

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CULTIVO DE PAPA
VARIEDAD UNICA (*Solanum tuberosum* L.) USANDO UN MODELO
DE CRECIMIENTO DE CULTIVO”**

Presentada por:

JOHAN LENON NINANYA TANTAVILCA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima - Perú

2020

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE CULTIVO DE PAPA
VARIEDAD UNICA (*Solanum tuberosum* L.) USANDO UN MODELO
DE CRECIMIENTO DE CULTIVO”**

Presentada por:

JOHAN LENON NINANYA TANTAVILCA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar
PRESIDENTE

Mg. Sc. Juan Carlos Chang Chang Fun
MIEMBRO

Mg. Sc. Rolando Percy Egúsqiza Bayona
MIEMBRO

Mestre. Jerónimo García Villanueva
ASESOR

Mg. Sc. Javier Isidoro Rinza Díaz

DEDICATORIA

*A mis padres Juana y Jorge,
y a mis hermanos Katherin y Franklin*

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) en el marco del proyecto N°: 016-2015-INIA-PNIA/UPMSI/IE “Uso efectivo del agua en el cultivo de papa en zonas áridas: Mejorando el manejo del riego mediante el monitoreo del estatus hídrico para enfrentar al Cambio Climático” por el financiamiento para realizar esta investigación.

Al Dr. David Ramírez (investigador principal del proyecto) por el apoyo y respaldo durante la investigación, por sus enseñanzas y consejos durante la redacción del manuscrito, y por su amistad.

Al Mg. Sc. Javier Rinza (co-asesor, maestro y amigo) por confiar y creer en mi, por guiarme durante la investigación, y por su apoyo y motivación para sacar adelante esta tesis.

A Cecilia Silva, Jonas Witten, Angel Cobeñas y Fernando Guerrero por su amistad, por apoyarme durante la investigación, y por enseñarme que el mejor trabajo es aquel que se hace en equipo.

Al Mg. Sc. Jerónimo García por su asesoría durante esta investigación, por sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorar este manuscrito, y por su paciencia y comprensión.

A los profesores miembros del jurado por sus valiosos comentarios y críticas constructivas.

A mis profesores y amigos de la universidad que me enseñaron a querer más esta carrera y me dieron las herramientas necesarias para poder llevar a cabo esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. GENERALIDADES SOBRE EL CULTIVO DE PAPA	4
2.2. EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL CULTIVO DE PAPA	4
2.3. ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO (CWSI)	5
2.4. MODELO DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA	6
2.5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO SOLANUM	7
III. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO	12
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	13
3.2.1. Variables meteorológicas	15
3.2.2. Análisis estadístico.....	16
3.3. MANEJO DE CAMPO Y DEL CULTIVO	16
3.3.1. Material vegetal	16
3.3.2. Determinación de los parámetros físicos del suelo y evaluación de la humedad del suelo	16
3.3.3. Determinación del volume de riego	18
3.3.4. Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)	19
3.3.5. Evaluación de la cobertura de follaje y biomasa	21
3.4. MÉTODOS	22
3.4.1. Estimación del rendimiento de tubérculo con un modelo de cultivo bajo condición potencial y de restricción hídrica	22
a. Parametrización del modelo SOLANUM	22
b. Estimación del rendimiento de tubérculo	23
3.4.2. Incorporación del índice de estrés hídrico (cwsí) en el modelo SOLANUM	25

3.4.3.	Evaluación del performance del modelo en la estimación del rendimiento del cultivo	28
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1.	ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE TUBÉRCULO CON UN MODELO DE CULTIVO BAJO CONDICIÓN POTENCIAL Y DE RESTRICCIÓN HÍDRICA	30
4.2.	INCORPORACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO (CWSI) EN EL MODELO SOLANUM	36
4.2.1.	Resultados previos a la incorporación del cwsí en el modelo SOLANUM	36
4.2.2.	Estimación del rendimiento del cultivo mediante el módulo de cwsí incorporado en el modelo SOLANUM.....	37
4.3.	EVALUACIÓN DEL PERFORMANCE DEL MODELO EN LA ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO	40
V.	CONCLUSIONES	42
VI.	RECOMENDACIONES	43
VII.	BIBLIOGRAFÍA.....	44
VIII.	ANEXOS.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Parámetros y variables necesarios para ejecutar el modelo SOLANUM. TT _{ac} : Tiempo termal acumulado desde la emergencia. CF: Cobertura de follaje.....	9
Tabla 2: Promedio mensual (\pm error estándar) de las principales variables meteorológicas: Temperatura promedio del aire (T), temperatura máxima/mínima (T _{max} /T _{min}), humedad relativa (HR), radiación solar (R _s), presión atmosférica (PA) y precipitación total (pp).....	12
Tabla 3: Características del campo experimental del ensayo llevado a cabo entre el 05 de octubre del 2017 y el 15 de enero del 2018.....	13
Tabla 4: Criterios tomados en cuenta para determinar el momento de riego en cada tratamiento. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo.....	15
Tabla 5: Parámetros físicos del suelo determinados a partir de dos calicatas. ρ : Densidad global. θ_{cc}/u_{cc} : Humedad volumétrica/gravimétrica en capacidad de campo. θ_{pmp} : Humedad volumétrica en el punto de marchitez permanente.....	18
Tabla 6: Parámetros del cultivo usados en la parametrización del modelo SOLANUM. El nombre de los parámetros son los mismo que en el Tabla 1.....	23
Tabla 7: Parámetros ambientales y variables adicionales necesarios para ejecutar el modelo SOLANUM.....	24
Tabla 8: Criterios de confiabilidad para la evaluación del modelo SOLANUM.....	29
Tabla 9: Coeficientes del factor de reducción (FR) empleados en la penalización del uso eficiente de radiación (RUE), valor máximo de la cobertura de follaje (w_{max}), tiempo termal cuando se alcanza el w_{max} (t_e) y el valor máximo del índice de cosecha (A) en términos del CWSI acumulado ($CWSI_{ac}$). $FR = a_1 CWSI_{ac}^2 + a_2 CWSI_{ac} + a_3$	37
Tabla 10: Rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu, en t ha ⁻¹) obtenido durante el ensayo y estimado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de restricción hídrica (RH) y de CWSI.....	39

Tabla 11: Estadísticos usados para la evaluación del performance del modelo SOLANUM en la estimación del rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu, en t ha ⁻¹) obtenido mediante el módulo de restricción hídrica (RH) y de CWSI. MBE y RMSE en tha ⁻¹	41
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Principales estados de desarrollo del cultivo de papa.....	5
Figura 2: Esquema simplificado para calcular el rendimiento del cultivo en relación con datos del clima y humedad del suelo.....	8
Figura 3: Diseño de bloques completamente al azar del ensayo de campo realizado durante los meses de octubre - enero del 2018. Se aplicaron cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4) repetidos en 5 bloques, siendo T1 el tratamiento control y T2, T3 y T4 los tratamientos con restricción hídrica. EMA: Estación meteorológica automática portátil. K1 y K2: Calicatas	14
Figura 4: Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) usando una cámara térmica. SHR: Superficie húmeda de referencia	20
Figura 5: Esquema para determinar diariamente la variable “final” penalizado por el CWSI (Y_{CWSI}) a partir del valor potencial ($Y_{pot.}$) y “castigado” mediante un factor de reducción (Y_{cws}). $CWSI_{ac}$: Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) acumulado desde el inicio de tratamiento (IT) hasta los 85 días después de la siembra (dds)	27
Figura 6: Rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu) (\pm error estándar) obtenido en las parcelas regadas por goteo (a) y gravedad (b). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) detectado mediante una prueba LSD de Fisher	31
Figura 7: Rendimiento de materia fresca del tubérculo (RMFTu) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra) y el de restricción hídrica (línea continua gris). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).	32
Figura 8: Rendimiento de materia seca total (RMST) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de	

<p>crecimiento potencial (línea punteada negra) y el de restricción hídrica (línea continua gris). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).</p>	33
<p>Figura 9: Influencia del uso eficiente de la radiación (RUE) en el rendimiento de materia seca total (RMST). El RUE es expresado como porcentaje del máximo valor alcanzado en las parcelas regadas po goteo (gris) y gravedad (blanco)</p>	36
<p>Figura 10: Rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu) observado (círculo ± error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra), el de restricción hídrica (línea continua gris) y el de CWSI incorporado (línea continua negra). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).</p>	38
<p>Figura 11: Rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu) observado vs. simulado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de restricción hídrica (a) y de CWSI (b) para las parcelas regadas por goteo (negro) y gravedad (blanco)</p>	41

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Productos químicos (insecticidas y plaguicidas) usados para el control integral de plagas y enfermedades durante el ensayo llevado a cabo entre el 05-oct-17 al 15-ene-18. dds: Días después de la siembra. 1 cil = 200 L ..	51
Anexo 2: Volumen de agua (en m ³ ha ⁻¹) usado durante el ensayo en el tratamiento T1 (control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7). 1: Desde la siembra hasta el inicio de tratamiento (0 a 33dds). 2: Desde el inicio de tratamiento hasta la cosecha (33 a 102 dds). 3: Volumen total de agua. dds: Días después de la siembra	51
Anexo 3: Ajuste de la cobertura de follaje (CF) a una función Beta para obtener los parámetros relacionados a la intercepción de luz: el máximo valor de la CF (w_{max}), el TT_{ac} cuando ocurre el w_{max} (t_e) y el TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de crecimiento de la CF (t_m). TT_{ac} : Tiempo termal acumulado	52
Anexo 4: Ajuste del índice de cosecha (IC) a una función Gompertz para obtener los parámetros relacionados a la partición de tubérculo: el máximo valor del IC (A), el TT_{ac} cuando ocurre el inicio del proceso de tuberización (b) y el TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de partición (t_u). TT_{ac} : Tiempo termal acumulado	52
Anexo 5: Determinación del uso eficiente de radiación (RUE, en gMJ ⁻¹). BST: Biomasa seca total. PAR: Radiación fotosintéticamente activa. a: Pendiente de la recta que pasa por el origen	53
Anexo 6: Interpolación de los datos faltantes del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) mediante el polinomio interpolante de Lagrange, en las parcelas regadas por goteo. Los datos observados e interpolados son representados por los círculos grises y blancos respectivamente. Las subfiguras a), b), c) y d) representan al tratamiento T1 (Control), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente	53
Anexo 7: Influencia de los parámetros del cultivo en el rendimiento de materia seca total (RMST). Los parámetros están expresados como porcentaje del máximo valor obtenido en las parcelas regadas por goteo (gris) y gravedad (blanco). w_{max} : máximo valor de la cobertura de follaje. t_e : TT_{ac} cuando ocurre w_{max} . t_m : TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de crecimiento del	

<p>follaje. A: máximo valor del índice de cosecha. b: TT_{ac} cuando ocurre el proceso de tuberización. t_u: TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de partición. TT_{ac}: tiempo termal acumulado</p>	54
<p>Anexo 8: Rendimiento de materia seca del tubérculo (RMSTu) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra) y el de restricción hídrica (línea continua gris). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).....</p>	55
<p>Anexo 9: Rendimiento de materia seca total (RMST) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra), el de restricción hídrica (línea continua gris) y el de CWSI incorporado (línea continua negra). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).</p>	56
<p>Anexo 10: Rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra), el de restricción hídrica (línea continua gris) y el de CWSI incorporado (línea continua negra). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).</p>	57
<p>Anexo 11: Comparación del rendimiento observado y simulado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de restricción hídrica para el tratamiento T1 (control, \circ), T2 (CWSI = 0.4, Δ), T3 (CWSI = 0.6, \times) y T4 (CWSI = 0.7, \square). Rendimiento de materia seca de tubérculo: goteo (a) y gravedad (b). Rendimiento de materia fresca de tubérculo: goteo (c) y gravedad (d).</p>	

Rendimiento de materia seca total: goteo (e) y gravedad (f)	58
Anexo 12: Comparación del rendimiento observado y simulado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de CWSI para el tratamiento T1 (control, ○), T2 (CWSI = 0.4, Δ), T3 (CWSI = 0.6, ×) y T4 (CWSI = 0.7, □). Rendimiento de materia seca de tubérculo: goteo (a) y gravedad (b). Rendimiento de materia fresca de tubérculo: goteo (c) y gravedad (d). Rendimiento de materia seca total: goteo (e) y gravedad (f)	59
Anexo 13: Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) (línea gris) y lámina de riego (barra negra) aplicado durante el ensayo. La línea vertical entrecortada representa el inicio de los tratamientos (33 dds). La línea punteada horizontal representa el umbral de CWSI usado como criterio de riego. Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. dds: Días después de la siembra.	60
Anexo 14: Agua disponible en el suelo (ASD) medido en campo (línea y puntos negros) y simulado con el modelo SOLANUM (línea continua gris) y lámina de riego aplicado en cada tratamiento (barras negras). La línea vertical entrecortada representa el inicio de tratamiento (33 dds). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra.	61
Anexo 15: Error cuadrático medio de la raíz (RMSE) expresado como porcentaje de la media (rRMSE, en %) de algunos modelos de crecimiento para el cultivo de papa. El asterisco (*) indica que solo estuvo disponible el RMSE, en t ha ⁻¹	62

LISTA DE ABREVIATURAS

RMFTu	: Rendimiento de materia fresca de tubérculo
RMSTu	: Rendimiento de materia seca de tubérculo
RMST	: Rendimiento de materia seca total
CF	: Cobertura del follaje
IC	: Índice de cosecha
RUE	: Uso eficiente de radiación
w_{max}	: Valor máximo de la cobertura de follaje
t_e	: Tiempo termal cuando ocurre el valor máximo de la cobertura de follaje
t_m	: Tiempo termal cuando ocurre la tasa máxima de crecimiento de la cobertura de follaje
A	: Valor máximo del índice de cosecha
t_u	: Tiempo termal cuando ocurre la tasa máxima de partición de tubérculo
b	: Tiempo termal cuando ocurre el inicio del proceso de tuberización
TT_{ac}	: Tiempo termal acumulado desde el inicio de emergencia
dds	: Días después de la siembra
cc	: Capacidad de campo
pmp	: Punto de marchitez permanente
CIP	: Centro Internacional de la Papa
θ	: Humedad volumétrica del suelo
SHR	: Superficie húmeda de referencia
T_f	: Temperatura del follaje
T_s	: Temperatura de la superficie seca de referencia
T_{sh}	: Temperatura de la superficie húmeda de referencia
CWSI	: Índice de estrés hídrico del cultivo
$CWSI_{ac}$: Índice de estrés hídrico del cultivo acumulado desde el inicio de tratamiento hasta los 85 días después de la siembra
FR	: Factor de reducción
IT	: Inicio de tratamiento

RESUMEN

La estimación del rendimiento del cultivo de papa variedad UNICA mediante un modelo de crecimiento de cultivo (SOLANUM) sometido a diferentes niveles de estrés hídrico y bajo dos tipos de riego (goteo y gravedad), se discuten en el siguiente estudio. El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI, del inglés “Crop Water Stress Index”), considerado como una variable integradora del estado hídrico de un cultivo, fue incorporado en el modelo SOLANUM. El ensayo se llevó a cabo en la estación experimental del Centro Internacional de la Papa (CIP) de octubre (2017) a enero (2018) en La Molina-Perú. Cuatro tratamientos de momentos de riego basados en el CWSI fueron aplicados: humedad del suelo mantenido en capacidad de campo (control, T1), CWSI = 0.4 (T2), CWSI = 0.6 (T3) y CWSI = 0.7 (T4). El rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu) estimado con el módulo de crecimiento potencial del modelo SOLANUM fue de 36.6 ± 0.1 y 48.5 ± 0.2 t ha⁻¹, mientras que, el RMFTu observado (en el tratamiento control) fue de 34.8 ± 5.4 y 40.8 ± 6.6 t ha⁻¹ en las parcelas regadas por goteo y gravedad respectivamente. El módulo de restricción hídrica (RH), en promedio, sobreestimó el rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu) en 45 y 78 por ciento en las parcelas regadas por goteo y gravedad respectivamente. El módulo de CWSI incorporado en el modelo, redujo la sobreestimación del RMSTu, siendo esta de 4 por ciento (en goteo) y 38 por ciento (en gravedad). En los siete estadísticos evaluados, el módulo de CWSI presentó mejor performance respecto al módulo de RH. Para el RMSTu, el error cuadrático medio de la raíz expresado como porcentaje de la media (rRMSE) fue de 46.6 y 20.5 por ciento para el módulo de RH y CWSI respectivamente. Se propone el CWSI como una variable que permite mejorar la estimación del rendimiento del cultivo de papa en condiciones de estrés hídrico y el rRMSE como un mejor estadístico para evaluar el performance de un modelo de cultivo.

Palabras claves: *Estrés hídrico, rendimiento del cultivo de papa, índice de estrés hídrico del cultivo, estimación del rendimiento, modelo SOLANUM, performance del modelo.*

ABSTRACT

Yield estimation of the UNICA potato crop variety through a crop growth model (SOLANUM) submitted to different water stress levels under two kinds of irrigation (drip and furrow), is discussed in the present study. The crop water stress index (CWSI), considered as an integrating variable of the water status of a crop, was incorporated in the SOLANUM model. The trial was carried out at the experimental station of the International Potato Center (CIP) from October (2017) to January (2018) in La Molina-Peru. Four treatments of irrigation timing based on CWSI were applied: soil moisture maintained at field capacity (control, T1), CWSI = 0.4 (T2), CWSI = 0.6 (T3) and CWSI = 0.7 (T4). The fresh tuber biomass yield (RMFTu) estimated with the potential growth module of the SOLANUM model was 36.6 ± 0.1 and 48.5 ± 0.2 t ha⁻¹, while the observed RMFTu (in the control treatment) was 34.8 ± 5.4 and 40.8 ± 6.6 t ha⁻¹ for the plots irrigated by drip and furrow respectively. The water restriction module (RH), on average, overestimated tuber dry biomass yield (RMSTu) by 45 and 78 percent in the plots irrigated by drip and furrow respectively. The CWSI module incorporated in the model, reduced the overestimation of RMSTu, being 4 percent (in drip) and 38 percent (in furrow). In the seven statistics evaluated, CWSI module presented better performance than RH module. For RMSTu, the root mean square error expressed as a percentage of the mean (rRMSE) was 46.6 and 20.5 percent for RH and CWSI module, respectively. CWSI is proposed as a variable that allows to improve the estimation of crop potato yield in conditions of water stress and rRMSE as the best statistic to evaluate the crop model performance.

Keywords: Water stress, potato yield, Crop water stress index, yield estimation, SOLANUM model, model performance.

I. INTRODUCCIÓN

La papa es el cuarto cultivo en producción a nivel mundial, con alrededor de 375 millones de toneladas anuales, siendo Perú el principal productor en Latinoamérica (FAO 2018). Debido a su alto rendimiento y extraordinaria adaptabilidad a diferentes climas, es considerado como un cultivo de vital importancia para la seguridad alimentaria (DeFauw *et al.* 2012, Devaux *et al.* 2014). Se destaca por el uso productivo del agua, ya que ofrece más alimento por unidad de agua que cualquier otro cultivo (Renault y Wallender 2000). Se caracteriza por tener un sistema radicular superficial, limitando la extracción de humedad a las capas superiores del perfil de suelo, por lo que es sensible al estrés hídrico (Iwama 2008, Monneveux *et al.* 2013, Obidiegwu *et al.* 2015, van Loon 1981). Debido al cambio climático, se espera un incremento en la frecuencia y duración de las sequías, causando déficit en el suministro de agua para la agricultura (IPCC 2008). Siendo las sequías uno de los factores de estrés más importantes para los cultivos, es necesario desarrollar estrategias para ahorrar agua sin reducir el rendimiento del cultivo de papa (Obidiegwu *et al.* 2015, Ramírez *et al.* 2016).

Muchos estudios sugieren que un buen indicador del estado hídrico de un cultivo es la temperatura de follaje, la cual puede ser expresada a través del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI, del inglés “Crop Water Stress Index”) (Gardner *et al.* 1992, Prashar y Jones 2016, Rinza *et al.* 2018, Rud *et al.* 2014). La temperatura de follaje puede ser medida mediante termografía infrarroja, el cual es un método no destructivo de sensoramiento proximal basado en la detección de radiación infrarroja emitida por la planta (Jones *et al.* 2009). A su vez, el CWSI es un índice que varía de 0 a 1 y nos indica el grado de estrés hídrico que presenta un cultivo, por lo que está siendo usado como criterio para determinar el momento del riego en algunos cultivos de alta importancia (Alderfasi y Nielsen 2001, Stegman y Soderlund 1992, Erdem *et al.* 2006, O’Shaughnessy *et al.* 2012, Möller *et al.* 2006, Jones 1999) incluyendo la papa (Rud *et al.* 2014, Ramírez *et al.* 2016, Erdem *et al.* 2005, Stark y Wright 1985). No obstante, debido a que el CWSI está influenciado por las condiciones medioambientales (McCann *et al.* 1992, Jones 1999), es necesario determinar valores umbrales para una zona agroclimática en particular (Erdem *et al.* 2005, Ramírez *et*

al. 2016, Jones 1999, Jackson *et al.* 1981, Rinza *et al.* 2018). Al respecto, Rinza *et al.* (2018) proponen usar valores de CWSI inferiores a 0.4 como umbrales de riego óptimo en ambientes con alta humedad relativa como el de la costa central peruana. Además, el CWSI está estrechamente relacionado con el rendimiento del cultivo (Irmak *et al.* 2000, Jones 1999, Ramírez *et al.* 2016), reportándose en la literatura que valores superiores a 0.7 reducen significativamente el rendimiento del cultivo de papa en climas semi-áridos (Erdem, *et al.* 2005). Asimismo, el CWSI se ha propuesto como una herramienta potencial para estimar el rendimiento del cultivo (Irmak *et al.* 2000).

Una manera de integrar los factores causales que afectan el rendimiento de los cultivos es mediante la construcción de modelos matemáticos de crecimiento (De Vries y Rabbinge 1995). Hoy en día, estos modelos están ganando importancia debido a su capacidad de complementar la experimentación agrícola en el campo (Singh *et al.* 2008). Además, son vitales en el desarrollo de estrategias innovadoras de gestión de cultivos y sostenibilidad agrícola (Ahmed *et al.* 2013). La mayoría de los modelos en papa se derivan de modelos genéricos, principalmente de cereales (Raymundo *et al.* 2014). Al respecto, el SOLANUM es un modelo del cultivo de papa que estima el rendimiento del tubérculo bajo condiciones potenciales (Condori *et al.* 2008, 2010, Quiroz *et al.* 2017), de restricción de agua (Carli *et al.* 2014, Fleisher *et al.* 2017), de restricción de nitrógeno y de heladas (Condori *et al.* 2104). El modelo SOLANUM ha sido modificado a partir del modelo LINTUL-POTATO y adaptado para variedades de papa en los Andes (Condori *et al.* 2010). La incorporación de variables basadas en sensoramiento proximal como la reflectancia del follaje tomada por cámaras multi-espectrales han venido siendo ensayadas en estudios recientes con el modelo SOLANUM (Quiroz *et al.* 2017). Así el índice de vegetación normalizada (NDVI, del inglés “Normalized Difference Vegetation Index”), ha mostrado ser un mejor integrador de la intercepción de luz en el modelo, mejorando la capacidad de estimación del rendimiento del cultivo de papa (Quiroz *et al.* 2017). Teniendo en cuenta este reciente hallazgo y siendo el CWSI un integrador del estado hídrico del cultivo de papa (Prashar *et al.* 2013, Rud *et al.* 2014, Ramírez *et al.* 2016, Rinza *et al.* 2018) queda aún pendiente el análisis de su incorporación en el modelo SOLANUM.

En ese sentido, se ha desarrollado un experimento en campo bajo dos tipos de riego, con la finalidad de evaluar la estimación del rendimiento del cultivo de papa (variedad UNICA)

usando un modelo de crecimiento de cultivo bajo las condiciones medioambientales de La Molina y con los siguientes objetivos específicos:

- Estimar el rendimiento del tubérculo con un modelo de cultivo bajo condición potencial y de restricción hídrica.
- Incorporar el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en el modelo SOLANUM.
- Evaluar el performance del modelo en la estimación del rendimiento del cultivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 GENERALIDADES SOBRE EL CULTIVO DE PAPA

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es una planta perteneciente a la familia de las solanáceas originaria de Sudamérica y específicamente de los Andes de Perú y Bolivia (Hawkes 1992, Quiroz *et al.* 2012). Pueden crecer en diferentes ambientes, pero están mejor adaptados a climas templados (Haverkort 1990). Se divide en dos subespecies apenas diferentes: la andígena, adaptada a condiciones de días breves y cultivada principalmente en los Andes, y la *tuberosum*, la variedad que hoy se cultiva en todo el mundo. Este cultivo requiere de 0.35 a 0.8 m³ de agua para producir 1 kg de materia seca de tubérculo (Quiroz *et al.* 2012). El consumo de agua es de 500-700 mm aproximadamente, para un periodo vegetativo de 120-150 días (Hernández *et al.* 2016). Para el crecimiento de los tubérculos, la temperatura óptima del suelo es de 15 a 18 °C, mientras que, la temperatura óptima del aire es de 25 a 32 °C (temperatura diurna) y de 12 a 18 °C (temperatura nocturna) (Quiroz *et al.* 2012). A menos de 10 °C y por encima de los 30 °C se inhibe la tuberización (Pino 2016).

2.2 EFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN EL CULTIVO DE PAPA

El efecto del estrés hídrico en el cultivo de papa depende del momento de ocurrencia, así como de la duración y severidad del déficit hídrico (Jefferies 1995). Una restricción de agua en etapas tempranas del desarrollo del cultivo como el inicio de brotación y emergencia (ver Figura 1) retrasa la emergencia e inhibe el crecimiento de la raíz, acortando el periodo de crecimiento de la planta (Monneveux *et al.* 2013, Obidiegwu *et al.* 2015, van Loon 1981). La sensibilidad al estrés hídrico es mayor al inicio de tuberización, en comparación a otras etapas de crecimiento (van Loon 1981). En esta etapa se limita el desarrollo del follaje, el largo de tallos, el tamaño de las hojas y el número de tubérculos (Obidiegwu *et al.* 2015, Pino 2016), reduciendo significativamente el rendimiento del cultivo (van Loon 1981). En etapas tardías como el llenado de tubérculo (ver Figura 1) se limita el desarrollo del tubérculo afectando en su tamaño y calidad (Pino 2016). En general, se reduce el crecimiento de la hoja, el índice de área foliar, la cobertura del follaje, la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar ($\mu\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y el índice de cosecha (Monneveux *et al.* 2013).

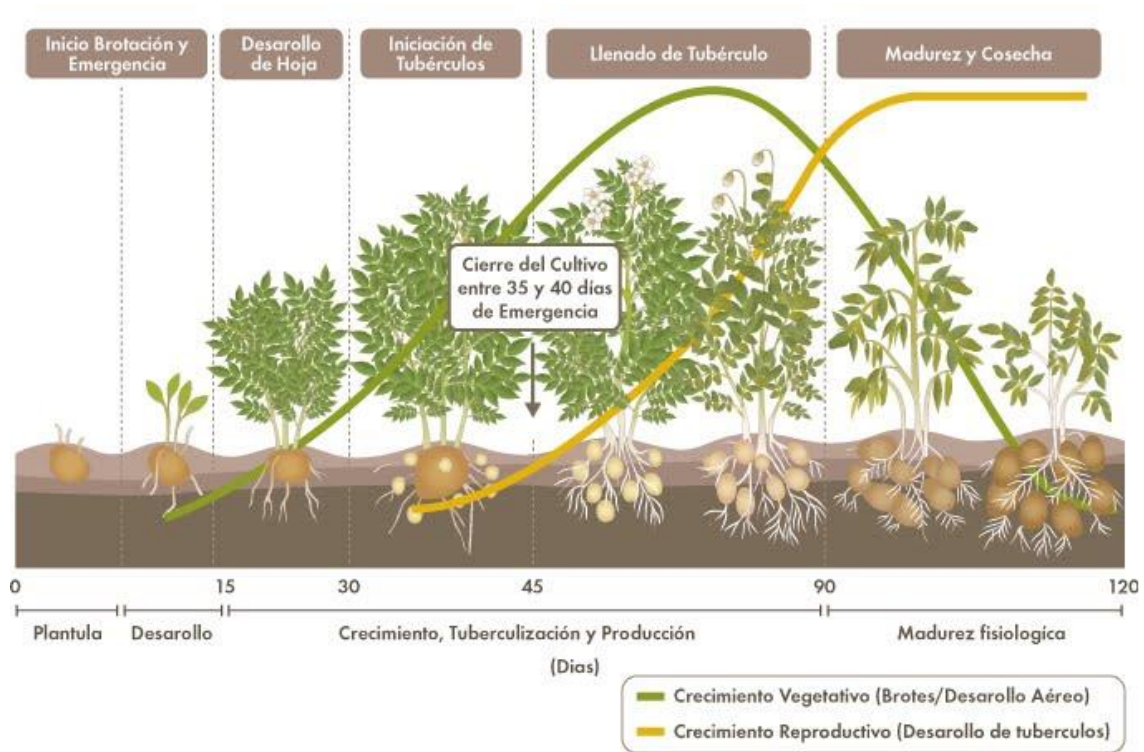


Figura 1: Principales estados de desarrollo del cultivo de papa.
FUENTE: Pino (2016).

2.3 ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO (CWSI)

La diferencia de temperatura de follaje (T_f) de un cultivo con la temperatura del aire (T_a) es un índice para evaluar el estrés hídrico en un cultivo. Esta diferencia de temperaturas ($T_f - T_a$) es influenciada por factores medioambientales como la presión de vapor del aire, radiación solar neta y velocidad del viento (Kirkham 2014). El CWSI es un índice desarrollado por Idso *et al.* (1981), el cual estandariza esta diferencia de temperaturas ($T_f - T_a$), de manera que sea independiente de la variabilidad medioambiental. El CWSI fue obtenido al encontrar la relación lineal entre el déficit de presión de vapor (VPD) vs. $T_f - T_a$ y al definir dos umbrales de temperatura. Según Idso *et al.* (1981) y Jackson *et al.* (1981) se define como:

$$CWSI = \frac{[(T_f - T_a)_m - (T_f - T_a)_{li}]}{[(T_f - T_a)_{ls} - (T_f - T_a)_{li}]} \quad (2.1)$$

Donde el subíndice m denota la diferencia medida entre las dos temperaturas, los subíndices li (límite inferior) y ls (límite superior) representan la diferencia entre las dos temperaturas ($T_f - T_a$) cuando el cultivo transpira al máximo y cuando deja de transpirar (transpiración =

0) respectivamente. Jones (1999) reformula el CWSI para superficies de referencias, obteniendo la siguiente ecuación:

$$CWSI = \frac{T_f - T_{sh}}{T_s - T_{sh}} \quad (2.2)$$

Donde T_f es la temperatura de follaje, T_{sh} es la temperatura de la superficie húmeda que representa la temperatura de follaje de una planta bien regada, T_s es la temperatura de la superficie seca y representa la temperatura de follaje de una planta en estrés máximo. Este índice varía de 0 a 1. Cuando un cultivo está bien regado (sin estrés) su valor es cercano a cero y cuando el cultivo está en estrés su valor se aproxima a uno.

2.4 MODELO DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE PAPA

Los modelos de crecimiento son modelos matemáticos que describen el crecimiento y desarrollo de un cultivo, así como su respuesta a los factores edafológicos, biológicos y meteorológicos (Ahmed *et al.* 2013). Para simular el crecimiento potencial del cultivo de papa los modelos incluyen procesos de acumulación de tiempo termal, desarrollo del follaje, inducción de tubérculos, asignación de materia seca y crecimiento del tubérculo (Raymundo *et al.* 2014). El desarrollo del cultivo es determinado principalmente por la temperatura y duración del día, estos factores determinan el momento de iniciación del órgano y la posterior asignación relativa de materia seca a ellos. Las temperaturas altas reducen el tiempo entre las diversas etapas del cultivo y los fotoperiodos cortos conducen a un inicio más temprano de tuberización y maduración del cultivo, ya que más materia seca se asigna al tubérculo y por lo tanto menos al follaje (Haverkort 2007). El rendimiento del cultivo se calcula como la proporción de biomasa asignada al tubérculo. En algunos modelos se consideran procesos de partición para los diferentes órganos. En general, los modelos para el cultivo de papa han sido desarrollados bajo dos enfoques (Raymundo *et al.* 2014):

Uso eficiente de radiación o luz (LUE del inglés “Light Use Efficiency”): En estos modelos, la producción total de materia seca es calculada a partir de la cantidad incidente de radiación fotosintéticamente activa (PAR, del inglés “Photosynthetic Active Radiation”) y la eficiencia en la conversión de radiación PAR en biomasa. El rendimiento del tubérculo es determinado por el crecimiento total de materia seca y la fracción de materia seca asignada al tubérculo (Spitters y Schapendonk 1990).

Uso eficiente de agua (WUE del inglés “Water Use Efficiency”): En estos modelos, la biomasa total se obtiene a partir de la cantidad acumulada de transpiración del cultivo. A su vez, la transpiración del cultivo es determinada por la evapotranspiración de referencia (ET_o) multiplicada por un coeficiente del cultivo (K_{cTr}). El coeficiente del cultivo es proporcional al desarrollo de la cobertura de follaje y varía a través de todo el ciclo de crecimiento del cultivo. Finalmente, el rendimiento del cultivo se obtiene usando el índice de cosecha, que es la fracción de biomasa cosechable (Raes 2017).

2.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO SOLANUM

El modelo SOLANUM pertenece a la familia de modelos LINTUL (del inglés “Light INTERception and Utilization”), el cual es un modelo genérico de cultivo que fue diseñado por la Universidad de Wageningen y es usado ampliamente para predecir la producción potencial de un cultivo basado en el uso eficiente de luz (Ahmed *et al.* 2013). El modelo SOLANUM fue el resultado de una modificación y adaptación del modelo LINTUL-POTATO (Kooman y Haverkort 1994) para el cultivo de papa en los Andes (Condori *et al.* 2010). Este modelo opera bajo pasos de tiempo diario y simula la acumulación de materia seca a través de la siguiente ecuación general (Quiroz *et al.* 2017):

$$dTDM(t) = PAR \times CF(t) \times RUE/100 \quad (2.3)$$

Donde $dTDM$ es la tasa neta de asimilación de materia seca ($t \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$), PAR es la radiación fotosintéticamente activa (400-700 nm), CF es la curva de la cobertura de follaje (fracción de suelo cubierto por el follaje) y RUE es el valor promedio del uso eficiente de radiación PAR ($g \text{ MJ}^{-1}$). Tanto la radiación PAR como la cobertura de follaje varían diariamente. El RUE es un valor fijo, sin embargo, puede ser afectado por las temperaturas altas, bajas y/o el déficit hídrico al que es sometido el cultivo. La curva de la cobertura de follaje (CF) depende del valor máximo que puede alcanzar (w_{max}), del tiempo termal cuando alcanza el valor máximo de la CF (t_e) y del tiempo termal cuando alcanza la tasa máxima de crecimiento de la CF (t_m). La biomasa total acumulada es obtenida por integración de la $dTDM$ sobre el tiempo termal, mediante la siguiente ecuación:

$$DTY = \int IC(t) \times dTDM(t) \times dt \quad (2.4)$$

Donde DTY es el rendimiento total de materia seca (del inglés “Dry Tuber Yield”, en $t\ ha^{-1}$). IC es la curva de partición o índice de cosecha y representa la traslocación de biomasa hacia el tubérculo. La curva del índice de cosecha depende de su valor máximo (A), del tiempo termal cuando alcanza la tasa máxima de partición (t_u) y del tiempo termal antes del inicio del proceso de tuberización (b). Los parámetros de la curva de la CF y del HI se obtienen mediante regresión no lineal, ajustando sus datos a una función Beta y Gompertz, respectivamente. El rendimiento de materia fresca de tubérculo (FTY) se obtiene a partir de la concentración de materia seca de tubérculo (DM_C), usando la siguiente ecuación:

$$FTY = DTY/DM_C \quad (2.5)$$

Los parámetros del cultivo que usa el modelo SOLANUM (ver Tabla 1) describen los principales procesos involucrados en la intercepción de luz, en el uso eficiente de luz y en la partición de tubérculo (para una descripción más detallada ver Condori *et al.* 2010, 2014, Quiroz *et al.* 2017). El modelo SOLANUM cuenta con 4 módulos: de crecimiento potencial, de restricción hídrica, de restricción por nitrógeno y por heladas (CIP-PSE 2018). El módulo principal es el de crecimiento potencial y bajo este operan los otros módulos penalizando el rendimiento potencial de acuerdo con el grado de estrés que presenta el cultivo. En el modelo, cuando el cultivo crece bajo condiciones óptimas, el rendimiento es determinado solo por el clima. Cuando la disponibilidad de agua es un factor limitante el sistema planta-clima-agua interacciona de acuerdo con la Figura 2.

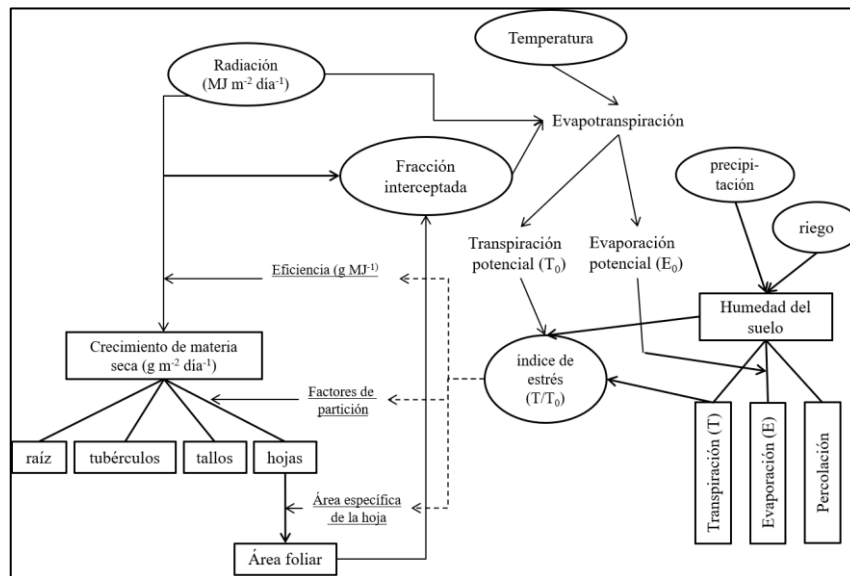


Figura 2: Esquema simplificado para calcular el rendimiento del cultivo en relación con datos del clima y humedad del suelo.

FUENTE: Spitters y Schapendonk 1990.

Tabla 1: Parámetros y variables necesarios para ejecutar el modelo SOLANUM. TT_{ac} : Tiempo termal acumulado desde la emergencia. CF: Cobertura de follaje.

Símbolo	Descripción	Unidades
EDay	Día de la emergencia	Día
plantDensity	Densidad de la planta	Planta m^{-2}
Parámetros del cultivo		
w_{max}	Máximo valor de la cobertura de follaje	fracción
t_m	TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de crecimiento de la CF	$^{\circ}C$ día
t_e	TT_{ac} en el que ocurre el máximo valor de la CF	$^{\circ}C$ día
A	Máximo valor del índice de cosecha	fracción
t_u	TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de partición de tubérculo	$^{\circ}C$ día
b	TT_{ac} antes del proceso de inicio de tuberización	$^{\circ}C$ día
RUE	Uso eficiente de radiación	g MJ^{-1}
DMCont	Concentración de materia seca	fracción
Parámetros ambientales		
T_b	Temperatura máxima para el inicio de tuberización	$^{\circ}C$
T_o	Temperatura óptima para el inicio de tuberización	$^{\circ}C$
T_u	Temperatura mínima para el inicio de tuberización	$^{\circ}C$
P_c	Fotoperiodo crítico	hr
w	Sensibilidad al fotoperiodo	hr^{-1}
Temperaturas bajas		
T_{cr}	Temperatura crítica	$^{\circ}C$
T_{ld}	Temperatura de muerte de las hojas	$^{\circ}C$
T_{rg}	Temperatura de rebrote	$^{\circ}C$
Balance hídrico		
Z_{suelo}	Profundidad del suelo	m
H_o	Contenido inicial de agua en el suelo (en lámina de agua)	mm
θ_{cc}	Humedad volumétrica en capacidad de campo	%
θ_{pmp}	Humedad volumétrica en el punto de marchitez permanente	%
CO₂		
$CO_2Air_{Concent}$	Concentración de CO ₂ en el aire	ppm

FUENTE: Condori *et al.* (2010).

El módulo de crecimiento potencial requiere de datos diarios de temperatura mínima (en $^{\circ}C$), temperatura máxima (en $^{\circ}C$), radiación solar (en $MJ\ m^{-2}$) y horas teóricas de sol (fotoperiodo, en hrs). Mientras que, el módulo de restricción hídrica adicionalmente requiere datos diarios

de precipitación (en mm) y riego (en mm). El modelo SOLANUM calcula diariamente la biomasa potencial del cultivo a partir de la radiación PAR interceptada y la eficiencia en el uso de radiación (RUE). La biomasa producida es distribuida en órganos aéreos (tallos y hojas) y en tubérculos. El crecimiento de las hojas incrementa el área foliar, esto se traduce en un aumento en la interceptación de radiación PAR, proporcionado así mayor energía para los procesos internos y el desarrollo de la planta. En el módulo de restricción hídrica se calcula diariamente la evapotranspiración potencial (ET_o) mediante el método de FAO-Penman-Monteith. La transpiración potencial (T_o) es calculada mediante la ecuación 2.6, a partir de la evapotranspiración potencial (ET_o), el valor máximo de la cobertura de follaje (w_{max}) y la curva de la cobertura de follaje (CF). Usando la ecuación 2.7 se estima la evaporación potencial (E_o).

$$T_o = w_{max} \times ET_o \times \frac{1 - e^{-0.7 \times 4 \times CF}}{1 - e^{-0.7 \times 4 \times w_{max}}} \quad (2.6)$$

$$E_o = ET_o - T_o \quad (2.7)$$

Mediante la ecuación 2.8, el modelo realiza un balance hídrico para determinar el contenido de agua disponible en el suelo (ASWC, del inglés “Available Soil Water Content”) en un día “i”, para ello considera el ASWC del día anterior “i-1” (reserva). En el balance hídrico se considera como entrada de agua al sistema, a la precipitación (R) y el riego (I) aplicado en un día “i”. La salida de agua del sistema están determinados por la evaporación potencial (E_o) y la transpiración real (T) del día anterior (“i-1”). El ASWC alcanza su mínimo y máximo valor cuando llega al punto de marchitez permanente (WP, del inglés “Wilting Point”) y a la capacidad de campo (FC, del inglés “Field Capacity”) respectivamente. Estos dos valores determinan el parámetro CL ($CL = 0.5 \times FC + 0.5 \times WP$), el cual es usado para determinar la transpiración real (T). Cuando el ASWC supera el parámetro CL, el cultivo transpira en su tasa potencial, es decir, la transpiración real es igual a la transpiración potencial ($T = T_o$). Cuando el ASWC cae al punto de marchitez permanente, el cultivo deja de transpirar, por lo tanto, la transpiración actual es cero ($T = 0$). En otros casos, la transpiración actual es calculada usando la ecuación 2.9.

$$ASWC_i = R_i + I_i + ASWC_{i-1} + E_{o_{i-1}} + T_{i-1} \quad (2.8)$$

$$T = T_o \times \frac{WP - ASWC}{WP - CL} \quad (2.9)$$

$$W_s = 1 - \frac{T}{T_o} - 0.8 \quad (2.10)$$

Mediante la ecuación 2.10 se calcula diariamente un factor o índice de estrés (W_s), a partir de la transpiración real (T) y la transpiración potencial (T_o). El W_s junto a su valor acumulado (CW_s) son los encargados de penalizar el rendimiento del cultivo, para ello, mediante un factor de reducción “castigan” el valor potencial del uso eficiente de radiación (RUE) y la curva de cobertura de follaje (CF), mediante la ecuación 2.11 y 2.12 respectivamente. Finalmente, los nuevos valores afectados (RUE_s y CF_s) son empleados en las ecuaciones (2.3 y 2.4) para determinar el rendimiento del cultivo.

$$RUE_s = RUE \times \frac{0.8 - W_s}{0.8} \quad (2.11)$$

$$CF_s = CF \times \frac{75 - CW_s}{75} \quad (2.12)$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO

El experimento se llevó a cabo en el campo experimental “La Molina” del Centro Internacional de la Papa (CIP), ubicado en el departamento de Lima (Latitud: 12.08 °S, Longitud: 76.95 °W y Altura: 244 msnm) durante los meses de octubre de 2017 a enero de 2018. El campo experimental se encuentra localizado en la costa central del Perú, el cual presenta un clima desértico árido-subtropical, con cielo nuboso en otoño e invierno y escasa o nula precipitación (SENAMHI 2018). El lugar de estudio presenta una temperatura promedio del aire, temperatura máxima/mínima y humedad relativa del aire de 19.6 ± 0.9 °C, $26.8 \pm 1.0/15.9 \pm 0.7$ °C y 81.2 ± 1.6 por ciento respectivamente (2013-2017, Estación Meteorológica CIP), para más detalles sobre las condiciones meteorológicas durante el ensayo ver el Tabla 2. El suelo se caracteriza por ser franco arenoso (56.1 ± 0.8 %, 41.7 ± 0.9 % y 2.2 ± 0.3 % de arena, limo y arcilla respectivamente). Asimismo, el suelo presenta un contenido de materia orgánica, capacidad de campo, densidad aparente, pH y conductividad eléctrica de 1.5 ± 0.1 por ciento, 20.1 ± 1.0 por ciento, 1.63 ± 0.03 g cm⁻³, 7.61 ± 0.01 y 6.8 ± 0.4 dS m⁻¹ respectivamente (Laboratorio de Análisis de Suelo, Plantas, Aguas y Fertilizantes – Universidad Nacional Agraria La Molina).

Tabla 2: Promedio mensual (\pm error estándar) de las principales variables meteorológicas: Temperatura promedio del aire (T), temperatura máxima/mínima (T_{\max}/T_{\min}), humedad relativa (HR), radiación solar (R_s), presión atmosférica (PA) y precipitación total (pp).

mes	T (°C)	T_{\max} (°C)	T_{\min} (°C)	HR (%)	R_s (MJ m ⁻² día ⁻¹)	PA (mbar)	pp (mm)
Oct	16.8 ± 0.1	21.5 ± 0.3	14.6 ± 0.1	89.4 ± 0.4	17.4 ± 0.2	984.2 ± 0.2	0.4
Nov	17.7 ± 0.2	22.1 ± 0.3	15.2 ± 0.2	86.2 ± 0.6	19.5 ± 0.2	984.3 ± 0.2	0.1
Dic	19.9 ± 0.2	24.0 ± 0.3	17.5 ± 0.2	86.2 ± 1.1	22.1 ± 0.2	983.8 ± 0.2	0.3
Ene	22.6 ± 0.1	27.3 ± 0.2	19.6 ± 0.1	82.0 ± 0.6	23.3 ± 0.1	982.9 ± 0.4	0.1

FUENTE: Estación meteorológica automática del Centro Internacional de la Papa.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

En este estudio se realizó un diseño de bloques completamente al azar, con cuatro tratamientos de momentos de riego (T1, T2, T3 y T4) repetidos en cinco bloques, para dos tipos de sistema de riego (goteo y gravedad). El campo experimental fue dividido en 40 parcelas (20 por cada tipo de riego) abarcando un área total de 3304.8 m² (ver Figura 3). Cada parcela (unidad experimental) fue dividida en seis subparcelas, las cuales fueron enumeradas de manera aleatoria del 1 al 6 (C1, C2, C3, C4, C5 y C6) (ver Figura 3) ya que se realizaron muestreos secuenciales de biomasa. En cada subparcela se sembraron 20 plantas (5 por cada surco), con una separación entre plantas y surcos de 0.3 y 0.9 m respectivamente (para más detalles ver Tabla 3). Con la finalidad de evitar el efecto de borde, las evaluaciones de cobertura de follaje, del CWSI y de biomasa se realizaron sobre las seis plantas centrales de cada subparcela (ver Figura 3).

Tabla 3: Características del campo experimental del ensayo llevado a cabo entre el 05 de octubre del 2017 y el 15 de enero del 2018.

Características del campo experimental	
Generales	
Tipos de riego	goteo y gravedad
Dimensiones del campo experimental	76.5 m × 43.2 m
N.º de tratamientos	4
N.º de repeticiones	5
N.º total de parcelas	40
N.º total de plantas	4800
Distancia entre plantas	0.3 m
Distancia entre surcos	0.9 m
Parcela	
Dimensiones de una parcela	12.5 m × 3.6 m
N.º de plantas por parcela	120
N.º de subparcelas por parcela	6
N.º de surcos por parcela	5
Subparcela	
Dimensiones de una subparcela	1.5 m × 3.6 m
N.º de plantas por subparcela	20

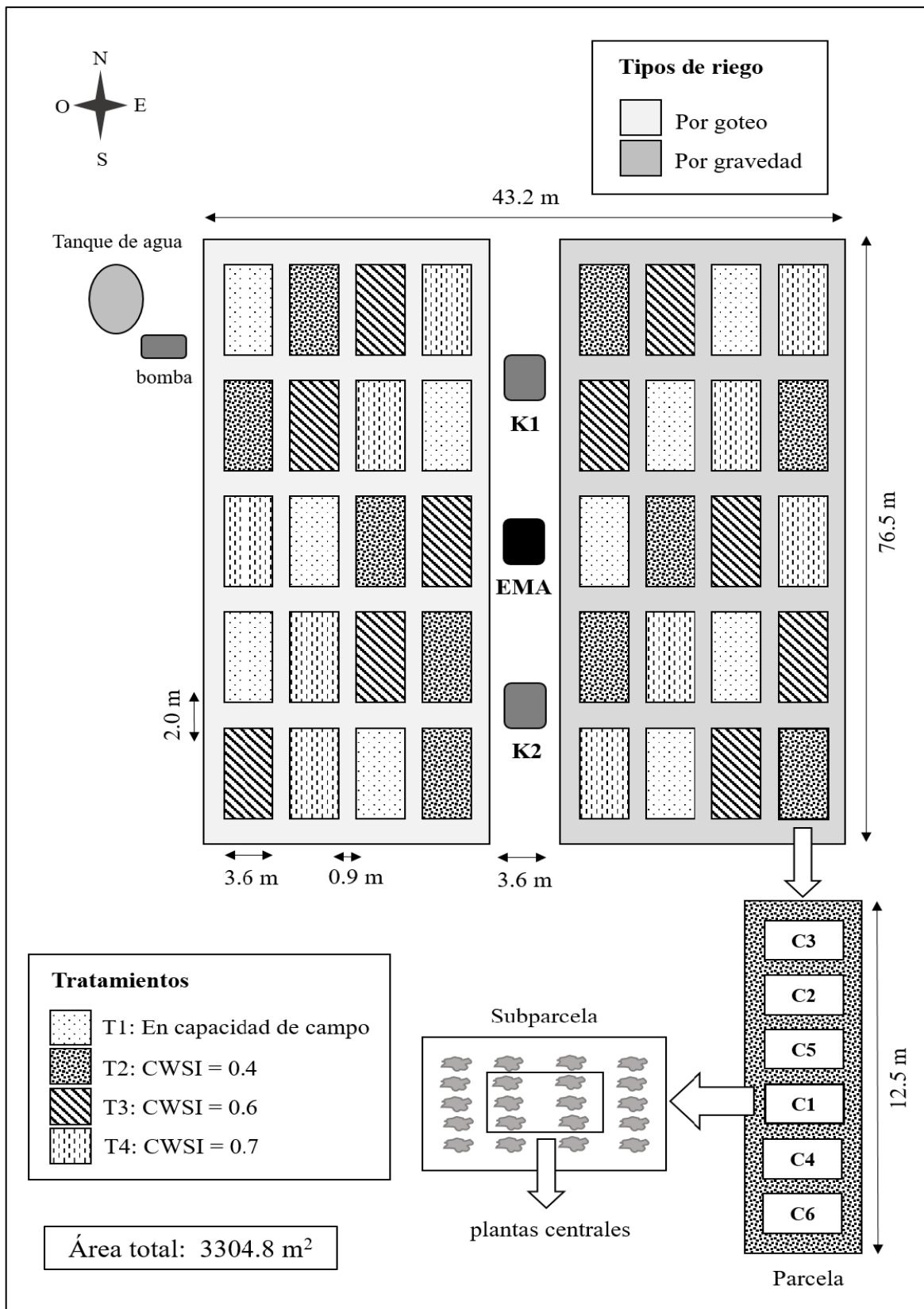


Figura 3: Diseño de bloques completamente al azar del ensayo de campo realizado durante los meses de octubre - enero del 2018. Se aplicaron cuatro tratamientos (T1, T2, T3 y T4) repetidos en 5 bloques, siendo T1 el tratamiento control y T2, T3 y T4 los tratamientos con restricción hídrica. EMA: Estación meteorológica automática portátil. K1 y K2: Calicatas.

Los tratamientos de restricción hídrica fueron aplicados cuando ocurrió el inicio de tuberización. Se consideró como inicio de tuberización cuando más del 80 por ciento de las plantas muestreadas presentaron tubérculos con un diámetro superior a 1 cm, esto ocurrió a los 33 días después de la siembra (dds). Desde la siembra hasta el inicio del tratamiento (IT) se aplicaron 5 riegos pesados (por gravedad), los cuales fueron a los 1, 8, 13, 20 y 26 dds. En estos riegos se asumió que todas las parcelas recibieron la misma cantidad de agua. Los tratamientos de restricción hídrica aplicados fueron en base a un valor umbral de 0.4, 0.6 y 0.7 del CWSI para el tratamiento T2, T3 y T4 respectivamente. El tratamiento control (T1) fue basado en un riego convencional, manteniendo la humedad del suelo en capacidad de campo (Tabla 4). En términos del CWSI, el tratamiento control fue equivalente a un valor umbral de 0.3 de CWSI. En general, para el tratamiento control, la frecuencia del riego fue de tres-cuatro y cinco-seis días en las parcelas regadas por goteo y gravedad respectivamente. En los tratamientos con restricción hídrica (T2, T3 y T4) se aplicó el riego (hasta capacidad de campo) cuando el valor del CWSI superó el umbral establecido de 0.4, 0.6 y 0.7 para los tratamientos T2, T3 y T4 respectivamente. Después de un riego, el CWSI tiende a disminuir durante unos días y luego empieza a subir nuevamente. Cuando el CWSI alcanzó nuevamente estos umbrales (0.4, 0.6 y 0.7), fueron regados otra vez. De esta manera se aseguró de mantener valores del CWSI inferiores a dichos umbrales para sus respectivos tratamientos.

Tabla 4: Criterios tomados en cuenta para determinar el momento de riego en cada tratamiento. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo.

Tratamiento	Criterio
Tratamiento 1 (T1)	En capacidad de campo (u_{cc})
Tratamiento 2 (T2)	Valor máximo de 0.4 del CWSI
Tratamiento 3 (T3)	Valor máximo de 0.6 del CWSI
Tratamiento 4 (T4)	Valor máximo de 0.7 del CWSI

3.2.1 Variables meteorológicas

El monitoreo de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar global, radiación fotosintéticamente activa (PAR) y precipitación se realizó con una estación meteorológica automática portátil (EMA) (HOBO U12 Outdoor Industrial model, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA), el cual fue programado para registrar los datos cada cinco

minutos. La EMA se instaló a 1.5 m sobre el nivel del suelo y fue ubicada en el centro del campo experimental (ver Figura 3).

3.2.2 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento del cultivo. Una prueba LSD (del inglés “Least Significant Difference”) fue realizada para detectar diferencias significativas entre los tratamientos. Ambos análisis fueron realizados con el software R v.3.5.1.

3.3 MANEJO DE CAMPO Y DEL CULTIVO

3.3.1 Material vegetal

En el presente estudio se trabajó con semillas pre-básicas de la variedad de papa UNICA (código CIP 392797.22). Esta variedad, es un genotipo adaptado a la costa peruana que se caracteriza por su precocidad (90-100 días), su resistencia a virus (PVY) y su ligera tolerancia a la salinidad y el calor (Gutiérrez-Rosales *et al.* 2007). Presenta un rendimiento de tubérculo relativamente alto bajo condiciones de restricción hídrica (Rolando *et al.* 2015). La dosis de fertilización consistió en 180, 120 y 160 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O respectivamente, aplicados en la siembra y el aporque (a los 32 dds). Se realizó un manejo integrado para el control de plagas y/o enfermedades usando trampas amarillas (adhesivas) y de feromonas. No obstante, fue necesario realizar aplicaciones químicas tales como: Movento 150 OD, Proton, Vertimec 1.8 EC, Evisect-S, entre otros (para más detalles ver Anexo 1).

3.3.2 Determinación de los parámetros físicos del suelo y evaluación de la humedad del suelo

La densidad global (ρ), la humedad volumétrica en capacidad de campo (θ_{cc}) y la humedad gravimétrica en capacidad de campo (u_{cc}) se determinaron una semana antes de la fecha de siembra. Para ello, se realizaron dos calicatas en un área de 1.5 m \times 1.5 m (K1 y K2, ver Figura 3). Usando cilindros muestreadores (de volumen v_c) se sacaron muestras de suelo en los niveles de 0, 0.10, 0.25 y 0.40 m para dos perfiles del terreno. Posteriormente estas muestras de suelo fueron rotuladas, envueltos en papel aluminio y pesadas inmediatamente para determinar el peso fresco (p_f). Seguidamente, estas muestras fueron llevadas a una estufa (Modelo UF450, Memmert, Alemania) y secadas a 105 °C hasta obtener peso

constante con el fin de obtener el peso seco (p_s). Finalmente, la densidad global (ρ) y la humedad volumétrica en capacidad de campo (θ_{cc}) para cada nivel (0, 0.10, 0.25 y 0.40 m) fueron calculadas con las ecuaciones 3.1 y 3.2 respectivamente. La humedad volumétrica en el punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) fue estimada usando la ecuación 3.3, según Silva *et al.* (2015). Por último, la humedad gravimétrica en capacidad de campo (u_{cc}) para la capa z, se determinó a partir la densidad global ($\bar{\rho}$) y humedad volumétrica en capacidad de campo ($\bar{\theta}_{cc}$) promediado entre el nivel 0 y z m usando la ecuación 3.4 (para más detalles ver García 1992). Los valores de los parámetros físicos del suelo determinados para este estudio se presentan en el Tabla 5.

$$\rho = \frac{p_s}{v_c} \quad (3.1)$$

$$\theta_{cc} = \frac{p_f - p_s}{v_c} \quad (3.2)$$

$$\theta_{pmp} = \frac{\theta_{cc}}{1.85} \quad (3.3)$$

$$u_{cc} = \frac{\bar{\theta}_{cc}}{\bar{\rho}} \quad (3.4)$$

La evaluación del contenido de agua en el suelo se llevo a cabo mediante el monitoreo de la humedad gravimétrica (u), el cual se realizó con una frecuencia de 5-6 días desde el inicio del tratamiento (33 dds) hasta el periodo de senescencia del cultivo (85 dds aproximadamente). Para ello, usando un muestreador tipo sacabocado, se sacaron muestras de suelo a una profundidad del 90 por ciento de la zona radicular, el cual varió de 0.15 m durante las etapas tempranas (desarrollo de hojas) hasta 0.35 m, en las etapas tardías (llenado de tubérculos y maduración). Estas muestras de suelo fueron pesadas inmediatamente para obtener el peso fresco (p_f) y posteriormente secadas en un horno microonda (Modelo CQ1570, Samsung, Bangkok, Thailandia) por un tiempo de 25 minutos para obtener el peso seco (p_s), según el procedimiento descrito por Ramírez *et al.* 2016. Finalmente, la humedad gravimétrica (u) fue calculada usando la siguiente ecuación:

$$u = \frac{p_f - p_s}{p_s} \quad (3.5)$$

Tabla 5: Parámetros físicos del suelo determinados a partir de dos calicatas. ρ : Densidad global. θ_{cc}/u_{cc} : Humedad volumétrica/gravimétrica en capacidad de campo. θ_{pmp} : Humedad volumétrica en el punto de marchitez permanente.

nivel/capa (m)	ρ (g cm ⁻³)	θ_{cc} (%)	u_{cc} (%)	θ_{pmp} (%)
0	1.56	34.49	22.08	18.64
0.10	1.68	32.73	20.76	17.69
0.25	1.66	31.12	20.10	16.82
0.40	1.70	28.63	19.27	15.48
Promedio				
0-0.30	1.63	32.72	20.98	17.72

3.3.3 Determinación de volúmenes de riego

Desde la siembra (05/10/2017) hasta el inicio de tratamiento (33 dds) a todas las parcelas se le aplicaron cinco riegos pesados (por gravedad), manteniendo la humedad del suelo en capacidad de campo. Previamente, las parcelas recibieron un riego pesado dos días antes de la siembra. Estos riegos fueron aplicados a los 1, 8, 13, 20 y 26 dds y se asumió que todas las parcelas recibieron la misma cantidad de agua (ver Anexo 2). Para calcular el volumen de agua por unidad de área (V_1 , en m³ ha⁻¹) se usó la ecuación 3.6. En la cual, el caudal del agua de pozo (Q) fue aproximadamente de 1 m³ min⁻¹ y el tiempo de riego (t , en minutos) fue medido en cada fecha de riego. Se consideró un porcentaje de pérdida por escorrentía (p) de 25 por ciento aproximadamente. El área regada (A_r) fue 2678.4 m².

$$V_1 = Qt(1 - p) \left(\frac{10000}{A_r} \right) \quad (3.6)$$

Una vez iniciado el tratamiento, las parcelas fueron regadas de acuerdo con el diseño experimental propuesto (ver sección 3.2). En el riego por gravedad, las parcelas fueron regadas de manera individual usando el agua proveniente del pozo del centro experimental. En este caso, para determinar el volumen de agua por unidad de área (V_2 , en m³ ha⁻¹) se usó la ecuación 3.7. Para ello, se midió el caudal del agua de pozo (Q_p , en m³ min⁻¹) y evitando perder agua por escorrentía se midió el tiempo (t , en minutos) que demora en llenarse de agua los surcos de cada parcela de área A_p ($A_p = 45$ m²). En el riego por goteo, el agua fue suministrado por un tanque con capacidad de 0.5 m³ usando una bomba (1 hp, Venus 33M, ESPA, España) (ver Figura 3). El riego se aplicó con una presión en las cintas de riego de

0.5 MPa, el cual proporcionaba un caudal de agua por gotero de 1.69 L hr⁻¹. Por cada surco se colocaron dos cintas de riego con aproximadamente 126 goteros cada una. A partir del caudal de agua por gotero y el número total de goteros por cinta, se determinó el caudal de agua por surco (Q_s), el cual fue de $3.55 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. La humedad gravimétrica (u) fue convertida a humedad volumétrica (θ) y junto a la humedad volumétrica en capacidad de campo (θ_{cc} , $\theta_{cc} = 0.33$) se determinó el tiempo de riego (t_r , en minutos) usando la ecuación 3.8. La distancia entre cintas de riego (d) y la longitud del surco (l) fueron de 0.4 y 12.5 m respectivamente, mientras que la profundidad de la zona radicular (z_r) varió de acuerdo con la etapa del cultivo. El número de surcos de la parcela (n) fue 4. En este caso, se usó la ecuación 3.9 para determinar el volumen de agua por unidad de área (V_3 , en $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$). El volumen de agua total aplicado en cada tipo de riego y para cada tratamiento se presentan en el Anexo 2.

$$V_2 = Q_p t \left(\frac{10000}{A_p} \right) \quad (3.7)$$

$$t_r = \frac{dlz_r(\theta_{cc} - \theta)}{Q_s} \quad (3.8)$$

$$V_3 = nQ_s t_r \left(\frac{10000}{A_p} \right) \quad (3.9)$$

3.3.4 Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

Para decidir el momento del riego de acuerdo con los umbrales de CWSI establecidos para cada tratamiento, se evaluó el índice de estrés hídrico del cultivo. Para ello, se tomaron imágenes térmicas usando una cámara FLIR (modelo E60, FLIR Systems Inc., Wilsonville, USA), el cual trabaja en un rango espectral de 7.5-13 μm y adicionalmente lleva integrada una cámara digital de 3.1 Mpixeles. En cada parcela, las imágenes térmicas siempre fueron tomadas a las mismas seis plantas centrales de la subparcela C6 y a una distancia de 3.5 m sobre el nivel del follaje (ver Figura 4). El monitoreo del CWSI se realizó después del mediodía solar y en condiciones despejadas, aproximadamente a las 14:00 horas, ya que es el momento más apropiado para evaluar el estado hídrico del cultivo (Rinza *et al.* 2018). El CWSI se evaluó desde el inicio de tratamiento (33 dds) hasta el periodo de senescencia del cultivo (85 dds aproximadamente) con una frecuencia diaria, siempre y cuando las condiciones meteorológicas lo permitían. El procesamiento de las imágenes térmicas se

realizó mediante un programa escrito en Matlab (R2015a, Mathworks Inc., MA, 20USA), el cual fue desarrollado por la Unidad de Sistemas de Producción y Ambiente del CIP. Este programa alinea las imágenes térmicas y visibles manteniendo la imagen térmica “fija” y “moviendo” la imagen visible mediante funciones intrínsecas de Matlab (para más detalles ver Ramírez *et al.* 2016, Rinza *et al.* 2018). Como resultado de este procesamiento, se obtiene la temperatura de follaje (T_f), la cual es necesaria en el cálculo del CWSI. Finalmente, para calcular el CWSI se usó la metodología de las superficies de referencia (Jones 1999, Rud *et al.* 2014) definida por la siguiente ecuación:

$$CWSI = \frac{T_f - T_{sh}}{T_s - T_{sh}} \quad (3.10)$$

Donde T_f es la temperatura de follaje (en °C), T_{sh} es la temperatura de la superficie húmeda de referencia (en °C) y T_s es la temperatura de la superficie seca de referencia (en °C).

La temperatura de follaje y la temperatura de la superficie húmeda de referencia (SHR) fueron obtenidas a partir de las imágenes térmicas usando el programa escrito en Matlab y el software FLIR Tools (Versión 6.3, FLIR Systems, 2015) respectivamente. Según Rinza *et al.* (2018), se usó una superficie blanca de tecnopor cubierta con tela de algodón de 5 mm de espesor sumergido en agua dentro de un recipiente de 0.32 x 0.22 x 0.10 m³, como la SHR. Al momento de tomar las fotos térmicas, la SHR fue colocada al centro de la subparcela C6 de cada parcela (ver Figura 4). La temperatura de la superficie seca fue considerada como 13 °C por encima de la temperatura del aire (Rinza *et al.* 2018).

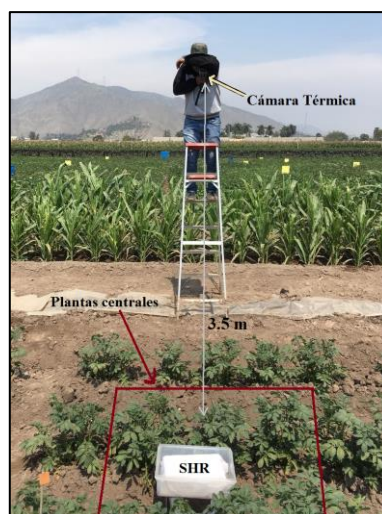


Figura 4: Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) usando una cámara térmica. SHR: Superficie húmeda de referencia.

3.3.5 Evaluación de la cobertura del follaje y biomasa

Para parametrizar el modelo SOLANUM es necesario tener datos en el tiempo de la cobertura del follaje y del índice de cosecha (“biomasa seca de tubérculo”/”biomasa seca total”). Asimismo, para evaluar el performance del modelo en la estimación del rendimiento del cultivo, es necesario tener datos observados de biomasa en el tiempo y/o rendimiento final. Para ello, se evaluó la cobertura del follaje y la biomasa del cultivo.

La cobertura de follaje fue evaluada mediante la toma de fotografías del cultivo usando una cámara digital (D5300, Nikon, Tailandia) y con una frecuencia de seis-siete días desde los 18 dds (una semana después del inicio de emergencia) hasta los 92 dds. En cada parcela se tomaron fotografías de las seis plantas centrales de la subparcela C6, a una altura de 0.8 m por encima del dosel, siguiendo el protocolo para el diseño y realización de experimentos de campo con fines de modelación (CIP 2013). Para procesar las imágenes y así obtener el valor numérico de la cobertura de follaje se usó el software CanopyCover (Versión 3.6, CIP, 2017), el cual fue desarrollado por la Unidad de Sistemas de Producción y Ambiente del CIP y está disponible en: <https://cipotato.org/site/inrm/home/downmod.htm>. Este software, a partir de un umbral de brillo, discrimina el color verde del resto de colores y determina la cobertura de follaje en función del porcentaje de píxeles verdes de la imagen. El umbral de brillo varía de 0 a 0.1, por lo que se debe determinar un valor adecuado que genere un buen contraste entre los colores (verde y otros). Se realizaron pruebas variando los valores del umbral de brillo y se determinó el valor de 0.04 como umbral de brillo adecuado.

Para evaluar la biomasa del cultivo se realizaron muestreos en diferentes tiempos del periodo vegetativo a partir del inicio de tratamiento (33 dds). Para ello, cada parcela fue dividida en seis subparcelas y estas fueron enumeradas de manera aleatoria del uno al seis (C1, C2, C3, C4, C5 y C6, ver Figura 3). Los muestreos de biomasa se realizaron de manera secuencial, empezando con la subparcela C1 y terminado con la subparcela C6. Estas se llevaron a cabo a los 39, 53, 68, 83, 91 y 102 dds. Para cada parcela se sacaron individualmente cuatro plantas centrales de la subparcela asignada al muestreo de biomasa. En total se sacaron 128 plantas por cada fecha de muestreo (4 tratamientos por 32 parcelas entre riego por goteo y gravedad). Cada planta fue separada en hojas, tallos, tubérculos y raíces para luego ser pesados y determinar el peso fresco. Finalmente fueron llevados al horno a 60 °C para ser secados y determinar el peso seco por planta, según el procedimiento seguido por Ramírez *et al.* (2016).

3.4 MÉTODOS

3.4.1 Estimación del rendimiento de tubérculo con un modelo de cultivo bajo condición potencial y de restricción hídrica.

La estimación del rendimiento de tubérculo bajo condiciones potenciales y de restricción hídrica se realizó con el modelo de crecimiento de cultivo SOLANUM (versión 2.2, CIP, 2017), el cual fue desarrollado por la Unidad de Sistemas de Producción y Ambiente del CIP y se encuentra disponible en: <https://cipotato.org/site/inrm/home/downmod.htm>. El modelo SOLANUM cuenta con cuatro módulos, los cuales al momento de ejecutar el modelo “corren” en simultáneo. Por cada módulo, como resultado principal se obtienen los rendimientos del cultivo (*outputs*), los cuales son válidos siempre y cuando los datos de entrada (*inputs*) fueron los adecuados para cada módulo. El módulo de crecimiento potencial es el “módulo principal” y es el que menor cantidad de *inputs* requiere, mientras que el módulo de restricción hídrica necesita de *inputs* adicionales (ver sección 2.5). Antes de ejecutar el modelo SOLANUM, este debe ser parametrizado, es decir, “alimentado” con los parámetros del cultivo (Tabla 1), los cuales describen sus principales características.

a. Parametrización del modelo SOLANUM

Los parámetros del cultivo están relacionados al uso eficiente de radiación, a la interceptación de luz y a la partición de tubérculo. Estos parámetros se calcularon para cada tratamiento y tipo de riego. El uso eficiente de la radiación (RUE) se determinó como la pendiente de la regresión lineal entre la biomasa seca total (BST, en g m^{-2}) y la radiación PAR interceptada y acumulada (en MJ m^{-2}), pasando a través del origen de coordenadas (Condori *et al.* 2010, de la Casa *et al.* 2011) (ver Anexo 5). La radiación PAR interceptada se calculó como el producto de la radiación PAR incidente y la fracción de suelo cubierto por el follaje (Kooman *et al.* 1996, de la Casa *et al.* 2011). Los parámetros del cultivo relacionados a la interceptación de luz (w_{\max} , t_e y t_m) y a la partición de tubérculo (A , t_u y b) fueron calculados a partir de los datos de cobertura de follaje (CF) y del índice de cosecha (IC), respectivamente. El IC se calculó como la relación entre el peso seco del tubérculo y el peso seco total. Como escala temporal (eje x), se usó el tiempo termal acumulado desde el inicio de emergencia (TT_{ac}), calculado según McMaster y Wilhelm (1997) (usando el método 1: Sí $[(T_{\max} + T_{\min})/2] < T_{\text{base}}$, entonces $[(T_{\max} + T_{\min})/2] = T_{\text{base}}$), con una temperatura base (T_{base}) de 2 °C. Los datos de cobertura de follaje y del índice de cosecha fueron ajustados a una función Beta y

Tabla 6: Parámetros del cultivo usados en la parametrización del modelo SOLANUM. Los nombres de los parámetros son los mismos que en la Tabla 1.

Parámetro	Unidad	Goteo	Gravedad
w_{max}	fracción	1.00	1.00
t_m	°Cdía	333.5	283.2
t_e	°Cdía	967.3	1016.4
A	fracción	0.75	0.70
t_u	°Cdía	638.1	627.3
b	°Cdía	223.4	229.4
RUE	gMJ ⁻¹	2.9	3.3
DM _c	fracción	0.21	0.19

Gompertz respectivamente, según Yin *et al.* (2003) (ver Anexo 3 y 4). En ambos casos, el ajuste se realizó mediante mínimos cuadrados no lineales usando el software R v.3.5.1. La concentración de materia seca de tubérculo (DM_c) se calculó como la razón entre el peso seco y el peso fresco del tubérculo (CIP 2013). El modelo SOLANUM fue parametrizado con los valores obtenidos para el tratamiento de control, tanto en las parcelas regadas por gravedad como por goteo (Tabla 6).

b. Estimación del rendimiento de tubérculo

El modelo SOLANUM incorpora una variable de aleatoriedad, el cual hace que la simulación del rendimiento no se repita en cada ejecución del modelo, por lo que fue programado para realizar 30 repeticiones con una variabilidad de 7.5 por ciento. Esto se realizó para cada tratamiento, no obstante, los parámetros del cultivo cambiaron de acuerdo con el tipo de riego (ver Tabla 6). Adicionalmente a los parámetros del cultivo es necesario los parámetros ambientales (ver Tabla 1), los cuales influyen en el inicio de tuberización ya que están relacionados al fotoperiodo y a la temperatura. Los valores para estos parámetros fueron establecidos a partir de la base de datos de parámetros que tiene incorporado el modelo SOLANUM, los datos fueron seleccionados para la variedad UNICA (Tabla 7). Para evaluar el efecto de las temperaturas bajas en el cultivo (ver Tabla 1), se usaron como temperatura crítica (T_{cr}), temperatura de muerte de las hojas (T_{ld}) y temperatura de rebrote (T_{rg}) los valores de -3, -5 y -8 °C respectivamente, los cuales están establecidos en el modelo SOLANUM. En nuestro caso, estos valores no son de relevancia ya que durante el ensayo la temperatura del aire no bajó de 12.9 °C. La emergencia del cultivo (D_E) ocurrió a los 10

días después de la siembra y la densidad de la planta (ρ_{planta}) fue de 3.7 plantas m^{-2} . Finalmente, el modelo SOALNUM fue “ejecutado” para el caso de crecimiento bajo condiciones potenciales, proporcionándoles datos diarios de temperatura mínima (en $^{\circ}\text{C}$), temperatura máxima (en $^{\circ}\text{C}$), radiación solar (en MJ m^{-2}) y horas teóricas de sol (fotoperiodo, en hrs). Mientras que, para el caso de crecimiento bajo restricción hídrica, adicionalmente se le proporcionó datos diarios de precipitación (en mm) y de riego (en mm). El balance hídrico se realizó considerando una profundidad del sistema radicular (Z_{suelo}) de 0.3 m con un contenido inicial de agua (H_0) de 98.34 mm, siendo ésta, la lámina de agua cuando el suelo está en capacidad de campo. La humedad volumétrica en capacidad de campo (θ_{cc}) y en el punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) para la capa de 0.3 m fueron de 32.8 y 17.7 por ciento respectivamente (ver Tabla 5).

Tabla 7: Parámetros ambientales y variables adicionales necesarios para ejecutar el modelo SOLANUM.

Parámetros / variables	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura mínima para el inicio de tuberización	T_b	4	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura óptima para el inicio de tuberización	T_o	17	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura máxima para el inicio de tuberización	T_u	35	$^{\circ}\text{C}$
Fotoperiodo crítico	P_c	13	hr
Sensibilidad al fotoperiodo	w	0.25	hr^{-1}
Temperatura crítica	T_{cr}	-3	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de muerte de las hojas	T_{ld}	-5	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de rebrote	T_{rg}	-8	$^{\circ}\text{C}$
Profundidad del suelo	Z_{suelo}	0.3	m
Contenido inicial de agua en el suelo (en lámina de agua)	H_0	98.34	mm
Humedad volumétrica en capacidad de campo	θ_{cc}	32.78	%
Humedad volumétrica en el punto de marchitez permanente	θ_{pmp}	17.72	%

3.4.2 Incorporación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en el modelo SOLANUM.

El modelo SOLANUM, mediante el módulo de restricción hídrica determina un índice de estrés hídrico (w) en base a la transpiración real (T) y potencial (T_0). Luego “castiga” a una variable clave en la determinación del rendimiento del cultivo (por ejemplo, el uso eficiente de radiación “RUE”), reduciendo así, su valor potencial. Este factor de reducción es determinado por el índice de estrés acumulado (w_c) y a partir de un umbral, el modelo decide (para un día d) si se “castiga” o no a dicha variable (para más detalles ver sección 2.5). En base a esta lógica se decidió incorporar el CWSI en el modelo.

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar las variables que influyen más en el rendimiento del cultivo. Para ello, se compararon los parámetros del cultivo, expresados como porcentaje del máximo valor obtenido entre las parcelas regadas por goteo y gravedad, con el rendimiento de materia seca total (RMST). Los parámetros mas influyentes fueron penalizados en función del CWSI acumulado ($CWSI_{ac}$). Debido a que el CWSI no fue medido a diario (principalmente por condiciones meteorológicas no adecuadas), se completaron los datos mediante el polinomio interpolante de Lagrange de segundo orden usando la fórmula baricéntrica (Higham 2004). La máxima separación entre los datos de CWSI fueron de dos días, no obstante, cabe destacar que el CWSI presenta un comportamiento característico antes y después del riego, y que la interpolación realizada reflejó dicho comportamiento (ver Anexo 6). A partir de la etapa de senescencia, las mediciones del CWSI son pocos confiables (López *et al.* 2009), por lo que se decidió usar los datos de CWSI desde el inicio de tratamiento (33 dds) hasta los 85 dds, ya que aproximadamente en ese tiempo el cultivo entró en senescencia. A partir del valor potencial, se penalizó cada parámetro escogido (RUE, w_{max} , t_e y A) en términos del $CWSI_{ac}$, de tal manera que éstos se aproximen a los valores obtenidos de los parámetros para cada tratamiento y tipo de riego, para ello se usó la siguiente ecuación:

$$X_c = X_p \times FR(CWSI_{ac}) \quad (3.10)$$

Donde X_p es el valor potencial del parámetro, el cual fue considerado como el promedio de los valores obtenidos en las parcelas regadas por goteo y gravedad (solo en el tratamiento control), FR es el factor de reducción, el cual está en función del $CWSI_{ac}$ y X_c es el valor “castigado” o penalizado por efecto del CWSI. Para escoger un factor de reducción (FR)

apropiado, se realizaron pruebas con diferentes funciones: lineal ($a_1CWSI_{ac} + a_2$), cuadrática ($a_1CWSI_{ac}^2 + a_2CWSI_{ac} + a_3$) y exponencial ($a_1e^{a_2} + a_3$). Los valores de los coeficientes del factor de reducción fueron calculados mediante mínimos cuadrados no lineales, usando la función *nls* del paquete estadístico *stats* versión 2.13.1 del software R (v. 3.5.1, R Core Team). Estos coeficientes fueron determinados para cada parámetro escogido e incorporados en el modelo SOLANUM. El uso eficiente de radiación penalizado por el CWSI (RUE_{cws_i}) fue calculado directamente con la ecuación 3.10. En el modelo SOLANUM, los valores diarios de cobertura de follaje (CF_{cws_i}) e índice de cosecha (IC_{cws_i}) penalizados por el CWSI fueron calculados con las siguientes ecuaciones:

$$CF_{cws_i} = \widehat{w}_{max} \left(1 + \frac{\widehat{t}_e - t}{\widehat{t}_e - t_m} \right) \left(\frac{t}{\widehat{t}_e} \right)^{\frac{\widehat{t}_e}{\widehat{t}_e - t_m}} \quad (3.11)$$

$$IC_{cws_i} = \widehat{A} e^{-e^{-1/b(t-t_u)}} \quad (3.12)$$

Donde t es el tiempo termal, \widehat{w}_{max} , \widehat{t}_e y \widehat{A} son los parámetros w_{max} , t_e y A respectivamente, afectados por el CWSI y calculados mediante la ecuación 3.10 y t_m , t_u y b son los parámetros potenciales para cada tipo de riego (ver Tabla 6), los cuales no han sido penalizados ya que tienen poca influencia en el rendimiento del cultivo (ver Sección 4.2.1).

Estos valores de RUE_{cws_i} , CF_{cws_i} y IC_{cws_i} y sus respectivos valores potenciales (RUE , CF y IC) determinan la variable “final” penalizado por el CWSI (RUE_{CWSI} , CF_{CWSI} y IC_{CWSI}). En base al esquema presentado en la Figura 5, se determinó la variable “final” (Y_{CWSI}), el cual puede ser: RUE_{CWSI} , CF_{CWSI} ó IC_{CWSI} . Teniendo en cuenta que desde la siembra hasta el inicio de tratamiento (IT) todas las parcelas fueron sometidas a riegos frecuentes, manteniendo el cultivo en óptimas condiciones, se consideró que para esos días la variable “final” penalizado por CWSI (Y_{CWSI}) asume su valor potencial ($Y_{pot.}$). Desde el inicio de tratamiento (33 dds) hasta los 85 dds se decidió realizar una restricción diaria entre tratamientos en base a un valor umbral de 0.4 de CWSI. Este valor fue escogido ya que una programación de riegos en función a este umbral no reduce significativamente el rendimiento del cultivo de papa (Ramírez *et al.* 2016, Rinza *et al.* 2018). De esta manera, para un día “d”, cuando el CWSI es menor que 0.4, la variable “final” (Y_{CWSI}) asume el valor potencial ($Y_{pot.}$), pero cuando el CWSI es mayor que 0.4, asume el valor “castigado” (Y_{cws_i}).

El valor potencial ($Y_{pot.}$) es obtenido a partir del módulo de crecimiento potencial, mientras que el valor “castigado” (Y_{cws}) es obtenido a partir de la penalización por CWSI del valor potencial en el cual se usó el factor de reducción (FR). Debido a que desde los 85 dds hasta la cosecha del cultivo (102 dds) no se contó con datos de CWSI (datos pocos confiables debido a que el cultivo entró en senescencia), se decidió usar el valor de CWSI acumulado ($CWSI_{ac}$) desde el IT hasta los 85 dds. Después de los 85 dds, para decidir el valor de Y_{CWSI} (entre Y_{cws} y $Y_{pot.}$) se decidió usar un valor de 20 de $CWSI_{ac}$. De esta manera, cuando el cultivo presenta un valor de $CWSI_{ac}$ menor que 20, la variable final (Y_{CWSI}) asume el valor potencial ($Y_{pot.}$), pero cuando el $CWSI_{ac}$ es mayor que 20, asume el valor “castigado” (Y_{cws}). Para determinar el rendimiento del cultivo, los valores diarios de la variable “final” penalizado por el CWSI (RUE_{CWSI} , CF_{CWSI} y IC_{CWSI}) fueron ingresados en el modelo SOLANUM mediante las ecuaciones 2.3 y 2.4 (ver Sección 2.5).

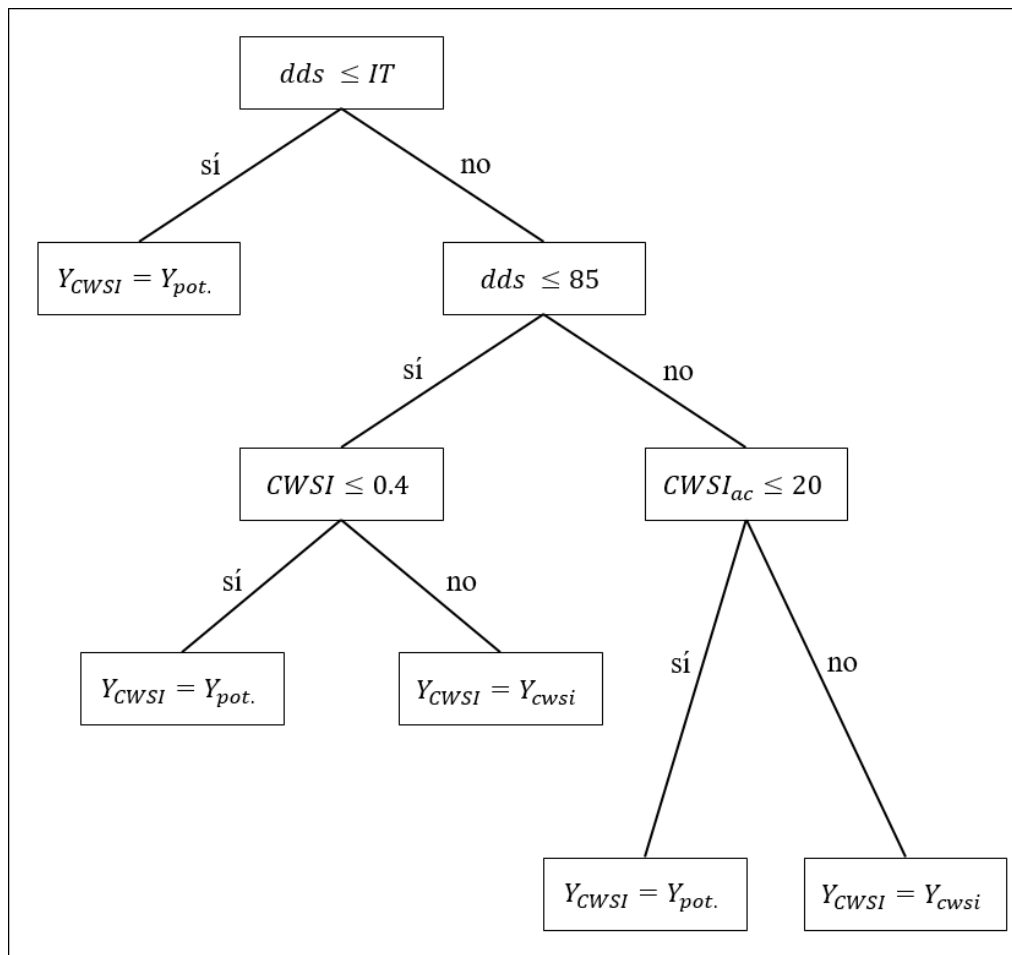


Figura 5: Esquema para determinar diariamente la variable “final” penalizado por el CWSI (Y_{CWSI}) a partir del valor potencial ($Y_{pot.}$) y “castigado” mediante un factor de reducción (Y_{cws}). $CWSI_{ac}$: Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) acumulado desde el inicio de tratamiento (IT) hasta los 85 días después de la siembra (dds).

3.4.3 Evaluación del performance del modelo en la estimación del rendimiento del cultivo

El grado de confiabilidad del modelo se evaluó comparando los rendimientos reales con los rendimientos estimados por el modelo para cada módulo (de restricción hídrica y de CWSI). Para ello, se utilizó el coeficiente de determinación (r^2), el índice de concordancia de Willmot (D), el error absoluto de la media expresado como porcentaje de la media (MAE), el error de sesgo promedio (MBE), el error cuadrático medio de la raíz (RMSE) y la eficiencia del modelo (EF). En ese orden, estos estadísticos fueron calculados con las siguientes ecuaciones:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.15)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{Y}_i - \bar{Y}| + |Y_i - \bar{Y}|)^2} \quad (3.16)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i|}{n} \times \frac{100}{\bar{Y}} \quad (3.17)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i - Y_i}{n} \quad (3.18)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (3.19)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.20)$$

Donde n es el número de datos, Y_i es el valor medido de la variable, \hat{Y}_i es el valor estimado de la variable y \bar{Y} es el promedio de los datos medidos.

Adicionalmente, se usó el RMSE expresado en su forma relativa ($rRMSE = RMSE \times 100 / \bar{Y}$) para evaluar el performance del modelo SOLANUM con otros modelos de crecimiento del cultivo de papa. Para evaluar el performance del modelo se usaron los criterios de confiabilidad recomendados por De Jager (1994), Yang *et al.* (2014) y Bitri *et al.* (2014) (ver Tabla 8). Debido a que el error de sesgo promedio (MBE) y el error cuadrático medio

de la raíz (RMSE) presentan unidades, se consideró que los valores más bajos (ceranos a cero) indican un buen performance del modelo (Condori *et al.* 2010, Yang *et al.* 2014).

Tabla 8: Criterios de confiabilidad para la evaluación del performance del modelo SOLANUM.

Estadístico	Unidades	Criterio de confiabilidad	Referencia
r^2	*	> 0.80	De Jager 1994
D	*	> 0.75	Yang <i>et al.</i> 2014
MAE	*	< 20 %	De Jager 1994
MBE	t ha ⁻¹	-	-
$RMSE$	t ha ⁻¹	-	-
$rRMSE$	*	< 20 %	Bitri <i>et al.</i> 2014
EF	*	> 0	Yang <i>et al.</i> 2014

* Adimensional

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE TUBÉRCULO CON UN MODELO DE CULTIVO BAJO CONDICIÓN POTENCIAL Y DE RESTRICCIÓN HÍDRICA

El rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu) obtenido durante el ensayo en las parcelas regadas por goteo fueron de 34.8 ± 5.4 , 31.2 ± 3.6 , 18.1 ± 2.8 y 13.1 ± 3.3 t ha⁻¹ para los tratamientos T1 (control), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. Mientras que en las parcelas regadas por gravedad el RMFTu fueron de 40.8 ± 6.6 , 41.6 ± 6.2 , 16.9 ± 3.0 y 13.6 ± 3.2 t ha⁻¹ para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente. Respecto al tratamiento de control (T1), el RMFTu fue mayor en las parcelas regadas por gravedad, no obstante, en ambos tipos de riego no se alcanzó el rendimiento potencial de 50 t ha⁻¹ reportado para la variedad UNICA en invierno y en zona de la costa peruana (Gutiérrez-Rosales *et al.* 2007). Probablemente esta reducción en el rendimiento fue debido a la época en la que se realizó el ensayo (octubre-enero), a las aplicaciones químicas realizadas (ver Anexo 1) y a la manifestación de pudrición en los tubérculos. Tanto en las parcelas regadas por goteo como por gravedad, no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el RMFTu entre el tratamiento T1 y T2 y entre el tratamiento T3 y T4 (ver Figura 6). En base a estos resultados se podría decir que una programación de riego usando un umbral de CWSI de 0.4 no reduce significativamente el rendimiento del cultivo de papa, lo cual concuerda con los resultados encontrados por Ramírez *et al.* (2016) y Rinza *et al.* (2018). Asimismo, se podría decir que un riego basado en un umbral de CWSI mayor de 0.6 reduce significativamente el rendimiento del cultivo, coincidiendo con los resultados encontrados por Erdem *et al.* (2005).

El RMFTu estimado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de crecimiento potencial fue de 36.6 ± 0.1 y 48.5 ± 0.2 t ha⁻¹ en las parcelas regadas por goteo y gravedad respectivamente (Figura 7). En el tratamiento control (T1) se alcanzaron rendimientos altos, cercanos a lo estimado por el modelo, tanto en las parcelas regadas por goteo (34.8 t ha⁻¹) como por gravedad (40.8 t ha⁻¹). Por otro lado, respecto al valor “potencial” estimado, el

RMFTu observado se redujo en 4.8, 14.7, 50.5 y 64.1 por ciento para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente, en las parcelas regadas por goteo. Mientras que, en las parcelas regadas por gravedad, la reducción del rendimiento (RMFTu) fue de 15.8, 14.2, 65.2 y 71.8 por ciento para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente. La reducción del RMFTu fue mayor en las parcelas regadas por gravedad (en T1), debido a la pérdida de biomasa por pudrición del tubérculo, el cual se manifiesta como una caída del RMFTu observado a los 100 dds aproximadamente (ver Figura 7b). En la Figura 7 se observa que la curva de rendimiento “potencial” (línea punteada negra) en todos los tratamientos y para ambos tipos de riego, son muy parecidas. Esto se debe a que el modelo asume en todos los tratamientos que el cultivo se ha desarrollado en óptimas condiciones, por lo tanto, los resultados son similares, y la pequeña variabilidad observada es debido al factor estocástico que incluye el modelo (variabilidad de 7.5 %). La notable diferencia en el comportamiento del RMFTu entre las parcelas regadas por goteo y por gravedad (siendo mayor por gravedad), se debe a la parametrización realizada para cada tipo de riego (ver sección 3.4). En general, los resultados obtenidos con el módulo de crecimiento potencial del modelo SOLANUM presentan el mismo comportamiento (variabilidad entre tratamientos y diferencias entre tipos de riego) para el rendimiento de materia seca total (RMST, ver Figura 8) y el rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu, ver Anexo 8).

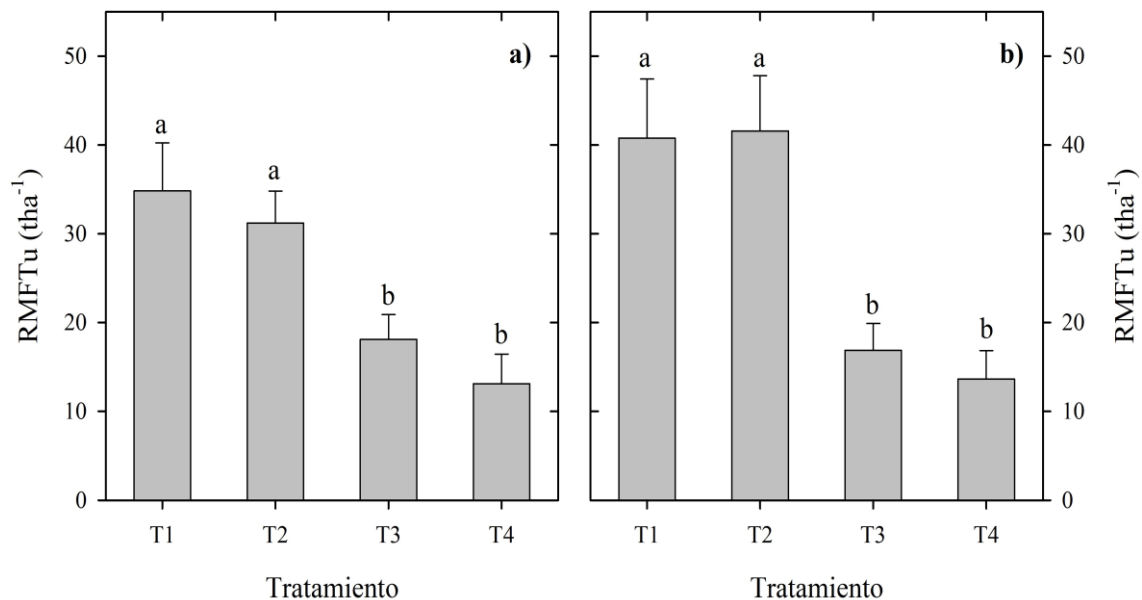


Figura 6: Rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu) (\pm error estándar) obtenido en las parcelas regadas por goteo (a) y gravedad (b). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) detectado mediante una prueba LSD de Fisher.

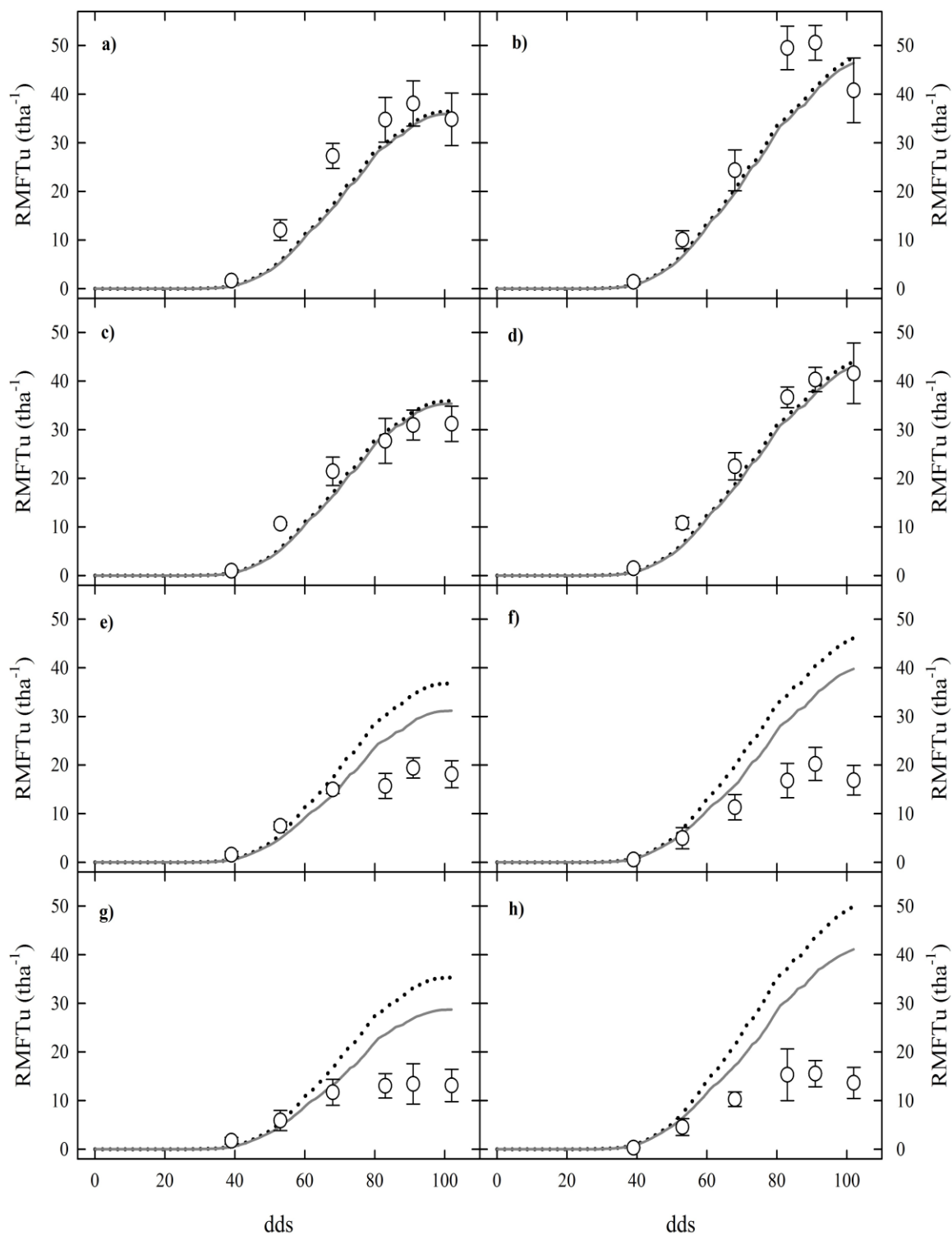


Figura 7: Rendimiento de materia fresca del tubérculo (RMFTu) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra) y el de restricción hídrica (línea continua gris). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).

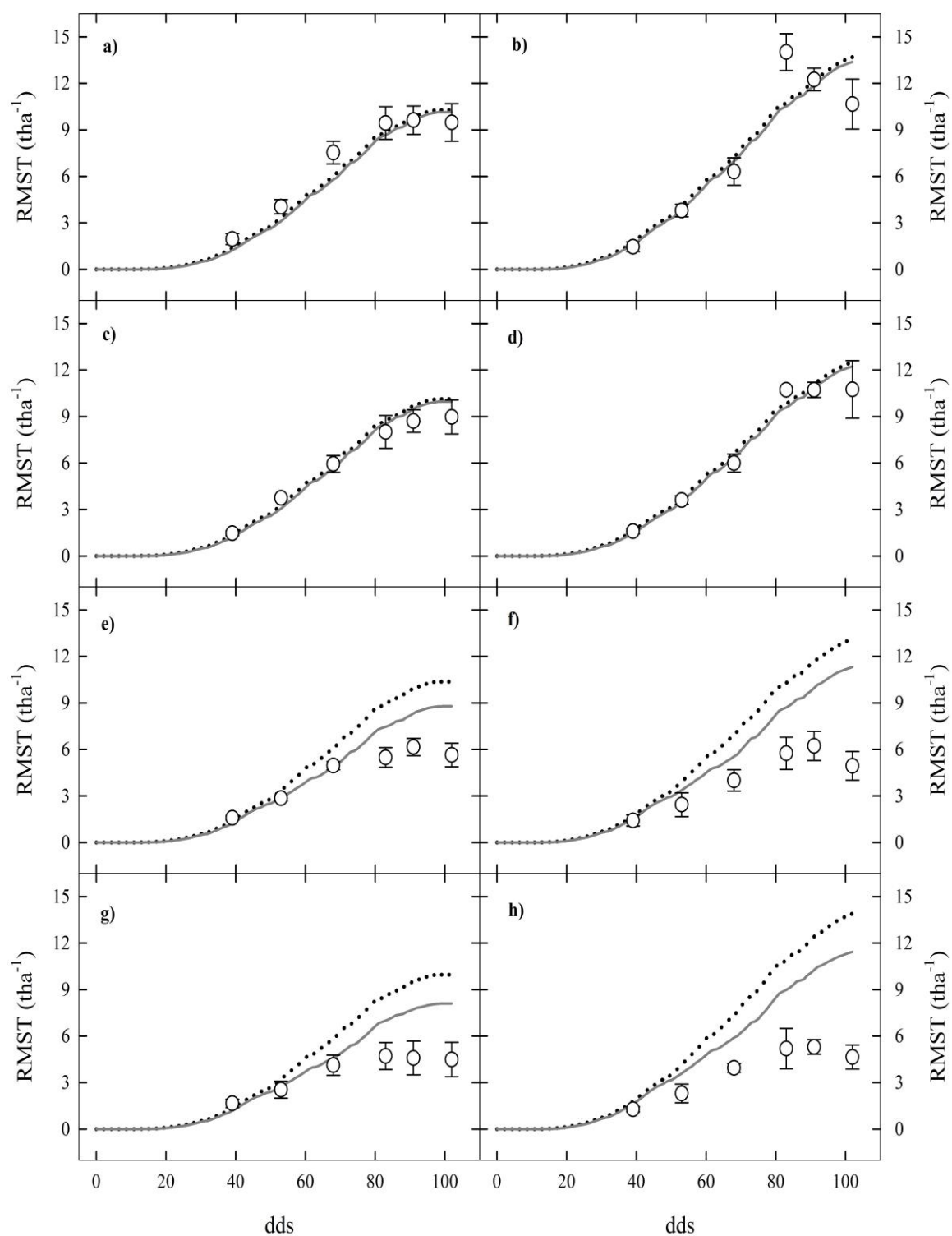


Figura 8: Rendimiento de materia seca total (RMST) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra) y el de restricción hídrica (línea continua gris). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).

El RMFTu estimado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de restricción hídrica, en principio, debería representar el rendimiento real del cultivo, ya que simula las condiciones hídricas del cultivo en cada tratamiento y tipo de riego. Pero como se observa en la Figura 7 (línea continua gris) no sucede aquello, sino por el contrario hay una sobreestimación del rendimiento, siendo mayor en los tratamientos T3 y T4. Lo mismo ocurre para el rendimiento de materia seca total (RMST, ver Figura 8) y el rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu, ver Anexo 8). En el caso de las parcelas regadas por goteo el RMFTu estimado fue de 36.7, 36.3, 31.4 y 30.1 t ha⁻¹ para el tratamiento T1, T2, T3 y T4 respectivamente, mientras que para las parcelas regadas por gravedad el RMFTu estimado fue de 47.7, 47.7, 42.0 y 40.9 t ha⁻¹ para el tratamiento T1, T2, T3 y T4 respectivamente. En los tratamientos T1 y T2, para ambos tipos de riego, el RMFTu simulado coincide con el observado durante casi toda la temporada de crecimiento del cultivo (ver Figura 7). En los tratamientos T3 y T4 la sobreestimación del RMFTu empieza aproximadamente a los 70 y 55 dds, en las parcelas regadas por goteo y gravedad respectivamente (ver Figura 7). En general, el modelo sobreestima el RMFTu en 5.5, 16.1, 73.1 y 129.4 por ciento para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente (en goteo) y en 16.9, 14.8, 148.7 y 199.8 por ciento para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente (en gravedad).

El rendimiento de materia seca total (RMST) obtenido durante el ensayo en las parcelas regadas por goteo fueron de 9.5 ± 1.2 , 9.0 ± 1.1 , 5.7 ± 0.8 y 4.5 ± 1.1 t ha⁻¹ para el tratamiento T1, T2, T3 y T4 respectivamente. Mientras que en las parcelas regadas por gravedad fueron de 10.7 ± 1.6 , 10.8 ± 1.9 , 5.0 ± 0.9 y 4.7 ± 0.8 t ha⁻¹ para el tratamiento T1, T2, T3 y T4 respectivamente. Al igual que en el RMFTu no se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el tratamiento T1 y T2 y entre el tratamiento T3 y T4, para ambos tipos de riego. El RMST potencial estimado por el modelo fue de 10.2 ± 0.1 y 13.3 ± 0.3 t ha⁻¹ en las parcelas regadas por goteo y gravedad respectivamente (ver Figura 8). El RMST estimado con el módulo de restricción hídrica del modelo, presentó una sobreestimación (respecto a los valores observados) de 7.1, 11.2, 55.7, 80.5 por ciento en las parcelas regadas por goteo. Mientras que en las parcelas regadas por gravedad la sobreestimación fue de 25.6, 13.9, 129.3 y 146.3 por ciento para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente. Los resultados encontrados en el RMST, RMSTu y RMFTu nos indican que el módulo de restricción hídrica no responde de manera adecuada a las condiciones medioambientales e hídricas ocurridas durante el ensayo. Esto podría explicarse si tenemos en cuenta que el

modelo SOLANUM ha sido desarrollado para las condiciones climáticas de los Andes (Condori *et al.* 2010), el cual influye en el performance del modelo al momento de estimar el rendimiento. Por ejemplo, Raymundo *et al.* (2016) evaluaron el performance del modelo SUBSTOR-potato (uno de los modelos de papa más usados) bajo diferentes condiciones medioambientales de crecimiento. En dicho estudio se encontró una sobreestimación en el rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu) de aproximadamente 100% para algunos lugares (por ejemplo, San Ramón - Perú), mientras que en otros lugares la estimación del RMSTu fue casi perfecta (por ejemplo, Toralapa - Bolivia).

4.2 INCORPORACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO (CWSI) EN EL MODELO SOLANUM.

4.2.1 resultados previos a la incorporación del CWSI en el modelo SOLANUM.

Los parámetros del cultivo que determinaron en mayor medida el rendimiento del cultivo fueron el uso eficiente de radiación (RUE, $R^2 = 0.95$) (ver Figura 9), el valor máximo de la cobertura de follaje (w_{max} , $R^2 = 0.95$), el tiempo termal acumulado cuando se alcanza el w_{max} (t_e , $R^2 = 0.61$) y el valor máximo del índice de cosecha (A , $R^2 = 0.39$) (ver Anexo 7). El tiempo termal acumulado cuando se alcanza la tasa máxima de partición de tubérculo (t_u) fue el parámetro que menor influencia tuvo en el rendimiento del cultivo ($R^2 = 0.08$) (ver Anexo 7). De todos los parámetros del cultivo, el RUE es el que más influye en el rendimiento. Bajo condiciones óptimas de crecimiento, las diferencias en el rendimiento de diferentes cultivos de papa pueden ser explicados por el RUE (Oliveira *et al.* 2016). El factor de reducción expresado como función del CWSI acumulado ($CWSI_{ac}$) que en promedio generó menor error relativo (ER) fue una función cuadrática ($a_1CWSI_{ac}^2 + a_2CWSI_{ac} + a_3$, ER = 3.27 %), respecto a otras dos funciones: lineal ($a_1CWSI_{ac} + a_2$, ER = 3.77 %) y exponencial ($a_1e^{a_2} + a_3$, ER = 3.49 %). Para el RUE, los coeficientes a_1 , a_2 y a_3 del FR fueron -1.12×10^{-3} , 0.97×10^{-2} y 12.07×10^{-1} respectivamente (ver Tabla 9). Se encontró que el $CWSI_{ac}$ en los tratamientos de control y T2 ($CWSI = 0.4$) fueron menor a 20 (en promedio 18.8), tanto en las parcelas regadas por goteo como por gravedad. Los tratamientos sometidos a una mayor restricción hídrica (T3 y T4) presentaron un valor de $CWSI_{ac}$ mayor a 20 (26.1). Este resultado nos permite hacer una diferenciación (en etapas tardías) entre plantas sin ($CWSI_{ac} < 20$) y con ($CWSI_{ac} > 20$) estrés.

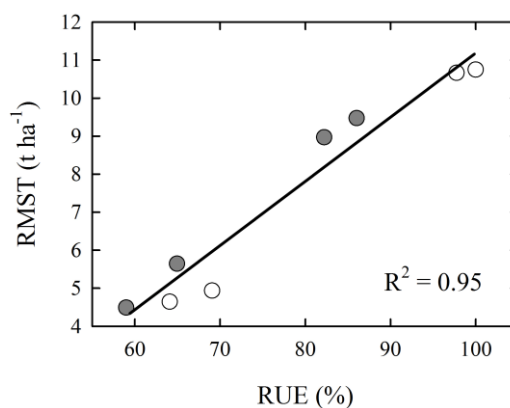


Figura 9: Influencia del uso eficiente de la radiación (RUE) en el rendimiento de materia seca total (RMST). El RUE es expresado como porcentaje del máximo valor alcanzado en las parcelas regadas por goteo (gris) y gravedad (blanco).

Tabla 9: Coeficientes del factor de reducción (FR) empleados en la penalización del uso eficiente de radiación (RUE), valor máximo de la cobertura de follaje (w_{max}), tiempo termal cuando se alcanza el w_{max} (t_e) y el valor máximo del índice de cosecha (A) en términos del CWSI acumulado ($CWSI_{ac}$). $FR = a_1 CWSI_{ac}^2 + a_2 CWSI_{ac} + a_3$.

Parámetro	$a_1 (\times 10^{-3})$	$a_2 (\times 10^{-2})$	$a_3 (\times 10^{-1})$
RUE	-1.12	0.97	12.07
w_{max}	-2.81	9.38	2.32
t_e	-0.93	3.10	7.54
A	-2.28	9.29	0.74

4.2.2 estimación del rendimiento del cultivo mediante el modulo de cwsí incorporado en el modelo SOLANUM.

Como se observa en la Figura 10 el RMFTu estimado con el módulo de CWSI representa mejor los datos observados, a diferencia que el rendimiento estimado con el módulo de restricción hídrica del modelo SOLANUM (ver detalles en el Tabla 10). En las parcelas regadas por goteo, la estimación del rendimiento fue muy similar a los datos observados (ver Tabla 10), sin embargo, hay una sobreestimación de 5.7, 11.1, 12.1 y 10.2% para los tratamientos T1 (control), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. Mientras que, en las parcelas regadas por gravedad, la sobreestimación fue de 19.2, 15.9, 57.9 y 101.2 por ciento para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente. En condiciones de crecimiento óptimas el rendimiento estimado mediante los módulos del modelo SOLANUM (potencial, restricción hídrica y CWSI) coinciden (p.e. para el RMFTu ver Figura 10b). La estimación del rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu, ver Anexo 8) y de materia seca total (RMST, ver Anexo 9) fue mejorada en todos los tratamientos, en especial, para las parcelas regadas por goteo. El modelo sobreestimó el RMST en 11.7, 7.4, 6.2 y 0.8% para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente, en las parcelas regadas por goteo. Mientras que, en las parcelas regadas por gravedad, la sobreestimación fue de 27.2, 25.1, 51.2 y 68.7% para los tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente. Se encontró que el modelo sobreestimó en mayor medida el RMFTu respecto al RMST y RMSTu, tanto para el módulo de restricción hídrica como para el de CWSI. La sobreestimación del RMSTu, en promedio, se redujo de 45 a 4 por ciento, en las parcelas regadas por goteo, mientras que en las parcelas regadas por gravedad se redujo de

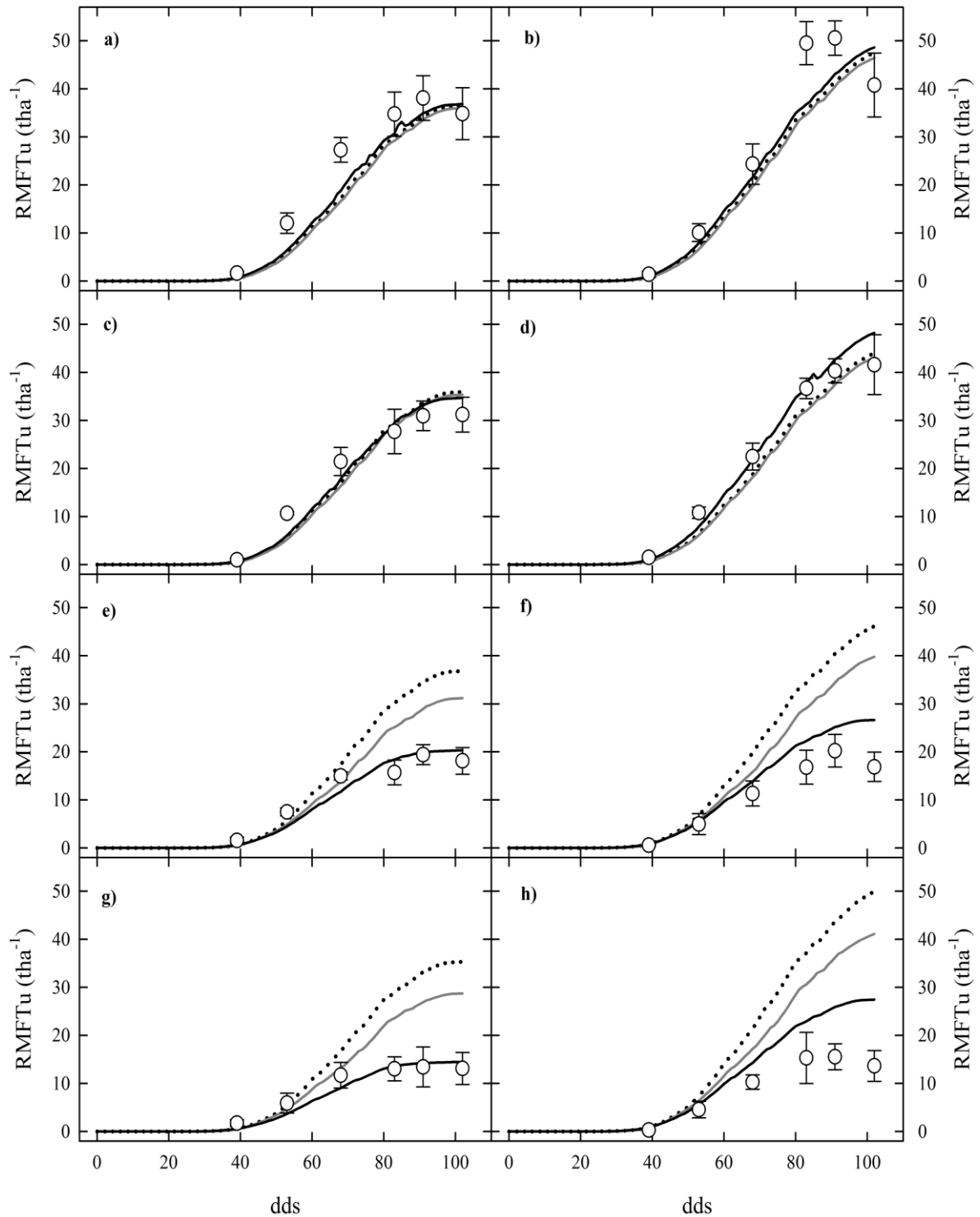


Figura 10: Rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra), el de restricción hídrica (línea continua gris) y el de CWSI incorporado (línea continua negra). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).

78 a 38 por ciento. En general el módulo de CWSI incorporado en el modelo SOLANUM mejoró la estimación del rendimiento del cultivo (RMFTu, RMSTu y RMST). No obstante, persiste la sobrestimación del rendimiento, sobretodo para las parcelas regadas por gravedad y en los tratamientos T3 y T4. Estos resultados nos sugieren que la incorporación de una variable integradora del estado hídrico de un cultivo como el CWSI permiten mejorar la estimación del rendimiento en condiciones de estrés severo ($CWSI \geq 0.6$). Un resultado similar, en términos de una mejor estimación del rendimiento del cultivo de papa, fue encontrado por Quiroz *et al.* (2017) incorporando al modelo SOLANUM (para su parametrización) datos obtenidos por sensoramiento remoto.

Tabla 10: Rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu, en $t\ ha^{-1}$) obtenido durante el ensayo y estimado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de restricción hídrica (RH) y de CWSI.

RMFTu	riego por goteo				riego por gravedad			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Observado	34.8	31.2	18.1	13.1	40.8	41.6	16.9	13.6
RH	36.7	36.3	31.4	30.1	47.7	47.7	42.0	40.9
CWSI	36.8	34.7	20.3	14.5	48.6	48.2	26.6	27.5

4.3 EVALUACIÓN DEL PERFORMANCE DEL MODELO EN LA ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Para el módulo de restricción hídrica (RH), a pesar de la sobreestimación del rendimiento, se obtuvo que el índice de concordancia de Willmot (D) y la eficiencia del modelo (EF) fueron los únicos estadísticos que pasaron los criterios de confiabilidad considerados en este estudio (ver Tabla 8). Asimismo, el coeficiente de determinación (r^2), el error absoluto de la media expresado como porcentaje de la media (MAE) y el error cuadrático medio de la raíz expresado como porcentaje de la media (rRMSE) fueron de 0.78, 30.8 por ciento y 46.6 por ciento respectivamente (ver Tabla 11). Respecto al rRMSE, se ha reportado por Quiroz *et al.* (2017), en un ensayo realizado en invernadero bajo condiciones óptimas, un valor de 60.5 por ciento para el modelo SOLANUM. Según Bitri *et al.* (2014), estos valores del rRMSE (> 30 %) nos indican que el modelo no presenta un buen performance para las condiciones en las que fue evaluado. No obstante, hay que tener en cuenta que los estadísticos basados en la suma de cuadrados como el RMSE, son muy sensibles a valores atípicos y desviaciones grandes (Yang *et al.* 2014). El error de sesgo promedio (MBE) nos indica si hubo una subestimación (valores negativos) o una sobreestimación (valores positivos) por parte del modelo. En nuestro caso es evidente que hubo una sobreestimación (ver Figura 10), lo cual es confirmado con el MBE (+ 5.2 t ha⁻¹). En comparación al valor de 0.1-0.9 t ha⁻¹ del MBE reportado para el modelo SOLANUM por Condori *et al.* (2010, 2014) tenemos una mayor sobreestimación del rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu). Por otro lado, para el modelo SOLANUM se ha reportado valores de RMSE de 0.7-1.5 t ha⁻¹ (Condori *et al.* 2010, 2014) y de 2.7 t ha⁻¹ (Quiroz *et al.* 2017) para el RMSTu y de 2.1-8.9 t ha⁻¹ (Carli *et al.* 2014) para el rendimiento de materia fresca de tubérculo (RMFTu). En nuestro caso se obtuvo un RMSE de 1.6 y 9.5 t ha⁻¹ para el RMSTu y el RMFTu respectivamente. En cuanto a la eficiencia del modelo (EF), si bien supera el criterio de confiabilidad, el valor obtenido (0.61) es mucho menor a los valores de 0.88-0.96 y 0.91-1.00 encontrados por Condori *et al.* (2010, 2014) y Carli *et al.* (2014) respectivamente.

En cuanto al módulo de CWSI, se observa claramente que la estimación del rendimiento del cultivo fue mejorada (ver Figura 11), lo cual se refleja en los estadísticos considerados (ver Tabla 11). Al respecto, se obtuvo un coeficiente de determinación (r^2) de 0.94, esto nos indica que la correlación entre rendimiento observado y simulado fue mejor respecto al módulo de restricción hídrica (0.78). La incorporación del CWSI en el modelo redujo la sobreestimación del rendimiento del cultivo (MBE = +1.4 t ha⁻¹). El RMSE (0.7 t ha⁻¹) se

encuentra dentro de los valores reportado por Condori *et al.* (2010) (0.7-1.5 t ha⁻¹). En general, el módulo de CWSI pasó todos los criterios de confiabilidad, excepto el rRMSE, que estuvo cerca de superar el criterio establecido (ver Tabla 11). El rRMSE (20.5 %) obtenido para el modelo SOLANUM se encuentra dentro de los valores reportados por Raymundo *et al.* (2014), para otros modelos de papa como el SUBSTOR-Potato (5-51 %), ISPOTA (8-32 %), Ingram-model (10-27 %), DAISY (1-30 %), etc. (para más detalles ver Anexo 15).

Tabla 11: Estadísticos usados para la evaluación del performance del modelo SOLANUM en la estimación del rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu, en t ha⁻¹) obtenido mediante el módulo de restricción hídrica (RH) y de CWSI. MBE y RMSE en t ha⁻¹.

Estadístico	Criterio	RH	CWSI
r ²	> 0.8	0.78	0.94
D	> 0.75	0.91	0.98
MAE	< 20%	30.8	14.3
MBE	-	5.2	1.4
RMSE	-	1.6	0.7
rRMSE	< 20%	46.6	20.5
EF	> 0	0.61	0.92

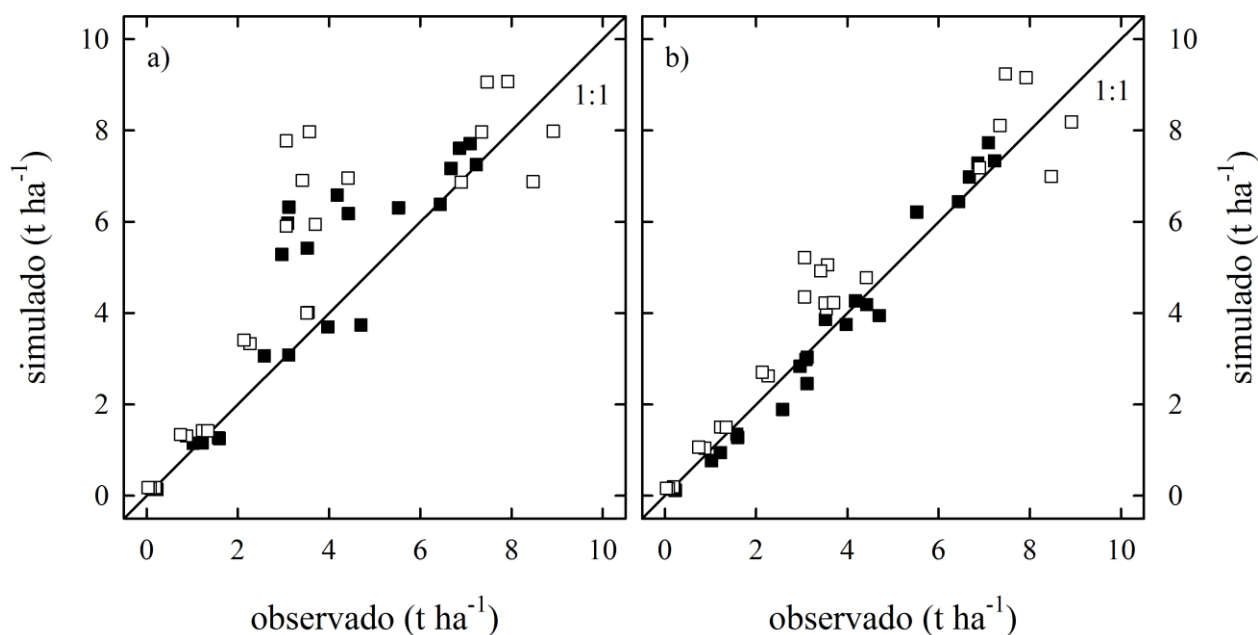


Figura 11: Rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu) observado vs. simulado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de restricción hídrica (a) y de CWSI (b) para las parcelas regadas por goteo (negro) y gravedad (blanco).

V. CONCLUSIONES

El rendimiento del cultivo estimado mediante el módulo de crecimiento potencial del modelo SOLANUM fue mayor en las parcelas regadas por gravedad debido a la parametrización realizada. y se aproxima al rendimiento potencial de 50 t ha⁻¹ reportados para la variedad UNICA, siendo esta de 47.8 t ha⁻¹. El módulo de restricción hídrica estima de manera adecuada el rendimiento del cultivo en el tratamiento T1 (control) y T2, sin embargo, sobreestima el rendimiento en los tratamientos con restricción hídrica (T3 y T4), siendo mayor la sobreestimación para el RMFTu (en las parcelas regadas por gravedad). Esta sobreestimación en el rendimiento genera una ventana de oportunidades en términos de mejora del modelo.

La incorporación del CWSI en el modelo SOLANUM mediante relaciones empíricas entre el CWSI y las principales variables que determinan el rendimiento del cultivo permiten una mejor estimación del rendimiento. En promedio, la sobreestimación del rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu) se redujo de 45 a 4 por ciento en las parcelas regadas por goteo, mientras que en las regadas por gravedad se redujo de 78 a 38 por ciento. En general, la estimación del rendimiento fue adecuada para el riego por goteo en todos los tratamientos, sin embargo, aún hay una sobrestimación del rendimiento en las parcelas regadas por gravedad.

El módulo de restricción hídrica no obtuvo resultados satisfactorios en la evaluación del performance del modelo, y solamente superó el criterio de confiabilidad para el índice de concordancia de Willmot ($D > 0$, $D = 0.91$) y la eficiencia del modelo ($EF > 0$, $EF = 0.61$). Mientras que el módulo de CWSI superó el criterio de confiabilidad en todos los estadísticos evaluados, excepto para el error cuadrático medio de la raíz expresada como porcentaje de la media ($rRMSE < 20\%$, $rRMSE = 20.5\%$). Se encontró que tanto el $rRMSE$ como el error absoluto de la media expresado como porcentaje de la media (MAE) fueron los estadísticos que dieron valores más coherentes con los resultados.

VI. RECOMENDACIONES

Validar las parametrizaciones realizadas del modelo SOLANUM y la incorporación del CWSI con otros ensayos realizados en ambientes con alta humedad relativa y en diferentes épocas del año.

Se propone usar la diferencia entre la temperatura del follaje y del aire (dT) para ser usado en contraste con el CWSI, para estimar el rendimiento mediante un modelo de crecimiento de cultivo.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, M., Asif, M., Hirani, A. H., Akram, M.N., & Goyal, A. (2013). Modeling for Agricultural Sustainability: A review. In Bhullar, GS, Bhullar, NK (eds.). *Agricultural Sustainability: Progress and prospect in crop research*. Elsevier. p. 127–147.
- Alderfasi, A. A., & Nielsen, D. C. (2001). Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management* 47(1): 69–75.
- Bitri, M., Grazhdani, S., & Ahmeti, A. (2014). Validation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Potato Production in Environmental Condition of Korça Zone, South-eastern Albania. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 3(5): 12013-12020.
- Carli, C., Yuldashev, F., Khalikov, D., Condori, B., Mares, V., & Monneveux, P. (2014). Effect of different irrigation regimes on yield, water use efficiency and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) in the lowlands of Tashkent, Uzbekistan: A field and modeling perspective. *Field Crops Research* 163: 90-99.
- CIP-PSE. (julio, 2018). CIP-PSE División. Disponible en <https://cipotato.org/site/inrm/home/downmod.htm>.
- CIP. (2013). Protocol for Designing and Conducting Potato Field Experiments for Modeling Purposes. *International Potato Center* (CIP). p. 18.
- Condori, B., Hijmans, R. J., Ledent, J. F., & Quiroz, R. (2014). Managing Potato Biodiversity to Cope with Frost Risk in the High Andes: A Modeling Perspective. *PLoS ONE* 9(1): e81510.
- Condori, B., Hijmans, R. J., Quiroz, R., & Ledent, J.-F. (2010). Quantifying the expression of potato genetic diversity in the high Andes through growth analysis and modeling. *Field Crops Research* 119(1): 135–144.

- Condori, B., Mamani, P., Botello, R., Patiño, F., Devaux, A., & Ledent, J. F. (2008). Agrophysiological characterisation and parametrisation of Andean tubers: Potato (*Solanum sp.*), oca (*Oxalis tuberosa*), isaño (*Tropaeolum tuberosum*) and papalisa (*Ullucus tuberosus*). *European Journal of Agronomy* 28(4): 526–540.
- de Jager, J. M. (1994). Accuracy of vegetation evaporation ratio formulae for estimating final wheat yield. *Water SA – PRETORIA* 20 (4): 307-314.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., & Rodríguez, A. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación en papa estimada a partir de la cobertura del follaje. *AGRISCIENTIA*, vol. XXVIII: 21-30
- de Vries, F. W. T. P., & Rabbinge, R. (1995). Models in research and education, planning and practice. In Haverkort, AJ, MacKerron, DKL (eds.). *Potato Ecology And modelling of crops under conditions limiting growth. Dordrecht Springer Netherlands* vol.3. p. 1–18.
- DeFauw, S. L., He, Z., Larkin, R. P., & Mansour, S. A. (2012). Sustainable Potato Production and Global Food Security. In: He, Z, Larkin, R, Honeycutt, W (eds.). *Sustainable Potato Production: Global Case Studies. Springer, Dordrecht.* p. 3-19.
- Devaux, A., Kromann, P., & Ortiz, O. (2014). Potatoes for Sustainable Global Food Security. *Potato Research* 57 (3-4): 185-199.
- Erdem, T., Halim O. A., Erdem, Y., & Okursoy, H. (2005). Crop water stress index for potato under furrow and drip irrigation systems. *Potato Research* 48(1-2): 49–58.
- Erdem, Y., Şehirali, S., Erdem, T., & Kenar, D. (2006). Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 30: 195–202.
- FAO. (julio, 2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division (FAOSTAT). Disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/>.
- Fleisher, D. H., Condori, B., Quiroz, R., Alva, A., Asseng, S., Barreda, C., Bindi, M., Boote, K. J., Ferrise, R., Franke, A. C., Govindakrishnan, P. M., Harahagazwe, D., Hoogenboom, G., Naresh Kumar, S., Merante, P., Nendel, C., Olesen, J. E., Parker, P.

- S., Raes, D., Raymundo, R., Ruane, A. C., Stockle, C., Supit, I., Vanuytrecht, E., Wolf, J., & Woli, P. (2017). A potato model intercomparison across varying climates and productivity levels. *Global Change Biology* 23(3): 1258-1281.
- García, J. (1992). Agrometeorología: Energía y Agua en la Agricultura. *UNALM*, 174p.
 - Gardner, B. R., Nielsen, D. C., & Shock, C. C. (1992). Infrared Thermometry and the Crop Water Stress Index. II. Sampling Procedures and Interpretation. *Journal of Production Agriculture* 5(4): 466-475.
 - Gutiérrez-Rosales, R. O., Espinoza-Trelles, J. A., & Bonierbale, M. (2007). UNICA: variedad peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y resistencia para condiciones climáticas adversas. *Revista Latinoamericana de la Papa* 14: 41–50.
 - Haverkort, A. J. (1990). Ecology of potato cropping systems in relation to latitude and altitude. *Agricultural Systems* 32(3): 251–272.
 - Haverkort, A. J. (2007). The Canon of Potato Science: 46. Potato Crop Modelling. *Potato Research* 50(3-4): 399-402.
 - Hawkes, J. G. (1992). History of the potato. In Harris, PM (ed.). *The Potato Crop: The Scientific Basis for Improvement*. p. 1-12.
 - Hernández, C., Villagra, P., & Antúnez, A. (2016). Relación suelo-agua-planta y evaluaciones de estrés hídrico en papas. In Pino, MT (ed.). *Estrés Hídrico y Térmico en Papas, Avances y Protocolos*. Santiago. Chile. *Instituto de Innovaciones Agropecuarias*. p. 86-105.
 - Higham, N. (2004). The numerical stability of barycentric Lagrange interpolation. *IMA Journal of Numerical Analysis* 24: 547-556.
 - Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology* 24: 45–55.
 - IPCC. (2008). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. p. 103.

- Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Timing and Yield Estimation of Corn. *Agron. J.* 92:1221–1227.
- Iwama, K. (2008). Physiology of the Potato: New Insights into Root System and Repercussions for Crop Management. *Potato Research* 51:333–353.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17(4): 1133–1138.
- Jefferies, R. A. (1995). Physiology of crop response to drought. In Haverkort, A. J., MacKerron, DKL (eds.). *Potato Ecology and modelling of crops under conditions limiting growth. Dordrecht, Springer Netherlands*, vol.3. p. 61-74.
- Jones, H. G. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* 95(3): 139–149.
- Jones, H. G., Serraj, G. R., Loveys, B. R., Xiong, L., Wheaton, A., & Price, A. H. (2009). Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Functional Plant Biology* 36, 978-989.
- Kirkham, M. B. (2014). Stress-Degree-Day Concept and Crop Water Stress Index. In *Principles of soil and plant water relations. Elsevier.* p. 483–499.
- Kooman, P. L., Fahem, M., Tegera, P., & Haverkort, A. J. (1996). Effects of climate on different potato genotypes 1. Radiation interception, total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy* 5: 193-205.
- Kooman, PL, Haverkort, AJ. (1994). Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In Haverkort, A. J., MacKerron, DKL (eds). *Potato Ecology And modelling of crops under conditions limiting growth. Dordrecht, Springer Netherlands*, vol.3. p. 41–59.
- López, R., Arteaga, R., Vázquez, M. A., López, I., & Sánchez, I. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México* 35(1): 97-111.

- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87(4): 291-300.
- McCann, I. R., Stark, J. C., & King, B. A. (1992). Evaluation and interpretation of the crop water stress index for well-watered potatoes. *American Potato Journal* 69(12):831–841.
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., & Cohen, S. (2006). Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 58(4): 827-838.
- Monneveux, P., Ramírez, D. A., & Pino, M.-T. (2013). Drought tolerance in potato (*S. tuberosum* L.). *Plant Science* 205-206: 76–86.
- Obidiegwu, J. E., Bryan, G. J., Jones, H. G., & Prashar, A. (2015). Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science* 6: 1-23.
- Oliveira, J., Brown, H., Gash, A., & Moot, D. (2016). An Explanation of Yield Differences in Three Potato Cultivars. *Agronomy Journal*. 108.
- O’Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Colaizzi, P. D., & Howell, T. A. (2012). A crop water stress index and time threshold for automatic irrigation scheduling of grain sorghum. *Agricultural Water Management* 107:122–132.
- Pino, M. T. (2016). Efectos del estrés hídrico y de altas temperaturas en el cultivo de papa. In Pino, MT (ed.). *Estrés Hídrico y Térmico en Papas, Avances y Protocolos*. Santiago, Chile. *Instituto de Innovaciones Agropecuarias*. p. 16-26.
- Prashar, A., & Jones, H. G. (2016). Assessing Drought Responses Using Thermal Infrared Imaging. In Duque, P (ed.). *Environmental Responses in Plants: Methods and Protocols*. New York. *Springer New York*. Vol. 1398. p. 209–219.
- Prashar, A., Yildiz, J., McNicol, J. W., Bryan, G. J., & Jones, H. G. (2013). Infra-red Thermography for High Throughput Field Phenotyping in *Solanum tuberosum*. *PLoS ONE* 8(6): e65816.

- Quiroz, R., Chujoy, E., & Mares, V. (2012). Papa o patata. In Steduto, P, Hsiao, TC, Fereres, E, Raes, D (eds). Crop yield response to water. *FAO (Estudio FAO: Riego y Drenaje*, no. 66). p. 190-195.
- Quiroz, R., Loayza, H., Barreda, C., Gavilán, C., Posadas, A., & Ramírez, D. A. (2017). Linking process-based potato models with light reflectance data: Does model complexity enhance yield prediction accuracy? *European Journal of Agronomy* 82: 104–112.
- R Core Team. (2015). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria <http://www.R-project.org/>.
- Raes, D. (2017). AquaCrop training handbook I. Understanding AquaCrop. *FAO*. p. 59.
- Ramírez, D. A., Yactayo, W., Rens, L. R., Rolando, J. L., Palacios, S., De Mendiburu, ..., & Quiroz, R. (2016). Defining biological thresholds associated to plant water status for monitoring water restriction effects: Stomatal conductance and photosynthesis recovery as key indicators in potato. *Agricultural Water Management* 177: 369–378.
- Raymundo, R., Asseng, S., Cammarano, D., & Quiroz, R. (2014). Potato, sweet potato, and yam models for climate change: A review. *Field Crops Research* 166: 173–185.
- Raymundo, R., Asseng, S., Prasad, R., Kleinwechter, U., Concha, J., Condori, B., ..., & Porter, C. (2016). Performance of the SUBSTOR-potato model across contrasting growing conditions. *Field Crops Research*. p. 20.
- Renault, D., & Wallender, W. (2000). Nutritional water productivity and diets. *Agricultural Water Management* 45(3): 275-296.
- Rinza, J., Ramírez, D. A., García, J., de Mendiburu, F., Yactayo, W., Barreda, C., Velasquez, T., Mejía, A., & Quiroz, R. (2018). Infrared Radiometry as a Tool for Early Water Deficit Detection: Insights into Its Use for Establishing Irrigation Calendars for Potatoes Under Humid Conditions. *Potato Research*. 62(2), 109-122
- Rolando, J. L., Ramírez, D. A., Yactayo, W., Monneveux, P., & Quiroz, R. (2015). Leaf greenness as a drought tolerance related trait in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Environmental and Experimental Botany* 110:27-35.

- Rud, R., Cohen, Y., Alchanatis, V., Levi, A., Brikman, R., Shenderey, C., ... & Nigon, T. (2014). Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agriculture* 15(3):273–289.
- SENAMHI. (julio, 2018). Servicio Nacional Meteorológico e Hidrológico (en línea, sitio web). Disponible en <http://www.senamhi.gob.pe>.
- Silva, P., Silva, H., Garrido, M., & Acevedo, E. (2015). Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. *Universidad de Chile*. p. 82.
- Singh, J. P., Govindakrishnan, P. M., Lal, S. S., & Aggarwal, P. K. (2008). Infocrop-Potato A Model for Simulating Growth and Yield of Potato in the Sub-Tropics. *Central Potato Research Institute: Shimla*. p. 36.
- Spitters, C. J. T., & Schapendonk, A. H. C. M. (1990). Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant and Soil* 123: 193–203.
- Stark, J. C., & Wright, J. L. (1985). Relationship between foliage temperature and water stress in potatoes. *American Potato Journal* 62(2): 57-68.
- Stegman, E. C., & Soderlund, M. (1992). Irrigation Scheduling of Spring Wheat Using Infrared Thermometry. *Transactions of the ASAE* 35(1): 143–152.
- van Loon, C. D. (1981). The effect of water stress on potato growth, development, and yield. *American Potato Journal* 58(1): 51–69.
- Yang, J. M., Yang, J. Y., Liub, S., & Hoogenboom, G. (2014). An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*. *Agricultural Systems*, 127, 81-89.
- Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E. A., Vos, J., & Spiertz, H. (2003). A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany* 91: 361-371.

VIII. ANEXOS

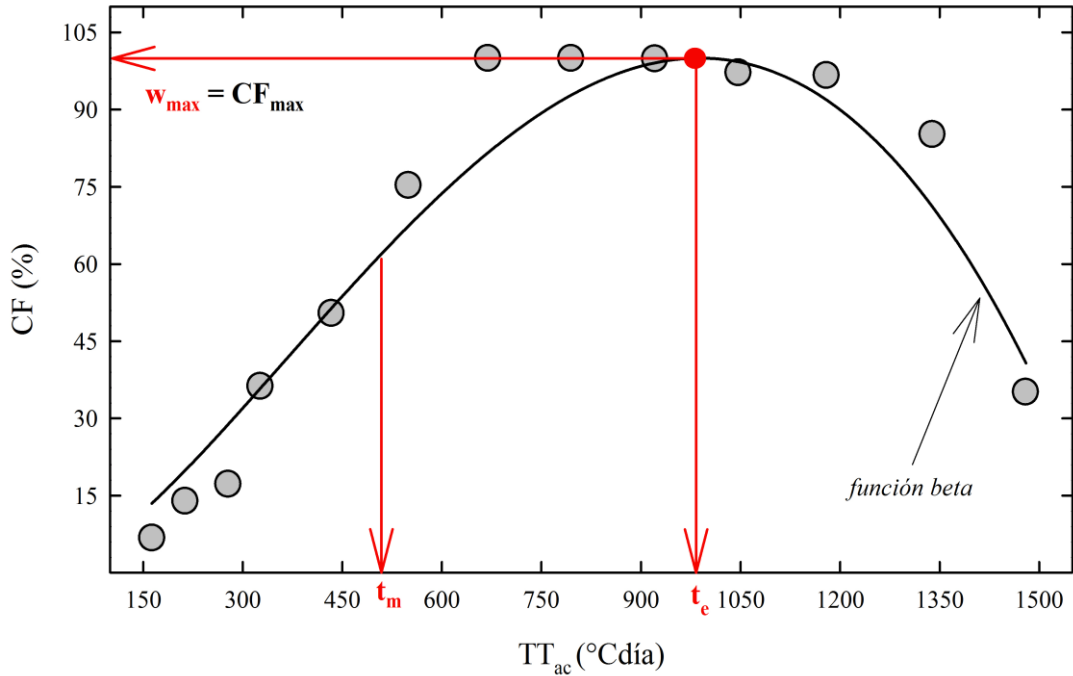
Anexo 1: Productos químicos (insecticidas y plaguicidas) usados para el control integral de plagas y enfermedades durante el ensayo llevado a cabo entre el 05-oct-17 al 15-ene-18. dds: Días después de la siembra. 1 cil = 200 L.

fecha	dds	Producto	Cantidad
04-11-17	30	Movento 150 OD, NutriOil, Trigard, Qumifol 600 y Quimifol boro	1/3 cil
24-11-17	50	Eviset-S, Sorba, Kieto, Oligomix-Co y Agrosterin	1/2 cil
30-11-17	56	Movento 150 OD, NutriOil, Trigard, Sorba y Enziprom	2/3 cil
07-12-17	63	Proton y Enziprom	2/3 cil
19-12-17	75	Trigard, Movento 150 OD, NutriOil y Quimifol 600	1/3 cil

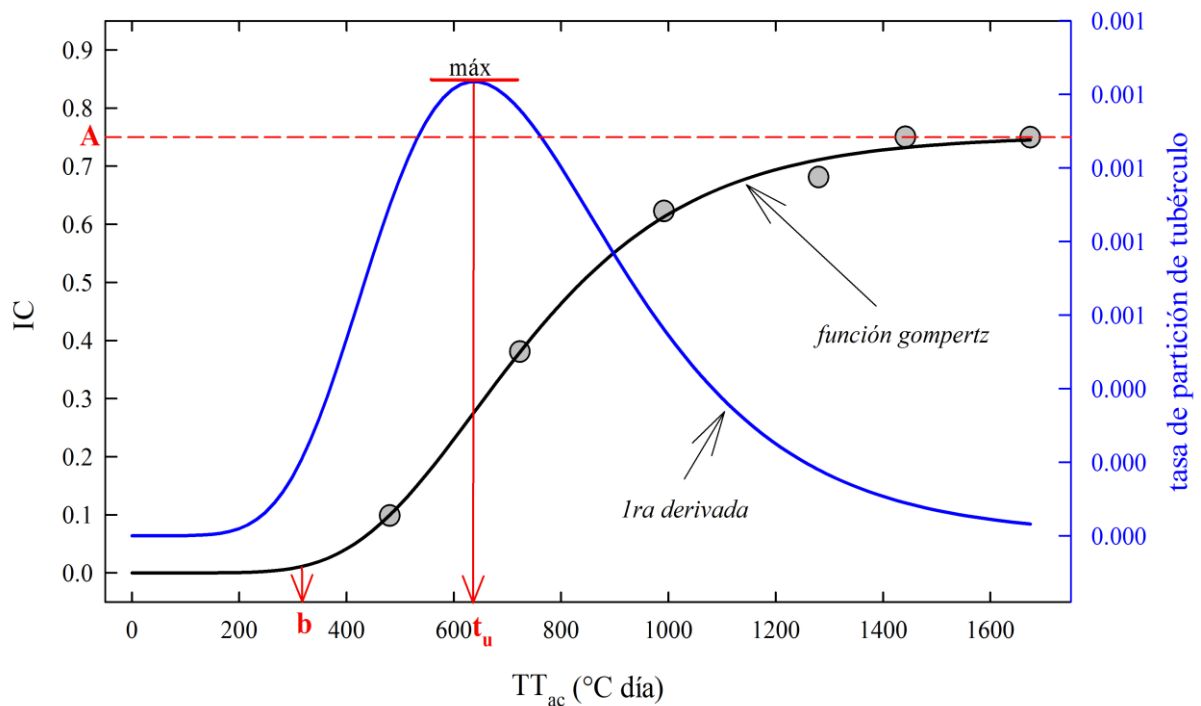
Anexo 2: Volumen de agua (en m³ ha⁻¹) usado durante el ensayo en el tratamiento T1 (control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7). 1: Desde la siembra hasta el inicio de tratamiento (0 a 33dds). 2: Desde el inicio de tratamiento hasta la cosecha (33 a 102 dds). 3: Volumen total de agua. dds: Días después de la siembra.

	riego por goteo				riego por gravedad			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
1	1781	1781	1781	178.1	1781	1781	1781	1781
2	1458	1116	403	254	2981	2331	927	419
3	3239	2897	2184	2035	4762	4112	2708	2200

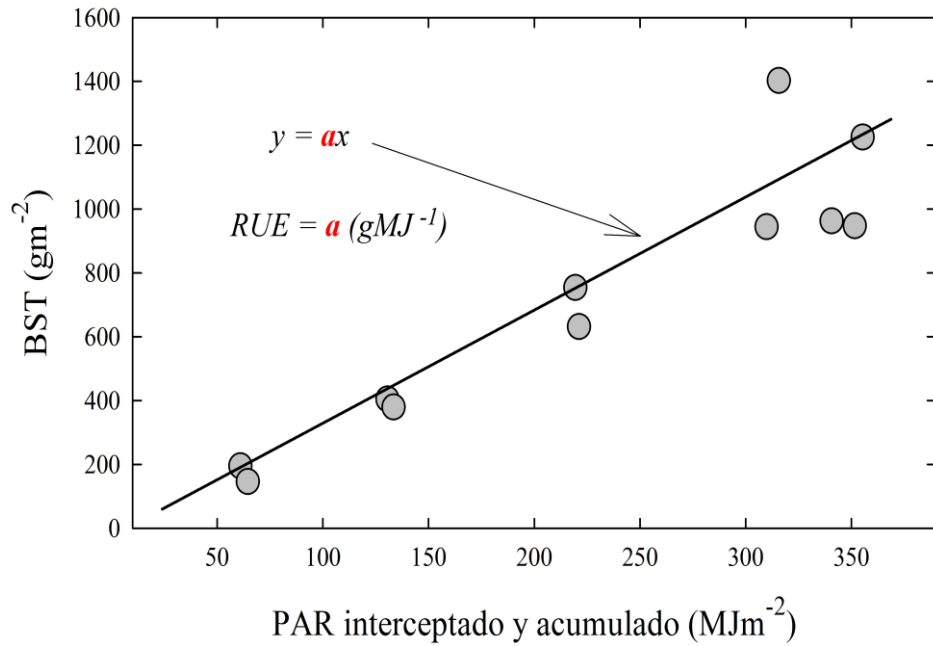
Anexo 3: Ajuste de la cobertura de follaje (CF) a una función Beta para obtener los parámetros relacionados a la intercepción de luz: el máximo valor de la CF (w_{max}), el TT_{ac} cuando ocurre el w_{max} (t_e) y el TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de crecimiento de la CF (t_m). TT_{ac} : Tiempo termal acumulado.



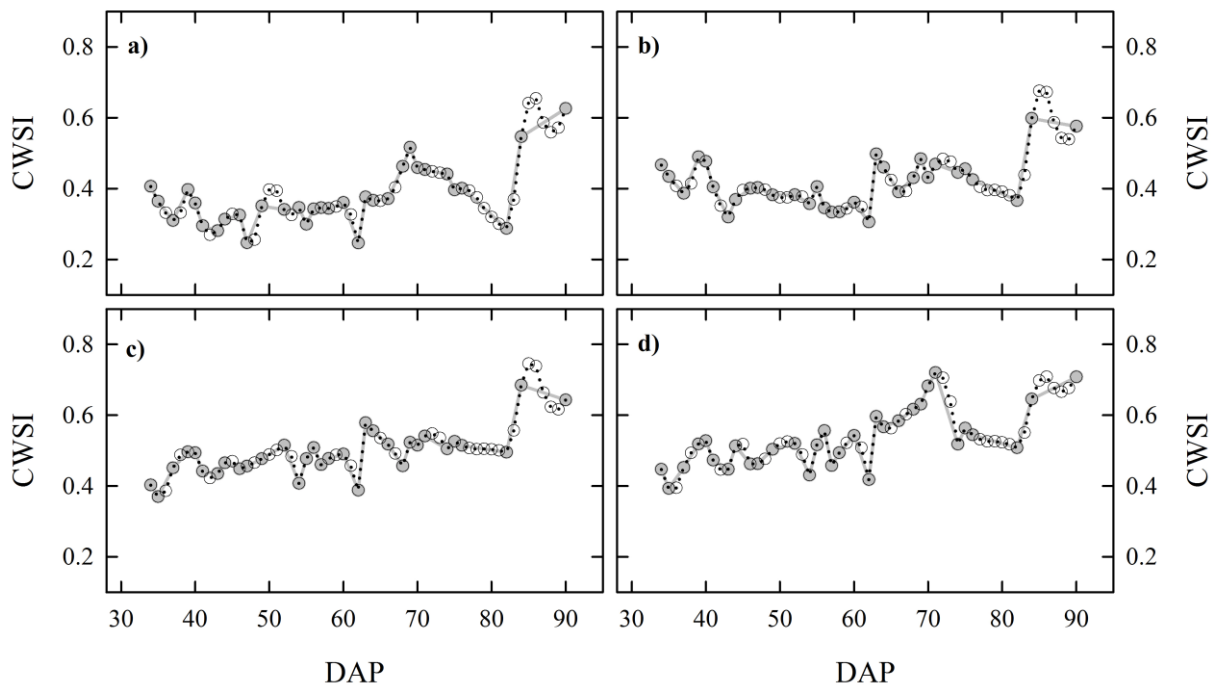
Anexo 4: Ajuste del índice de cosecha (IC) a una función Gompertz para obtener los parámetros relacionados a la partición de tubérculo: el máximo valor del IC (A), el TT_{ac} cuando ocurre el inicio del proceso de tuberización (b) y el TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de partición (t_u). TT_{ac} : Tiempo termal acumulado.



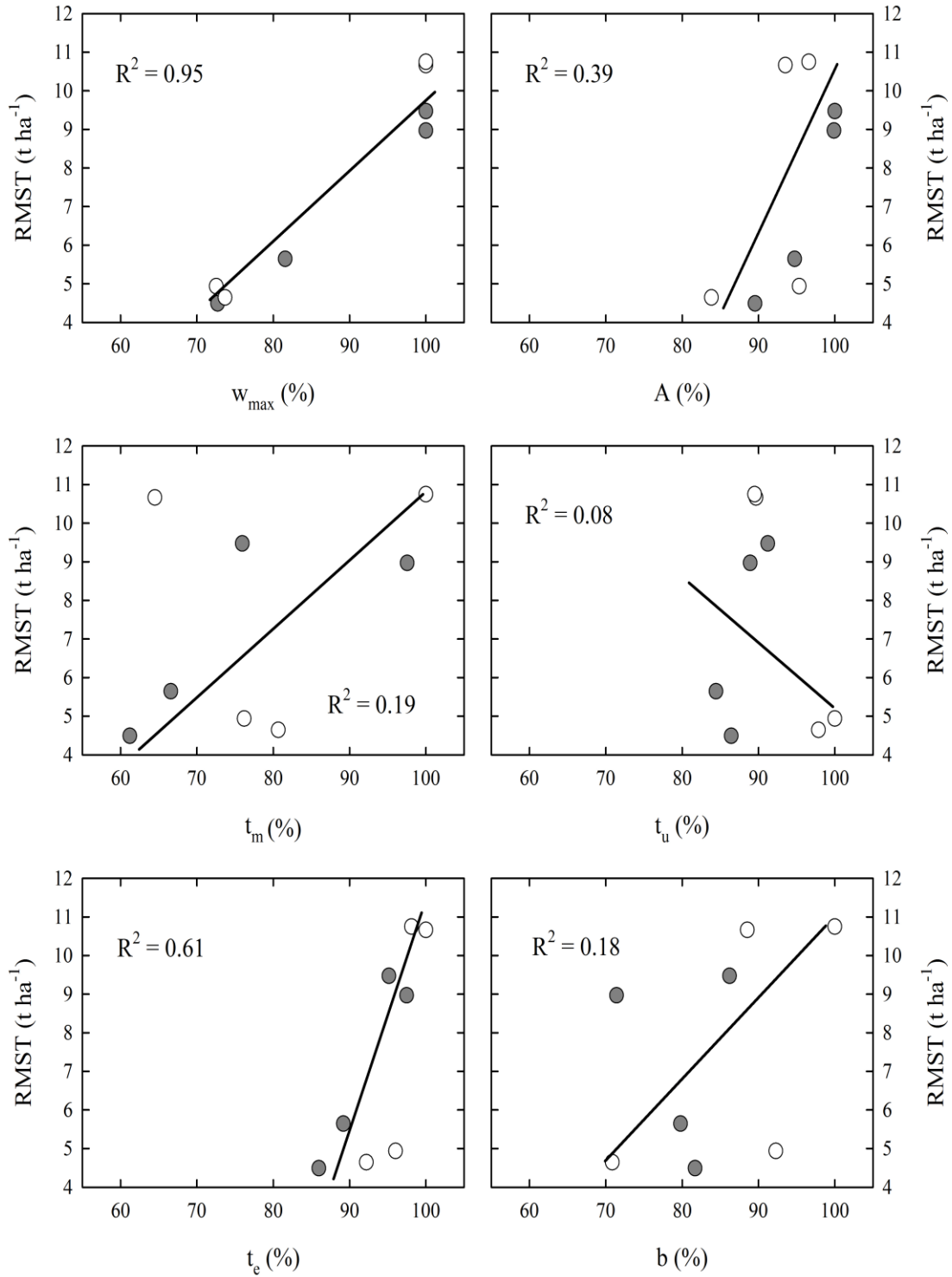
Anexo 5: Determinación del uso eficiente de radiación (RUE, en gMJ^{-1}). BST: Biomasa seca total. PAR: Radiación fotosintéticamente activa. a: Pendiente de la recta que pasa por el origen.



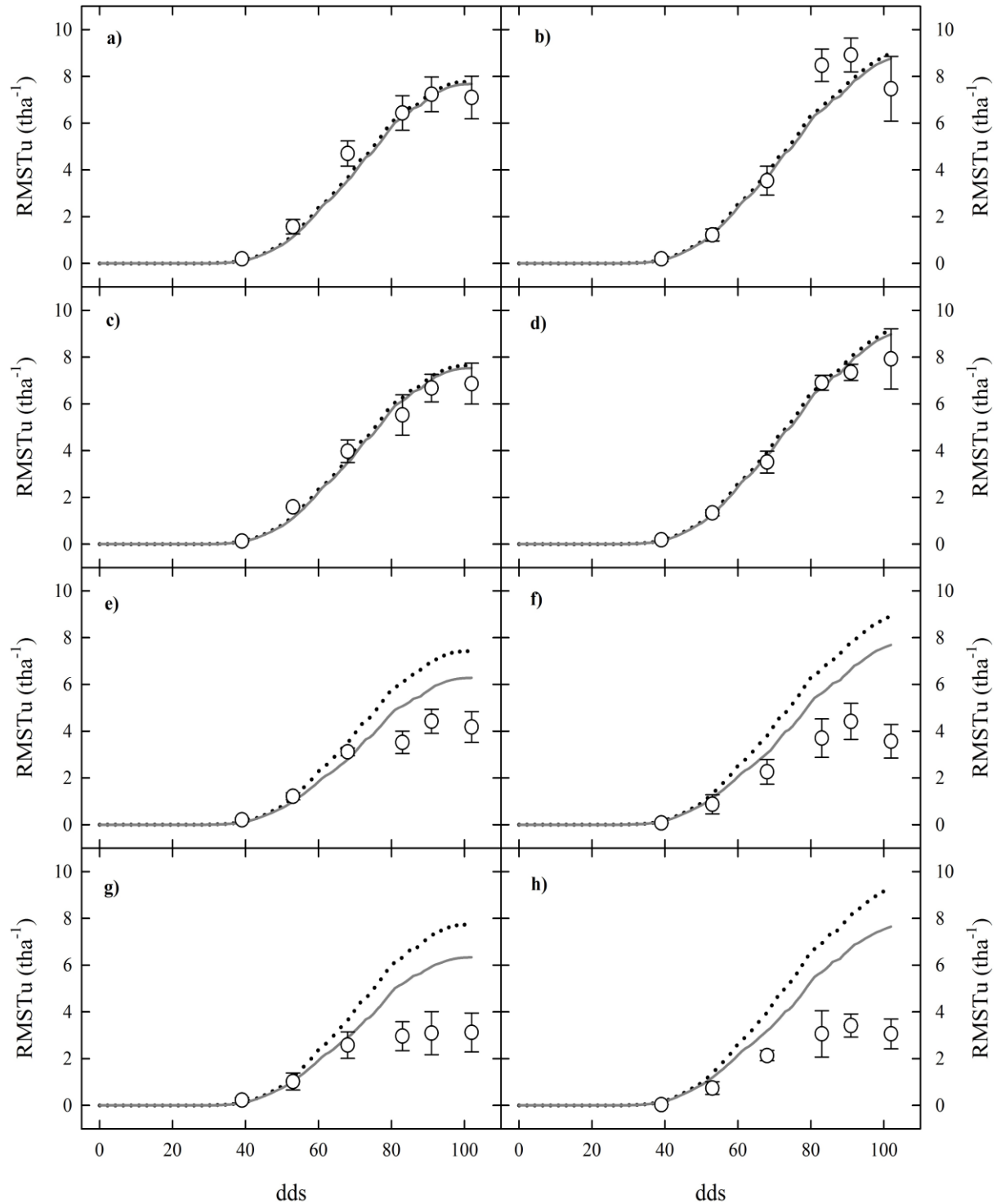
Anexo 6: Interpolación de los datos faltantes del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) mediante el polinomio interpolante de Lagrange, en las parcelas regadas por goteo. Los datos observados e interpolados son representados por los círculos grises y blancos respectivamente. Las subfiguras a), b), c) y d) representan al tratamiento T1 (Control), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente.



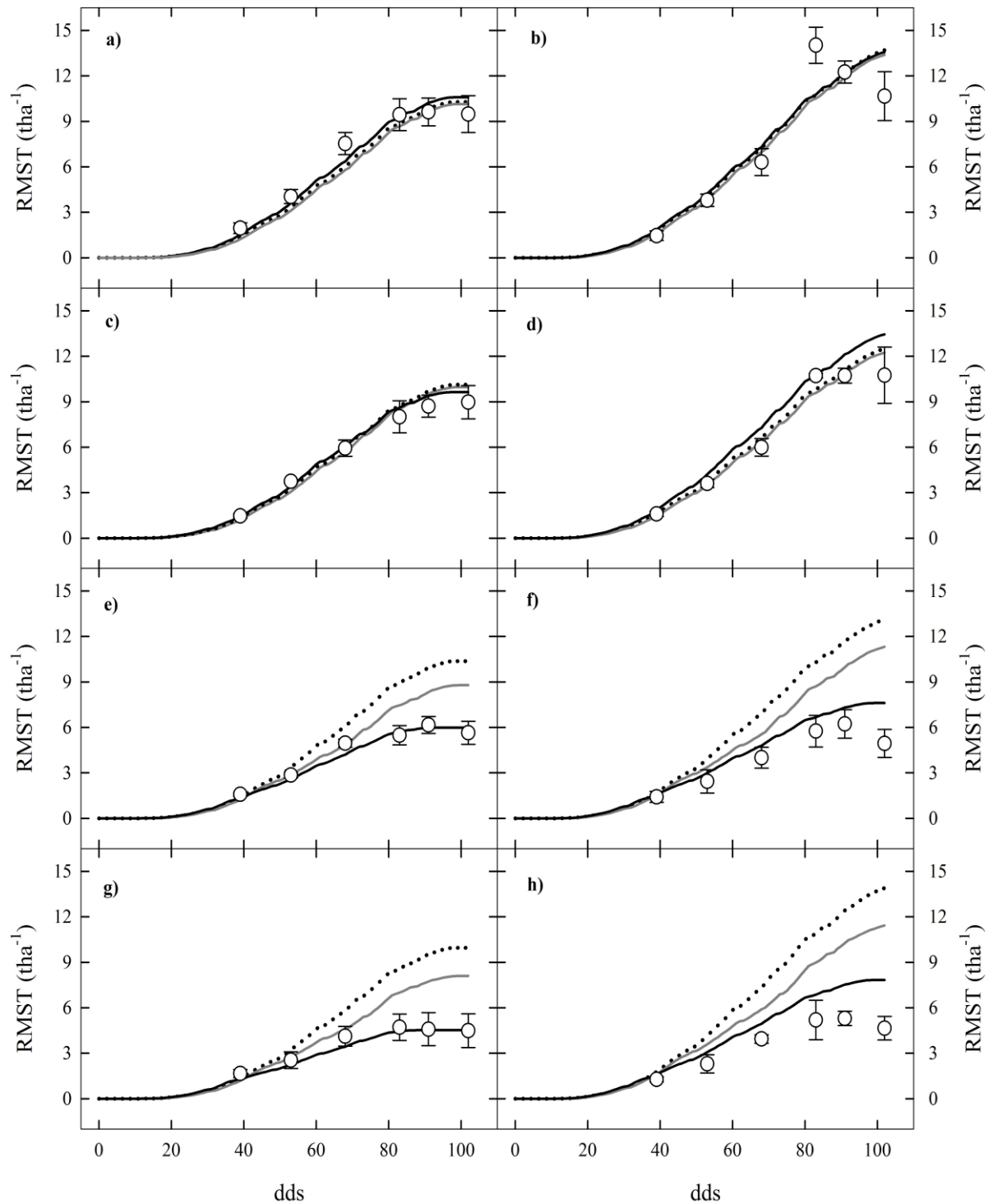
Anexo 7: Influencia de los parámetros del cultivo en el rendimiento de materia seca total (RMST). Los parámetros están expresados como porcentaje del máximo valor obtenido en las parcelas regadas por goteo (gris) y gravedad (blanco). w_{max} : máximo valor de la cobertura de follaje. t_e : TT_{ac} cuando ocurre w_{max} . t_m : TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de crecimiento del follaje. A : máximo valor del índice de cosecha. b : TT_{ac} cuando ocurre el proceso de tuberización. t_u : TT_{ac} cuando ocurre la tasa máxima de partición. TT_{ac} : tiempo termal acumulado.



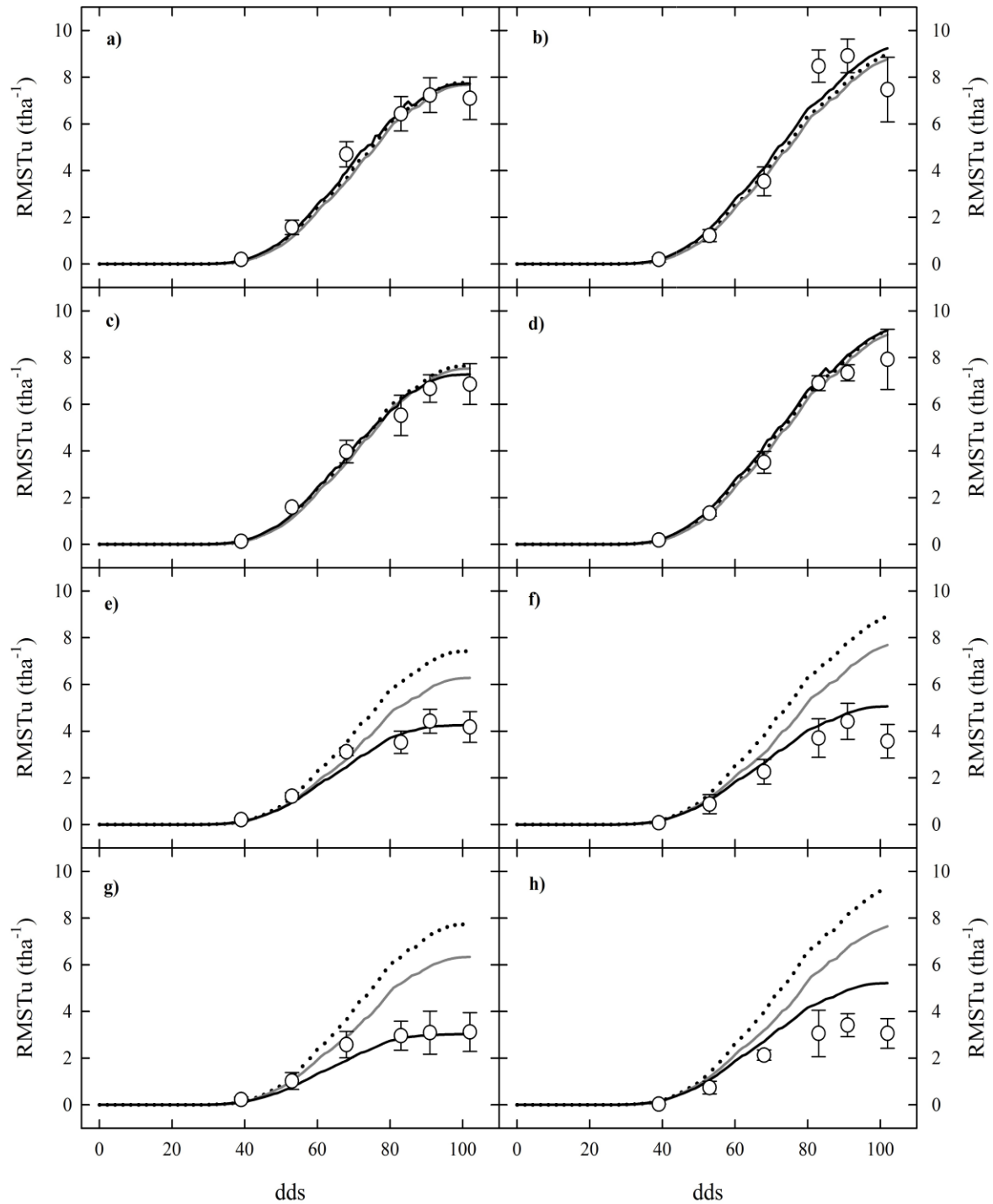
Anexo 8: Rendimiento de materia seca del tubérculo (RMSTu) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra) y el de restricción hídrica (línea continua gris). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).



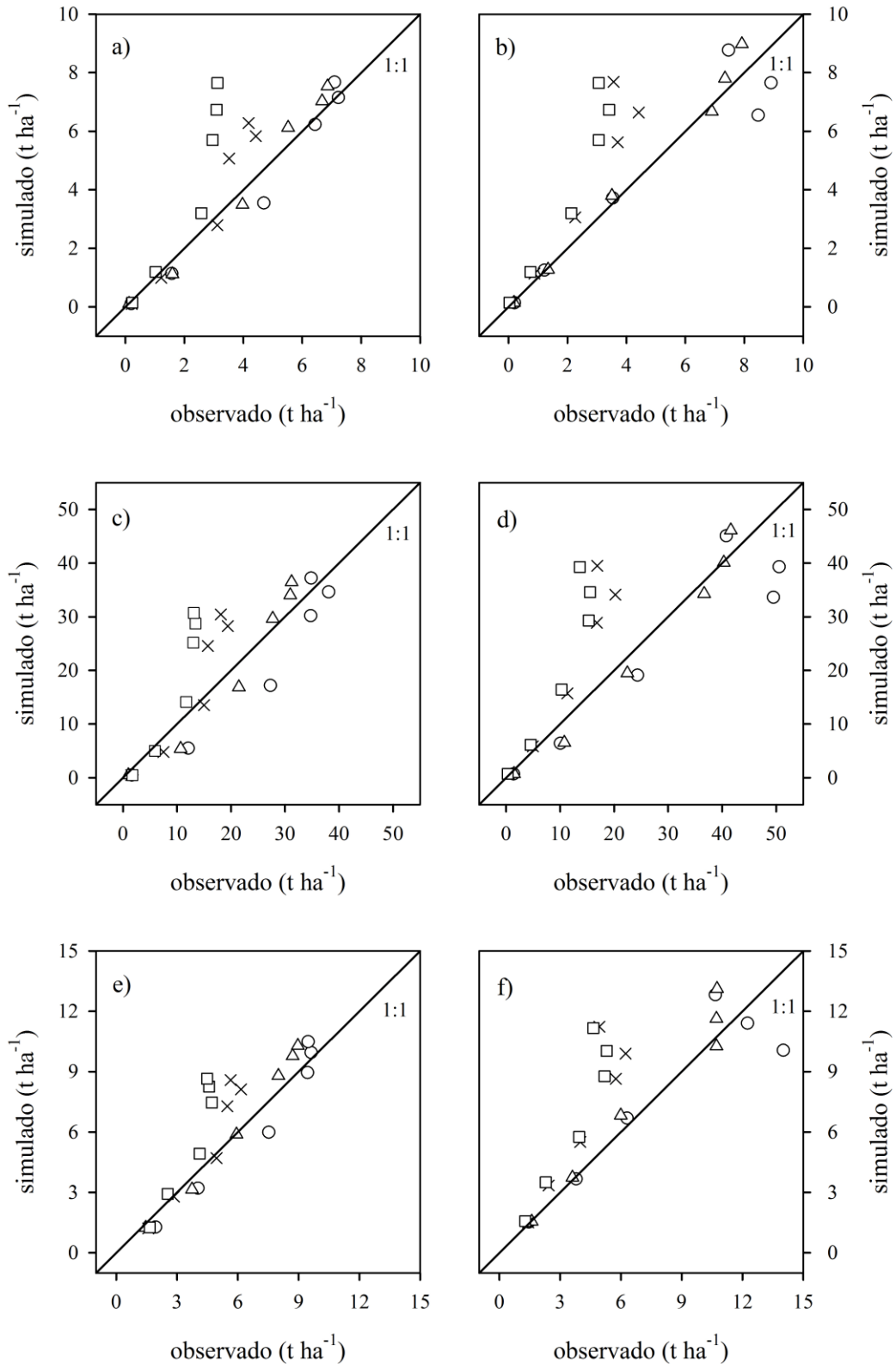
Anexo 9: Rendimiento de materia seca total (RMST) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra), el de restricción hídrica (línea continua gris) y el de CWSI incorporado (línea continua negra). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).



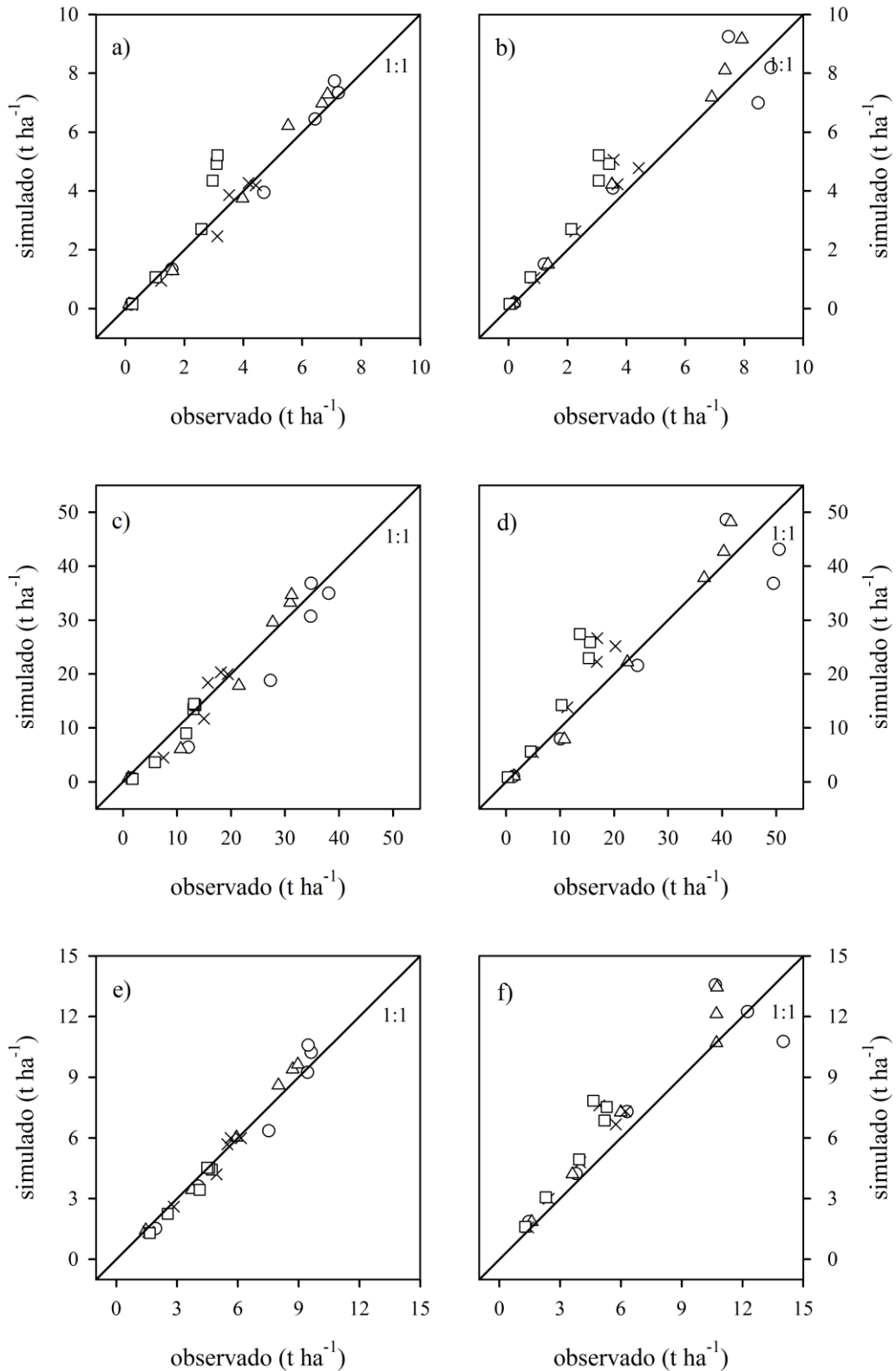
Anexo 10: Rendimiento de materia seca de tubérculo (RMSTu) observado (círculo \pm error estándar) y simulado con el modelo SOLANUM usando el módulo de crecimiento potencial (línea punteada negra), el de restricción hídrica (línea continua gris) y el de CWSI incorporado (línea continua negra). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra (escala temporal).



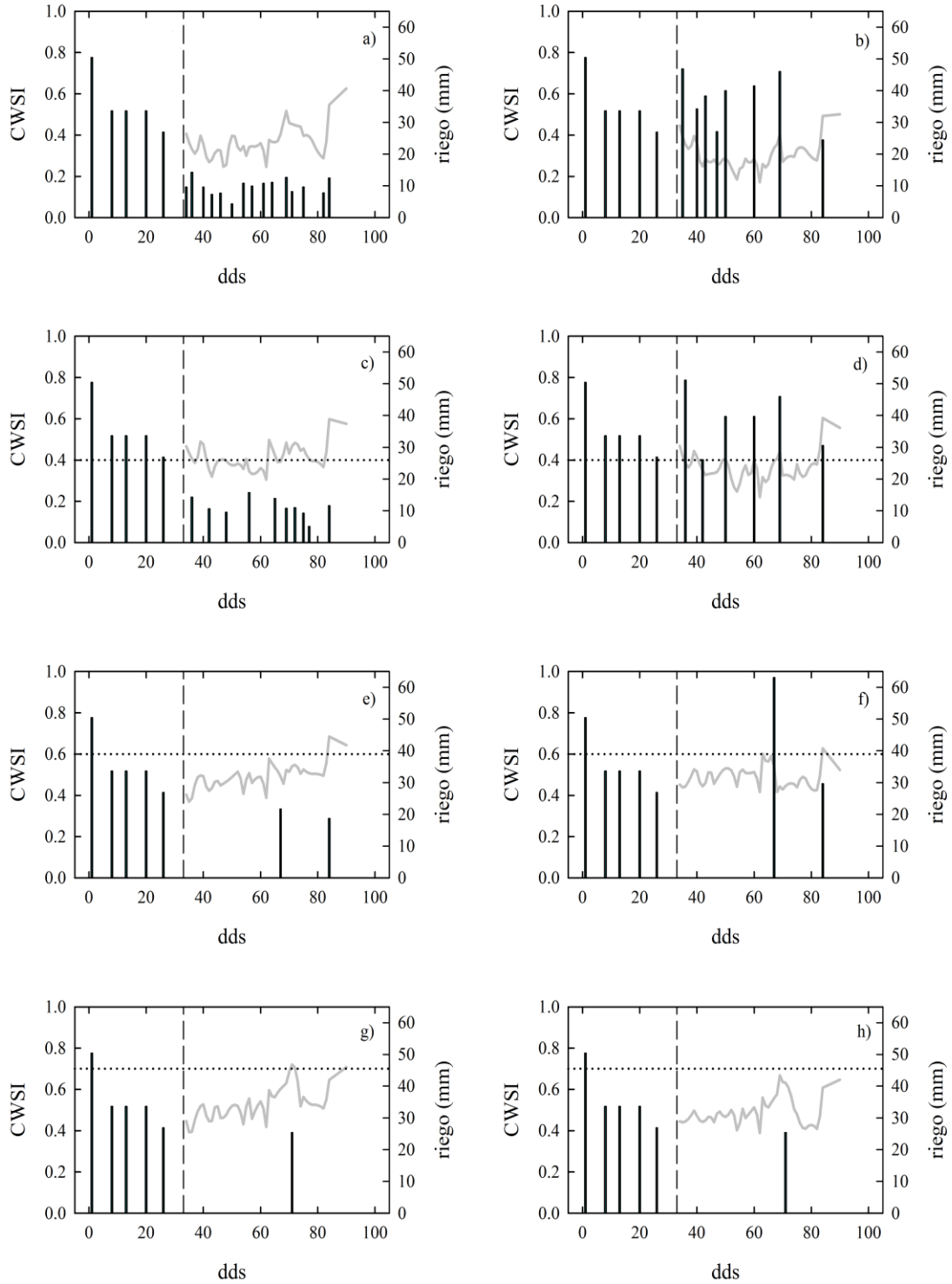
Anexo 11: Comparación del rendimiento observado y simulado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de restricción hídrica para el tratamiento T1 (control, ○), T2 (CWSI = 0.4, △), T3 (CWSI = 0.6, ×) y T4 (CWSI = 0.7, □). Rendimiento de materia seca de tubérculo: goteo (a) y gravedad (b). Rendimiento de materia fresca de tubérculo: goteo (c) y gravedad (d). Rendimiento de materia seca total: goteo (e) y gravedad (f).



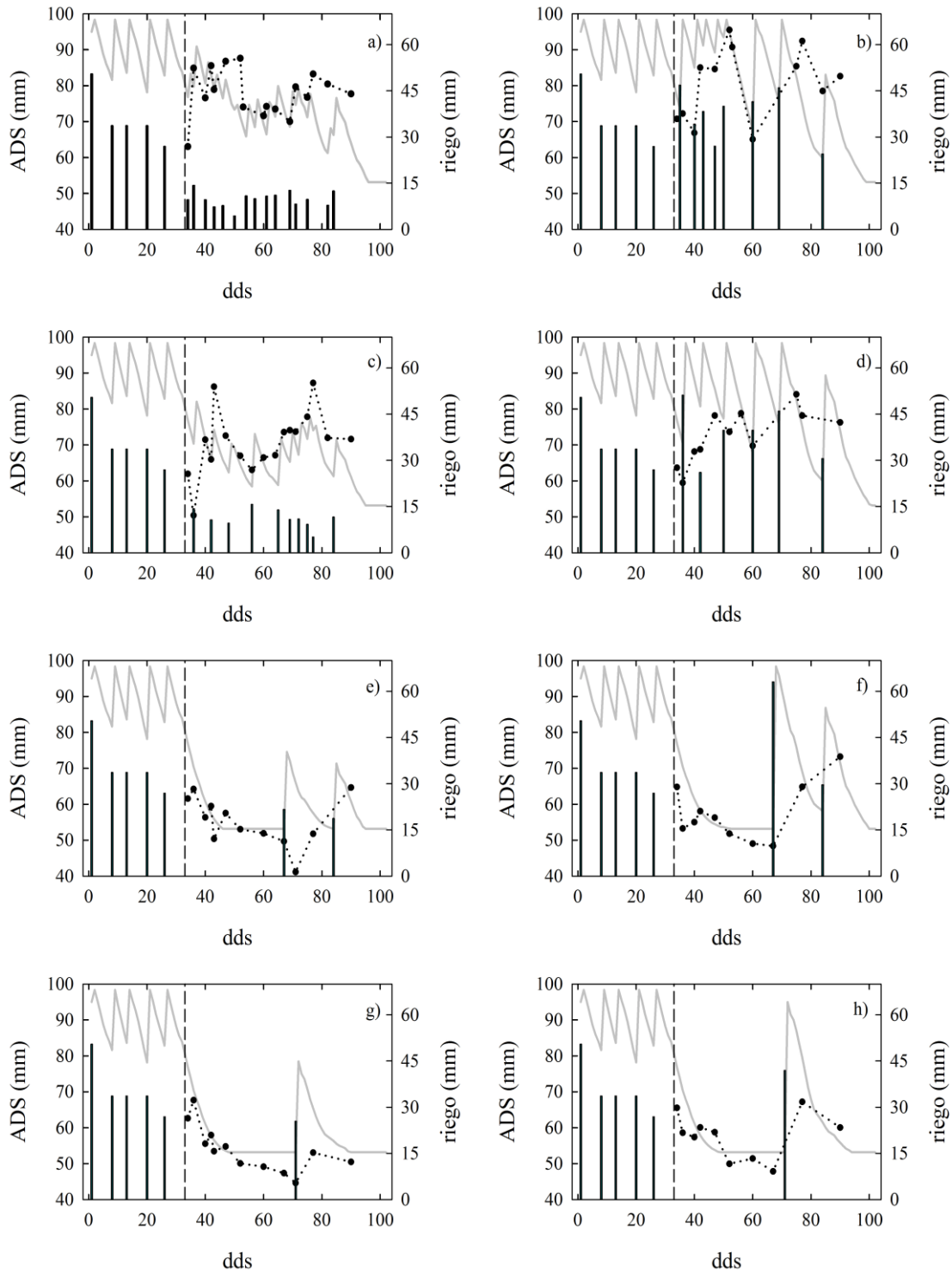
Anexo 12: Comparación del rendimiento observado y simulado con el modelo SOLANUM mediante el módulo de CWSI para el tratamiento T1 (control, ○), T2 (CWSI = 0.4, △), T3 (CWSI = 0.6, ×) y T4 (CWSI = 0.7, □). Rendimiento de materia seca de tubérculo: goteo (a) y gravedad (b). Rendimiento de materia fresca de tubérculo: goteo (c) y gravedad (d). Rendimiento de materia seca total: goteo (e) y gravedad (f).



Anexo 13: Evaluación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) (línea gris) y lámina de riego (barra negra) aplicado durante el ensayo. La línea vertical entrecortada representa el inicio de los tratamientos (33 dds). La línea punteada horizontal representa el umbral de CWSI usado como criterio de riego. Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. dds: Días después de la siembra.



Anexo 14: Agua disponible en el suelo (ASD) medido en campo (línea y puntos negros) y simulado con el modelo SOLANUM (línea continua gris) y lámina de riego aplicado en cada tratamiento (barras negras). La línea vertical entrecortada representa el inicio de tratamiento (33 dds). Las subfiguras a), c), e) y g) (en goteo) y b), d), f) y h) (en gravedad) representan a los tratamientos T1 (Control, en capacidad de campo), T2 (CWSI = 0.4), T3 (CWSI = 0.6) y T4 (CWSI = 0.7) respectivamente. CWSI: Índice de estrés hídrico del cultivo. dds: Días después de la siembra.



Anexo 15: Error cuadrático medio de la raíz (RMSE) expresado como porcentaje de la media (rRMSE, en %) de algunos modelos de crecimiento para el cultivo de papa. El asterisco (*) indica que solo estuvo disponible el RMSE, en t ha⁻¹. FUENTE: Raymundo *et al.* (2014).

Modelos	rRMSE
CROPSYSTUB-CSPOTATO	12
DAISY	1-30
INFOCROP-POTATO	11
ISPOTA	8-32
Ingram-model	10-27
POTATO	19
SUBSTOR-Potato	15-51
WOFOST	16
Potato calculator	8.7 *
SOLANUM	0.7-1.5 *
REGCROP	6.7 *
LINTUL-NPOTATO	1.1-1.2 *
LINTUL-FAST	1.1-2.7 *