toda la información fue recopilada de la estación meteorológica automática (Davis Vantage Pro2) ubicada en el Laboratorio de Recursos Hídricos de la UNALM.

La figura 22 muestra la evolución de las condiciones climáticas durante la campaña de ensayo que se requiere en el modelo. Se registraron temperaturas máximas de  $31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el mes de febrero y una mínima de  $14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  en noviembre (en promedio la temperatura en el lugar alcanzó los  $23.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Así mismo, la humedad relativa tuvo picos altos en el mes de octubre (91 por ciento) y los más bajos en enero (64.7 por ciento). Mientras tanto, la velocidad del viento se mantuvo prácticamente constante con un promedio de  $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Por otro lado, la precipitación en la zona es escasa (en concordancia con la condición de aridez de la zona) la cual llegó a una tasa acumulada de  $3.3\text{ mm}$  durante toda la experimentación. Por último, la radiación solar de onda corta fue de  $13.1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$  en promedio, durante todo el periodo de crecimiento del cultivo. Cabe señalar que las intensidades más fuertes de radiación se dieron en la segunda mitad del periodo, llegando a picos de  $20\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ .



**Figura 22. Variación diaria de a) temperatura y humedad relativa, b) velocidad de viento e intensidad de radiación solar, y c)  $ET_0$  y precipitación.**

#### 4.1.2. Componente suelo

En la tabla 10 se presenta los resultados de la prueba fisicoquímica realizada a una muestra de suelo representativa del campo, incluida la granulometría. Es precisamente la granulometría del suelo la que nos permite hallar los parámetros de entrada en el componente suelo del modelo. Estos parámetros de entrada (tabla 11) sirvieron para que el modelo calcule otras variables del suelo (evaporación del suelo, drenaje interno, percolación profunda, escorrentía superficial y ascenso capilar).

**Tabla 10. Análisis físico-químico de suelo del área experimental en la UNALM**

Tipo de análisis	Resultados
<b>Análisis Físico</b>	
Arena (%)	57.9
Limo (%)	27.3
Arcilla (%)	14.8
Clase Textural	Franco arenoso
<b>Análisis Químico</b>	
C.E (dS·m <sup>-1</sup> )	0.7
pH (1:1)	7.6
M.O (%)	1.75
CaCO <sub>3</sub> (%)	1.23
P (ppm)	45.7
K (ppm)	71.9
CIC Cmol(+).Kg <sup>-1</sup>	13.8

FUENTE: LAASMA

La textura del suelo es franco arenoso con un porcentaje de materia orgánica muy bajo, de 1.75 por ciento. Los efectos que presenta la salinidad del suelo son despreciables (CE = 0.77 dS·m<sup>-1</sup>), al mismo tiempo que es considerado medianamente alcalina (pH = 7.59). En estas condiciones se sembraron las dos variedades de camote, en un suelo que no presenta mayores problemas, pues este cultivo puede desarrollarse en un amplio rango de suelos, con una conductividad eléctrica no mayor a 6.0 dS·m<sup>-1</sup> y un pH que no supere el umbral de ocho.

**Tabla 11. Parámetros no conservativos del suelo necesarios para el modelo**

Parámetro	Unidad	Magnitud
Contenido de humedad en el suelo en el punto de marchitez permanente (PWP)	%	11
Contenido de humedad en el suelo en capacidad de campo (FC)	%	22
Contenido de humedad en el suelo en el punto de saturación (SAT)	%	44
Conductividad hidráulica en saturación (Ksat)	mm·dia <sup>-1</sup>	331.2
Porcentaje de gravas	%	0
Tasa de expansión de la zona de raíz	%	0

Al realizar solo un muestreo representativo del suelo y no a distintas profundidades, como es debido, las magnitudes de las variables descritas en la tabla 13 se ajustaron para un metro de profundidad para cubrir los 0.50 metros de enraizamiento máximo que tuvo el cultivo.

El modelo también requiere como datos de entrada: la profundidad y salinidad de la capa freática. Sin embargo, en esta investigación se obviaron dichas variables debido a la gran profundidad a la que se encuentra el nivel freático en el área de estudio (CISMID, 2010).

#### 4.1.3. Componente manejo

El tipo de riego usado en la investigación fue por goteo. Se asumió un porcentaje de superficie del suelo humedecida de 40 por ciento (el modelo sugiere que para riego por goteo el rango de esta variable esta entre 15 a 40 por ciento). El calendario de riego con las láminas reales recibidas en cada tratamiento se puede observar en la tabla 12.

**Tabla 12. Calendario de riego de la lámina real (mm) recibida en cada tratamiento**

DDT	T <sub>o</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>b</sub>	T <sub>c</sub>	DDT	T <sub>o</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>b</sub>	T <sub>c</sub>
1	1.8	1.8	1.8	1.8	56	7.9	4.0	4.0	4.0
3	3.6	3.6	3.6	3.6	59	10.9	5.5	5.5	5.5
5	3.3	3.3	3.3	3.3	61	6.6	3.3	3.3	3.3
7	3.4	3.4	3.4	3.4	63	8.4	4.2	4.2	4.2
10	4.3	4.3	4.3	4.3	66	11.4	5.7	5.7	5.7
12	3.3	3.3	3.3	3.3	68	11.6	5.8	5.8	5.8
14	2.5	2.5	2.5	2.5	70	11.9	6.0	6.0	6.0
17	3.3	3.3	3.3	3.3	73	8.5	4.3	4.3	4.3
19	2.4	2.4	2.4	2.4	75	3.6	1.8	1.8	1.8
21	3.4	3.4	3.4	3.4	77	16.3	8.2	8.2	8.2
24	3.9	1.9	3.9	3.9	80	8.7	4.4	4.4	4.4
26	3.7	1.9	3.7	3.7	82	10.1	5.1	5.1	5.1
28	5.5	2.8	5.5	5.5	87	15.7	7.8	7.8	7.8
31	7.8	3.9	7.8	7.8	89	13.8	6.9	6.9	6.9
33	7.4	3.7	3.7	7.4	91	15.9	8.0	8.0	8.0
35	6.9	3.5	3.5	6.9	98	18.6	9.3	9.3	9.3
38	11.1	5.6	5.6	11.1	101	9.5	4.8	4.8	4.8
40	4.3	2.2	2.2	4.3	103	6.5	3.3	3.3	3.3
42	2.9	1.5	1.5	2.9	105	16.1	8.1	8.1	8.1
45	10.8	5.4	5.4	5.4	108	10.8	5.4	5.4	5.4
47	4.1	2.1	2.1	2.1	118	36.4	18.2	18.2	18.2
49	2.5	1.3	1.3	1.3	126	28.0	14.0	14.0	14.0
52	11.5	5.8	5.8	5.8	130	10.1	5.1	5.1	5.1
54	5.0	2.5	2.5	2.5	143	31.6	15.8	15.8	15.8

Cabe señalar que durante el último mes de desarrollo del cultivo no se aplicaron las láminas de riego calculadas, en su lugar se aplicaron laminas más bajas en base a la poca oferta de agua que teníamos en el reservorio (debido al fenómeno El Niño).

En la tabla 13 se puede observar la lámina total aplicada por cada tratamiento en estudio. El intervalo de riegos fue de dos a tres días hasta 82 DDT, posteriormente se regó con intervalos más largos debido a la falta de agua. Previo al trasplante se dio un riego de asiento sometiendo al suelo a capacidad de campo. La mayoría de los riegos practicados fueron al iniciar el día (7:00 a.m.) o al terminar la tarde (6:00 p.m.).

**Tabla 13. Lámina total de riego aplicada por tratamiento**

Tratamiento	Lamina (mm)	Lamina (m <sup>3</sup> /ha)
T <sub>o</sub>	447.6	4476
T <sub>a</sub>	240.4	2404
T <sub>b</sub>	250.8	2508
T <sub>c</sub>	266.9	2669

**Tabla 14. Análisis de la calidad de agua de riego**

Parámetros	Valores observados*	Valores normales en agua de riego**
C.E (dS·m <sup>-1</sup> )	0.66	0 – 3
pH (1:1)	7.52	6.5 – 8.5
Calcio (meq·l <sup>-1</sup> )	4.90	0 – 20
Magnesio (meq·l <sup>-1</sup> )	0.83	0 – 5
Sodio (meq·l <sup>-1</sup> )	0.89	0 – 40
Potasio (meq·l <sup>-1</sup> )	0.05	0 – 2
Suma de Cationes	6.67	
Cloruro (meq·l <sup>-1</sup> )	1.13	0 – 30
Sulfato (meq·l <sup>-1</sup> )	2.67	0 – 20
Bicarbonato (meq·l <sup>-1</sup> )	2.83	0 – 10
Nitratos (meq·l <sup>-1</sup> )	0.00	0 – 5
Carbonatos (meq·l <sup>-1</sup> )	0.00	0 – 0.1
Suma de Aniones	6.62	
SAR	0.52	0 – 15
Clasificación	C2-S1	-
Boro (ppm)	0.57	0 – 2

\* Valores obtenidos del análisis realizado en el LAASMA

\*\* Valores extraídos de Moliner y Masaguer (1996)

Para el caso de la calidad del agua de riego, un detalle comparativo de las características observadas en la muestra de agua recogida del reservorio frente a valores normales en agua de riego se presenta en la tabla 14. Los resultados denotan un agua de buena calidad para su uso en riego, garantizando un rendimiento óptimo. Es necesario señalar que la clasificación de C2-S1 establecida para la muestra de agua nos indica que su grado de riesgo sódico y salino es bajo. Por último, es necesario señalar que la calidad del agua de riego es buena respecto a la conductividad eléctrica (C.E.=0.66 dS·m<sup>-1</sup>) por lo que su efecto se consideró despreciable en el modelo.

El módulo manejo de campo no se especificó en el modelo por dos razones. Por un lado, la condición de fertilidad del suelo fue óptima debido a la práctica de fertirrigación en el experimento. Por otro lado, los acolchados, prácticas de superficie de campo y manejo de malezas, fueron obviadas durante la investigación.

#### 4.1.4. Componente cultivo

En el componente cultivo del modelo *Aquacrop* se pueden encontrar parámetros conservativos y no conservativos, siendo el ajuste del primero lo que determina la calibración del mismo.

Para el tipo de cultivo del modelo se seleccionó el correspondiente a tubérculos/raíces y el método de plantación por transplante. El marco de plantación del cultivo fue de 0.30 por 0.80 metros (densidad de plantación de 4.2 camotes por metro cuadrado), este último parámetro sirvió para determinar la cobertura de dosel inicial.

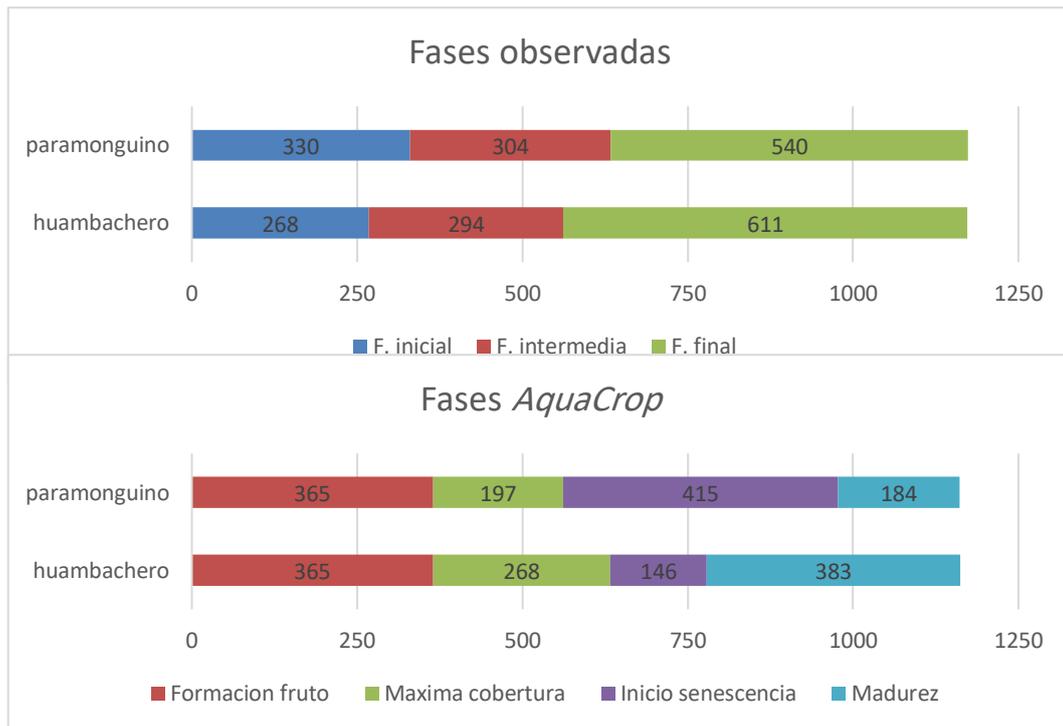
##### a. Fenología

La fenología observada en campo de cada variedad de camote se puede apreciar en la tabla 15, donde es comparada con la sugerencia de duración de estas fases para los autores Scott (1950) y Wilson y Low (1973).

La duración de las fases fenológicas traducidas a tiempo térmico acumulado se observa en la figura 23. Además, ahí se detalla la duración en tiempo térmico de la fenología según *AquaCrop* (comienzo de la formación del fruto, tiempo a máxima cobertura de dosel, a inicio de senescencia de dosel y madurez fisiológica). La determinación de estas etapas permitió calibrar los parámetros que influyen en el desarrollo de la cobertura del dosel.

**Tabla 15. Duración de las fases fenológicas del camote en semanas**

FASE	Valores observados		Valores bibliográficos	
	Huambachero	Paramonguino	Scott	Wilson y Low
Inicial	0 a 8.5	0 a 10	0 a 9.5	0 a 4
Intermedia	8.5 a 14	10 a 15	9.5 a 16	4 a 7
Final	>14	>15	>16	>7



**Figura 23. Tiempo térmico acumulado (°C) del camote**

b. Cobertura de dosel (CC)

Para la comparación de los valores simulados y observados en campo como parte del proceso de calibración, se recogió información tanto previo a la cosecha como durante la misma. En el caso del grado de cobertura verde del dosel, las tablas 16 y 17 recoge los datos muestreados en toda la campaña experimental para las variedades huambachero y paramonguino respectivamente.

**Tabla 16. Grado de cobertura (%) obtenido en cada muestreo realizado en el cultivo de camote, variedad huambachero**

DDT	$T_o$			$T_a$			$T_b$			$T_c$		
25	7.4	5.2	6.1	7.5	11.1	9.1	7.0	11.4	10.4	14.3	8.4	6.8
31	11.3	7.6	7.7	14.5	20.7	11.9	10.8	15.7	15.0	17.0	12.2	13.0
43	40.2	50.7	33.5	38.3	44.6	50.4	33.6	40.0	36.2	32.4	17.7	21.6
55	52.1	63.1	34.2	51.9	53.1	52.4	53.9	65.7	55.7	49.1	32.8	26.1
77	64.9	68.0	41.8	66.9	62.1	60.7	57.2	67.6	57.9	64.8	38.6	36.1
94	89.9	73.6	69.8	93.9	77.3	74.5	76.8	91.1	69.5	78.8	67.4	71.5
101	99.1	78.7	99.0	95.0	90.4	96.1	85.3	93.5	92.6	83.6	93.1	97.7
111	99.4	99.0	95.3	95.7	75.2	68.4	96.1	86.8	83.5	90.4	75.6	97.4
125	64.9	78.1	99.0	69.9	55.9	61.4	81.9	69.1	66.2	72.8	50.2	92.1
138	53.4	58.9	87.3	66.2	51.9	46.5	78.8	60.0	58.9	72.3	56.2	26.8
146	46.2	51.4	81.8	53.4	46.7	26.3	53.0	54.0	45.8	51.4	48.0	21.7

**Tabla 17. Grado de cobertura (%) obtenido en cada muestreo realizado en el cultivo de camote, variedad paramunguino**

DDT	T <sub>o</sub>			T <sub>a</sub>			T <sub>b</sub>			T <sub>c</sub>		
25	6.6	6.5	9.9	4.7	9.7	9.5	5.0	9.6	9.0	6.9	8.6	8.7
31	11.0	6.8	14.2	5.7	14.1	13.8	5.2	13.7	17.8	8.4	11.6	13.1
43	20.3	14.5	33.3	26.6	24.3	33.8	17.9	23.8	29.5	16.1	17.8	14.5
55	51.3	50.2	42.7	45.5	45.6	50.6	40.1	52.7	50.1	40.1	51.2	33.4
77	64.0	92.7	61.2	70.0	73.5	60.8	65.3	72.2	80.1	50.8	54.4	63.6
94	100	100	72.1	100	60.9	71.7	78.5	77.2	83.7	57.6	65.3	88.7
101	100	100	100	100	79.0	100	80.6	78.7	95.9	91.0	85.8	96.3
111	100	100	100	100	92.0	100	87.4	96.3	96.0	97.3	100	100
125	100	100	97.1	81.6	100	99.4	93.7	100	92.0	87.9	96.6	88.4
138	100	95.7	92.2	48.9	65.3	91.8	90.1	85.8	79.2	61.6	81.9	69.2
146	79.0	60.3	92.1	48.4	58.4	87.8	81.3	64.8	66.8	45.4	63.0	63.6

**Tabla 18. Análisis estadístico de la evolución de grado de cobertura (%) observado en el cultivo de camote, variedad huambachero**

DDT	25	31	43	55	77	94	101	111	125	138	146
T <sub>o</sub>	6.2	8.9	41.5a	49.8	58.2	77.8	92.2	97.8	80.7	66.5	59.8
T <sub>a</sub>	9.3	15.7	44.4a	52.5	63.2	81.9	93.8	79.7	62.4	54.9	42.1
T <sub>b</sub>	9.6	13.9	36.6a	58.4	60.9	79.1	90.5	88.8	72.4	65.9	50.9
T <sub>c</sub>	9.8	14.0	23.9b	36.0	46.5	72.5	91.5	87.8	71.7	51.8	40.4
<b>p valor</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>*</b>	<b>ns</b>							

**Tabla 19. Análisis estadístico de la evolución de grado de cobertura (%) observado en el cultivo de camote, variedad paramunguino**

DDT	25	31	43	55	77	94	101	111	125	138	146
T <sub>o</sub>	7.7	10.7	22.7	48.0	72.6	90.7	100.0	100.0	99.0	96.0	77.1
T <sub>a</sub>	8.0	11.2	28.2	47.2	68.1	77.5	93.0	97.3	93.7	68.7	64.9
T <sub>b</sub>	7.9	12.3	23.7	47.6	72.5	79.8	85.1	93.2	95.2	85.0	71.0
T <sub>c</sub>	8.1	11.0	16.2	41.6	56.3	70.5	91.1	99.1	91.0	70.9	57.3
<b>p valor</b>	<b>ns</b>										

En ambas variedades se observa una alta variabilidad de los datos en las repeticiones. Lo anterior desencadenó que las coberturas de dosel verde (CC) no presentaran diferencias significativas entre tratamientos aplicados, tal cual se puede observar en las tablas 18 y 19. Durante toda la campaña los datos promedios entre tratamientos son comparativamente diferentes, sin embargo, como ya se mencionó, no existen diferencias significativas, salvo a los 43 DDT (variedad *huambachero*) entre el tratamiento deficitario iniciado a los 45 días (T<sub>c</sub>) y el resto de tratamientos (tabla 18), según el test de Tukey.

c. Biomasa fresca, rendimiento fresco y contenido de humedad

En el caso de la biomasa fresca de y rendimiento fresco de cada tratamiento/variedad, los resultados de los muestreos se presentan en las tablas 20 y 21, respectivamente. Así mismo, en la tabla 22 se puede observar los muestreos realizados durante la cosecha para cada tratamiento y variedad en estudio.

**Tabla 20. Biomasa fresca en Tn·ha<sup>-1</sup> obtenida en cada muestreo previo a cosecha**

DDT	T <sub>0</sub>			T <sub>a</sub>			T <sub>b</sub>			T <sub>c</sub>		
<b><u>Huambachero</u></b>												
94	14.6	11.3	19.6	17.6	10.0	7.55	11.6	15.0	7.53	10.8	6.01	13.2
115	20.9	30.8	26.9	17.9	25.0	12.4	23.2	25.8	13.6	23.7	25.6	26.1
136	47.7	41.4	41.1	26.8	37.9	43.0	51.5	27.6	40.7	43.0	32.6	29.4
<b><u>Paramonguino</u></b>												
112	26.3	41.8	27.2	24.2	27.6	39.2	33.7	28.6	34.5	19.2	26.7	21.0
133	50.7	36.4	42.9	40.5	30.7	41.9	31.4	23.3	41.8	30.4	47.9	40.0

**Tabla 21. Rendimiento fresco en Tn·ha<sup>-1</sup> obtenido en cada muestreo previo a cosecha**

DDT	T <sub>0</sub>			T <sub>a</sub>			T <sub>b</sub>			T <sub>c</sub>		
<b><u>Huambachero</u></b>												
94	0.52	2.24	0.89	3.12	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48	1.32	0.00	0.92
115	9.26	15.3	8.27	8.20	8.83	3.38	7.12	7.83	4.25	13.3	9.19	6.24
136	31.5	20.2	28.0	14.7	23.2	24.0	31.4	16.3	24.4	25.0	17.3	16.9
<b><u>Paramonguino</u></b>												
112	9.01	16.4	6.94	12.9	5.99	5.23	10.2	13.3	8.33	5.11	8.64	10.3
133	25.5	22.0	29.5	16.3	17.5	23.3	16.4	14.2	28.4	18.2	26.9	25.0

En cuanto a biomasa y rendimiento fresco evaluado, se puede observar en las tablas 23 y 24, respectivamente, que no existe diferencia significativa entre tratamientos en ambas variedades. Aun así, se puede apreciar que el T<sub>0</sub> alcanzó siempre los promedios más altos.

**Tabla 22. Biomasa fresca ( $Tn \cdot ha^{-1}$ ) y rendimiento fresco ( $Tn \cdot ha^{-1}$ ) recogido durante la cosecha.**

Tratamiento	Rendimiento fresco	Biomasa fresca	Rendimiento fresco	Biomasa fresca
	<u>Huambachero</u>		<u>Paramonguino</u>	
To	33.6	56.3	30.5	48.8
	44.4	66.7	32.8	59.3
	38.2	54.5	41.8	73.2
	46.9	71.2	47.4	66.7
	47.7	60.8	43.3	72.2
Ta	20.8	34.4	26.8	48.0
	29.6	40.6	23.1	42.2
	39.8	57.8	36.2	61.7
	39.9	50.5	35.6	65.2
	43.6	60.1	28.3	41.7
Tb	25.3	37.2	26.9	52.1
	26.5	35.0	26.8	37.9
	42.2	61.5	34.7	50.2
	34.7	50.6	32.1	52.9
	34.7	48.2	36.4	57.3
Tc	26.2	36.5	23.0	38.0
	26.9	49.4	26.0	43.6
	27.4	43.6	36.6	58.3
	45.3	64.1	39.0	65.2
	49.8	60.2	38.5	54.5

**Tabla 23. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de biomasa fresca del cultivo de camote**

Tratamiento	94 DDT	115 DDT	136 DDT	Cosecha	112 DDT	133 DDT	Cosecha
	<u>Huambachero</u>				<u>Paramonguino</u>		
To	15.17	26.20	43.41	61.90	31.75	43.34	64.04
Ta	11.71	18.42	35.91	48.70	30.30	37.71	51.77
Tb	11.35	20.88	39.93	46.51	32.25	32.17	50.07
Tc	9.99	25.17	35.00	50.75	22.28	39.43	51.92
<b>p valor</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>

**Tabla 24. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de rendimiento fresco del cultivo de camote**

Tratamiento	94 DDT	115 DDT	136 DDT	Cosecha	112 DDT	133 DDT	Cosecha
	<b><u>Huambachero</u></b>				<b><u>Paramonguino</u></b>		
To	1.22	10.93	26.56	42.14	10.80	25.76	39.18
Ta	1.04	6.80	20.62	34.74	8.03	19.01	30.00
Tb	0.49	6.40	24.02	32.66	10.61	19.66	31.37
Tc	0.75	9.56	19.71	35.12	8.01	23.37	32.62
<b>p valor</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>

Tanto la biomasa como el rendimiento fresco son variables que como tal no puede ser usadas para trabajos de modelamiento en *AquaCrop*, por lo que es importante conocer el porcentaje de materia seca del cultivo, con el fin de determinar la biomasa seca (B) y el rendimiento seco (Y). En la tabla 25 se puede apreciar los porcentajes materia seca de la biomasa aérea y subterránea (rendimiento) para cada muestreo realizado.

**Tabla 25. Contenido de materia seca (%) del rendimiento y biomasa aérea en cada muestreo realizado**

	94 DDT	115 DDT	136 DDT	Cosecha	112 DDT	133 DDT	Cosecha
	<b><u>Huambachero</u></b>				<b><u>Paramonguino</u></b>		
<b>Rendimiento</b>	30.50	28.30	29.90	28.80	28.40	26.70	29.30
<b>Biomasa aérea</b>	36.10	37.20	35.70	35.90	33.40	35.60	32.70

d. Biomasa seca (B), rendimiento seco (Y) e índice de cosecha (HI)

Por otro lado, en el caso de la biomasa seca y rendimiento seco, se presenta y analiza los datos recogidos en campo separados en aquellos que fueron muestreados antes de la cosecha de los que fueron muestreados en la cosecha. Los datos de biomasa seca (B), así como de rendimiento seco (Y) obtenidos en cada muestreo, previos a la cosecha, se presentan en las tablas 26 y 27 respectivamente. Mientras que en la tabla 28 se presenta los resultados de B e Y, así como del parámetro índice de cosecha (HI), obtenidos durante el muestreo en la cosecha.

**Tabla 26. Biomasa seca (B) en Tn·ha<sup>-1</sup> obtenida en cada muestreo previo a cosecha**

DDT	To			Ta			Tb			Tc		
<b><u>Huambachero</u></b>												
94	5.26	3.94	3.52	6.17	3.62	2.73	4.17	5.41	2.64	3.83	2.17	4.70
115	6.96	10.1	9.28	6.02	8.41	4.23	7.99	8.92	4.69	7.65	8.72	9.18
136	15.2	13.6	13.0	8.61	12.3	13.9	16.5	8.92	13.1	14.0	10.7	9.39
<b><u>Paramonguino</u></b>												
112	8.32	13.1	8.73	7.62	9.06	12.8	10.7	8.89	11.1	6.10	8.43	6.50
133	15.8	11.0	12.7	12.9	10.0	12.8	9.73	7.02	12.3	9.02	14.4	11.8

**Tabla 27. Rendimiento seco (Y) en Tn·ha<sup>-1</sup> obtenido en cada muestreo previo a cosecha**

DDT	To			Ta			Tb			Tc		
<b><u>Huambachero</u></b>												
94	0.16	0.68	0.27	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.40	0.00	0.28
115	2.62	4.32	2.34	2.32	2.50	0.96	2.02	2.21	1.20	3.75	2.60	1.77
136	9.43	6.03	8.37	4.40	6.92	7.18	9.39	4.86	7.29	7.47	5.16	5.05
<b><u>Paramonguino</u></b>												
112	2.56	4.67	1.97	3.65	1.70	1.49	2.91	3.77	2.36	1.45	2.45	2.92
133	6.87	5.88	7.88	4.35	4.66	6.21	4.37	3.80	7.57	4.87	7.17	6.68

Muy al contrario de lo previsto, los tratamientos hídricos no afectaron, de manera significativa, en la acumulación de biomasa seca (B) y rendimiento seco (Y) del cultivo en ambas variedades (tablas 29 y 30). Sin embargo, es importante señalar que al igual que en el caso de la productividad fresca, es el tratamiento testigo (To) quien siempre alcanzó los promedios más altos en el procesamiento de datos.

El camote es generalmente considerado como un cultivo resistente a la sequía. Sin embargo, es preciso señalar que, debido a las grandes diferencias genotípicas, muchos autores han aunado esfuerzos para dar con las variedades apropiadas para estas condiciones de estrés. Por nuestro lado, podemos corroborar en las tablas 29 y 30 que los cultivares huambachero y paramonguino van dentro del grupo resistente a la sequía, por lo menos previo a la cosecha.

**Tabla 28. Datos de biomasa seca (B, Tn·ha<sup>-1</sup>), rendimiento seco (Y, Tn·ha<sup>-1</sup>) e índice de cosecha (HI), durante la cosecha.**

<u>Tratamiento</u>	<u>Y</u>	<u>B</u>	<u>HI</u>	<u>Y</u>	<u>B</u>	<u>HI</u>
	<u>Huambachero</u>			<u>Paramonguino</u>		
To	9.7	17.8	54.2	8.9	14.9	60.0
	12.8	20.8	61.5	9.6	18.3	52.6
	11.0	16.9	65.1	12.2	22.5	54.3
	13.5	22.2	60.8	13.9	20.2	68.8
	13.7	18.4	74.5	12.7	22.1	57.4
Ta	6.0	10.9	55.1	7.8	14.8	53.1
	8.5	12.5	68.3	6.8	13.0	52.0
	11.5	17.9	63.9	10.6	18.9	56.0
	11.5	15.3	75.2	10.4	20.1	51.9
	12.5	18.5	67.8	8.3	12.7	65.5
Tb	7.3	11.6	63.0	7.9	16.1	48.8
	7.6	10.7	71.3	7.9	11.5	68.5
	12.2	19.1	63.7	10.2	15.2	66.9
	10.0	15.7	63.6	9.4	16.2	58.0
	10.0	14.9	67.3	10.7	17.5	60.9
Tc	7.5	11.3	67.0	6.7	11.6	57.8
	7.8	15.8	49.1	7.6	13.4	57.0
	7.9	13.7	57.5	10.7	17.8	60.3
	13.0	19.8	65.9	11.4	20.0	57.1
	14.3	18.1	79.4	11.3	16.5	68.3

**Tabla 29. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de B (Tn·ha<sup>-1</sup>) del cultivo de camote**

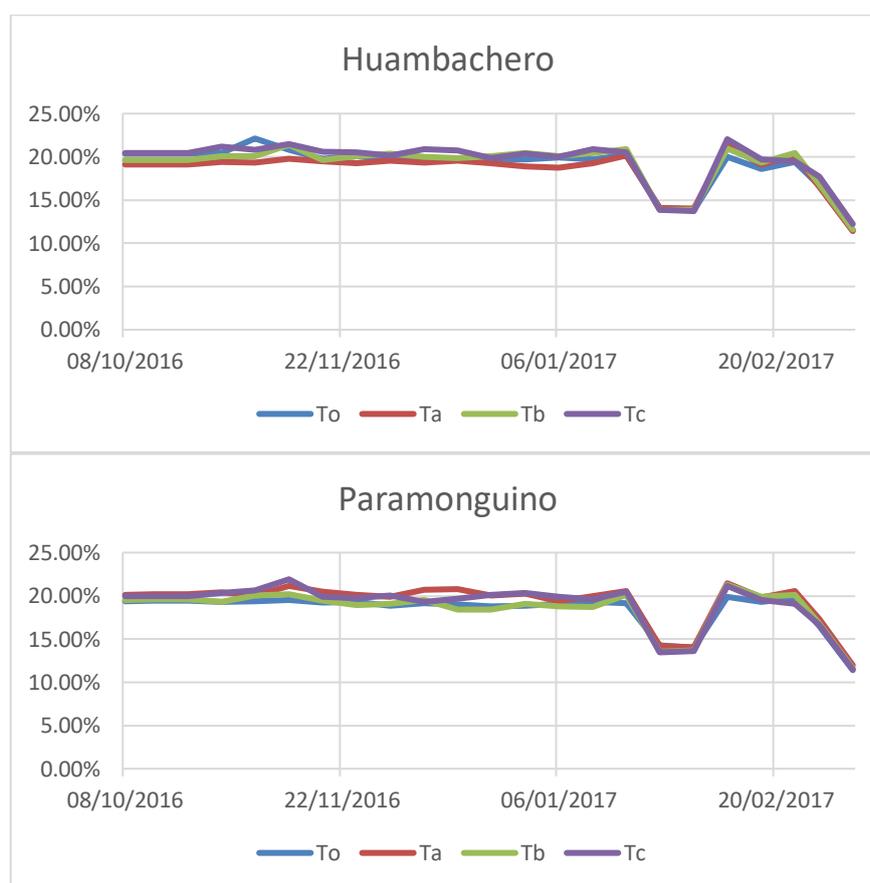
<u>Tratamiento</u>	<u>94</u>	<u>115</u>	<u>136</u>	<u>Cosecha</u>	<u>112</u>	<u>133</u>	<u>Cosecha</u>
	<u>DDT</u>	<u>DDT</u>	<u>DDT</u>		<u>DDT</u>	<u>DDT</u>	
	<u>Huambachero</u>				<u>Paramonguino</u>		
To	4.24	8.78	13.96	19.23	10.07	13.23	19.61
Ta	4.17	6.22	11.62	15.02	9.85	11.94	15.91
Tb	4.07	7.20	12.86	14.38	10.24	9.70	15.31
Tc	3.56	8.52	11.39	15.73	7.01	11.78	15.87
<b>p valor</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>

**Tabla 30. Promedios por tratamiento/variedad y análisis estadístico de la evolución de Y (Tn·ha<sup>-1</sup>) del cultivo de camote**

Tratamiento	94 DDT	115 DDT	136 DDT	Cosecha	112 DDT	133 DDT	Cosecha
	<u>Huambachero</u>				<u>Paramonguino</u>		
To	0.37	3.09	7.94	12.14	3.07	6.88	11.48
Ta	0.32	1.93	6.17	10.00	2.28	5.08	8.79
Tb	0.15	1.81	7.18	9.40	3.01	5.25	9.19
Tc	0.23	2.71	5.89	10.11	2.27	6.24	9.56
<b>p valor</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>

e. Contenido de humedad en el suelo

El riego ofertado permitió mantener el suelo a capacidad de campo durante gran parte del ensayo. Los datos recogidos en campo de la humedad del suelo, a una profundidad de 30 cm, durante todo el periodo experimental se pueden observar en la figura 24.



**Figura 24. Humedad volumétrica (%) del suelo.**

La humedad que presentó el suelo durante el periodo de experimentación en todos los tratamientos se ubicó siempre cerca de capacidad de campo (22%). Los valores más bajos

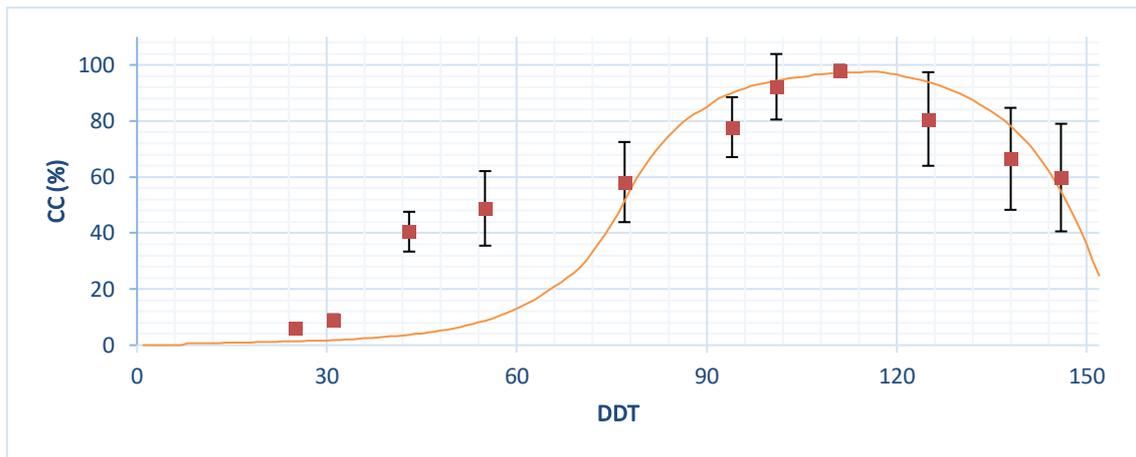
se tuvieron a finales del periodo debido a los inconvenientes de agua por el fenómeno “El Niño”.

Dentro del conjunto de variables que operan al modelo *AquaCrop*, las variables coeficiente de crecimiento (CGC) y senescencia (CDC) del dosel, el índice de cosecha de referencia ( $HI_o$ ), los coeficiente de estrés hídrico para expansión del dosel ( $K_{s_{exp,w}}$ ), cierre estomático ( $K_{s_{sto}}$ ) y senescencia temprana ( $K_{s_{sen}}$ ) a través de sus umbrales superior ( $p_{upper}$ ) e inferior ( $p_{lower}$ ), y el efecto del estrés hídrico sobre el  $HI_o$  durante la formación del rendimiento, positivo ante la expansión del dosel (a) y negativo debido al cierre de estomas (b), han sido calibrados para cada variedad en estudio a partir de las observaciones realizadas durante el ensayo experimental y mostradas previamente en este subcapítulo. Todas estas variables tienen una influencia directa sobre la evolución del grado de cobertura (CC), biomasa seca (B) y rendimiento seco (Y). Por lo tanto, los valores de los parámetros calibrados se justifican a medida que se analizan CC, B e Y.

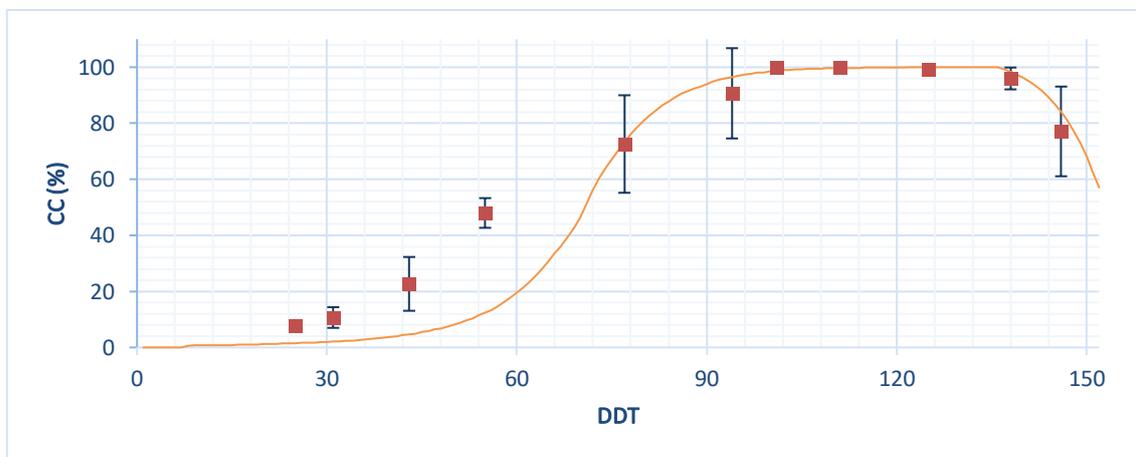
#### **4.2. GRADO DE COBERTURA**

El primer parámetro a determinar en el proceso de cálculo del modelo *AquaCrop* (figura 5) es la evolución de la cobertura de dosel (CC). En esta parte es importante el cálculo de los coeficientes de crecimiento (CGC) y senescencia (CDC) de la cubierta vegetal verde ya que describen la forma de la curva CC. Por lo tanto, es preciso en esta primera etapa del modelamiento determinar los coeficientes CGC y CDC a partir de los datos observados en el tratamiento testigo ( $T_o$ ) del ensayo realizado en campo.

Las dos variedades tienen un comportamiento distinto en cuanto al desarrollo de la cubierta verde. Así, el huambachero con un CGC de  $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$  reproduce una expansión de dosel lenta, en contraste con el paramanguino, el cual remeda una expansión moderada con un registro de CGC de  $0.014\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$ . Ambas variedades precisan alrededor de  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  acumulados para alcanzar el  $CC_x$  máximo, aproximadamente  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  acumulados más de los que requirió el camote en el estudio realizado por Rankine *et al.*, (2015). En el caso del CDC, la brecha entre variedades se extiende. La decadencia de la cubierta se desenvuelve de manera muy lenta en el huambachero ( $0.007\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) y de forma moderada en el paramanguino ( $0.012\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{dia}^{-1}$ ).

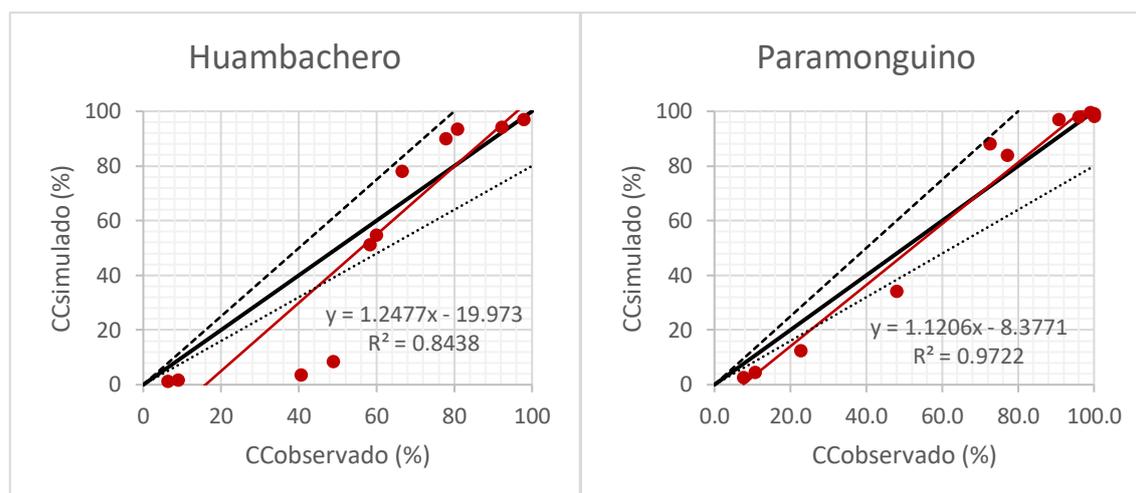


**Figura 25. Evolución observada y simulada del grado de cobertura (CC) de la variedad huambachero en T<sub>0</sub>**



**Figura 26. Evolución observada y simulada del grado de cobertura (CC) de la variedad paramonguina en T<sub>0</sub>**

Las figuras 25 y 26 representan la evolución del CC simulado y observado para el tratamiento de referencia (T<sub>0</sub>) en las variedades huambachero y paramonguino, respectivamente. Se observa que la evolución del CC en las simulaciones tuvo una buena relación con los CC observados en ambas variedades, teniendo mayor precisión en la segunda mitad del ciclo vegetativo del cultivo (a partir de los 70 DDT).



**Figura 27. Grado de relación de la cobertura promedio simulada y observada en  $T_0$ .**

Así mismo, en la figura 27 se puede observar que, independientemente de la variedad, para CC inferiores al 60 por ciento, el modelo es incapaz de reproducir satisfactoriamente las observaciones, estando la mayoría de los puntos fuera del intervalo  $\pm 20$  por ciento. También se observa que el modelo tiende a subestimar las mediciones de campo durante la fase de crecimiento de la planta, esto igualmente lo percibe Rankine *et al.*, (2015) en la calibración del modelo *AquaCrop* para el cultivo de camote para condiciones de Devon, en Jamaica. Además, en esa oportunidad, al igual que en esta, el modelo simula muy de cerca los valores observados en la fase de cobertura máxima.

Los ajustes obtenidos revelan la existencia de un alto coeficiente de determinación ( $R^2$  por encima de 0.80) entre los datos promedio simulados y observados para las dos variedades en estudio, donde además se cumplen los criterios de calibración establecidos previamente (tabla 31). Debemos señalar que para el caso del huambachero, el estadístico NRMSE consideró pobre al modelo por lo que fue necesario evaluarlo a partir de los 70 DDT, ya que, según lo anteriormente descrito, pasada esta fecha el modelo mejora su precisión.

**Tabla 31. Resultados de los estadísticos de la evolución del grado de cobertura simulado para  $T_0$  en las dos variedades de camote en estudio**

Variedad	n	$R^2$	NRMSE	EF	d
Huambachero	3	0.84	11.5*	0.61	0.93
Paramonguino	3	0.97	19.4	0.87	0.97

\* Valor considerado a partir de los 70 DDT

Una vez calibrado el CGC y CDC, se procedió a efectuar el mismo procedimiento para los coeficientes de estrés hídrico para expansión del dosel ( $K_{S_{exp,w}}$ ) y senescencia temprana ( $K_{S_{sen}}$ ), esta vez con los tres tratamientos deficitarios ( $T_a$ ,  $T_b$  y  $T_c$ ). Ambas variedades presentan su curva de  $K_{S_{exp,w}}$  muy similares, brindando al cultivo la característica de ser

moderadamente sensitivo al estrés por agua. Los umbrales para este coeficiente son 0.20 y 0.50 para el huambachero y 0.22 y 0.56 para el paramonguino. En contraste, la curva  $K_{Sen}$  tiene umbrales superiores muy diferentes para ambas variedades. Para el huambachero el límite de 0.58 le confiere la cualidad de ser moderadamente sensitivo al déficit hídrico, muy por el contrario, a la tolerancia al estrés por insuficiencia de agua que presenta el paramonguino (límite superior de 0.74).

En las figuras 28 y 29 se observa cómo afecta el déficit hídrico (tratamientos  $T_a$ ,  $T_b$  y  $T_c$ ) al desarrollo normal del CC simulado del camote en sus variedades huambachero y paramonguino, respectivamente. Además, se muestra el grado de ajuste del modelo con los CC recogidos en campo.

Obsérvese que se mantiene pobre el ajuste en la primera mitad del ciclo del camote y mejora a partir de los 70 DDT, debiendo integrar en el cálculo del CC un coeficiente de ajuste para cultivos de crecimiento acelerado de CC en sus primeros días. Por otro lado, la cobertura máxima sufre una disminución en las simulaciones realizadas bajo efectos de estrés hídrico, sin embargo, esta fase es la que mejor ajuste presenta entre lo simulado y lo observado en campo. Se puede apreciar una baja en el coeficiente de determinación  $R^2$  en ambas variedades, a excepción del tratamiento  $T_c$  para la variedad huambachero, esto último debido a los valores recogidos en campo para este tratamiento durante los 40 y 60 DDT, los cuales se ajustaron mejor al modelo. Así mismo, se puede observar que el modelo ya no solo presenta subestimaciones para CC menores al 60 por ciento, como se mostró en las simulaciones en condiciones óptimas de riego, sino que el modelo empieza a sobreestimar los valores observados en la fase de caída del CC, siendo más notorio en la variedad huambachero. Esto último también lo observa *Beletse et al., (2013)* al simular con *AquaCrop* la respuesta del rendimiento del camote de pulpa naranja “*Isondlo*” al estrés hídrico, en la Republica de Sudáfrica. De igual manera, *Montoya et al., (2016)* lo observó en simulaciones realizadas en *AquaCrop* para el cultivo de papa bajo tratamientos deficitarios, al sureste de España.

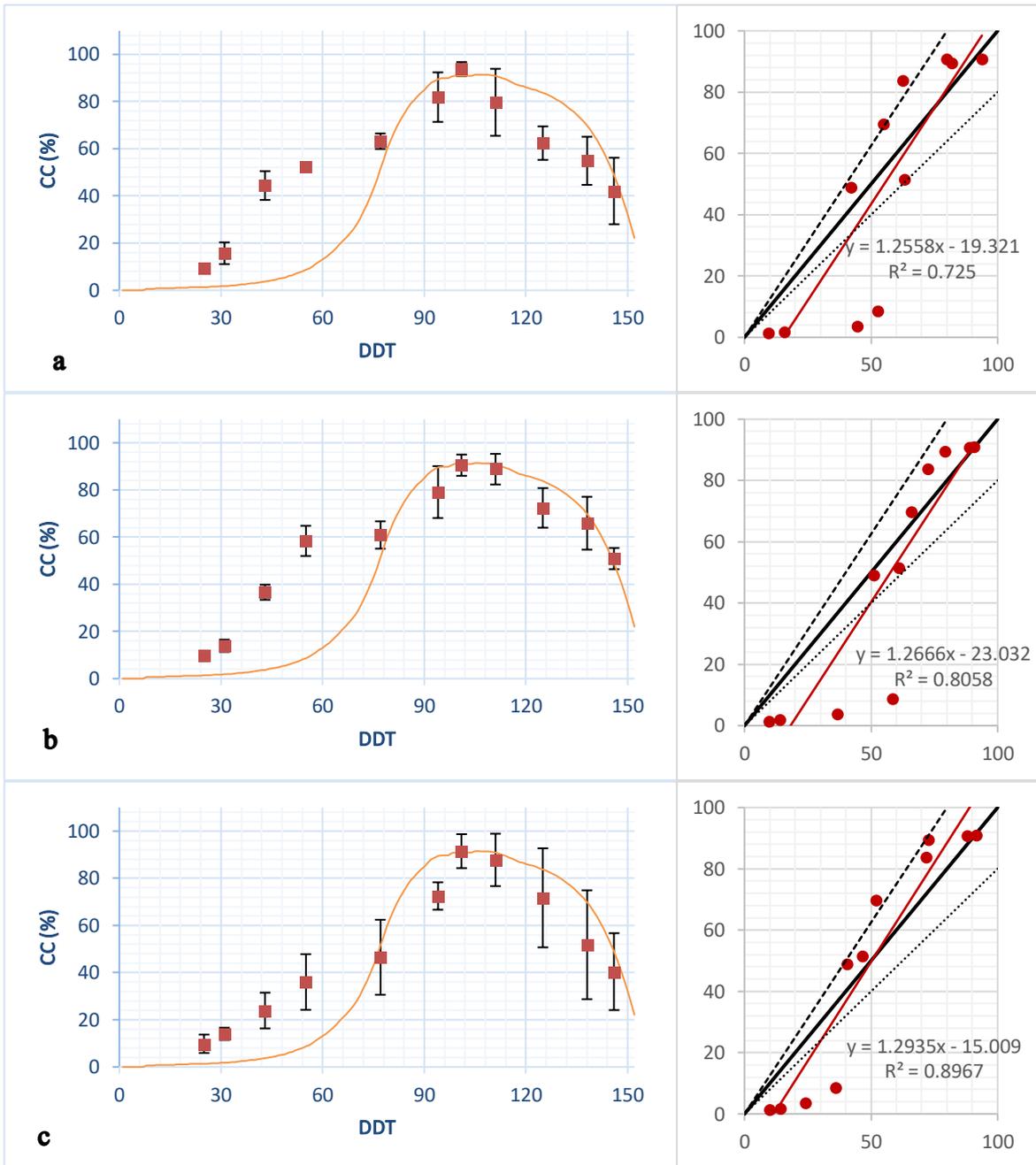
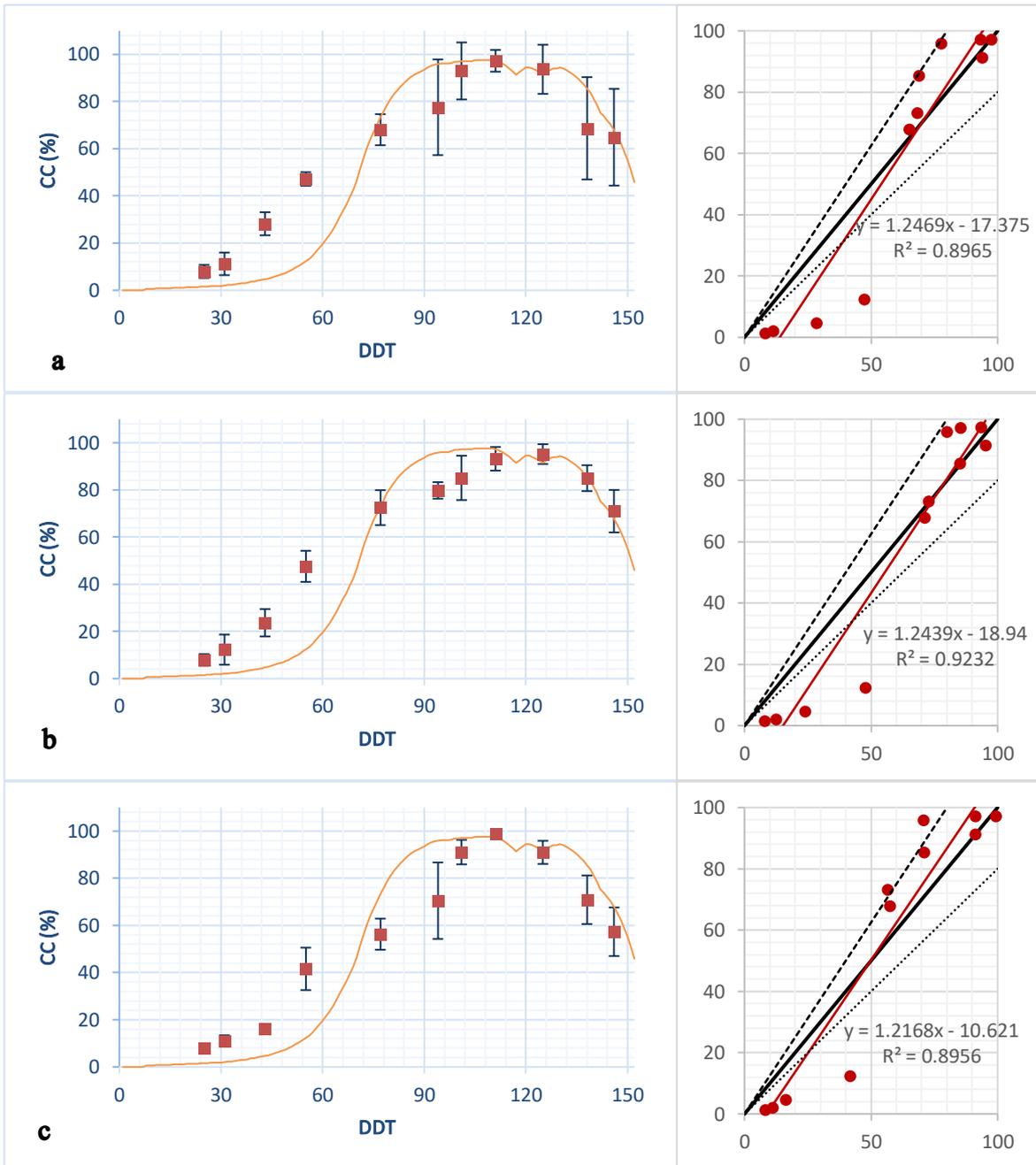


Figura 28. Evolución del CC simulado y observado, y su grado de relación en la variedad huambachero para los tratamientos a) T<sub>a</sub>, b) T<sub>b</sub> y c) T<sub>c</sub>



**Figura 29. Evolución del CC simulado y observado, y su grado de relación en la variedad paramunguino para los tratamientos a) T<sub>a</sub>, b) T<sub>b</sub> y c) T<sub>c</sub>**

Cabe señalar que las curvas CC simuladas en los tres tratamientos bajo riego deficitario no difieren en mucho. Esto se podría deber a que las láminas de riego total aplicadas a estos tratamientos variaron mínimamente, sin superar los 30 mm, esto a causa de la proximidad que tenían los inicios de los tratamientos de riego deficitario.

**Tabla 32. Resultados de los estadísticos de la evolución del grado de cobertura simulado para T<sub>a</sub>, T<sub>b</sub> y T<sub>c</sub> en las dos variedades de camote en estudio.**

	Variedad	n	R <sup>2</sup>	NRMSE	EF	d
T <sub>a</sub>	Huambachero	3	0.73	17.9*	0.29	0.88
	Paramonguino	3	0.90	25.5	0.75	0.95
T <sub>b</sub>	Huambachero	3	0.81	9.7*	0.45	0.90
	Paramonguino	3	0.92	23.1	0.80	0.96
T <sub>c</sub>	Huambachero	3	0.90	28.8	0.72	0.95
	Paramonguino	3	0.90	26.5	0.78	0.96

\* Valor considerado a partir de los 70 DDT.

Lo anterior se traduce en los buenos valores estadísticos que se extraen del análisis de precisión del modelo (tabla 32). Para los tres tratamientos, los valores estadísticos sugieren una buena agregación de los datos observados con los simulados, pero al igual que en el caso del tratamiento testigo, para la variedad huambachero, el NRMSE, supera los límites establecidos para considerar aceptable la simulación (en el caso de los tratamientos T<sub>a</sub> y T<sub>b</sub>). De igual manera, se procedió a realizar el análisis con los muestreos obtenidos a partir de los 70 DDT. El EF es moderado en todos los casos (valores mayores a 0.65) a excepción también del T<sub>a</sub> y T<sub>b</sub> en la variedad huambachero.

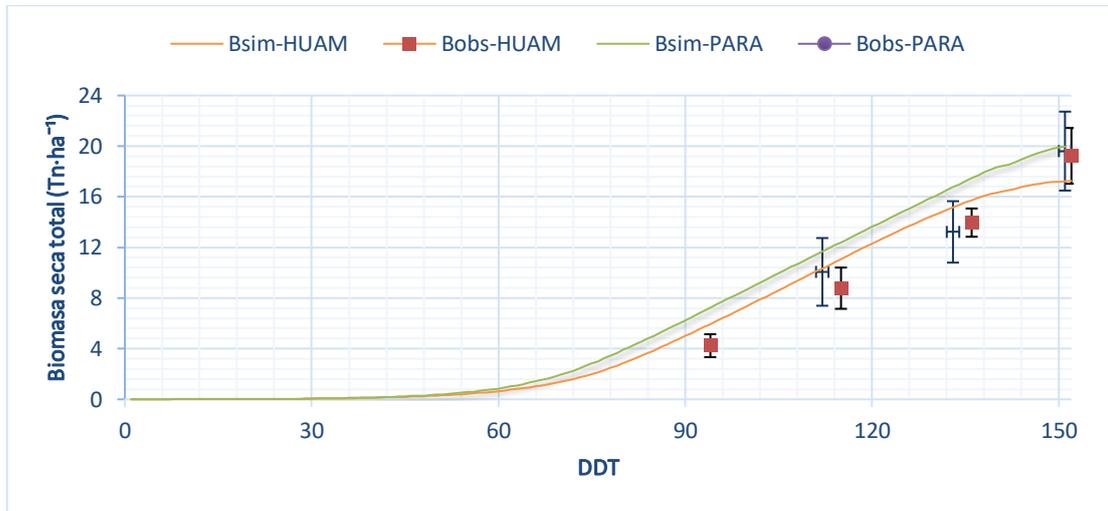
En todos los tratamientos (testigo y deficitarios), es la variedad paramonguino quien obtuvo los valores más altos en el EF, esto se debe a que es precisamente esta variedad la que prolongó más su etapa de floración (entre los 90 y 140 DDT), previo a la senescencia, según lo observado en campo y comparado en la simulación del modelo.

Así mismo, se ha percibido durante esta investigación, que el estrés hídrico es una variable que influye en el desarrollo de la cobertura verde del follaje, tal cual lo señalo La Rosa (2008), quien mencionó a la cobertura del follaje (CC) como la parte más afectada en una planta de camote al someterla a déficit hídrico.

### 4.3. BIOMOSA SECA

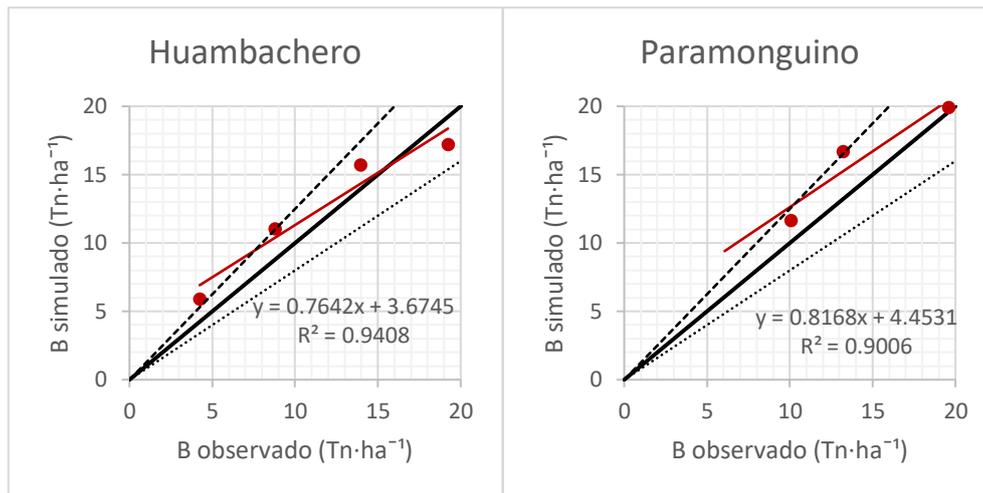
Una vez calibrado el desarrollo de cobertura verde del cultivo, se procedió a determinar la biomasa seca (B) que acumula la planta durante su ciclo de crecimiento. El modelo utiliza entre otras variables, la productividad del agua (WP). Este valor normalizado (WP\*) para condiciones del clima es un parámetro conservativo y se calibró a partir de las observaciones recogidas del tratamiento de referencia T<sub>0</sub>. La productividad de agua normalizada (WP\*) se ajustó mejor al modelo con un valor de 20 g·m<sup>-2</sup>, este coincide con el valor de ajuste obtenido

por Rankine *et al.*, (2015) y con los límites establecidos para cultivos de tipo C3 (Raes *et al.*, 2018).



**Figura 30. Evolución de la B simulada y observada para el tratamiento T<sub>0</sub> en las variedades huambachero y paramunguino**

La evolución de B simulada por *AquaCrop* para T<sub>0</sub> se comparó con la B observada en campo para ambas variedades (figura 30). Así, la principal observación aquí es la diferente acumulación de biomasa que presentan las variedades en los valores simulados. Es pasado los 90 DDT (con alrededor de 480 °C acumulados) cuando la diferencia entre curvas B se hace más notable, la variedad paramunguina empieza a aumentar en mayor proporción que el huambachero, llegando al final de la producción de biomasa, a diferenciarse en algo más de 2 tn·ha<sup>-1</sup>. Esta diferencia puede deberse a que es precisamente los 90 DDT la fecha en la cual la variedad paramunguina llega a la etapa de cobertura máxima de dosel verde y comienza a concentrar sus esfuerzos en sintetizar materia no foliar. Muy diferente a la situación del huambachero, quien recién a los 115 DDT llega a su CC<sub>x</sub>. Encima muy rápido empieza a decaer la cobertura de este último, mientras el primero mantiene su cobertura máxima hasta por 30 días. Para el caso de los valores B observados, ambas variedades llegan a tener al final de la cosecha valores muy próximos a 19 tn·ha<sup>-1</sup>. Es importante señalar que el modelo sobreestima los valores muestreados previos a la cosecha. Mientras que, para el final de la temporada, la simulación de una de las variedades (el huambachero) comienza a subestimar los datos observados. La variedad paramunguina, ajusta mejor la simulación al momento de la cosecha.



**Figura 31. Grado de relación de la B simulada y observada en T<sub>0</sub>.**

La determinación del WP\*, a través de la simulación del tratamiento de referencia T<sub>0</sub>, nos dejó un ajuste casi perfecto entre datos observados y simulados ( $R^2 > 0.9$ ), con pendientes cercanas a uno en ambas variedades, pero con valores muy altos de término independiente (figura 31). En general, para ambas variedades, la gran cercanía de valores predichos y observados en el T<sub>0</sub>, le confieren al modelo una buena capacidad para simular la B (10 – 20 por ciento el NRMSE) y, unos coeficientes de bondad de ajuste altos, por encima del 0.65 (tabla 33).

**Tabla 33. Resultados de los estadísticos de la evolución de la B simulada para el tratamiento T<sub>0</sub> en las dos variedades de camote en estudio**

Variedad	n	R <sup>2</sup>	NRMSE	EF	d
Huambachero	3-5	0.94	16.9	0.88	0.96
Paramonguino	3-5	0.90	15.7	0.68	0.92

El modelo calcula la biomasa a partir de la transpiración que efectúa la planta. Al someter al cultivo a estrés hídrico, *AquaCrop* activa el coeficiente de estrés por agua debido al cierre de estomas ( $K_{S_{sto}}$ ), afectando al cálculo de la transpiración y, en consecuencia, al de la materia seca acumulada (figura 9). Para la parametrización del  $K_{S_{sto}}$  se usaron los tratamientos T<sub>a</sub>, T<sub>b</sub> y T<sub>c</sub>. Las curvas  $K_{S_{sto}}$  tiene umbrales superiores muy diferentes para ambas variedades. El huambachero es moderadamente sensitivo al déficit hídrico con un valor límite de agotamiento de agua en zona radicular de 0.53. En contraste, al paramonguino se le fija un valor límite superior de 0.60 (moderadamente tolerante al estrés por agua).

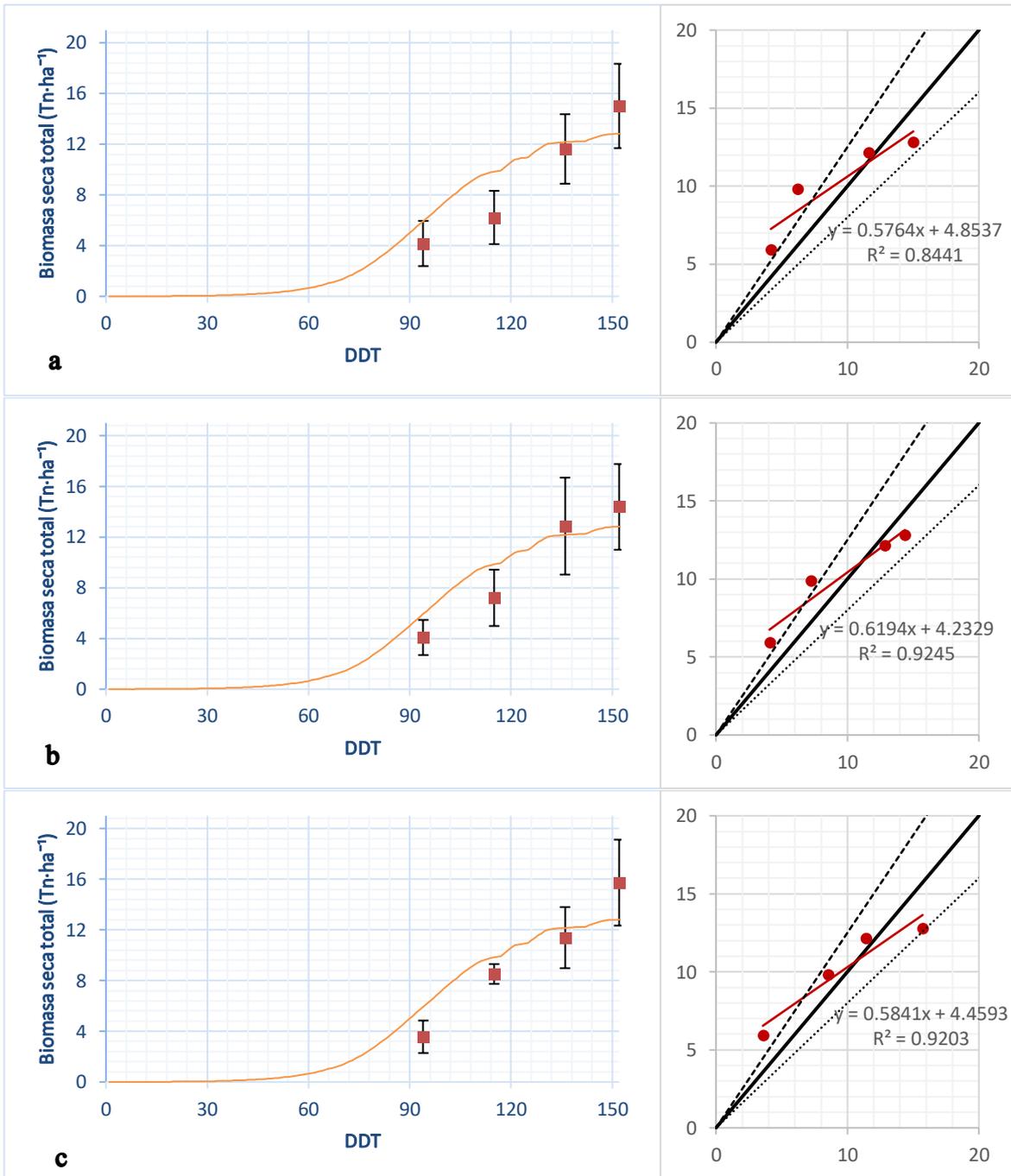
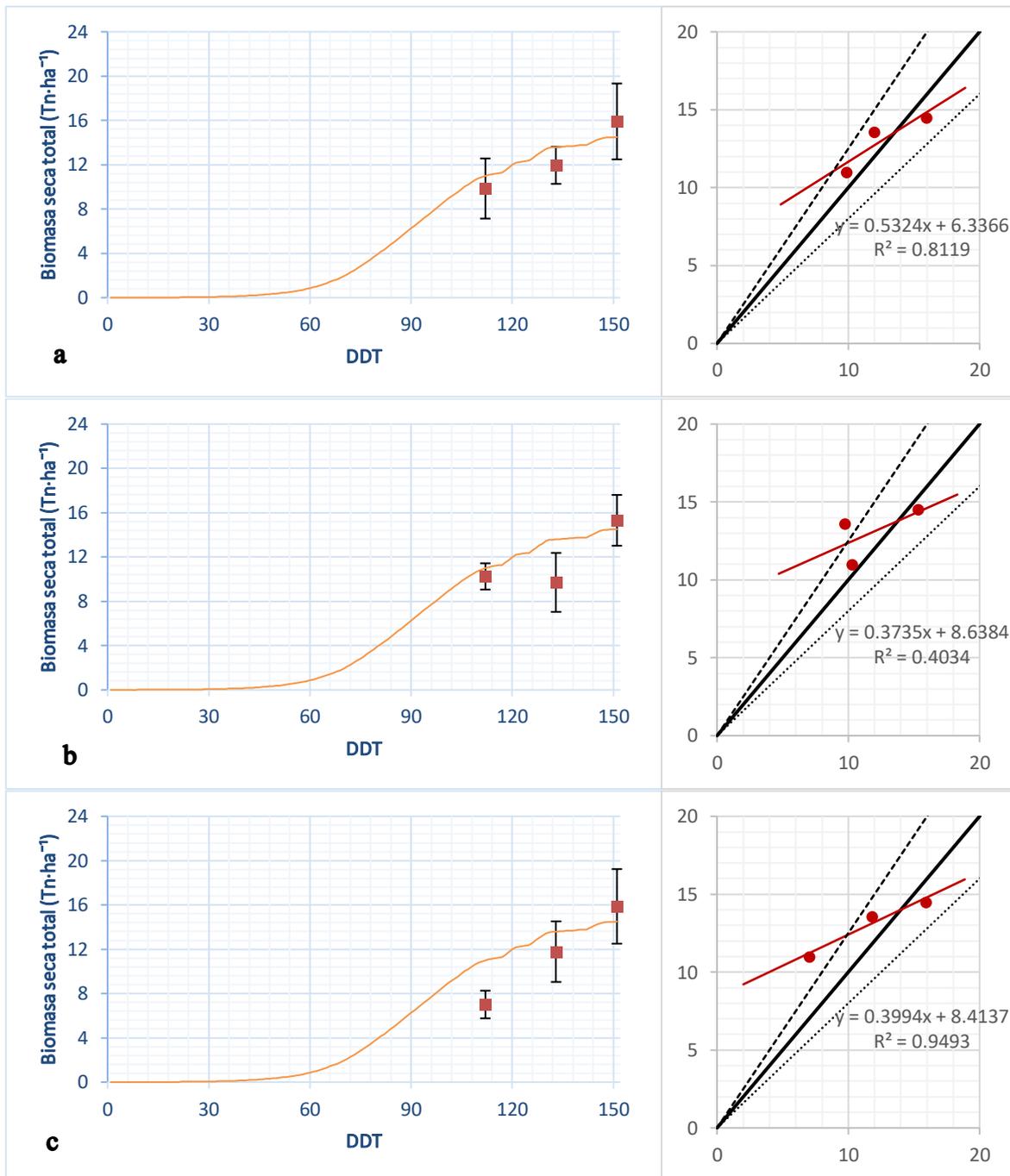


Figura 32. Evolución de la B simulada y observada, y su grado de relación en la variedad huambachero para los tratamientos a) T<sub>a</sub>, b) T<sub>b</sub> y c) T<sub>c</sub>



**Figura 33. Evolución de la B simulada y observada, y su grado de relación en la variedad paramunguina para los tratamientos a) T<sub>a</sub>, b) T<sub>b</sub> y c) T<sub>c</sub>**

Las figuras 32 y 33 muestran que el modelo tiende a sobreestimar el cálculo de B durante el desarrollo de este, sin embargo, la producción final de B es prácticamente exacta (se valió de esto para dar por calibrado, a un primer nivel, el parámetro B) en la variedad paramunguina, y subestimada en la otra variedad (huambachero) hasta en un 25 por ciento, respectivamente. Se mantiene la diferenciación (más notoria a partir de los 90 DDT) en la evolución de B debido al cultivar simulado, el mismo que fue observado en la simulación del T<sub>0</sub>. Además, es alrededor de estos 90 DDT cuando las curvas de B simuladas se ven

reducidas por el déficit de agua, esto se podría deber a que el cultivo se concentra en producir mayor cantidad de raíces adventicias, las cuales no aportan al cálculo de B en *AquaCrop*, como lo describen Lakshmi *et al.*, (2009) al estudiar las respuestas a la sequía del cultivo de soja. La producción final de B simulada se llega a reducir hasta en  $5 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

En las figuras 32 y 33 también se puede observar el grado de relación entre valores observados y simulados, con un ajuste satisfactorio de  $R^2 > 0.8$ , en el caso de ambas variedades y en los tres tratamientos en déficit, a excepción del tratamiento  $T_b$  en la variedad paramonguina ( $R^2=0.4$ ), debido al valor muy bajo muestreado en este tratamiento a los 133 DDT de la experimentación. Se puede apreciar que el modelo es más certero con la simulación mientras más cerca se encuentre del momento de la cosecha, sin embargo, previo a eso el modelo tiende a sobreestimar valores (puntos fuera del intervalo  $\pm 20$  por ciento), sobre todo para valores menores a  $8 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  en el caso del huambachero y  $10 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$  en la paramonguina. Nazeer y Ali (2012) observaron lo mismo al simular en *AquaCrop*, el cultivo de cebolla bajo riego deficitario en Pakistán; ahí ellos concluyeron que mientras más se acercaban al tiempo de cosecha, más preciso era el simulado de B.

Los estadísticos para las simulaciones de los tratamientos en estrés hídrico no fueron tan buenos como en el caso del  $T_o$ . Sin embargo, los índices estadísticos obtenidos (tabla 34), para los tratamientos  $T_a$ ,  $T_b$  y  $T_c$ , mostraron un coeficiente NRMSE alrededor de los 20 (entre buenos y aceptables). Este último indica que las simulaciones que consideran el déficit hídrico pierden el grado de bueno que tuvo con  $T_o$  y que ahora solo es aceptable su condición (20 – 30 por ciento), a excepción del tratamiento  $T_b$  en ambas variedades y  $T_a$  en paramonguino, que se mantienen buena su condición. Para el caso de todos los tratamientos, el índice de Nash-Sutcliffe (EF) se ha reducido considerablemente, pero no ha excedido los criterios mínimos establecidos previamente; por otro lado, en el caso de los tratamientos  $T_b$  y  $T_c$ , este índice resulto elevado en el caso de la variedad huambachero en comparación con variedad paramonguino que presenta valores bajos de este índice, pero no negativos. Previamente, se corrieron simulaciones que arrojaban valores más aceptables, pero, lamentablemente con valores negativos en la calibración del parámetro rendimiento seco (Y). Por lo tanto, los valores bajos, pero no negativos mostrados en la tabla 34 fueron aceptados en la validación. Por último, para el caso del coeficiente de Willmott (d) aún se mantiene alto (por encima de 0.70) por lo que las simulaciones son consideradas muy buenas.

**Tabla 34. Resultados de los estadísticos de la evolución de la B simulada para T<sub>a</sub>, T<sub>b</sub> y T<sub>c</sub> en las dos variedades de camote en estudio.**

	Variedad	n	R <sup>2</sup>	NRMSE	EF	d
T <sub>a</sub>	Huambachero	3-5	0.84	24.9	0.71	0.89
	Paramonguino	3-5	0.81	11.3	0.68	0.88
T <sub>b</sub>	Huambachero	3-5	0.92	18.9	0.81	0.93
	Paramonguino	3-5	0.40	19.9	0.15	0.79
T <sub>c</sub>	Huambachero	3-5	0.92	20.7	0.79	0.92
	Paramonguino	3-5	0.95	22.9	0.46	0.75

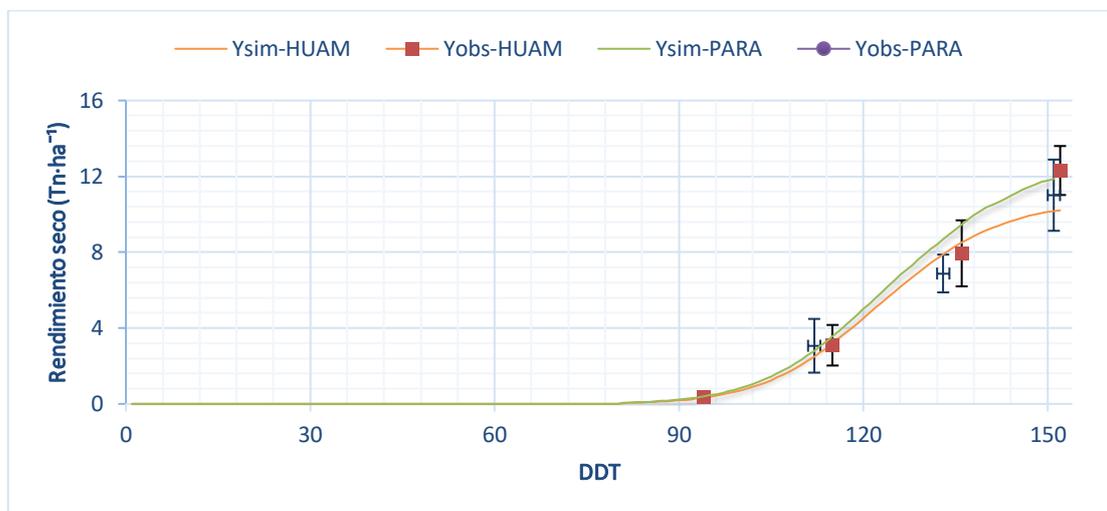
Para terminar, se puede observar que en situaciones optimas (figura 30), la acumulación de B simulado se comienza a ralentizar en el entorno de los 136 DDT (cerca a los 980 °C acumulados), siendo esta secuela más apreciable en la variedad huambachero. Pero, ante situaciones de estrés hídrico, este efecto se presenta con mayor prontitud y, es pasado aproximadamente los 106 DDT (casi 650 °C acumulados) cuando la curva de acumulación B se vuelve mucho más suave (de menor pendiente) donde los datos de B muestreados de campo se equiparán, como se señaló previamente, con mayor exactitud en la variedad paramonguina. También cabe señalar que es precisamente esta última etapa del desarrollo de la B donde se observan los valores muestreados con mayor dispersión, es decir, con desviaciones estándar muy altas en comparación con los valores obtenidos en la primera etapa de acumulación de B.

#### 4.4. RENDIMIENTO SECO

El modelo *AquaCrop* determina en periodos diarios la materia seca de los productos cosechables o rendimiento seco (Y), aplicando sobre la B generada cada día el índice de cosecha de referencia (HI<sub>o</sub>), tal cual se puede observar en la figura 11. Para esta parametrización se ajustó este coeficiente HI<sub>o</sub>, tras sucesivas simulaciones del tratamiento testigo (T<sub>o</sub>). Mediante prueba y error se ajustó el HI<sub>o</sub> en 0.60, estando este valor por encima del 0.55 que determinaron Rankine *et al.*, (2015) para las variedades de camote *Ganja*, *Uplifta* y *Yellow Belly*; y por debajo del valor ajustado de 0.90 calculado por Beletse *et al.*, (2013).

Durante el proceso de calibración, la variable HI<sub>o</sub> fue modificada a partir de los valores observados en campo del tratamiento T<sub>o</sub>. El HI<sub>o</sub> del camote obtenido en campo se encuentra en un intervalo muy disperso que va de 0.49 a 0.79 (tabla 28), correspondiéndose de buena forma con el intervalo 0.40 y 0.77 señalado por Bhagsari y Ashley (1990). Como ya se

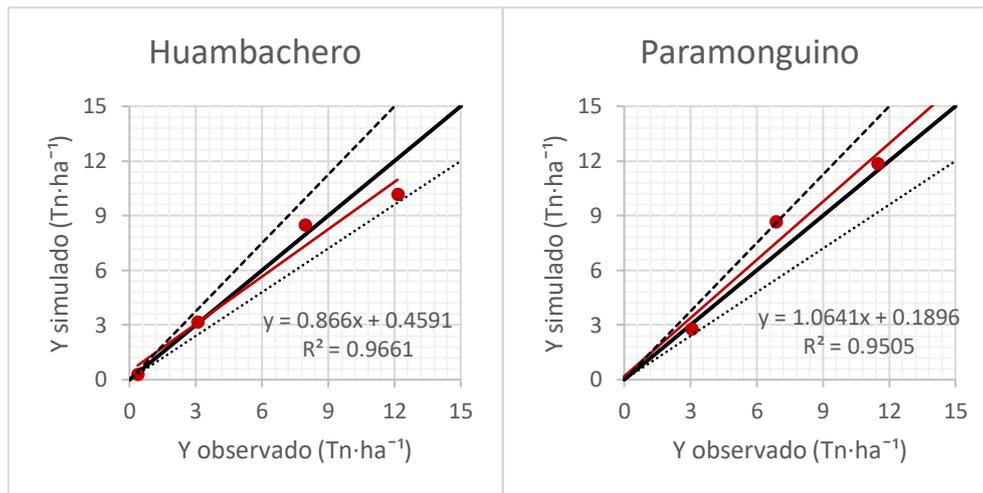
mencionó el valor calibrado del  $HI_o$ , a partir de simulaciones continuas de prueba y error, quedó en 0.60.



**Figura 34. Evolución del Y simulado y observado para el tratamiento  $T_o$  en las variedades huambachero y paramunguino**

En la figura 34 se observa que el modelo simula para variedades, valores muy cercanos a los observados en campo. Sin embargo, hay que notar que el modelo subestima (en 18 por ciento) el rendimiento observado en la variedad huambachero durante la cosecha; mientras que la variedad paramunguina sobreestima solo los valores observados durante el término de la fase de máxima cobertura del cultivo (de 120 a 140 DDT), fuera de ese intervalo el modelo ajuste con mucho acierto los valores muestreados. También se observa que la producción final de Y es mayor en la variedad huambachero (cerca a las  $12 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) que en el paramunguino ( $11 \text{ tn}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

En la figura 35, se puede observar los coeficientes de determinación bien elevados ( $R^2 > 0.95$ ), sin puntos que están fuera del límite del  $\pm 20$  por ciento, pero con cada variedad comportándose de una manera distinta. Santhosh y Somasundaram (2008) evaluaron el modelo SPOTCOMS (una mejora del modelo MADHURAM, modelo enfatizado al camote) en tres variedades de camote bajo condiciones óptimas, resultando una buena agregación de los valores observados y simulados (valores altos de  $R^2$ ); ahí casi todos los valores simulados sobreestiman las observaciones de campo, pero en uno de los cultivares, existe subestimación en la última etapa de desarrollo del cultivo, tal cual lo podemos observar en nuestro caso en una de las variedades.



**Figura 35. Grado de relación del Y simulado y observado en T<sub>0</sub>.**

El proceso de calibración del parámetro Y con el tratamiento en condiciones óptimas (T<sub>0</sub>) arroja valores muy buenos (tabla 35). El NRMSE da la consideración de bueno al modelo, mientras que los índices de ajuste de Nash y Willmott están por encima del 0.90. Es importante señalar aquí que estos datos estadísticos muy buenos obtenidos fueron debido a las constantes corridas que se realizaron con el modelo, tratando de balancear optimidad. Se pudieron obtener valores estadísticos de Y mejores, pero mermaban el rendimiento de la simulación de la variable B.

**Tabla 35. Resultados de los estadísticos de la evolución del Y simulado para el tratamiento T<sub>0</sub> en las dos variedades de camote en estudio**

Variedad	n	R <sup>2</sup>	NRMSE	EF	d
Huambachero	3-5	0.97	17.1	0.95	0.99
Paramonguino	3-5	0.95	15.1	0.90	0.98

De igual manera, el modelo permite adecuar el rendimiento de los cultivares ante situación de estrés hídrico mediante las variables *a* y *b* (no son las únicas, existen otras pero que no se toman en consideración en este trabajo por falta de información), las cuales definen el efecto del estrés hídrico sobre HI<sub>0</sub>, siendo estos efectos positivo y negativo, respectivamente. Estos se dan durante la formación del rendimiento, la variable *a* afectando la expansión de la cubierta verde y la variable *b* ante el cierre de estomas. Para la calibración de estas variables se tomaron en cuenta las observaciones tomadas de los tratamientos T<sub>a</sub>, T<sub>b</sub> y T<sub>c</sub>. El parámetro *a* se fijó en 4 para ambas variedades, lo cual nos indica que el efecto de este parámetro sobre el índice de cosecha de referencia es bajo. El efecto sigue siendo bajo para cada variedad al referirnos al parámetro negativo *b*, sin embargo, en este caso cada variedad tomo un valor distinto, 10 para el huambachero y 8 el paramonguino. El nivel de repercusión bajo que tiene estos parámetros coincide con los obtenidos por Rankine *et al.*, (2015).

Así como ocurrió en la simulación del  $T_o$ , las simulaciones del  $Y$  para los tratamientos bajo estrés hídrico siguen dando valores muy cercanos a los observados en campo, sin olvidar las particularidades de cada variedad durante algunas etapas (figuras 36 y 37).

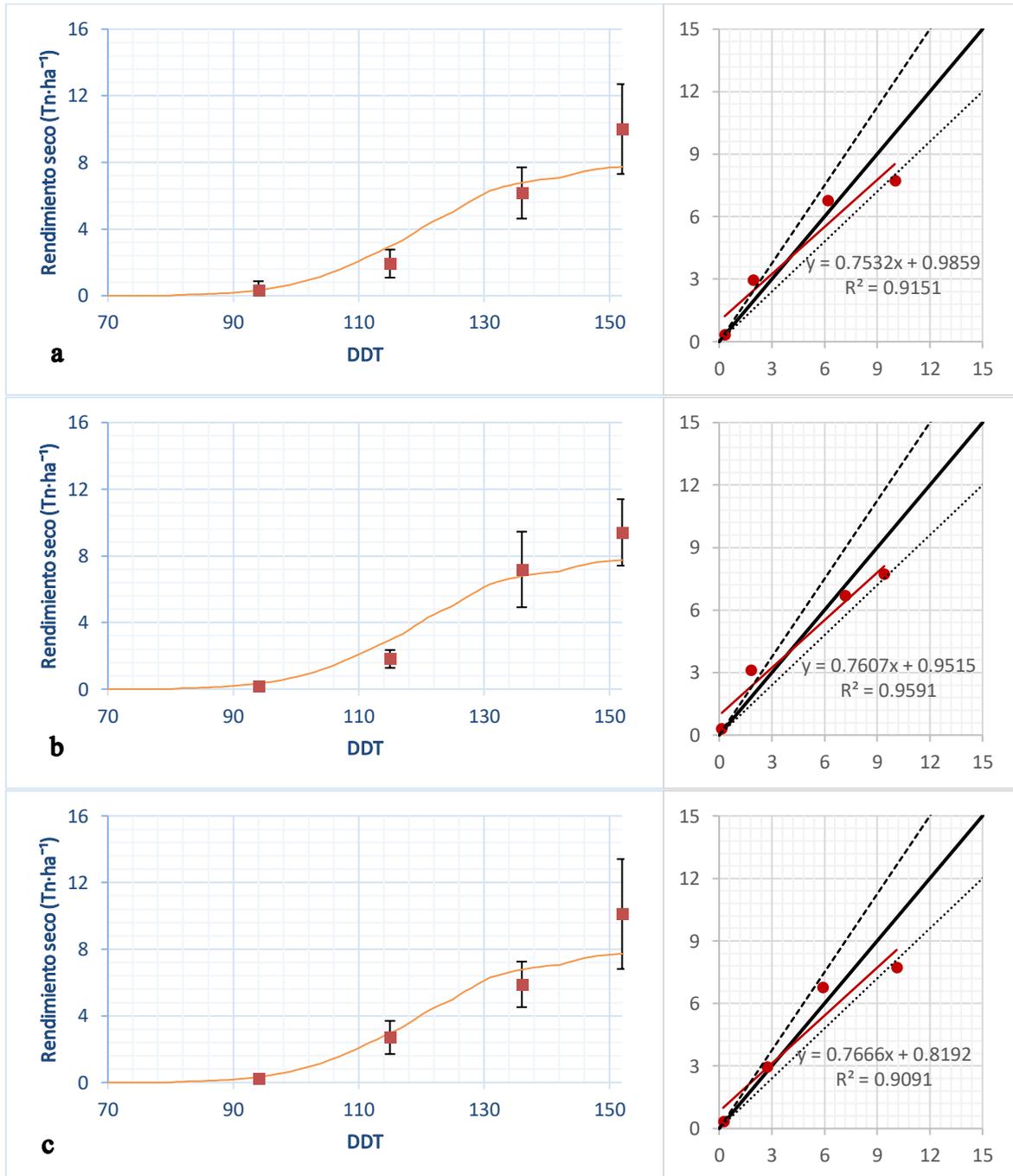
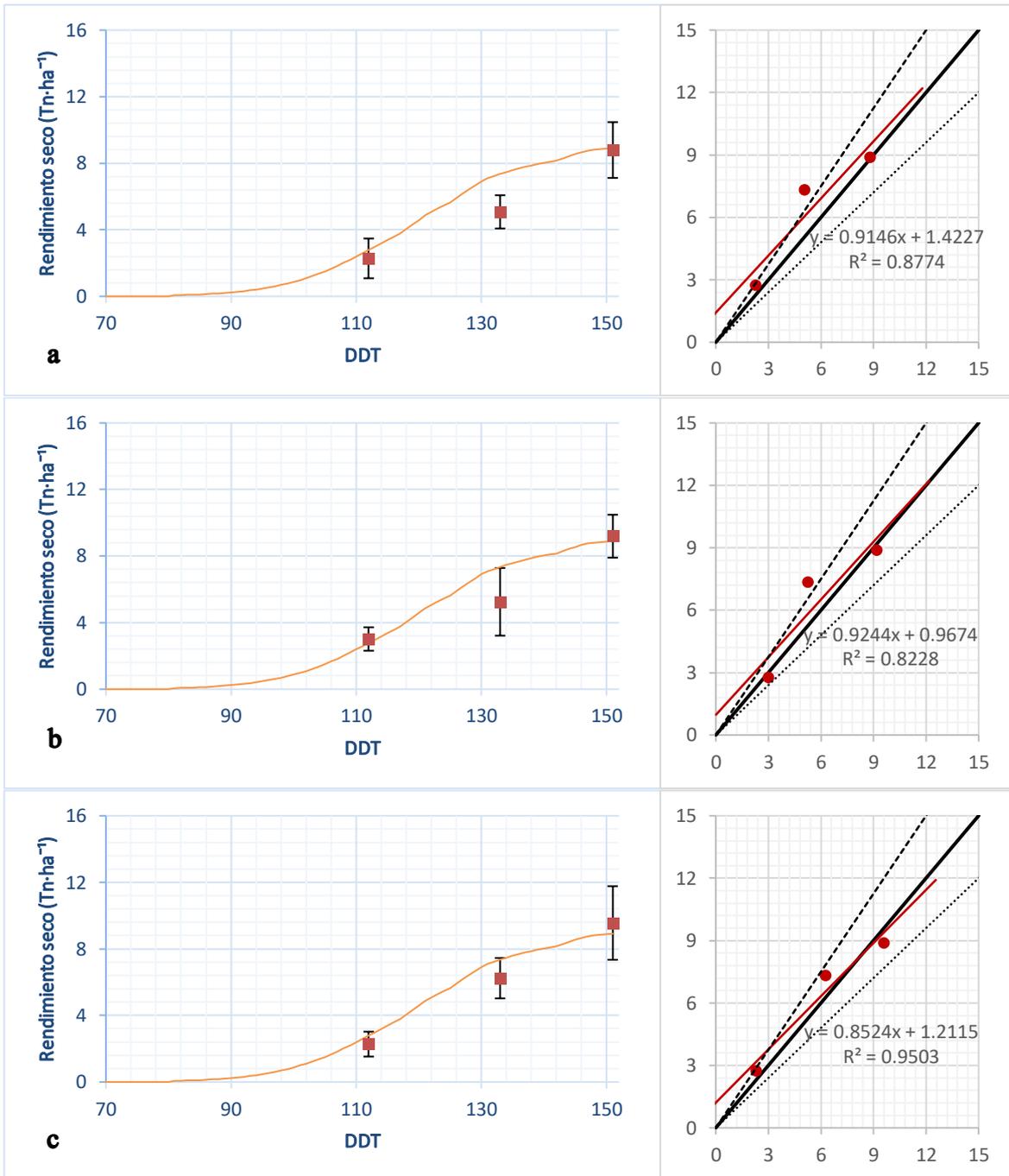


Figura 36. Evolución del  $Y$  simulado y observado, y su grado de relación en la variedad huambachero para los tratamientos a)  $T_a$ , b)  $T_b$  y c)  $T_c$



**Figura 37. Evolución del Y simulado y observado, y su grado de relación en la variedad paramunguina para los tratamientos a) T<sub>a</sub>, b) T<sub>b</sub> y c) T<sub>c</sub>**

Para el huambachero, las simulaciones durante la etapa de cosecha siguen subestimando los valores observados, pero ahora hasta en un 25 por ciento. En el paramunguino, por su lado, sigue habiendo una sobreestimación durante la finalización de la etapa de máxima cobertura en cada tratamiento, solo que ahora hasta en un 45 por ciento. Los bigotes que representan la desviación estándar muestran que previo a la cosecha no hay mucha variabilidad, la cual, si se hace presente durante el final del periodo vegetativo, siendo la variedad huambachero, la mayor perjudicada por esto. También se puede observar el grado de relación entre valores

observados y simulados por el modelo, siendo este considerado satisfactorio ( $R^2 > 0.80$ ), con uno o ni un solo punto fuera del intervalo  $\pm 20$  por ciento. Hay que señalar el caso del tratamiento  $T_b$  de la variedad paramonguino, donde el valor observado a los 133 DDT se encuentra muy sobreestimado (en 40 por ciento), lo cual reduce el  $R^2$ , a pesar de contar con otros dos puntos observados con ajuste casi perfecto a la curva simulada.

Hasta este punto se puede observar que los errores en la estimación son relativamente bajos, puesto que el crecimiento del rendimiento seco en *AquaCrop* se realiza al mismo ritmo de lo observado en el experimento, siendo la variedad huambachero más certera en el ajuste de valores. Así mismo, se puede observar en las **figuras 36 y 37** que tras la rápida acumulación de Y se produce una fase de ralentización a causa del ya comentado comportamiento del CC en su fase máxima y de senescencia.

A pesar de las subestimaciones y sobreestimaciones en las que incurre el modelo, este no llega a exceder los límites establecidos por los índices estadísticos (tabla 36). Incluso, de las tres variables ya analizadas, esta es sin duda la que mejores resultados tiene en lo que concierne a los valores de eficiencia del modelo (EF y d arriba de 0.80), a excepción de los tratamientos  $T_a$  y  $T_b$  de la variedad paramonguino (EF entre 0.75 y 0.80). Además, puede considerarse como aceptables las simulaciones (valores de NRMSE entre 20 y 30) y bueno solo para el tratamiento  $T_c$  en la variedad paramonguino (NRMSE entre 10 y 20).

**Tabla 36. Resultados de los estadísticos de la evolución del Y simulado para  $T_a$ ,  $T_b$  y  $T_c$  en las dos variedades de camote en estudio.**

	Variedad	n	$R^2$	NRMSE	EF	d
$T_a$	Huambachero	3-5	0.92	27.9	0.88	0.96
	Paramonguino	3-5	0.88	25.0	0.75	0.94
$T_b$	Huambachero	3-5	0.96	22.3	0.93	0.98
	Paramonguino	3-5	0.82	21.2	0.77	0.94
$T_c$	Huambachero	3-5	0.91	27.0	0.88	0.96
	Paramonguino	3-5	0.95	13.2	0.93	0.98

Los resultados muestran un alto índice de correlación entre valores observados y simulados en el modelo *AquaCrop*, referidos a la acumulación de Y. Sin embargo, es necesario señalar que las corridas del modelo se ejecutaron en condiciones óptimas de temperatura para el camote. En el caso de la papa, autores como Griffin *et al.*, (1995), tuvieron en cuenta la influencia directa que tienen las temperaturas extremas (en este caso, los puntos altos de  $T^\circ$ ) en la acumulación de materia seca en los tubérculos, por lo cual introdujeron un factor extra en el cálculo de este, en su modelo desarrollado *SUBSTOR-Potato*. Para la batata podría

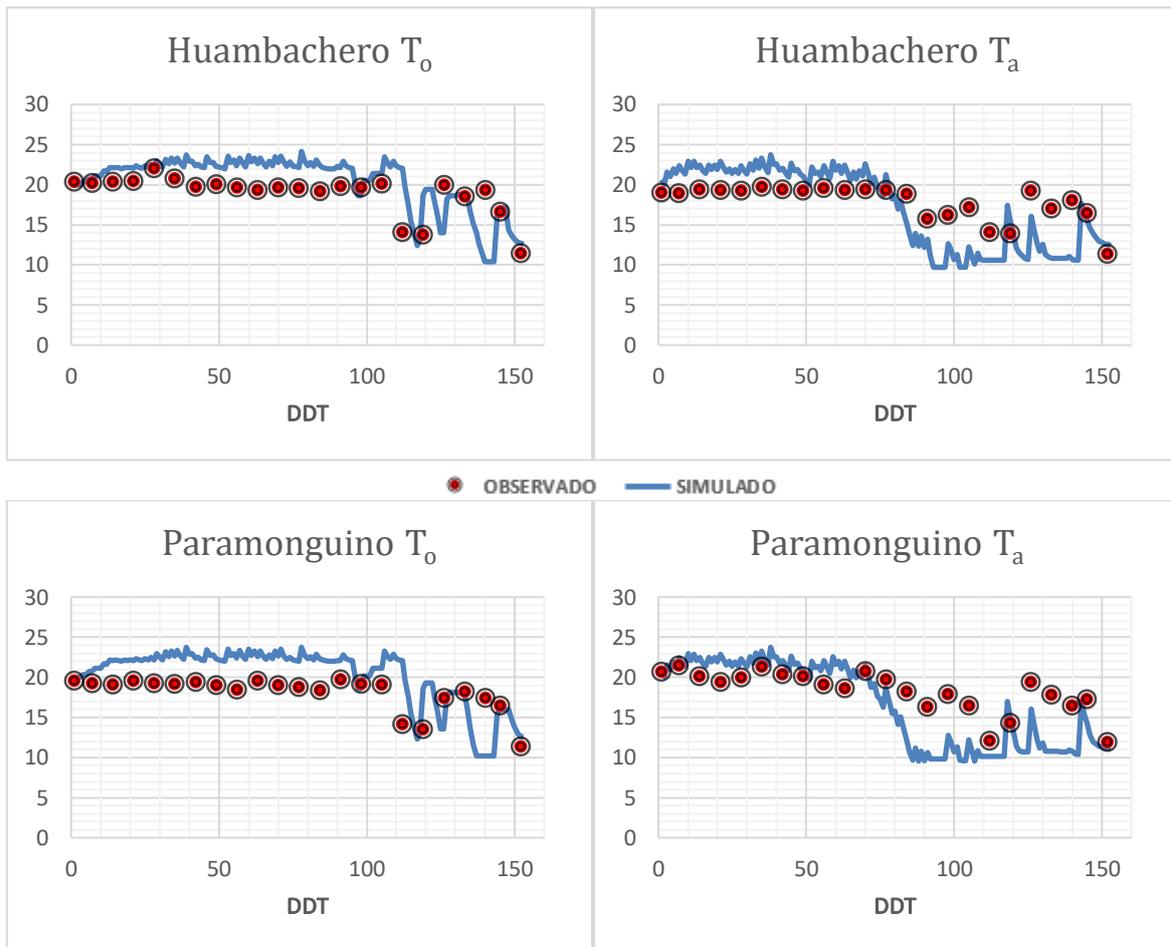
resultar de igual manera, por lo que es recomendable realizar estudios que sometan al cultivo a estas condiciones de estrés por temperatura y ver cómo es que se comporta el modelo *AquaCrop* en el cálculo del rendimiento seco, y a partir de esto saber si es necesario un factor nuevo que simule dicha alteración, o si los que ya están embebidos en el modelo son suficientes. Tener en cuenta, que Gajanayake *et al.*, (2015) señalaron que el rendimiento seco aumenta con normalidad hasta los 35 °C, y que por encima de este valor la disminución de esta variable sería de hasta 90 por ciento.

#### **4.5. HUMEDAD EN EL SUELO**

El modelo *AquaCrop* proporciona valores diarios de contenido de humedad en el suelo en las diferentes capas en las que se divide el perfil, a intervalos de 10 centímetros hasta la máxima profundidad del suelo descrito como parámetro de entrada en el modelo. Se pensó en usar los datos recogidos del *data logger* Em50G, el cual almacenaba información de agua en el suelo a 15 y 30 centímetros de profundidad. Sin embargo, esta data se perdió inadvertidamente, por lo que solo se tuvo que usar los datos muestrales tomados en campo con ayuda de un barreno.

La humedad volumétrica se calculaba con el contenido de humedad de las muestras de suelo extraídas a 30 centímetros de profundidad (profundidad radicular con mayor porcentaje de raíces absorbentes) y la densidad del suelo. Esto permitió comparar el contenido de agua *in situ* con la simulada por el modelo. Otros autores han realizado trabajos con el modelo *AquaCrop*, donde analizan la evolución de agua en el suelo y lo comparan con el contenido total de agua en el suelo simulado a una profundidad de 30 centímetros (Montoya *et al.*, 2016; Tórnes *et al.*, 2016).

La calibración de este parámetro se llevó a cabo en cada fase previa a esta (simulación de CC, B e Y). Como el monitoreo de agua en el suelo se mostró muy uniforme en todos los tratamientos (figura 24), bastó con comparar solo los tratamientos T<sub>o</sub> y T<sub>a</sub>, ya que T<sub>b</sub> y T<sub>c</sub> arrojaron valores simulados iguales a T<sub>a</sub>. La uniformidad mencionada se puede deber al uso de goteros de caudal 3.75 litros por hora, con separación de los mismos cada 0.30 metros. El fabricante recomienda que para esa separación de goteros es recomendable usar aquellos que tengan caudales menores a 2 litros por hora, para evitar la sobresaturación húmeda del suelo, lo que al parecer afectó al experimento en los dos primeros tercios de la temporada.

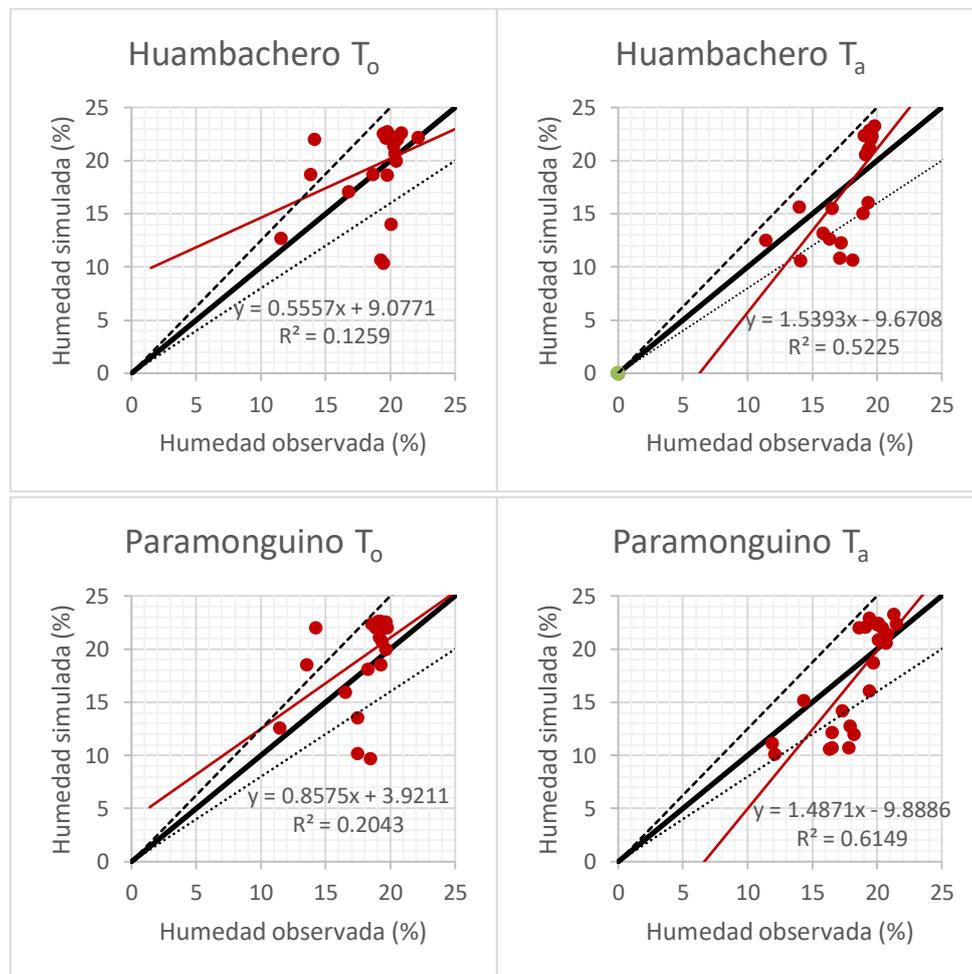


**Figura 38. Contenido total de agua medido y simulado hasta 0.30 m de profundidad**

La figura 38 recoge la evolución del contenido de agua total en el suelo medido en campo hasta los 0.30 m y es comparado con lo obtenido en la simulación con *AquaCrop*. Uno de los rasgos más resaltante es que para las condiciones óptimas de riego (tratamiento T<sub>0</sub>) el modelo crea una curva muy similar a los valores observados durante toda la campaña, mientras que para un escenario de déficit hídrico (tratamiento T<sub>a</sub>) el modelo solo lo hace para la primera mitad de la temporada. A pesar de la similitud, el contenido de humedad simulado sobreestima (de forma leve) los valores observados hasta los 110 DDT (685 °C acumulados aproximadamente) para el tratamiento testigo (T<sub>0</sub>). Para el T<sub>a</sub> el modelo sobreestima solo hasta los 75 DDT (alrededor de 365 °C acumulados).

Dentro de los datos observados se observa que hay una disminución considerable en los valores promedio entre los 105 y 126 DDT. Esto se debió al fenómeno El Niño, el cual mermó la oferta de agua disponible en los canales de riego del recinto universitario. Se pudo regar solo con el agua disponible lo que no llegó a mantener la condición de capacidad de campo del suelo, como se planificó en un comienzo.

Las estimaciones del contenido de agua por parte del modelo son mucho más similares a las lecturas del tratamiento con déficit hídrico ( $T_a$ ), ofreciendo mayor correspondencia en la distribución de la nube de puntos entre lo simulado y lo observado (figura 39). Lo anterior se tradujo en valores por encima de 0.50 de coeficiente de determinación para el caso del tratamiento deficitario ( $T_a$ ) en cada uno de las variedades. Así mismo, el valor de  $R^2$  para el tratamiento testigo fue de 0.13 para el huambachero y 0.20 el paramanguino. Estos valores bajos se deben a la existencia de 4 o 5 puntos que se alejan considerablemente de la nube de puntos obtenida.



**Figura 39. Grado de relación entre contenido total de agua medido y simulado hasta 0.30 m de profundidad**

**Tabla 37. Resultados de los estadísticos de la evolución del contenido de humedad en el suelo simulada para  $T_0$  y  $T_a$  para dos variedades de camote**

	Variedad	$R^2$	NRMSE	EF	d
$T_0$	Huambachero	0.13	33.9	0.30	0.60
	Paramanguino	0.20	36.8	0.71	0.61
$T_a$	Huambachero	0.52	26.5	0.38	0.74
	Paramanguino	0.61	25.7	0.76	0.77

Los estadísticos de los datos de humedad acumulada en el suelo a 0.30 metros (tabla 37) consideran aceptable al modelo para el caso del T<sub>a</sub>, considerando el NRMSE, mientras que los valores por encima de 30 (en el caso del T<sub>o</sub>) define al modelo como malo o pobre para esas condiciones. En cuanto a la agregación del modelo se considera también aceptable con valores de EF e índice de Willmott moderados (por encima de 0.60), aunque para el caso del huambachero valores por debajo de 0.40 en EF deben ser tomadas a consideración. Estas características no tan buenas para el modelo se deben, posiblemente, a la heterogeneidad del suelo e incluso a la precisión del modelo en el cálculo del balance húmedo del suelo a diferentes profundidades (Raes *et al.*, 2018).

#### **4.6. DATOS Y PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL CULTIVO DE CAMOTE CALIBRADOS CON AQUACROP**

A partir de todo el proceso de calibración del modelo, se determinaron los valores de todos los parámetros conservativos y no conservativos en el módulo de cultivo para la simulación de dos variedades de camote en un clima árido bajo riego por goteo en la UNALM. El detalle de estos valores y su respectiva comparación con los resultados obtenidos por Rankine *et al.*, (2015) se presentan en la tabla 38.

Se observa que, de todos los parámetros calibrados, tres de ellos presentan características diferentes para cada variedad de camote evaluado en este estudio. Por un lado, los dos coeficientes de crecimiento de la cobertura de dosel del cultivo. Los parámetros calibrados CGC y CDC simulan, para la variedad huambachero, una expansión del dosel lenta y una decadencia del dosel muy lenta, respectivamente; mientras, para el paramonguino, tanto expansión como decadencia del dosel de manera moderada. Por otro lado, el umbral superior del coeficiente de humedad del suelo para senescencia temprana (K<sub>s<sub>sen</sub></sub>) calibrado le concede el carácter de ser moderadamente sensitivo al estrés hídrico al huambachero y tolerante al déficit de agua en el caso del paramonguino.

Con estos resultados se puede inferir que ambas variedades en estudio son dos clases varietales distintas por poseer tres parámetros conservativos diferentes. Incluso si los comparamos con el estudio realizado por Rankine *et al.*, (2015), podemos decir que las tres variedades estudiadas por estos últimos, constituyen una clase varietal distinta a las dos variedades que fueron objeto de esta investigación.

**Tabla 38. Resultados de la parametrización del cultivo de camote en La Molina, Lima, para AquaCrop**

	<b>Parámetro</b>	<b>R*</b>	<b>H**</b>	<b>P***</b>	<b>Unidad</b>
C	Temperatura base ( $T_b$ )	15	15	15	°C
C	Temperatura superior ( $T_s$ )	35	35	35	°C
NC	Cobertura al 90% de emergencia ( $CC_o$ )	0.9	0.63	0.63	%
C	Coefficiente de crecimiento de dosel (CGC)	0.0097	0.0125	0.014	°C·dia <sup>-1</sup>
NC	Cobertura máxima del dosel ( $CC_x$ )	94	98	100	%
C	Coefficiente de disminución del dosel (CDC)	0.008	0.0071	0.0122	°C·dia <sup>-1</sup>
C	Coefficiente de cultivo para la transpiración en cobertura máxima ( $K_{C_{tr,x}}$ )	1.1	1.15	1.15	-
C	Índice de cosecha de referencia ( $HI_o$ )	55	60	60	%
C	Productividad del agua normalizada ( $WP^*$ )	20	20	20	g·m <sup>-2</sup>
C	Coefficiente de agotamiento de humedad de suelo				
	Umbral superior para expansión del dosel	0.26	0.2	0.22	
	Umbral inferior para expansión del dosel	0.66	0.5	0.56	-
	Forma de curva para expansión del dosel	3.3	3.3	3.3	-
	Umbral superior para cierre estomático	0.65	0.53	0.6	-
	Forma de curva para cierre estomático	3.4	3.4	3.4	-
	Umbral superior para senescencia temprana	0.69	0.58	0.74	-
	Forma de curva para senescencia temprana	2.7	2.7	2.7	-
C	Coefficiente de estrés hídrico en HI				
	Antes de la formación del rendimiento	8	8	8	-
	Durante la formación del rendimiento con efecto positivo (a)	4.2	4	4	-
	Durante la formación del rendimiento con efecto negativo (b)	18	10	8	-
C	Coefficiente de estrés de aireación ( $K_{S_{aer}}$ )	4	4	4	-
NC	Fenología				
	Tiempo de emergencia	77	26	26	GDD
	Tiempo a máximo grado de cobertura	820	633	562	GDD
	Tiempo del 90% de emergencia hasta el inicio de formación de rendimiento	415	365	365	GDD
	Tiempo de la formación del rendimiento	875	786	786	GDD
	Tiempo a inicio de senescencia	1091	779	977	GDD
	Tiempo a madurez de cosecha	1294	1161	1161	GDD

\* Extraído de Rankine *et al.*, (2015); \*\*Huambachero y \*\*\*Paramonguino

## V. CONCLUSIONES

- Se simuló con éxito el rendimiento y biomasa total de dos variedades locales de camote con *AquaCrop* para láminas del 100%  $ET_0$  y de 50%  $ET_0$  bajo el sistema de riego por goteo y para condiciones de clima y suelo de La Molina, Lima, Perú.
- Se elaboró una base de datos que incluía: información climática como temperatura, precipitación y evapotranspiración; características del suelo como punto de marchitez, capacidad de campo y saturación, así como la conductividad hidráulica; tipo y programa de riego como parte del componente manejo; variables propias del cultivo como fenología, cobertura del dosel (CC), biomasa seca (B), rendimiento seco (Y) e índice de cosecha (HI), y finalmente, el contenido de humedad en el suelo.
- La evaluación de las variables CC, B e Y durante el desarrollo de dos variedades de cultivo de camote, no demostraron diferencias significativas entre tratamientos aplicados, según el test de Tukey; sin embargo, son comparativamente diferentes, obteniendo siempre los promedios más altos el tratamiento testigo ( $T_0$ ).
- El contenido de agua en el suelo simulado por el modelo *AquaCrop*, en condiciones de riego óptimo, no se correspondió de buena forma con lo registrado en campo ( $NRMSE > 30\%$ ) en ambas variedades. Mientras que, para condiciones de riego deficitario, el modelo si se desempeña de manera aceptable ( $20\% < NRMSE < 30\%$ ).
- Para cada variedad, el modelo *Aquacrop* quedó calibrado al cumplir con los criterios mínimos establecidos en los estadísticos utilizados para evaluar al modelo, constituyendo una clase varietal distinta cada una. Se simuló con buena precisión la evolución de la CC durante las fases de cobertura máxima y senescencia, mas no en las fases previas. Mientras, la simulación de las variables B e Y mostraron un buen ajuste respecto a lo observado en campo, sobre todo previo a la cosecha para el huambachero y durante la cosecha para el paramonguino.

## VI. RECOMENDACIONES

- Realizar una validación temporal y espacial del modelo *AquaCrop* para el cultivo de camote, para cada clase varietal analizada en esta investigación.
- Para posteriores investigaciones se recomienda usar tratamientos diferenciados de riego deficitario más marcados, por ejemplo, con recuperación del 33, 66 y 100 por ciento de la lámina evapotranspirada, además de incluir un tratamiento en sobresaturación húmeda para la calibración del parámetro conservativo  $K_{s_{aer}}$ . Así mismo, se debe realizar experimentos en zonas con condiciones extremas de clima, de tal manera que podamos observar el comportamiento del camote y el grado de ajuste del modelo para con estas condiciones
- El modelo *AquaCrop* maneja parámetros de salinidad y niveles de fertilización, por lo cual es necesario efectuar investigaciones que sometan al cultivo de camote a estas condiciones, de tal manera que los resultados obtenidos puedan usarse posteriormente en la calibración de los parámetros ya mencionados.
- Para una calibración más directa del  $K_{s_{sto}}$  se recomienda incluir el monitoreo de la conductancia estomática en campo con ayuda de un porómetro.
- Debido a la sensibilidad que tiene el parámetro de humedad en el suelo debido al efecto de la temperatura, se recomienda coleccionar este parámetro a medianoche con ayuda de sensores de humedad a tiempo real. A partir de otros estudios se ha determinado que la medianoche es la etapa más estable del parámetro.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T., Singh, M., Pathak, H., & Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Addiscott, T. (1993). Simulation modeling and soil behaviour. *Geoderma*, 60(1-4), 15-40. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90016-E](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90016-E)
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, D. (1998). *Crop evapotranspiration: Guides for computing crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Barrett, J., & Nearing, M. (1998). Humanization of decision support using informations from simulations. In: R. Peart, R. Curry (Eds.), *Agricultural System Modelling and Simulation* (pp. 1-18). *Marcel Dekker Inc.*
- Bastidas, S., & De La Cruz, S. (2010). *Utilización de harina de camote (Ipomea Batatas) en la elaboración de pan* [Tesis pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
- Beletse, Y., Laurie, R., Du Plooy, C., Laurie, S., & Van den Berg, A. (2013). Simulating the yield response of orange fleshed sweet potato ‘Isondlo’ to water stress using the FAO AquaCrop model. *Acta Horticulturae*, 1007, 935-941. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1007.112>
- Bhagsari, A., & Ashley, D. (1990). Relationship of photosynthesis and harvest index to sweet potato yield. *Journal of the American Society for Horticultural Sci*, 115(2), 288–293. <https://doi.org/10.21273/JASHS.115.2.288>
- Birta, L., & Arbez, G. (2013). *Modelling and simulation: Exploring Dynamic System Behaviour*. London, Springer-Verlag. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-2783-3>

- Brunel, J., Ihab, J., Droubi, A., & Samaan, S. (2006). Energy Budget and actual evapotranspiration of an arid oasis ecosystem: Palmyra (Syria). *Agricultural Water Management*, 84(3), 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.02.005>
- Calviño, P., & Sadras, V. (2002). On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas. *Field Crops Research*, 74(1), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00193-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00193-9)
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, CISMID (2010). *Características geotécnicas del distrito de La Molina, Estudio de microzonificación sísmica y vulnerabilidad en la ciudad de Lima, apéndice B*. [http://eudora.vivienda.gob.pe/OBSERVATORIO/Documentos/EstudiosyAsistencia/Estudios/MicrozonificacionSismicaLima/LAMOLINA/APENDICE\\_B\\_MICROZONIFICACION\\_SISMICA\\_LAMOLINA.pdf](http://eudora.vivienda.gob.pe/OBSERVATORIO/Documentos/EstudiosyAsistencia/Estudios/MicrozonificacionSismicaLima/LAMOLINA/APENDICE_B_MICROZONIFICACION_SISMICA_LAMOLINA.pdf)
- Chandrasekara, A., & Kumar, J. (2016). Roots and tuber crops as functional foods: a review on phytochemical constituents and their potential health benefits. *International Journal of Food Science*, 2016: 1–15. <https://doi.org/10.1155/2016/3631647>
- Connor, R., & Koncagül, E. (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. UNESCO World Water Assessment Programme. <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2014-water-energy/>
- Consultative Group for International Agricultural Research, CGIAR (1996). *Report on the inter-centre review of root and tuber crops research in the CGIAR*. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10947/1205>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. (1979). *Yield Response to Water - FAO Irrigation and Drainage Paper 33*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025675-7.50021-2>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 24*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/f2430e/f2430e.pdf>

- Dourado-Neto, D., Teruel, D., Reichardt, K., Nielsen, D., Frizzone, J., & Bacchi, O. (1998). Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. *Scientia Agricola*, 55(spe), 46-50. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161998000500008>
- Eguren, F. (2002). La agricultura de la costa peruana. *Debate Agrario*, 35, 1-38. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3474338>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO (2010). *Pacific roots crops - building resilience to climate change root crop and fishery production*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/i1950e/i1950e.pdf>
- Félix, N. (2000). Los alimentos en el Perú. *Revista Peruana de Cardiología*, 26(2), 65-79. [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bVrevistas/cardiologia/v26\\_n2/alimentos.htm](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bVrevistas/cardiologia/v26_n2/alimentos.htm)
- Gajanayake, B., Reddy, K., & Shankle, M. (2015). Quantifying Growth and Developmental Responses of SweetPotato to Mid- and Late-Season Temperature. *Agronomy Journal*, 107(5), 1854-1862. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0545>
- Griffin, T., Johnson, B., & Ritchie, J. (1995). *Research Support Series 02 - A simulation model for potato growth and development: SUBSTOR-Potato v.2.0*. Honolulu, IBSNAT. [https://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNABU293.pdf](https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABU293.pdf)
- Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y Usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 73-82. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193217899013>
- Horton, D. (1988). *Underground crops: Long-term trends in production of roots and tubers*. Arizona, Winrock International. [https://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNABD277.pdf](https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNABD277.pdf)
- Hsiao, T., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, 448-459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>

- Hsiao, T., Steduto, P., Raes, D., & Fereres, E. (2012). *Guía de parametrización, calibración y validación de Aquacrop*. In: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua (pp. 73-92). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/i2800s/i2800s.pdf>
- Huamán, Z. (1992). *Botánica sistemática y morfología de la planta de batata o camote - Boletín de Información Técnica 25*. Centro Internacional de la papa.
- Jamieson, P., Porter, J., & Wilson, D. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27(4), 337–350. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- La Rosa. (2008). *Respuestas fisiológicas de camote Ipomoea batatas (L.) Lam. a diferentes frecuencias de riego* [Tesis Magíster, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].
- Lakshmi, P., Satish, K., Tran, L., & Nguyen, H. (2009). Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. *Plant and Cell Physiology*, 50(7), 1260-1276. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp082>
- McMaster, G., & Wilhelm, W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 291-300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- Moliner, A., & Masaguer, A. (1996). Calidad del agua para uso agrario. In: *Prácticas agrarias compatibles con el medio natural: el agua* (pp. 59-75). Madrid, MAPA.
- Montoya, F., Camargo, D., Ortega, J., Córcoles, J., & Domínguez, A. (2016). Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 164, 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.019>
- Moriasi, D., Arnold, J., Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mosterín, J. (1978). Sobre el concepto de modelo. *Teorema: Revista internacional de filosofía*, 8(2), 131-142. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2045041>

- Nazeer, M., & Ali, H. (2012). Modeling the response of onion crop to deficit irrigation. *Journal of Agricultural Technology*, 8(1), 393-402. [http://ijat-aatsea.com/pdf/v8\\_n1\\_12\\_January/33\\_IJAT%202012\\_8\\_1\\_\\_Muhammad%20Nazeer-accepted\\_FX.pdf](http://ijat-aatsea.com/pdf/v8_n1_12_January/33_IJAT%202012_8_1__Muhammad%20Nazeer-accepted_FX.pdf)
- Nelson, R. (1997). *Soil texture triangle: hydraulic properties calculator*. Consultado 5 oct. 2018. <http://resources.hwb.wales.gov.uk/VTC/env-sci/module2/soils/soilwatr.htm>
- O'Brien, P. (1972). The sweet potato: it's origin and dispersal. *American Anthropologist*, 74(3), 342–365. <https://doi.org/10.1525/aa.1972.74.3.02a00070>
- Onwueme, I., & Charles, W. (1994). *Tropical root and tuber crops: production, perspectives and future prospects*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016041573>
- Prakash, P., Prabhat, K., Jaganathan, D., Sheela, I., & Sivakumar, P. (2018). *Status, performance and impact of sweet potato cultivation on farming communities of Odisha, India*. 30th International Conference of Agricultural Economists.
- Raes, D. (2017). *AquaCrop training handbooks: Book I Understanding AquaCrop*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/i6051e/i6051e.pdf>
- Raes, D., Pasquale, S., Hsiao, T., & Fereres, E. (2018). *Reference manual AquaCrop versión 6.0: chapter 1*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/BR246E/br246e.pdf>
- Rankine, D., Cohen, J., Taylor, M., Coy, A., Simpson, L., Stephenson, T., & Lawrence, J. (2015). Parameterizing the FAO AquaCrop model for rainfed and irrigated field-grown sweet potato. *Agronomy Journal*, 107(1), 1-13. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0287>
- Romero, C., & Baigorria, G. (2008). The effect of temperature on sweet-potato growth and development. Poster presented at: ASA, CSSA, SSSA International Annual Meeting, Houston, Texas.

- Salvagiotti, F., Castellárin, J., Pedrol, H., & Satorre, E. (2003). El modelo de simulación CERES como herramienta en el diagnóstico de la fertilización nitrogenada en trigo. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 17.
- Sanginga, N. (2015). *Root and Tuber Crops (Cassava, Yam, Potato and Sweet Potato)*. Background paper in Feeding Africa.
- Santamaría, J., León, C., Sifuentes, E., Albújar, V., & Cajas, J. (2016). *Boletín estadístico de producción agrícola, pecuaria y avícola: marzo 2016*. Lima, Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas – Ministerio de Desarrollo Agrario. <http://repositorio.midagri.gob.pe:80/jspui/handle/MIDAGRI/43>
- Santhosh, V., & Somasundaram, K. (2008). A model to simulate sweet potato growth. *World Applied Sciences Journal*, 4(4), 568-577. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.388.1181&rep=rep1&type=pdf>
- Saxton, K., Rawls, W., Romberger, J., & Papendick, R. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Society of America Journal*, 50(4), 1031-1036. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>
- Scott, G., Rosegrant, W., & Ringler, C. (2000). Raíces y tubérculos para el siglo 21: tendencias, proyecciones y opciones de política. International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2020 vision discussion papers. 66p. <https://core.ac.uk/download/pdf/6388627.pdf>
- Scott, L. (1950). Potassium uptake by the sweet potato plant. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 56, 248-252.
- Smith, M., & Steduto, P. (2012). *Respuesta del rendimiento al agua: función original de producción del agua de la FAO*. In: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua (pp. 6-15). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/i2800s/i2800s.pdf>
- Steduto, P., Hsiao, T., & Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), 189-207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>

- Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., & Fereres, E. (2009a). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, *101*(3), 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T., Fereres, E., Heng, L., Howell, T., Evett, S., Rojas-Lara, B., Farahani, H., Izzi, G., Oweis, T., Wani, S., Hoogeveen, J., & Geerts, S. (2009b). *Concepts and Applications of AquaCrop: The FAO Crop Water Productivity Model*. In: W. Cao, J. White, E. Wang (Eds.), *Crop Modeling and Decision Support* (pp. 175–191). Berlin, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-01132-0_19)
- Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T., & Fereres, E. (2012). *AquaCrop: conceptos, fundamento y funcionamiento*. In: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua* (pp. 17-53). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/i2800s/i2800s.pdf>
- Sutton, W., Srivastava, J., Neumann, J., Droogers, P., & Boehlert, B. (2013). *Reducing the vulnerability of Uzbekistan's agricultural systems to climate change: impact assessment and adaptation options*. Washington DC: World Bank.
- Tarango, A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo, Serie Zonas Áridas*, *4*(2), 17-21. <https://www.redalyc.org/pdf/4555/455545052003.pdf>
- Tornés, N., Brown, O., Gómez, Y., Guerrero, A., (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry vean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *25*(3), 23-30. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93246970003>
- Ugent, D., & Peterson, L. (1998). Archaeological remains of potato and sweet potato in Perú. *CIP Circular*, *16*, 1-10.
- United Nations. (2015). *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. Working Paper No. ESA/P/WP.241.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., & Willems, P. (2011). Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Agricultural and Forest Meteorology*, *151*(12), 1753- 1762. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.011>

- Vásquez, A., Vásquez, I., Vásquez, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de ingeniería de riegos*. Lima UNALM.
- Verbist, K., Santibañez, F., Gabriels, D., & Soto, G. (2010). *Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe*. Documentos técnicos del PHI-LAC, n°25.
- Villordon, A., Clark, C., Ferrin, D., & La Bonte, D. (2009). Using growing degree days, agrometeorological variables, linear regression, and data mining methods to help improve prediction of sweetpotato harvest date in Louisiana. *HortTechnology*, 19, 133–134. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.19.1.133>
- Wadsworth, J. (1997). Análisis de sistemas de producción animal: las herramientas básicas. Roma, FAO. <http://www.fao.org/3/w7452s/w7452s00.htm>
- Wilson, L., & Lowe, S. (1973). Quantitative morphogenesis of root types in the sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) root system during early growth from stem cuttings. *Trop Agric Guilford*, 50, 343-345.
- WRG. 2012. *The Water Resources Group Background, Impact and the Way Forward*. World Economic Forum Annual Meeting 2012. Davos-Klosters, Switzerland.

## VIII. ANEXOS

### ANEXO 1: INFORMACIÓN CLIMÁTICA

**Tabla 39. Información de temperatura máxima (°C) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2”**

Fecha	T° max	Fecha	T° max	Fecha	T° max	Fecha	T° max	Fecha	T° max
8/10/16	20.1	8/11/16	22.9	9/12/16	25.1	9/1/17	29.1	9/2/17	29.3
9/10/16	21.4	9/11/16	23.5	10/12/16	25.1	10/1/17	28.2	10/2/17	28.9
10/10/16	22.4	10/11/16	22.7	11/12/16	25.2	11/1/17	28.4	11/2/17	30.8
11/10/16	21.2	11/11/16	22.4	12/12/16	24.7	12/1/17	27.6	12/2/17	29.5
12/10/16	21.8	12/11/16	23.3	13/12/16	23	13/1/17	26.8	13/2/17	29.3
13/10/16	21.1	13/11/16	23.1	14/12/16	24.6	14/1/17	27	14/2/17	30.2
14/10/16	21.8	14/11/16	23.3	15/12/16	22.3	15/1/17	28.1	15/2/17	29.9
15/10/16	19.6	15/11/16	21.7	16/12/16	24.9	16/1/17	30.1	16/2/17	31.3
16/10/16	21.8	16/11/16	22.5	17/12/16	25.2	17/1/17	27.4	17/2/17	29.7
17/10/16	22.4	17/11/16	23.8	18/12/16	25.3	18/1/17	28.2	18/2/17	28.9
18/10/16	22.8	18/11/16	22.5	19/12/16	24.8	19/1/17	28.9	19/2/17	30.6
19/10/16	22.6	19/11/16	22.8	20/12/16	25.8	20/1/17	28.1	20/2/17	29.8
20/10/16	23.2	20/11/16	23	21/12/16	24.8	21/1/17	28.1	21/2/17	29.3
21/10/16	19.8	21/11/16	24.2	22/12/16	25	22/1/17	30.2	22/2/17	30.3
22/10/16	20.3	22/11/16	23.5	23/12/16	25.9	23/1/17	26.7	23/2/17	30.3
23/10/16	19.2	23/11/16	24.2	24/12/16	25.8	24/1/17	26.4	24/2/17	29.8
24/10/16	20.7	24/11/16	23.6	25/12/16	25.8	25/1/17	29.1	25/2/17	30.4
25/10/16	21.3	25/11/16	23.8	26/12/16	26.3	26/1/17	29.7	26/2/17	30.7
26/10/16	22.3	26/11/16	24.2	27/12/16	26.3	27/1/17	29.1	27/2/17	30.6
27/10/16	19.9	27/11/16	24.8	28/12/16	27.1	28/1/17	29.6	28/2/17	29.6
28/10/16	20.7	28/11/16	24.4	29/12/16	26.5	29/1/17	29.4	1/3/17	29.1
29/10/16	21.1	29/11/16	24.8	30/12/16	27.2	30/1/17	30.9	2/3/17	29.7
30/10/16	21.4	30/11/16	24.1	31/12/16	26.7	31/1/17	29.4	3/3/17	30.7
31/10/16	21.4	1/12/16	24.4	1/1/17	27.7	1/2/17	29.6	4/3/17	30
1/11/16	21.3	2/12/16	23.4	2/1/17	25	2/2/17	29.3	5/3/17	30.1
2/11/16	21.6	3/12/16	25.3	3/1/17	26.5	3/2/17	29.2	6/3/17	29.3
3/11/16	22.2	4/12/16	24.9	4/1/17	25.1	4/2/17	30.2	7/3/17	30.4
4/11/16	22.2	5/12/16	25.7	5/1/17	27.5	5/2/17	29.2	8/3/17	27.8
5/11/16	20.9	6/12/16	23.6	6/1/17	30.2	6/2/17	28.6		
6/11/16	19.3	7/12/16	25.4	7/1/17	30.7	7/2/17	28.3		
7/11/16	22.8	8/12/16	23.8	8/1/17	25.3	8/2/17	28.3		

**Tabla 40. Información de temperatura mínima (°C) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2”**

Fecha	T° Min	Fecha	T° Min	Fecha	T° Min	Fecha	T° Min
8/10/16	15.2	15/11/16	18.2	23/12/16	19.2	30/1/17	24.1
9/10/16	16	16/11/16	17.1	24/12/16	19.6	31/1/17	23.2
10/10/16	15.9	17/11/16	16.7	25/12/16	19.8	1/2/17	23.5
11/10/16	16.3	18/11/16	16.9	26/12/16	19.3	2/2/17	22.7
12/10/16	15.9	19/11/16	16.5	27/12/16	20	3/2/17	22.9
13/10/16	16.2	20/11/16	17.4	28/12/16	19.1	4/2/17	23
14/10/16	16.2	21/11/16	17.2	29/12/16	19.6	5/2/17	22.3
15/10/16	15.6	22/11/16	16.7	30/12/16	19.5	6/2/17	21.8
16/10/16	15.6	23/11/16	17.2	31/12/16	19.8	7/2/17	21.6
17/10/16	15.7	24/11/16	16.3	1/1/17	20.3	8/2/17	21.7
18/10/16	16.1	25/11/16	17.1	2/1/17	19.9	9/2/17	22.1
19/10/16	16.2	26/11/16	17.7	3/1/17	19.2	10/2/17	21.8
20/10/16	15.7	27/11/16	17.9	4/1/17	19.3	11/2/17	23.1
21/10/16	15.7	28/11/16	17.8	5/1/17	19.9	12/2/17	22.4
22/10/16	15.7	29/11/16	17.4	6/1/17	22.1	13/2/17	22.7
23/10/16	15.6	30/11/16	17.6	7/1/17	22.1	14/2/17	23.1
24/10/16	15.5	1/12/16	17.8	8/1/17	20	15/2/17	22.8
25/10/16	15.9	2/12/16	17.9	9/1/17	20.8	16/2/17	23.1
26/10/16	16.3	3/12/16	18.2	10/1/17	21.1	17/2/17	22.4
27/10/16	15.2	4/12/16	18.5	11/1/17	22.2	18/2/17	22.1
28/10/16	15.8	5/12/16	18.1	12/1/17	21.9	19/2/17	22.2
29/10/16	15.8	6/12/16	18.3	13/1/17	20.6	20/2/17	22.1
30/10/16	16.5	7/12/16	17.8	14/1/17	20.7	21/2/17	22.9
31/10/16	16.1	8/12/16	18.2	15/1/17	21.9	22/2/17	22.8
1/11/16	15.6	9/12/16	18.5	16/1/17	22.4	23/2/17	22.6
2/11/16	14.4	10/12/16	18	17/1/17	22.5	24/2/17	21.9
3/11/16	14.5	11/12/16	18.2	18/1/17	22.8	25/2/17	22.6
4/11/16	15.5	12/12/16	17.3	19/1/17	22	26/2/17	23.8
5/11/16	16.2	13/12/16	17.2	20/1/17	22.8	27/2/17	23.7
6/11/16	16	14/12/16	17.4	21/1/17	22.8	28/2/17	24.8
7/11/16	15.8	15/12/16	18.2	22/1/17	22.8	1/3/17	23.4
8/11/16	15.7	16/12/16	17.6	23/1/17	23.2	2/3/17	23.6
9/11/16	16.7	17/12/16	18.9	24/1/17	22.6	3/3/17	23.6
10/11/16	16.5	18/12/16	19.2	25/1/17	22.9	4/3/17	22.9
11/11/16	16.6	19/12/16	19.3	26/1/17	23.8	5/3/17	22.8
12/11/16	16.3	20/12/16	18.4	27/1/17	24.1	6/3/17	23.1
13/11/16	16.8	21/12/16	18.4	28/1/17	24.1	7/3/17	22.2
14/11/16	17.7	22/12/16	18.6	29/1/17	24.2	8/3/17	23.1

**Tabla 41. Información de humedad relativa (%) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2”**

Fecha	HR	Fecha	HR	Fecha	HR	Fecha	HR
8/10/16	87.8	15/11/16	87.0	23/12/16	80.4	30/1/17	75.5
9/10/16	86.5	16/11/16	84.2	24/12/16	83.6	31/1/17	77.7
10/10/16	84.9	17/11/16	85.2	25/12/16	81.0	1/2/17	77.1
11/10/16	86.9	18/11/16	84.5	26/12/16	83.3	2/2/17	77.1
12/10/16	85.5	19/11/16	84.6	27/12/16	80.5	3/2/17	80.8
13/10/16	86.4	20/11/16	81.6	28/12/16	83.0	4/2/17	77.8
14/10/16	83.9	21/11/16	80.1	29/12/16	80.7	5/2/17	80.2
15/10/16	87.7	22/11/16	84.0	30/12/16	81.6	6/2/17	80.8
16/10/16	83.7	23/11/16	81.8	31/12/16	79.5	7/2/17	82.6
17/10/16	86.6	24/11/16	82.5	1/1/17	80.0	8/2/17	79.5
18/10/16	86.4	25/11/16	81.0	2/1/17	83.6	9/2/17	77.7
19/10/16	86.3	26/11/16	82.6	3/1/17	83.8	10/2/17	77.5
20/10/16	88.7	27/11/16	85.0	4/1/17	85.9	11/2/17	72.0
21/10/16	91.0	28/11/16	83.9	5/1/17	75.6	12/2/17	73.9
22/10/16	86.5	29/11/16	83.9	6/1/17	64.7	13/2/17	74.0
23/10/16	89.1	30/11/16	82.9	7/1/17	68.8	14/2/17	70.1
24/10/16	87.3	1/12/16	87.3	8/1/17	85.5	15/2/17	67.5
25/10/16	86.5	2/12/16	85.5	9/1/17	75.2	16/2/17	72.4
26/10/16	86.7	3/12/16	83.2	10/1/17	72.8	17/2/17	76.8
27/10/16	90.2	4/12/16	84.8	11/1/17	71.8	18/2/17	75.5
28/10/16	86.7	5/12/16	83.0	12/1/17	77.3	19/2/17	70.5
29/10/16	85.7	6/12/16	86.1	13/1/17	84.3	20/2/17	71.4
30/10/16	81.9	7/12/16	85.0	14/1/17	83.3	21/2/17	72.7
31/10/16	81.6	8/12/16	85.2	15/1/17	79.4	22/2/17	71.0
1/11/16	82.6	9/12/16	83.7	16/1/17	73.7	23/2/17	77.5
2/11/16	84.6	10/12/16	85.1	17/1/17	77.8	24/2/17	76.1
3/11/16	85.6	11/12/16	83.5	18/1/17	82.8	25/2/17	74.0
4/11/16	85.3	12/12/16	84.0	19/1/17	82.3	26/2/17	66.7
5/11/16	86.6	13/12/16	85.1	20/1/17	82.0	27/2/17	71.1
6/11/16	86.8	14/12/16	82.9	21/1/17	81.3	28/2/17	73.8
7/11/16	79.2	15/12/16	88.5	22/1/17	73.8	1/3/17	81.1
8/11/16	83.4	16/12/16	83.8	23/1/17	83.2	2/3/17	79.0
9/11/16	86.5	17/12/16	82.7	24/1/17	86.2	3/3/17	76.7
10/11/16	86.2	18/12/16	82.0	25/1/17	81.9	4/3/17	77.3
11/11/16	85.8	19/12/16	82.2	26/1/17	78.0	5/3/17	75.9
12/11/16	80.1	20/12/16	81.5	27/1/17	78.4	6/3/17	76.6
13/11/16	84.7	21/12/16	83.7	28/1/17	74.2	7/3/17	73.0
14/11/16	85.7	22/12/16	83.5	29/1/17	76.5	8/3/17	75.2

**Tabla 42. Información de velocidad de viento ( $m \cdot s^{-1}$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2”**

Fecha	Vel. V	Fecha	Vel. V	Fecha	Vel. V	Fecha	Vel. V
8/10/16	1.80	15/11/16	1.94	23/12/16	1.75	30/1/17	1.47
9/10/16	1.90	16/11/16	1.70	24/12/16	2.01	31/1/17	1.54
10/10/16	1.72	17/11/16	1.47	25/12/16	1.83	1/2/17	1.64
11/10/16	2.00	18/11/16	1.50	26/12/16	1.59	2/2/17	1.84
12/10/16	2.34	19/11/16	1.75	27/12/16	1.90	3/2/17	1.74
13/10/16	2.04	20/11/16	1.91	28/12/16	1.45	4/2/17	1.85
14/10/16	1.72	21/11/16	1.79	29/12/16	1.72	5/2/17	1.91
15/10/16	1.68	22/11/16	1.48	30/12/16	1.68	6/2/17	1.60
16/10/16	1.92	23/11/16	1.72	31/12/16	1.49	7/2/17	1.55
17/10/16	1.36	24/11/16	1.43	1/1/17	1.46	8/2/17	1.80
18/10/16	1.96	25/11/16	1.58	2/1/17	1.73	9/2/17	1.51
19/10/16	1.75	26/11/16	1.72	3/1/17	1.65	10/2/17	1.51
20/10/16	1.81	27/11/16	1.66	4/1/17	1.68	11/2/17	1.52
21/10/16	2.05	28/11/16	1.40	5/1/17	1.31	12/2/17	1.45
22/10/16	2.06	29/11/16	1.52	6/1/17	1.68	13/2/17	1.10
23/10/16	1.60	30/11/16	1.71	7/1/17	1.82	14/2/17	1.29
24/10/16	2.05	1/12/16	1.40	8/1/17	1.46	15/2/17	1.53
25/10/16	1.35	2/12/16	1.57	9/1/17	1.45	16/2/17	1.35
26/10/16	1.35	3/12/16	1.68	10/1/17	1.35	17/2/17	1.27
27/10/16	1.58	4/12/16	1.70	11/1/17	1.50	18/2/17	1.88
28/10/16	2.11	5/12/16	1.48	12/1/17	1.16	19/2/17	1.52
29/10/16	1.83	6/12/16	1.35	13/1/17	1.48	20/2/17	1.25
30/10/16	2.25	7/12/16	1.58	14/1/17	1.09	21/2/17	1.12
31/10/16	2.13	8/12/16	1.87	15/1/17	0.92	22/2/17	1.34
1/11/16	1.55	9/12/16	1.91	16/1/17	1.41	23/2/17	1.39
2/11/16	1.22	10/12/16	1.51	17/1/17	1.45	24/2/17	1.55
3/11/16	1.39	11/12/16	1.54	18/1/17	1.68	25/2/17	1.47
4/11/16	1.40	12/12/16	1.39	19/1/17	1.45	26/2/17	1.32
5/11/16	1.80	13/12/16	1.80	20/1/17	1.52	27/2/17	1.55
6/11/16	1.56	14/12/16	1.69	21/1/17	1.46	28/2/17	2.10
7/11/16	1.82	15/12/16	1.16	22/1/17	1.52	1/3/17	1.86
8/11/16	1.50	16/12/16	1.55	23/1/17	1.77	2/3/17	1.95
9/11/16	1.48	17/12/16	2.09	24/1/17	1.39	3/3/17	1.53
10/11/16	2.13	18/12/16	1.83	25/1/17	1.63	4/3/17	1.62
11/11/16	2.20	19/12/16	1.78	26/1/17	1.84	5/3/17	1.65
12/11/16	1.80	20/12/16	1.62	27/1/17	1.85	6/3/17	1.48
13/11/16	1.73	21/12/16	1.31	28/1/17	1.85	7/3/17	1.76
14/11/16	1.94	22/12/16	1.43	29/1/17	1.80	8/3/17	1.54

**Tabla 43. Información de radiación solar ( $W \cdot m^{-2}$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2”**

Fecha	RS	Fecha	RS	Fecha	RS	Fecha	RS
8/10/16	105.4	15/11/16	109.6	23/12/16	161.0	30/1/17	177.4
9/10/16	144.5	16/11/16	162.7	24/12/16	165.7	31/1/17	189.2
10/10/16	152.6	17/11/16	160.7	25/12/16	167.3	1/2/17	197.7
11/10/16	167.5	18/11/16	165.9	26/12/16	157.3	2/2/17	216.7
12/10/16	143.8	19/11/16	163.0	27/12/16	159.3	3/2/17	171.8
13/10/16	100.6	20/11/16	168.1	28/12/16	131.4	4/2/17	169.6
14/10/16	149.7	21/11/16	174.6	29/12/16	140.2	5/2/17	174.0
15/10/16	87.8	22/11/16	175.6	30/12/16	135.8	6/2/17	198.6
16/10/16	112.8	23/11/16	171.3	31/12/16	113.8	7/2/17	180.9
17/10/16	103.8	24/11/16	165.7	1/1/17	139.5	8/2/17	190.3
18/10/16	152.5	25/11/16	168.2	2/1/17	152.0	9/2/17	177.0
19/10/16	142.3	26/11/16	159.3	3/1/17	155.6	10/2/17	159.5
20/10/16	138.8	27/11/16	152.4	4/1/17	120.5	11/2/17	155.0
21/10/16	85.3	28/11/16	162.8	5/1/17	119.8	12/2/17	198.4
22/10/16	149.6	29/11/16	164.9	6/1/17	149.5	13/2/17	133.4
23/10/16	36.8	30/11/16	167.4	7/1/17	164.0	14/2/17	166.6
24/10/16	89.1	1/12/16	109.3	8/1/17	131.6	15/2/17	218.0
25/10/16	69.4	2/12/16	126.8	9/1/17	127.8	16/2/17	154.6
26/10/16	87.0	3/12/16	140.1	10/1/17	122.9	17/2/17	125.3
27/10/16	61.8	4/12/16	165.1	11/1/17	145.6	18/2/17	209.0
28/10/16	110.3	5/12/16	169.3	12/1/17	155.1	19/2/17	202.1
29/10/16	114.3	6/12/16	109.8	13/1/17	144.3	20/2/17	207.4
30/10/16	152.5	7/12/16	157.7	14/1/17	116.2	21/2/17	115.5
31/10/16	108.0	8/12/16	148.5	15/1/17	106.3	22/2/17	197.8
1/11/16	157.5	9/12/16	158.3	16/1/17	153.8	23/2/17	182.7
2/11/16	154.5	10/12/16	150.1	17/1/17	163.1	24/2/17	219.3
3/11/16	163.3	11/12/16	159.0	18/1/17	163.5	25/2/17	198.9
4/11/16	142.7	12/12/16	166.3	19/1/17	142.8	26/2/17	190.5
5/11/16	101.7	13/12/16	147.4	20/1/17	113.5	27/2/17	183.0
6/11/16	50.4	14/12/16	169.6	21/1/17	113.1	28/2/17	218.4
7/11/16	170.3	15/12/16	59.5	22/1/17	202.5	1/3/17	197.0
8/11/16	167.5	16/12/16	153.7	23/1/17	92.9	2/3/17	219.6
9/11/16	168.8	17/12/16	151.9	24/1/17	68.5	3/3/17	196.7
10/11/16	157.5	18/12/16	146.4	25/1/17	173.3	4/3/17	212.2
11/11/16	119.1	19/12/16	156.1	26/1/17	214.3	5/3/17	234.3
12/11/16	166.1	20/12/16	165.6	27/1/17	177.0	6/3/17	184.2
13/11/16	150.4	21/12/16	129.1	28/1/17	215.1	7/3/17	215.6
14/11/16	156.2	22/12/16	92.2	29/1/17	180.0	8/3/17	101.6

**Tabla 44. Información de radiación solar ( $W \cdot m^{-2}$ ) registrada por día y recopilada de la estación meteorológica “Davis Vantage Pro2”**

Fecha	Precip.	Fecha	Precip.	Fecha	Precip.	Fecha	Precip.
8/10/16	0	15/11/16	0	23/12/16	0	30/1/17	0
9/10/16	0	16/11/16	0	24/12/16	0	31/1/17	0
10/10/16	0	17/11/16	0	25/12/16	0	1/2/17	0
11/10/16	0	18/11/16	0	26/12/16	0	2/2/17	0
12/10/16	0	19/11/16	0	27/12/16	0	3/2/17	0
13/10/16	0	20/11/16	0	28/12/16	0	4/2/17	0
14/10/16	0	21/11/16	0	29/12/16	0	5/2/17	0
15/10/16	0	22/11/16	0	30/12/16	0	6/2/17	0
16/10/16	0	23/11/16	0	31/12/16	0	7/2/17	0
17/10/16	0	24/11/16	0	1/1/17	0	8/2/17	0
18/10/16	0	25/11/16	0	2/1/17	0	9/2/17	0
19/10/16	0	26/11/16	0	3/1/17	0	10/2/17	0
20/10/16	0	27/11/16	0	4/1/17	0	11/2/17	0
21/10/16	0	28/11/16	0	5/1/17	0	12/2/17	0
22/10/16	0	29/11/16	0	6/1/17	0	13/2/17	0
23/10/16	0	30/11/16	0	7/1/17	0	14/2/17	0
24/10/16	0	1/12/16	0	8/1/17	0	15/2/17	0
25/10/16	0	2/12/16	0	9/1/17	0	16/2/17	0
26/10/16	0	3/12/16	0	10/1/17	0	17/2/17	0
27/10/16	0	4/12/16	0	11/1/17	0	18/2/17	0
28/10/16	0	5/12/16	0	12/1/17	0	19/2/17	0
29/10/16	0	6/12/16	0	13/1/17	0	20/2/17	0
30/10/16	0	7/12/16	0	14/1/17	1.26	21/2/17	0
31/10/16	0	8/12/16	0	15/1/17	0	22/2/17	0
1/11/16	0	9/12/16	0	16/1/17	0	23/2/17	1.52
2/11/16	0	10/12/16	0	17/1/17	0	24/2/17	0
3/11/16	0	11/12/16	0	18/1/17	0	25/2/17	0
4/11/16	0	12/12/16	0	19/1/17	0	26/2/17	0
5/11/16	0	13/12/16	0	20/1/17	0	27/2/17	0.5
6/11/16	0	14/12/16	0	21/1/17	0	28/2/17	0
7/11/16	0	15/12/16	0	22/1/17	0	1/3/17	0
8/11/16	0	16/12/16	0	23/1/17	0	2/3/17	0
9/11/16	0	17/12/16	0	24/1/17	0	3/3/17	0
10/11/16	0	18/12/16	0	25/1/17	0	4/3/17	0
11/11/16	0	19/12/16	0	26/1/17	0	5/3/17	0
12/11/16	0	20/12/16	0	27/1/17	0	6/3/17	0
13/11/16	0	21/12/16	0	28/1/17	0	7/3/17	0
14/11/16	0	22/12/16	0	29/1/17	0	8/3/17	0

**Tabla 45. Información de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) calculada por día usando el método FAO Penman-Monteith (Allen et al. 1998)**

Fecha	ET <sub>o</sub>	Fecha	ET <sub>o</sub>	Fecha	ET <sub>o</sub>	Fecha	ET <sub>o</sub>
8/10/16	1.83	15/11/16	2.10	23/12/16	3.19	30/1/17	3.80
9/10/16	2.42	16/11/16	2.86	24/12/16	3.17	31/1/17	3.86
10/10/16	2.66	17/11/16	2.77	25/12/16	3.28	1/2/17	3.96
11/10/16	2.73	18/11/16	2.91	26/12/16	2.96	2/2/17	4.43
12/10/16	2.58	19/11/16	2.90	27/12/16	3.22	3/2/17	3.45
13/10/16	1.92	20/11/16	3.05	28/12/16	2.54	4/2/17	3.69
14/10/16	2.58	21/11/16	3.30	29/12/16	2.77	5/2/17	3.60
15/10/16	1.56	22/11/16	3.06	30/12/16	2.75	6/2/17	3.72
16/10/16	2.16	23/11/16	3.11	31/12/16	2.48	7/2/17	3.36
17/10/16	1.72	24/11/16	2.89	1/1/17	2.86	8/2/17	3.74
18/10/16	2.54	25/11/16	2.97	2/1/17	2.84	9/2/17	3.55
19/10/16	2.41	26/11/16	2.93	3/1/17	2.87	10/2/17	3.31
20/10/16	2.27	27/11/16	2.72	4/1/17	2.26	11/2/17	3.76
21/10/16	1.46	28/11/16	2.84	5/1/17	2.53	12/2/17	4.00
22/10/16	2.54	29/11/16	2.91	6/1/17	3.87	13/2/17	3.01
23/10/16	0.83	30/11/16	2.97	7/1/17	3.96	14/2/17	3.74
24/10/16	1.70	1/12/16	1.89	8/1/17	2.42	15/2/17	4.71
25/10/16	1.28	2/12/16	2.24	9/1/17	2.93	16/2/17	3.45
26/10/16	1.46	3/12/16	2.63	10/1/17	2.82	17/2/17	2.81
27/10/16	1.09	4/12/16	2.95	11/1/17	3.37	18/2/17	4.37
28/10/16	1.99	5/12/16	3.03	12/1/17	3.19	19/2/17	4.39
29/10/16	2.10	6/12/16	1.97	13/1/17	2.63	20/2/17	4.33
30/10/16	2.90	7/12/16	2.75	14/1/17	2.36	21/2/17	2.71
31/10/16	2.28	8/12/16	2.73	15/1/17	2.27	22/2/17	4.21
1/11/16	2.69	9/12/16	2.89	16/1/17	3.42	23/2/17	3.69
2/11/16	2.45	10/12/16	2.70	17/1/17	3.33	24/2/17	4.41
3/11/16	2.66	11/12/16	2.86	18/1/17	3.20	25/2/17	4.07
4/11/16	2.45	12/12/16	2.88	19/1/17	2.87	26/2/17	4.19
5/11/16	1.79	13/12/16	2.59	20/1/17	2.47	27/2/17	4.08
6/11/16	1.06	14/12/16	3.08	21/1/17	2.55	28/2/17	4.59
7/11/16	3.25	15/12/16	1.12	22/1/17	4.18	1/3/17	3.87
8/11/16	2.95	16/12/16	2.83	23/1/17	2.05	2/3/17	4.39
9/11/16	2.74	17/12/16	2.92	24/1/17	1.49	3/3/17	4.05
10/11/16	2.78	18/12/16	2.83	25/1/17	3.47	4/3/17	4.20
11/11/16	2.19	19/12/16	2.95	26/1/17	4.39	5/3/17	4.67
12/11/16	3.14	20/12/16	3.05	27/1/17	3.68	6/3/17	3.88
13/11/16	2.64	21/12/16	2.37	28/1/17	4.43	7/3/17	4.63
14/11/16	2.71	22/12/16	1.87	29/1/17	3.84	8/3/17	2.61

## ANEXO 2: RESULTADO DE LA SIMULACIÓN EN AQUACROP

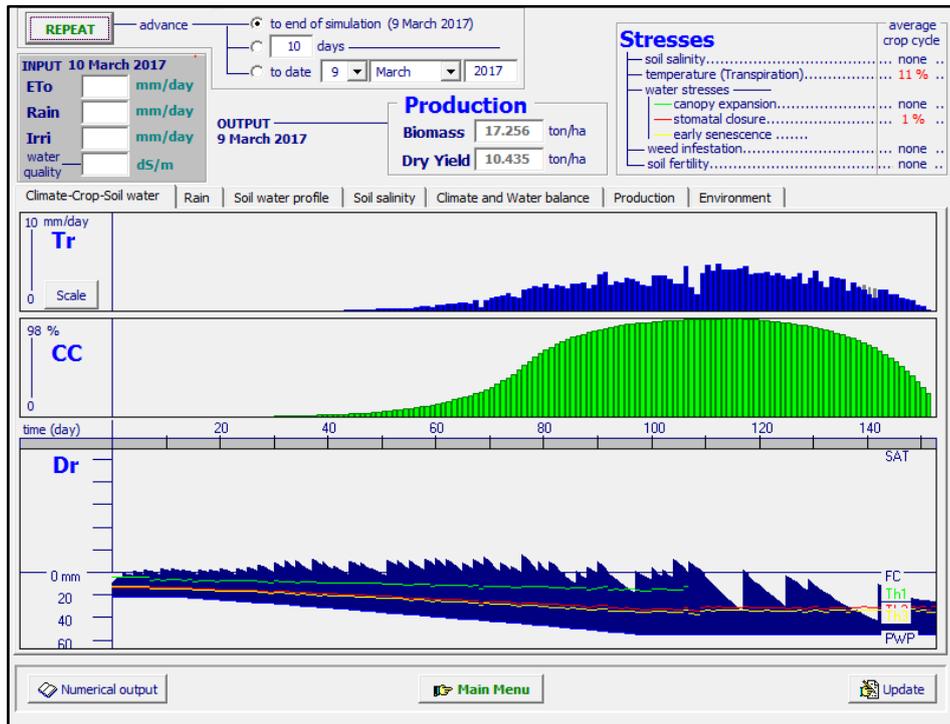


Figura 40. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento testigo T<sub>0</sub>.

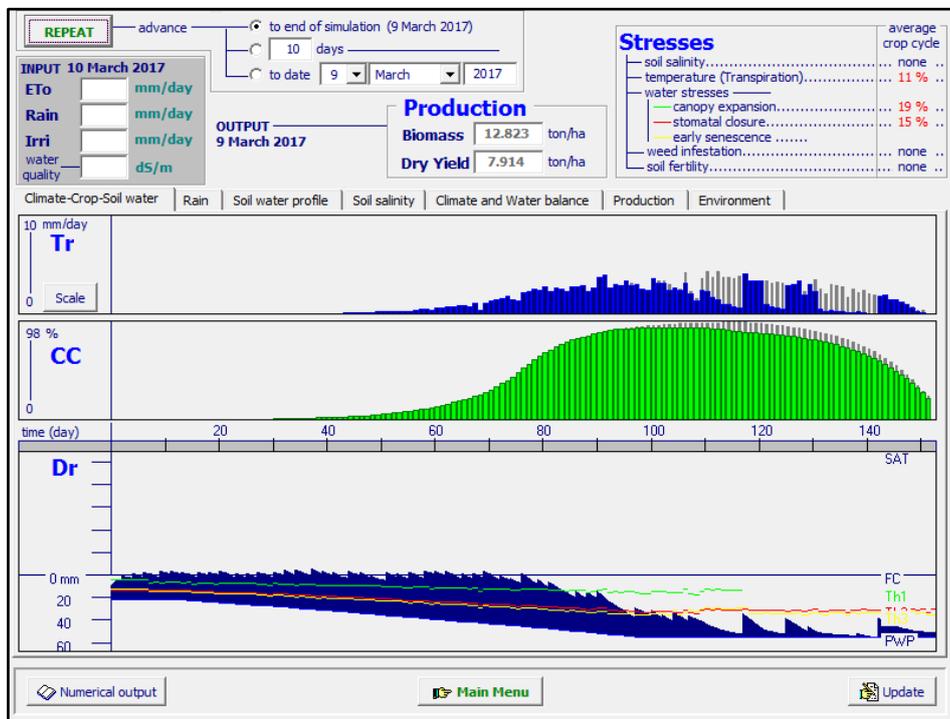


Figura 41. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento deficitario T<sub>a</sub>.

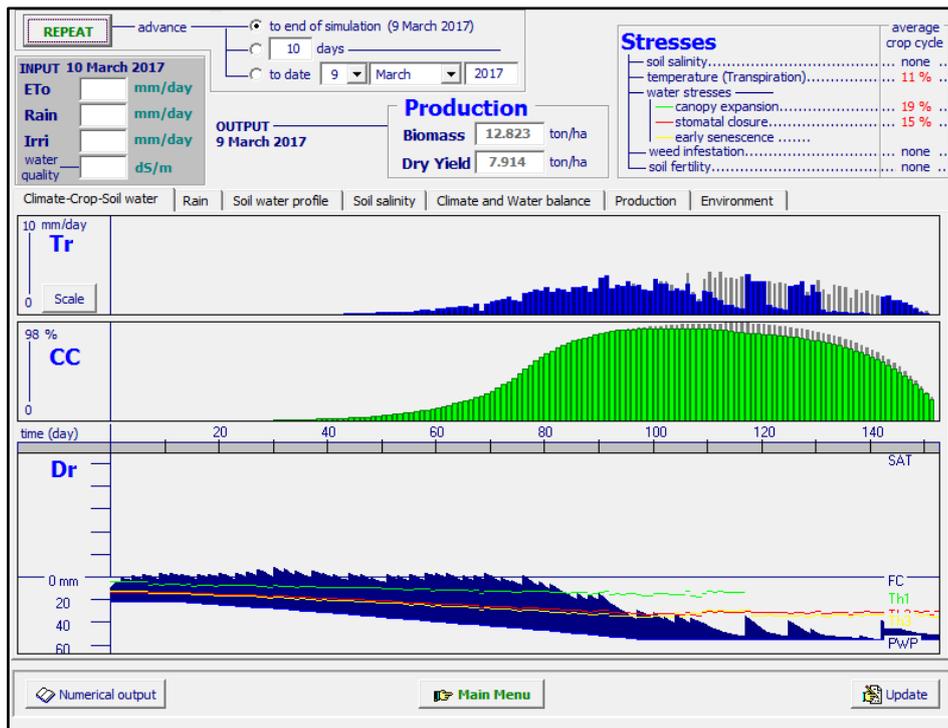


Figura 42. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento deficitario  $T_b$

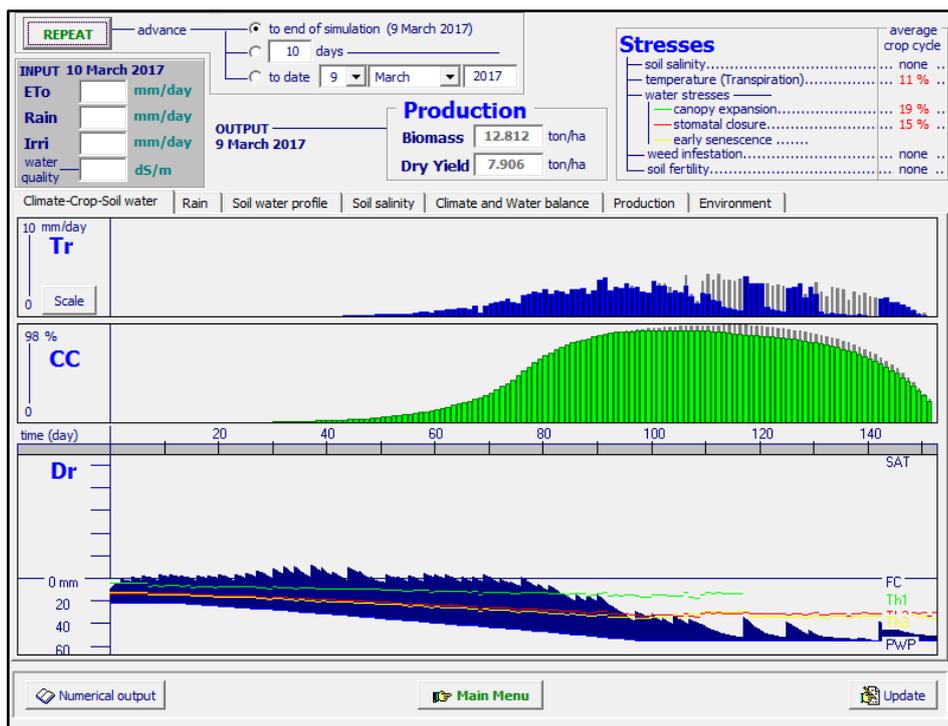


Figura 43. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad huambachero, tratamiento deficitario  $T_c$

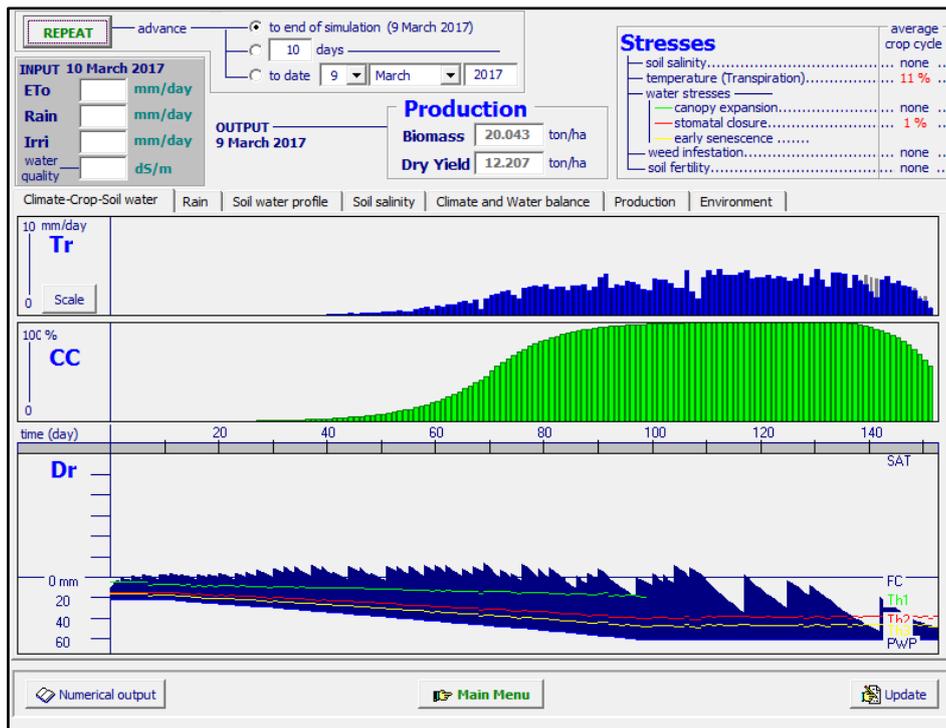


Figura 44. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramunguino, tratamiento testigo T.

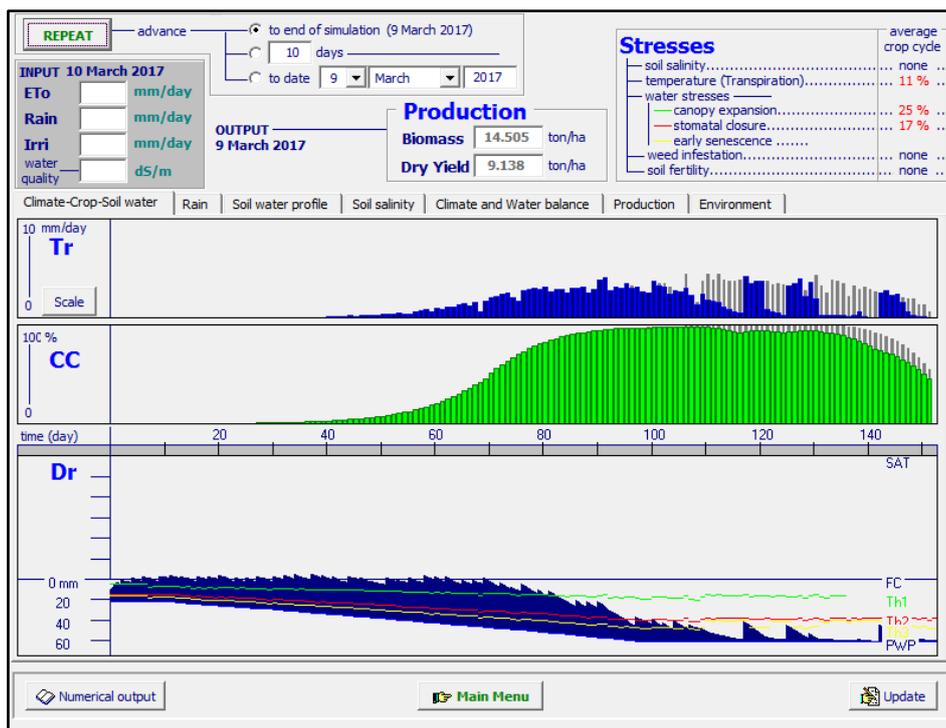


Figura 45. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramunguino, tratamiento testigo Ta

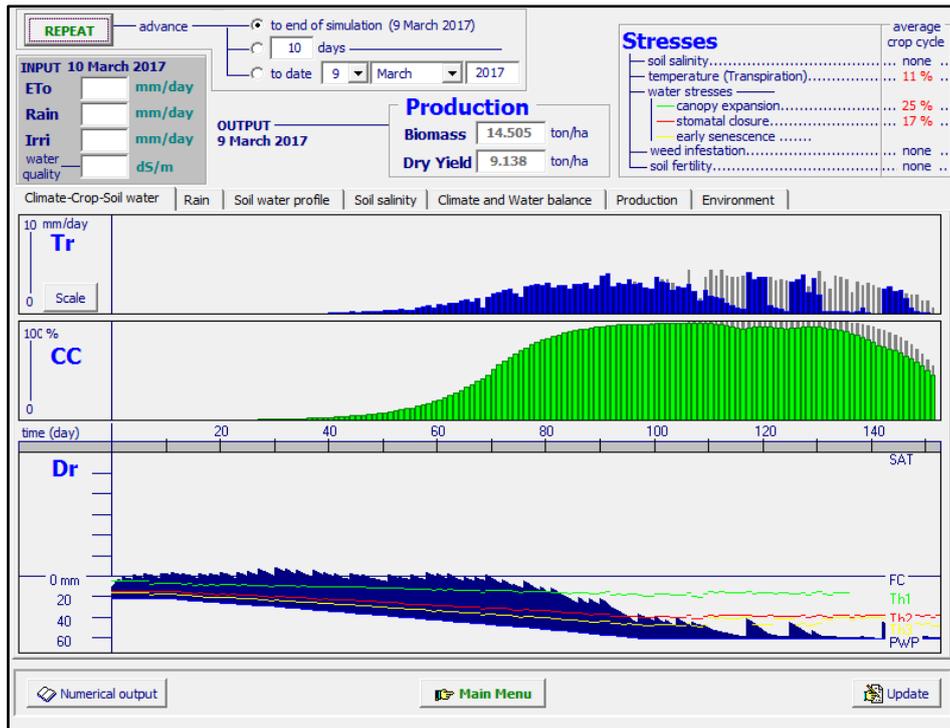


Figura 46. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramunguino, tratamiento testigo T<sub>b</sub>

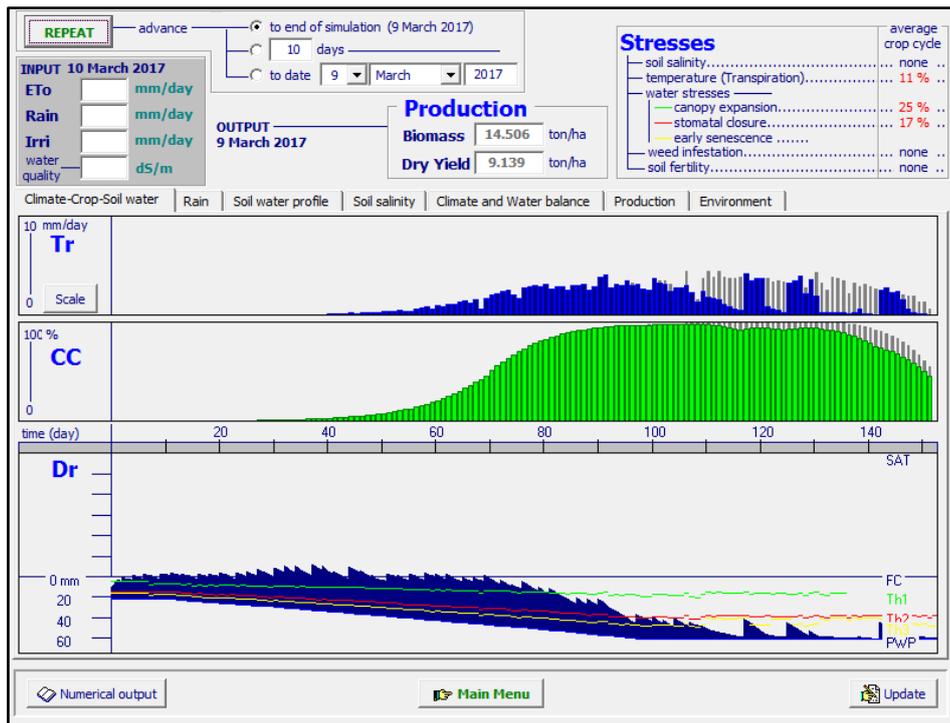


Figura 47. Resultado de la simulación en AquaCrop para el camote, variedad paramunguino, tratamiento testigo T<sub>c</sub>

### ANEXO 3: RESULTADOS DE LOS ANALISIS DE LABORATORIO

ANÁLISIS DE SUELO - CARACTERIZACION																	
SOLICITANTE		: MIGUEL SANCHEZ DELGADO															
PROCEDENCIA		: PARCELA EXPERIMENTAL DEL DEPARTAMENTO DE RECURSOS HIDRICOS- UNALM															
RESP. ANALISIS		: Ing. Elizabeth Monterrey Porras															
FECHA DE ANALISIS		: La Molina, 12 de Octubre del 2016															
Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	M.O. %	P ppm	K ppm	CaCO <sub>3</sub> %	Cationes Cambiables					
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC total	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup>
												Cmol (+) / Kg					
10955	Suelo	0.77	57.64	27.26	14.68	Francoso arenoso	7.59	1.75	45.68	72.00	1.23	13.82	12.28	1.28	0.10	0.15	-

Figura 48. Resultado del análisis de suelo del campo experimental llevado a cabo en el LAASMA de la UNALM

ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA		
SOLICITANTE		: MIGUEL SANCHEZ
UBICACIÓN		: Unalm
RESPONSABLE ANALISIS		: Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANALISIS		: La Molina, 15 de Junio del 2017
Nº LABORATORIO	7877	
Nº DE CAMPO	Agua	
CE	dS/m	0.66
pH		7.52
Calcio	meq/l	4.90
Magnesio	meq/l	0.83
Sodio	meq/l	0.89
Potasio	meq/l	0.05
SUMA DE CATIONES		6.67
Cloruro	meq/l	1.13
Sulfato	meq/l	2.67
Bicarbonato	meq/l	2.83
Nitratos	meq/l	0.00
Carbonatos	meq/l	0.00
SUMA DE ANIONES		6.62
SAR		0.52
CLASIFICACION		C2-S1
Boro	ppm	0.57

Figura 49. Resultado del análisis del agua de riego llevado a cabo en el LAASMA de la UNALM

#### ANEXO 4: REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Figura 50. Preparación e instalación del sistema de riego**



**Figura 51. Acondicionamiento del terreno y siembra del camote**



**Figura 52. Labores culturales y manejo del cultivo**



**Figura 53. Monitoreo del cultivo**



**Figura 54. Fotografías de la cobertura de dosel en la variedad huambachero**



**Figura 55. Fotografías de la cobertura de dosel en la variedad paramonguino**



**Figura 56. Cosecha del cultivo de camote**