

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA TOMATE
INDUSTRIAL (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)**

POR

PABLO SALATIEL FRES MORALES

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO**

**CHILLÁN – CHILE
2025**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA TOMATE
INDUSTRIAL (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)**

POR

PABLO SALATIEL FRES MORALES

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLAN – CHILE
2025**

Aprobada por:

Profesor Asistente, Mathias Kuschel O.
Ing. Civil Agrícola, Dr.

Guía

Profesor Asociado, Susana Fischer G.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs, Dr.

Asesor

Profesor Asociado, Marco Sandoval E.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs. Dr. Cs Ambientales

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	1
Summary	1
Introducción	2
Materiales y Métodos.....	5
Resultados y Discusión	13
Conclusiones	211
Referencias	21

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Ubicación del sitio de estudio.....	6
Figura 2	Distribución de los sectores de riego establecidos por el campo productivo.....	7
Figura 3	Evapotranspiración de referencia (ET _o) y Precipitación (PP) para el área de estudio durante la temporada 2023-2024.....	9
Figura 4	Temperatura mínima y máxima (T _{min} , T _{max}) para el área de estudio durante la temporada 2023-2024.....	9
Figura 5	Cobertura de la canopia en función de los días después de trasplante.....	16
Figura 6	Rendimiento del tomate industrial en función de la reposición hídrica.....	19
Figura 7	Eficiencia del uso del agua (WUE) en función de la reposición hídrica.....	20
Tabla 1	Análisis físico del suelo.....	10
Tabla 2	Parámetros requeridos para la calibración del tomate industrial a través del modelo AquaCrop.....	14
Tabla 3	Evaluación del desempeño del modelo AquaCrop, por medio del NRMSE para predecir el rendimiento y biomasa final (t ha ⁻¹).....	17
Tabla 4	Reposición hídrica total según tratamiento (simulación).....	18
Tabla 5	Simulación de rendimientos por hectárea en base seco para los distintos tratamientos de riego deficitario sostenido luego de calibrar el modelo.....	18
Tabla 6	Distribución de la reposición hídrica de acuerdo con la estrategia de riego deficitario sostenido (mm).....	20

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA TOMATE INDUSTRIAL (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)

CALIBRATION AND VALIDATION OF THE AQUACROP MODEL FOR PROCESSING TOMATO (*SOLANUM LYCOPERSICUM*)

RESUMEN

El estudio se centra en la calibración y validación del modelo AquaCrop para el cultivo de tomate industrial (*Solanum lycopersicum*), abordando la importancia del tomate a nivel mundial y los desafíos que enfrenta la producción agrícola debido a la variación climática. Se llevó a cabo en el fundo San Antonio, San Carlos, Chile, en la temporada 2023-2024, utilizando un diseño experimental que incluyó riego por goteo, seguimiento del desarrollo del cultivo y un muestreo representativo del sitio experimental. El objetivo principal fue demostrar que AquaCrop puede predecir la cobertura de canopia, biomasa y el rendimiento del tomate con un margen de error inferior al 10%. Los resultados mostraron un NRMSE de 9,48% para la cobertura de canopia, indicando buena precisión, aunque el modelo sobrestimó el rendimiento y la biomasa final, con NRMSE de 46,7% y 18,71%, respectivamente. A pesar de estas discrepancias, la simulación de biomasa fue considerada aceptable, mientras que la del rendimiento fue deficiente, sugiriendo que la variedad de tomate utilizada podría influir en estas diferencias. Además, se evaluó la eficiencia del uso del agua (WUE), encontrando que una aplicación de agua excesiva puede aumentar el rendimiento, pero disminuir la eficiencia de su uso. En conclusión, aunque AquaCrop es efectivo para simular la cobertura de canopia, se requiere más temporadas de validación para los parámetros de rendimiento y biomasa.

SUMMARY

This study focuses on the calibration and validation of the AquaCrop model for processing tomato cultivation (*Solanum lycopersicum*), addressing the global importance of tomatoes and the challenges faced by agricultural production due to climate variation. It was conducted at the San Antonio farm, San Carlos, Chile, during

the 2023-2024 agricultural season, using an experimental design that included drip irrigation, monitoring of crop development, and representative sampling of the experimental site. The main objective was to demonstrate that AquaCrop can predict canopy cover, biomass, and tomato yield with an error margin of less than 10%. The results showed an NRMSE of 9.48% for canopy cover, indicating good accuracy, although the model overestimated yield and final biomass, with NRMSE of 46.7% and 18.71%, respectively. Despite these discrepancies, biomass simulation was considered acceptable, while yield simulation was poor, suggesting that the tomato variety used could influence these differences. Additionally, water use efficiency (WUE) was evaluated, finding that excessive water application can increase yield but decrease water use efficiency. In conclusion, although AquaCrop is effective in simulating canopy cover, more validation seasons are required for yield and biomass parameters.

INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es una principal hortaliza cultivada a nivel mundial, con una gran variedad de formas, tamaños, colores, sabores, texturas y durezas. Adaptándose a consumo fresco o procesamiento industrial (Arredondo, 2016). Originario de Mesoamérica y domesticado hace unos 7.000 años (Peralta *et al.*, 2018), el tomate industrial pertenece a la familia de las solanáceas, siendo una planta dicotiledónea perenne cultivada anualmente, con crecimiento rastrero, semi erecto o erecto (Arredondo, 2016).

En el 2021 la producción mundial de tomate alcanzó los 189,1 millones de toneladas, un aumento del 2% respecto a 2020. Esta producción se realizó en 5.167.087 hectáreas, superando significativamente la superficie de cultivos como la papa y el arroz (Branthôme, 2023). Del total de la producción, el 78% se destinó al consumo en fresco, mientras que el 22% se procesó industrialmente (Muñoz, 2021). En 2023, la producción de tomate industrial se estimó en 43,5 millones de toneladas (Ctaex, 2024). La producción mundial de tomate industrial se concentra principalmente en el hemisferio norte, con Estados Unidos (California) y China como los mayores productores (Muñoz, 2021). Sin embargo, el hemisferio sur también

juega un papel importante en la producción global, destacando países como Chile, Argentina, Tailandia, Australia y República Dominicana (Red Agrícola Chile, 2020). En particular, Chile ha demostrado una alta productividad en este sector, alcanzando un rendimiento promedio de 93,8 toneladas por hectárea en la temporada 2023/2024 (Red Agrícola Chile, 2020). Esto subraya la relevancia de Chile como un productor significativo de tomate industrial a nivel mundial.

El tomate es un cultivo clave en Chile, representando el 13,6% de la superficie hortícola total del país en 2022, con 12.860 hectáreas dedicadas a su producción, incluyendo tanto tomate fresco como industrial (ODEPA, 2023). Históricamente, el tomate industrial ha predominado, ocupando alrededor de 8.000 hectáreas. Además, la pasta de tomate industrial es un producto de exportación importante, representando el 34% del valor total de las exportaciones hortícolas de Chile (ODEPA, 2023).

En Chile, la producción de tomate se enfoca principalmente en el procesamiento industrial, con un 90% destinado a este fin y solo un 10% para consumo fresco. El mercado está dominado por tres grandes empresas: Sugal, Agrozzi y Patagonia Fresh, que controlan casi toda la producción industrial a través de contratos con los agricultores. La producción se concentra en las regiones de O'Higgins, Maule y Ñuble, que juntas representan el 97,4% de la superficie total cultivada de tomate industrial en el país (Muñoz, 2023). Sin embargo, la variación climática genera incertidumbre en los patrones climáticos futuros, amenazando la producción agrícola global (Mearns *et al.*, 1997). En Chile, el cultivo de tomate industrial, vital para la economía, enfrenta riesgos significativos. La zona centro-sur (36° a 40° S) experimentará aumentos de temperatura de 1 a 4 °C para 2100, bajo escenarios de emisiones de gases moderadas y severas (Universidad de Chile, 2006). Además, se prevé una reducción de precipitaciones del 25% en primavera y 40% en verano, con otoño e invierno relativamente estables (CEPAL, 2012). Estas alteraciones climáticas requerirán que los agricultores se adapten y mitiguen los efectos adversos (Lizana *et al.*, 2013). Por lo tanto, el uso de tecnologías de monitoreo y gestión de cultivos es crucial para optimizar recursos y tomar decisiones informadas en este entorno cambiante (Roco, 2021).

Durante los años 90, el avance de la informática permitió una mayor integración de modelos en la investigación agrícola, abordando problemas específicos relacionados con el desarrollo de cultivos, respuestas a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés, pérdidas por erosión, la lixiviación de pesticidas, la contaminación ambiental y el calentamiento global (Hernández *et al.*, 2009). En este contexto, los modelos de simulación de cultivos se convirtieron en herramientas clave para estimar el impacto de la variación climática en la agricultura, facilitando la creación de estrategias de mitigación y adaptación (Asseng *et al.*, 2009). Los modelos de cultivos son simplificaciones cuantitativas de sistemas agrícolas reales, que predicen el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en función del agua y otros factores ambientales (Steduto *et al.*, 2009; Monteith, 1996). Existen diversos programas informáticos para simular estos procesos, variando en enfoque desde modelos de plantas individuales como CERES, hasta modelos de canopia como EPIC, ALMANAC y CropSyst (Steduto *et al.*, 2009). Sin embargo, la calibración y operación de estos modelos son complejas y costosas, requiriendo numerosos parámetros específicos para variedades y condiciones ambientales, lo que dificulta su adopción por agricultores y otros usuarios finales (Flores-Gallardo *et al.*, 2013).

AquaCrop es un modelo funcional y robusto que opera a nivel de cultivo (canopia), destacándose por su facilidad de implementación debido al reducido número de parámetros en comparación con otros modelos más complejos (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Fue desarrollado por la FAO (Steduto *et al.*, 2009), simula la producción de biomasa y rendimiento a partir del balance hídrico suelo-planta-atmósfera (Steduto *et al.*, 2009). La biomasa se calcula diariamente usando la evapotranspiración de referencia (ET_o) y la productividad de agua normalizada (WP), mientras que la distribución de la biomasa se modela con un índice de cosecha dinámico influenciado por la disponibilidad de agua (Hussein *et al.*, 2011). La conversión de AquaCrop en una herramienta de decisión confiable implica dos etapas cruciales: calibración y validación. La calibración ajusta los parámetros del modelo para que coincidan con los datos observados, modificando los coeficientes genéticos del cultivo para minimizar las diferencias entre resultados simulados y

datos reales (Andarzian *et al.*, 2011). La validación mide la capacidad del modelo calibrado para predecir el comportamiento del cultivo en condiciones diferentes a las usadas en la calibración, verificando su capacidad de generalización (Comerma *et al.*, 1985). AquaCrop ha demostrado ser eficaz en la simulación de diversos cultivos, incluyendo maíz (Heng *et al.*, 2009), algodón (Farahani *et al.*, 2009), quinua (Geerts y Raes, 2009) y trigo (Peña, 2013). En el caso del tomate industrial, estudios recientes han confirmado su capacidad para estimar con precisión la biomasa y el rendimiento del cultivo bajo diferentes condiciones ambientales (Takács *et al.*, 2021; Lipovac *et al.*, 2022; Battilani *et al.*, 2014).

Esta investigación busca calibrar y validar el modelo AquaCrop (versión 7,1) para estimar con precisión la cobertura de canopia, la biomasa total y el rendimiento del tomate industrial en Chile. La hipótesis principal es que una vez calibrado, AquaCrop puede predecir la cobertura de canopia, la biomasa y el rendimiento con un margen de error inferior al 10%, medido por el NRMSE (Error Cuadrático Medio Normalizado).

MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes del sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo durante la temporada agrícola 2023-2024 en el fundo San Antonio (Figura 1), propiedad de Agrícola Terrandes S.A. Este campo, está integrado al sistema de producción bajo contrato de empresas Iansa, el cual se ubica en la comuna de San Carlos, Chile (36°22'26" S, 71°57'53" W) y a una elevación de 174 msnm. La comuna antes mencionada, se caracteriza por un clima mediterráneo/templado. Esto se traduce en inviernos fríos y húmedos, con precipitaciones anuales que rondan entre los 800 y 1.100 mm, concentrándose principalmente en los meses invernales (junio a agosto). En contraste, los veranos son cálidos y secos, con temperaturas medias que rondan los 13,8°C. La evapotranspiración de referencia anual se estima entre 1.000 y 1.200 mm. En cuanto a la humedad relativa, el promedio anual es del 75%, alcanzando un máximo del 85% en junio y un mínimo del 65% en enero, de acuerdo con los datos recopilados de la estación meteorológica CE Arroz (INIA, 2024).

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio.



Fuente: elaboración propia de este ensayo.

El suelo donde se sitúa el estudio pertenece a la serie San Fabián, el cual cuenta con suelos profundos de más de 1,20 m, con texturas franco-limosas en la superficie y franco arcillo-limosas en la profundidad (Stolpe, 2006). Se estableció tomate industrial (*Solanum lycopersicum*), de la variedad cultivar Bq-273 que corresponde a un híbrido precoz de ciclo corto desarrollado por Syngenta Semillas (2023).

En este ensayo se estableció un muestreo representativo del campo productivo del fundo San Antonio, cuya superficie comprende 53 hectáreas destinadas al cultivo de tomate industrial. De acuerdo con los objetivos de la investigación y los antecedentes productivos del campo, se realizó el experimento bajo las condiciones de manejo agronómico propio de la administración de la Agrícola Terrandes.

El trasplante se llevó a cabo el 1 de noviembre de 2023, con un marco de plantación de 30 cm de distancia entre plantas y 1,5 m de distancia entre hileras. La densidad de plantación fue de 27.000 plantas por hectárea. Según el análisis previo del suelo, se aplicaron las enmiendas necesarias de acuerdo con el plan de fertilización para otorgar las mejores condiciones para un correcto establecimiento.

Las labores agronómicas se programaron de acuerdo con las directrices de la administración del campo, con el fin de mejorar las condiciones del suelo y asegurar un buen establecimiento de las plantas de tomate. Así mismo, el programa de aplicaciones fitosanitarias se planificó y programó en fechas específicas. Además, el riego se aplicó por goteo mediante cintas de riego.

El campo se dividió en sectores de riego, cada uno abastecido por uno de los tres equipos que se encargaron de suministrar el agua según la demanda del cultivo, estableciendo, así, un riego semanal durante la temporada de crecimiento.

Por otro lado, se estableció un área de muestreo representativo de acuerdo con la superficie y distribución del sistema de riego. Esta área se eligió estratégicamente, tomando como referencia imágenes satelitales del campo para identificar la zona más homogénea, lo que situó el experimento en el sector n°6 de riego (Figura 2).

Figura 2. Distribución de los sectores de riego establecidos por el campo productivo.



Fuente: elaboración propia de este ensayo.

Descripción del modelo de simulación de cultivo

Para este estudio se utilizó AquaCrop versión 7.1. Dicho modelo a diferencia de otros programas de simulación que utilizan múltiples parámetros, este se estructura en torno a cuatro parámetros principales: el suelo, con su balance hídrico y características físicas; el cultivo, con su crecimiento, desarrollo y rendimiento; el ambiente, con su régimen térmico, precipitaciones, demanda evaporativa y concentración de CO₂; y el manejo agronómico, con las prácticas de riego y fertilización. Sin embargo, no considera el control de plagas y enfermedades (Steduto *et al.*, 2009).

AquaCrop se basa en los principios establecidos en 1979 por Doorenbos y Kassam, que relacionan el rendimiento de los cultivos con la evapotranspiración (Ngetich *et al.*, 2012). Una característica destacada del modelo es la simulación de la cobertura de la canopia en lugar del índice de área foliar (IAF), como base para calcular la transpiración (Andarzian *et al.*, 2011).

La producción de biomasa y fruto depende de la respuesta del cultivo al estrés hídrico, la cual se manifiesta a través del crecimiento y senescencia del dosel, la tasa de transpiración y el índice de cosecha (Hi) (Steduto *et al.*, 2009; Andarzian *et al.*, 2011; Ngetich *et al.*, 2012). Con este fin, se analizaron y recopilamos los siguientes parámetros para la calibración del modelo:

Parámetros del clima

Durante todo el periodo de crecimiento del cultivo, se registró diariamente la temperatura mínima y máxima (en °C), así también la precipitación acumulada (en mm) y la evapotranspiración de referencia (ET_o) (Figura 3 y 4). Todos los datos meteorológicos fueron extraídos de la estación meteorológica Centro Experimental Arroz de la Red Agrometeorológica de INIA (<https://agrometeorologia.cl/>), ubicada a 5 km aproximadamente de donde se estableció el sitio experimental. Esta estación, perteneciente a una red reconocida, asegura la calidad y fiabilidad de los datos recopilados, cruciales para el análisis del comportamiento del cultivo en relación con las condiciones climáticas específicas de la zona, permitiendo así una interpretación precisa de las respuestas del cultivo a las variaciones ambientales.

Figura 3. Evapotranspiración de referencia (ET_o) y Precipitación (PP) para el área de estudio durante la temporada 2023-2024.

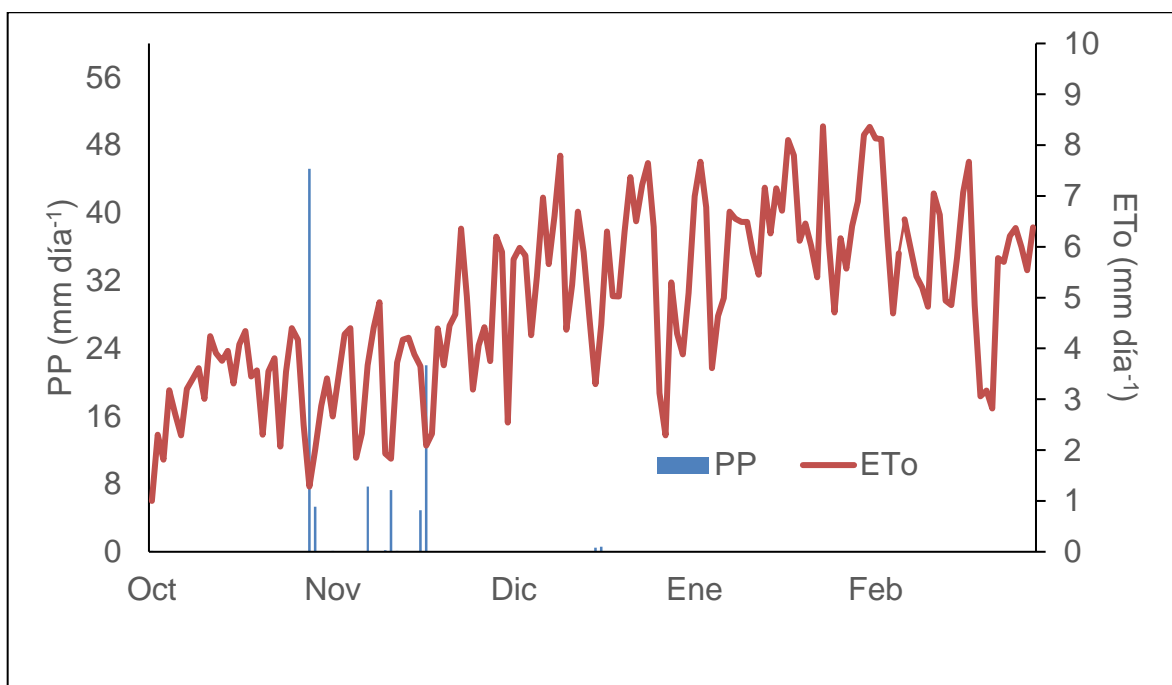
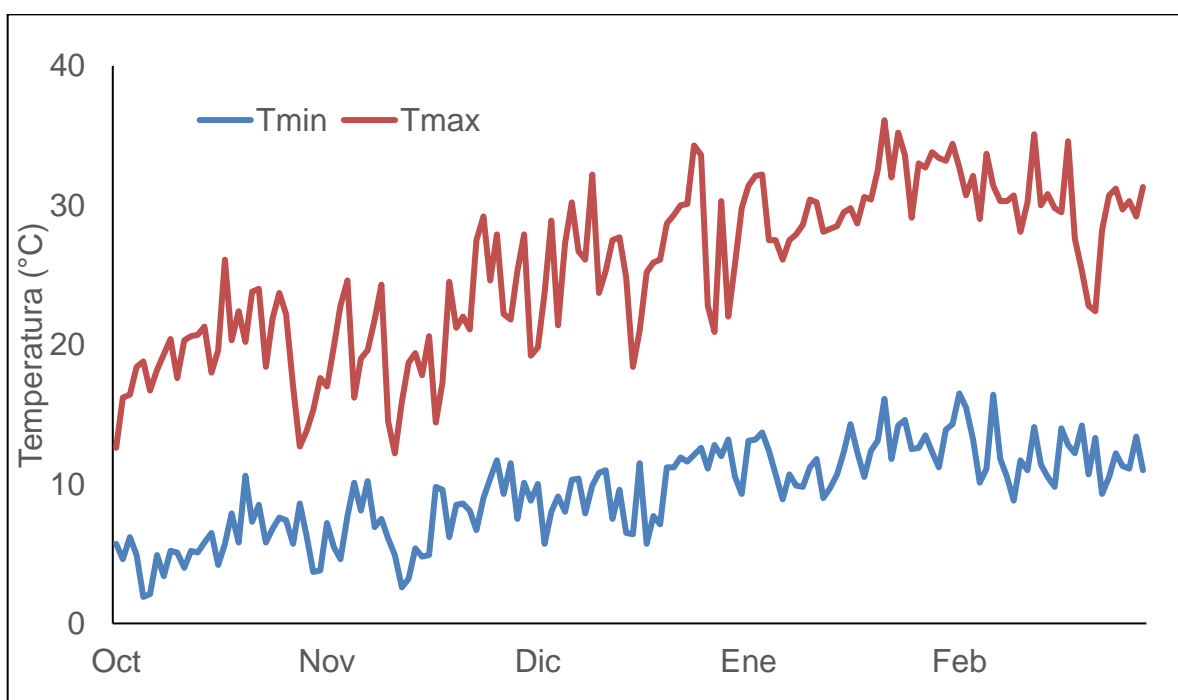


Figura 4. Temperatura mínima (T_{min}) y máxima (T_{max}) para el área de estudio durante la temporada 2023-2024.



Parámetros del suelo

Se realizó un análisis físico del suelo (Tabla 1), el cual contó con dos muestras de suelo a profundidad (0–20; 20-30 cm). Con dichas muestras se evaluó la clase textural del suelo, la Capacidad de Campo (CC), el Punto de Marchitez Permanente (PMP), el contenido de humedad a saturación y la Densidad Aparente (Da). Además, se utilizó la herramienta Soil Water Characteristics (SWC), desarrollado por el Departamento de Agricultura de los EE.UU (USDA), la cual permite determinar las características hidráulicas del suelo, en base a las características texturales del suelo (Vazquez, 2015). Mediante esta herramienta se determinó la conductividad hidráulica saturada (Ksat), empleando los datos del análisis de suelo.

Tabla 1. Análisis físico del suelo.

Variable	0 - 20 cm	20 - 30 cm	Unidad de medida
Arena	35,4	36,3	%
Limo	31,7	32,9	%
Arcilla	32,9	30,7	%
Clase textural	Fa	Fa	
Contenido de humedad Capacidad de Campo	35,6	40,6	% Vol
Contenido de humedad Punto de Marchitez Permanente	24,6	27,1	% Vol
Contenido de humedad saturación	35,6	40,5	% vol
Conductividad hidráulica saturada	136,8	456,4	mm dia ⁻¹
Densidad aparente	1,39	1,17	g cm ⁻³

*Fa: Franco arcillo.

Parámetros de la planta

Una vez establecido el cultivo, se analizaron los parámetros no conservativos de la planta, ya que los parámetros conservativos son constantes, en cambio los no

conservativos pueden cambiar según la variedad del cultivo, las prácticas agronómicas y las condiciones ambientales locales. Durante todo el período de crecimiento, se midió el porcentaje de cobertura de la canopia (CC) como criterio de cobertura. Para ello, se monitoreo semanalmente en diferentes puntos de cada repetición, tomando fotografías sobre la canopia con una cámara digital. Las imágenes se analizaron utilizando el software Canopeo v.1.1.7, desarrollado por la Universidad Estatal de Oklahoma. Además, se registraron la fecha de trasplante, así como la fecha y duración de las etapas de desarrollo vegetativo, floración, cuaja y madurez para su seguimiento y análisis.

Cuando el cultivo alcanzó la madurez de cosecha, se recolectaron muestras de tres hileras representativas del sector muestreado, con una longitud de 1,5 m por 2 m lineales en cada hilera. A partir de estas muestras, se determinó el peso seco y el peso fresco de la planta y del fruto mediante secado en horno de aire forzado a 65 °C hasta alcanzar un peso constante. Antes del secado, se separó el follaje del fruto, los cuales se pesaron por separado. Además, se realizó el conteo y la clasificación de los frutos según los parámetros de color: verde, amarillo y rojo. Con estas muestras, se determinaron los componentes del rendimiento del fruto y la biomasa total.

Calibración y validación del modelo

Para la calibración del modelo, se comenzó utilizando un conjunto de datos preestablecidos para AquaCrop en tomate de consumo, que se corrigió y ajustó a las condiciones específicas del ensayo. Además, se empleó los datos del experimento desarrollado en la temporada 2023-2024 bajo condiciones hídricas óptimas para asegurar un buen desarrollo del cultivo. Se utilizó también los datos meteorológicos de la estación CE Arroz. Los datos de entrada se ingresaron en las categorías de clima, parámetros del cultivo, manejo agronómico y suelo, según lo sugerido por el manual de AquaCrop (Raes *et al.*, 2012).

En la simulación, se consideró una fertilización óptima, debido al plan de fertilización específico diseñado por el huerto comercial. Además, se utilizó una concentración de CO² preestablecida (MaunaLoa.CO2), dado que este parámetro

no fue muestreado de acuerdo con los objetivos de la investigación. Una vez calibrado el modelo, se procedió a su validación en tomate industrial. Esta validación se realizó comparando los datos observados en campo con las salidas simuladas por el modelo.

Tras la calibración del modelo AquaCrop, se realizaron simulaciones de riego deficitario sostenido. Para ello, se generó un programa de riego utilizando AquaCrop, basado en un criterio de riego que aplica el 50% de la humedad aprovechable. Considerando las características específicas del suelo, clima y cultivo del sitio experimental, la reposición hídrica se definió en función de la demanda de hídrica del cultivo (ET_c), buscando maximizar el desarrollo de la canopia y el rendimiento. Este proceso inicial de la simulación se llevó a cabo mediante un enfoque de prueba y error.

A partir del programa de riego generado, se implementaron cuatro simulaciones adicionales (Tabla 4). La primera simulación (T1) correspondió al programa original, aplicando el 100% de la reposición hídrica, y fue utilizada como base para la calibración. Las simulaciones subsiguientes aplicaron porcentajes reducidos o aumentados de la reposición hídrica: 75% (T2), 50% (T3) y 120% (T4).

Es importante destacar que cada una de las diferenciaciones de reposición hídrica en las distintas simulaciones, se realizaron a partir del término de la etapa de cuajado de fruto, debido a que el riego debe asegurar la supervivencia de las plantas (Valcárcel *et al.*, 2020) (Tabla 6), para lo cual se realizó un seguimiento semanal de la fenología del cultivo, logrando identificar el momento exacto en el cual termina esta etapa (1 de enero del 2024). A partir de esa fecha se realizaron las restricciones hídricas en las respectivas simulaciones.

La biomasa se determinó mediante un método directo, que consistió en cosechar y pesar una muestra de 2 metros lineales de 3 hileras diferentes. Posteriormente, las muestras se secaron en un horno de aire forzado hasta alcanzar un peso constante, lo que permitió determinar el peso seco. Antes del secado, se pesaron las muestras para obtener el peso fresco. Con estos datos, se calculó la biomasa por unidad de área.

El rendimiento se midió mediante un método directo que consiste en cosechar

todos los frutos de cada muestra descrita anteriormente, que corresponden a dos metros lineales. Se obtiene el peso de los frutos por muestra y a partir de este resultado, se multiplica por el total de metros lineales en una hectárea, calculado según el marco de plantación. De esta manera, se obtiene el rendimiento por hectárea.

Análisis estadístico

Para evaluar el modelo se empleó la raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE). Además, el NRMSE normalizado se utilizará para calcular el porcentaje promedio de la diferencia relativa entre los datos simulados y los observados, utilizando la ecuación del NRMSE. En dicha ecuación, P_i y O_i corresponden a los valores simulados y observados, respectivamente, mientras que M representa la media de la variable observada (Loague and Green, 1991).

$$NRMSE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \cdot \frac{100}{M}$$

El resultado de la simulación se considera excelente si el NRMSE es inferior al 10 %, si su NRMSE se encuentra mayor a 10 % y menor que 20 %, la simulación se calificará como buena, en caso de que el NRMSE estuviera entre 20 % y 30 %, la simulación será aceptable. Finalmente, si el NRMSE supera el 30 %, la simulación se evaluará como deficiente (Jamieson *et al.*, 1991).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 representa los valores de los resultados típicos del modelo. Estos parámetros se utilizaron en la calibración para simular la cobertura de canopia (CC), biomasa final, rendimiento del cultivo y la eficiencia de uso de agua o Water Use Efficiency (WUE) para el área de estudio. Algunos parámetros calibrados se definieron como predeterminados, dado que el ensayo fue realizado en un campo productivo. Esta decisión se tomó para reflejar las condiciones de manejo estándar y las prácticas agrícolas que se aplican rutinariamente en la producción comercial de tomate industrial.

Tabla 2. Parámetros requeridos para la calibración del tomate industrial a través del modelo AquaCrop.

Parámetro	Cultivo	Unidad
Temperatura base	7	°C
Temperatura de corte	28	°C
Plantas por hectárea	27.000	plantas
Cobertura del canopia por plántula al 90% de emergencia (CCo)	20	cm ²
Cobertura máxima del canopia (CCx)	96	%
Coeficiente de crecimiento de la canopia (CGC)	8,8	% día ⁻¹
Coeficiente de reducción de la canopia (CDC) en la senescencia	7,2	%
Tiempo desde el trasplante hasta la máxima profundidad de enraizamiento	58	días
Tiempo desde el trasplante hasta el inicio de la senescencia	102	días
Tiempo desde el trasplante hasta la madurez	129	días
Tiempo del trasplante hasta la floración	44	días
Duración de la fase de floración	19	días
Acumulación del índice de cosecha	71	días
Productividad del agua, normalizada para ETo y CO2 atmosférico (WP*)	18	g m ⁻²
Índice de cosecha de referencia (HIo)	77	%
Aumento máximo permisible de HI especificado	15	%
Efecto de la cobertura de canopia en la reducción de la evaporación del suelo en la etapa de final de temporada	60	%
Máxima profundidad efectiva de enraizamiento, Zx	0,30	m
Mínima profundidad efectiva de enraizamiento, Zn	0,30	m
Umbral de agotamiento del agua del suelo por encima del cual la expansión del dosel comienza a declinar, P(upper)	0,15	

Tabla 2. Parámetros requeridos para la calibración del tomate industrial a través del modelo AquaCrop (continuación).

Parámetro	Cultivo	Unidad
Umbral de agotamiento del agua del suelo por encima del cual se alcesca la expansión del dosel, P(lower)	0.50	
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel	3	
Umbral de agotamiento del agua del suelo por encima del cual los estomas comienzan a cerrarse, Pupper	0.50	
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para el control estomático	3	
Umbral de agotamiento del agua del suelo por defecto suelo por encima del cual el dosel comienza a senescer, Pupper	0.70	
Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la senescencia del dosel	3	

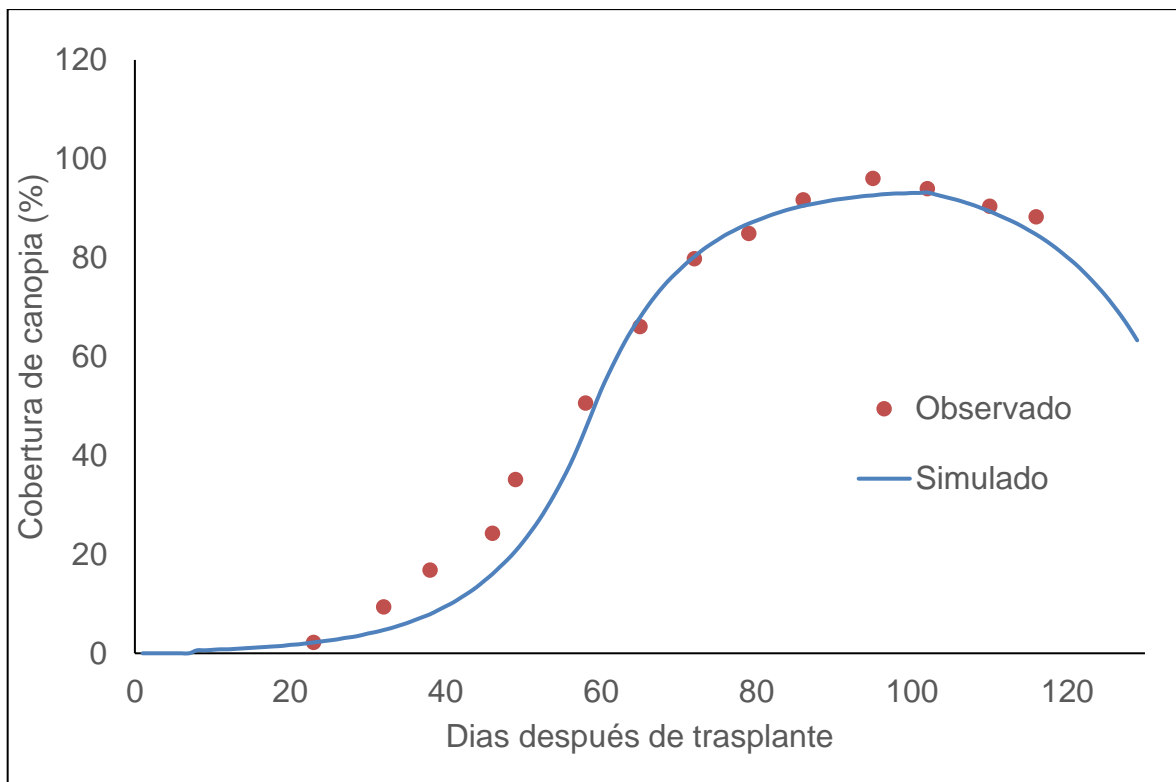
Cobertura de canopia (CC)

El modelo simula la cobertura de canopia a partir de los parámetros observados en las Tablas 2. De acuerdo con esto, la máxima cobertura se logró entre los 85 y 110 días después del trasplante (DDT), en cambio la senescencia comenzó a los 102 DDT.

La Figura 5 muestra que la simulación de la cobertura de canopia bajo condiciones de riego al 100%, días después de trasplante es excelente, obteniendo un valor para la simulación del NRMSE de 9,48%. Dichos resultados son comparables a estudios desarrollados en tomate en distintas condiciones hídricas por AquaCrop, en donde se obtuvieron rangos de NRMSE entre 4,1% y 19,6% (Abdalhi *et al.*, 2020). Por lo tanto, el bajo NRMSE demuestra ser una simulación precisa para datos de calibración y validación. Además, hay estudios en trigo (Peña, 2013), maíz (Heng *et al.*, 2009) y repollo (Pawar *et al.*, 2017); donde los autores concluyen que AquaCrop genera excelentes simulaciones para el desarrollo de

canopia.

Figura 5. Cobertura de la canopia en función de los días después de trasplante.



Biomasa final y rendimiento

Los datos presentes en la Tabla 3 son los obtenidos mediante el muestreo del sitio experimental, para el cual se estimó el rendimiento y la biomasa final ($t\ ha^{-1}$) en base a peso seco. Sin embargo, luego de la calibración realizada con los datos de la Tabla 2, AquaCrop sobrestima el rendimiento y biomasa final para tomate industrial, obteniendo un NRMSE de 46,7% y 18,71% respectivamente. Estos valores confirman la diferencia que existe entre los valores observados y los simulados, la cual alcanza $3,73\ t\ ha^{-1}$ en el caso del rendimiento y para la biomasa existe una variación de $2,39\ t\ ha^{-1}$, de acuerdo con el análisis estadístico propuesto por Jamieson *et al.* (1991), se define que para la biomasa se obtiene una simulación aceptable, por el contrario la simulación obtenida para el rendimiento se define como deficiente.

Tabla 3. Evaluación del desempeño del modelo AquaCrop, por medio del NRMSE para predecir el rendimiento y biomasa final ($t\ ha^{-1}$).

Datos de calibración	Rendimiento			Biomasa		
	Observado	Simulado	NRMSE %	Observado	Simulado	NRMSE %
Riego al 100%	7,96	11,69	46,76	12,79	15,18	18,71

Por lo tanto, los resultados infieren que el modelo sobrestima la producción de biomasa y rendimiento del cultivo. De acuerdo con la investigación de Abdalhi *et al.* (2020), obtiene la misma conclusión sobre el rendimiento y la biomasa final para tomate industrial con AquaCrop, pero de acuerdo con los resultados estadístico la predicción es considerada aceptable para ambos parámetros, lo que coincide con otras investigaciones (Rinaldi *et al.*, 2011; Katerji *et al.*, 2013; Linker *et al.*, 2016). Sin embargo, existe una diferencia entre la simulación realizada para el rendimiento debido a que no fue aceptable, esto genera una discrepancia con los demás autores, la cual puede ser generada por distintos factores, por ejemplo, la variedad del cultivar usado para cada investigación.

Estas diferencias no son comparables a los resultados de simulación de Abdalhi *et al.* (2020), probablemente debido a la existencia de un error en los datos medidos o en la manera de simular del modelo (Andarzian *et al.*, 2011), atribuyendo la variación en la producción, a factores tales como la presencia de malezas, que puede tener una influencia directa en la extracción de agua y rendimiento final del cultivo, por lo que, el rendimiento del modelo se ve afectado (Ngetich *et al.*, 2012). Tras la obtención de resultados, se procedió a analizar las discrepancias observadas. Para comprender estas diferencias, se presentaron los resultados a la administración del campo productivo. Se informó que la disminución significativa en el rendimiento podría atribuirse al uso de la variedad cultivar Bq-273, la cual fue introducida por primera vez en el sitio experimental. Las características de adaptabilidad de este cultivar al sitio, así como su potencial de rendimiento, podrían haber constituido el principal factor de variación entre el rendimiento observado en campo y el rendimiento simulado por el modelo.

Eficiencia del uso del agua (WUE)

El proceso de validación de AquaCrop, mediante la calibración con los valores de la Tabla 2, permitió simular escenarios de rendimiento basados en la demanda hídrica del cultivo (ET_c). Utilizando esta demanda, se generó el programa de riego inicial (T1), que sirvió como base para implementar cuatro simulaciones destinadas a evaluar el comportamiento del cultivo bajo condiciones de riego deficitario sostenido. Esta metodología permitió generar cuatro tratamientos de riego (Tabla 4) ajustados a la reposición hídrica requerida por el tomate industrial. Los resultados de la simulación de rendimientos obtenidos se resumen en la Tabla 5.

Tabla 4. Reposición hídrica total según tratamiento (simulación).

Tratamiento	Riego total (mm)
T1	680
T2	596
T3	512
T4	743

T1: 100% ET_c (calibración), T2: 75% ET_c, T3: 50% ET_c, T4: 120% ET_c.

Los resultados de la simulación proyectada permitieron generar una curva de rendimiento (Figura 6), que puede ser utilizada para predecir el rendimiento final esperado por el productor en función de los diferentes niveles de reposición hídrica (Tabla 5).

Tabla 5. Simulación de rendimientos por hectárea en base seco para los distintos tratamientos de riego deficitario sostenido luego de calibrar el modelo.

Tratamiento	Rendimiento t ha⁻¹
T1	11,689
T2	10,149
T3	6,244
T4	11,690

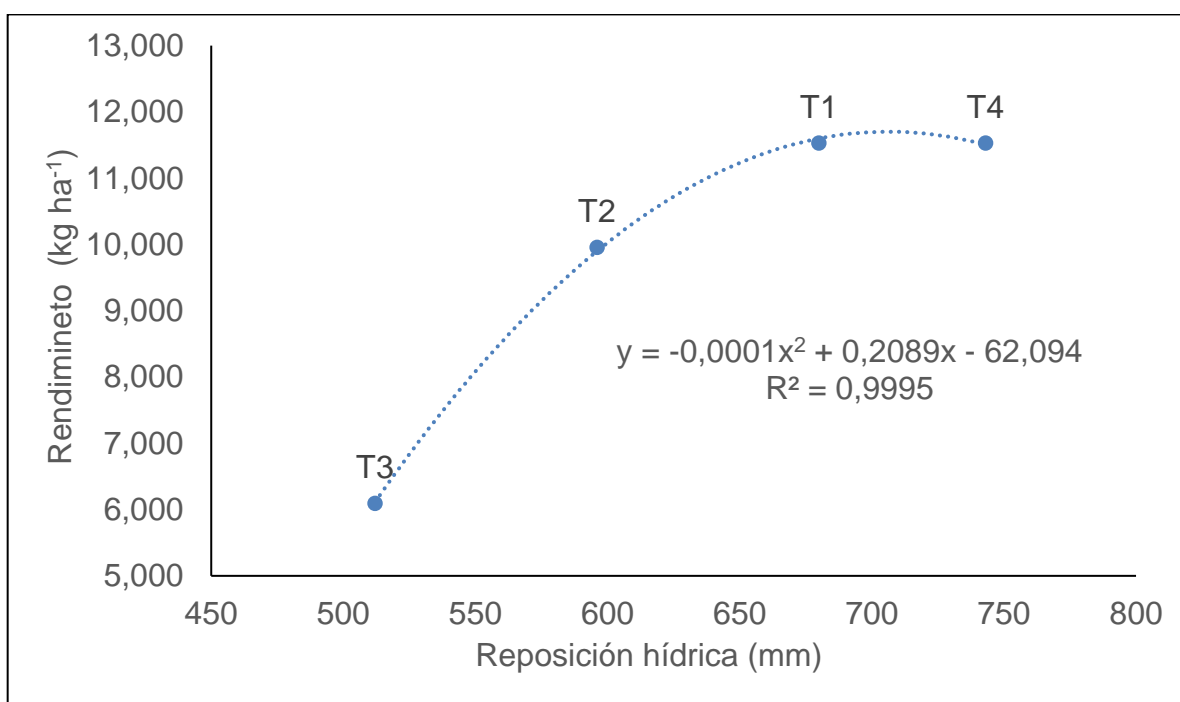
Esta relación se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$y = ax^2 + bx - c$$

En este modelo, el rendimiento por hectárea ($t\ ha^{-1}$) se establece como variable dependiente (y) y está en función de la reposición hídrica (mm), considerada como variable independiente (x). Es fundamental reconocer que estas son proyecciones derivadas de datos simulados, por lo tanto, están sujetas a un margen de error inherente.

A través de esta ecuación, los agricultores pueden predecir el rendimiento de sus cultivos y optimizar el riego (Uribe, 2024). Al fundamentar la gestión del agua en el conocimiento del balance hídrico, se maximiza la producción agrícola y se adaptan las prácticas de cultivo a las condiciones locales.

Figura 6. Rendimiento del tomate industrial en función de la reposición hídrica.



T1: 100% (calibración), T2: 75%, T3: 50%, T4: 120%.

La función de producción permite cuantificar la eficiencia del uso del agua (WUE) a través de la relación entre el rendimiento del cultivo y la cantidad de agua aplicada. El WUE, expresado en $Kg\ mm^{-1}$, representa el rendimiento producido por unidad de

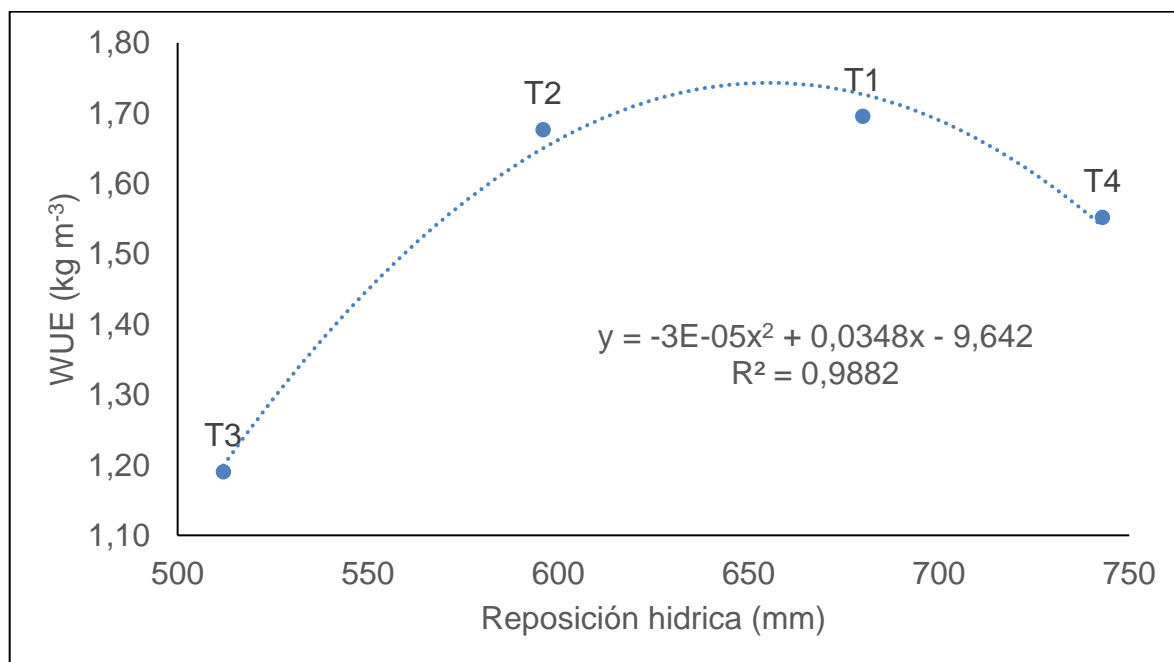
agua utilizada, según lo planteado por Perry (1999).

La Figura 7 muestra una relación cuadrática entre el WUE y la reposición hídrica, donde el punto de máxima eficiencia representa el nivel de riego óptimo para el cultivo en estudio. Esta información es esencial para optimizar las estrategias de manejo del agua.

Tabla 6. Distribución de la reposición hídrica de acuerdo con la estrategia de riego deficitario sostenido (mm).

Riego (Etc)	T1	T2	T3	T4
Trasplante - Cuaja	323	323	323	323
Cuaja - Cosecha	357	273	189	420
Total	680	596	512	743

Figura 7. Eficiencia del uso del agua (WUE) en función de la reposición hídrica.



T1: 100% ET_c (calibración), T2: 75% ET_c, T3: 50% ET_c, T4: 120% ET_c.

La relación entre el rendimiento y el riego, ilustrada en la Figura 7, revela que existe entre T1 y T2 un punto donde se maximiza la eficiencia del uso del agua. Si bien un

exceso de riego puede aumentar la producción, como se observa en el tratamiento T4, esto no se traduce necesariamente en un aumento de la eficiencia del uso de agua. Estos resultados corroboran los hallazgos de Abdalhi *et al.* (2020), quien sugiere que a medida que el riego excede del 100% de la demanda del cultivo, este puede disminuir la eficiencia del uso del agua, a pesar de incrementar el rendimiento final.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos de este ensayo, se puede concluir que:

1. El modelo AquaCrop fue capaz de simular con precisión la cobertura de canopia para tomate industrial. En cambio, la simulación de la biomasa producida por el modelo fue menos precisa.
2. El rendimiento observado y simulado presentó diferencias notorias, siendo una simulación deficiente de acuerdo a la raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado. Sin embargo, los datos necesitan otra temporada para su validación.
3. Si bien el regar en exceso en base a la demanda hídrica del cultivo, puede significar un aumento en el rendimiento final del cultivo, la eficiencia del uso del agua (WUE) será menor.

REFERENCIAS

1. Abdalhi, M.A., Z. Jia., W. Luo, O.O., Ali and C. Chen. 2020. Simulation of canopy cover, soil water content and yield using FAO-AquaCrop model under deficit irrigation strategies. *Russian Agricultural Sciences* 46: 279-288.
2. Andarzian, B., M. Bannayan, P. Steduto, H. Mazraeh, M.E. Barati, M.A. Barati and A. Rahnama. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agric. Water Manag.* 100(1): 1- 8.
3. Arredondo, S. 2016. Cultivo de Tomate Industrial en Chile [en línea]. Villa Alegre: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 338. <<https://hdl.handle.net/20.500.14001/6553>>. [Consulta: 11 julio 2024].
4. Asseng, S., W. Cao, W. Zhang and F. Ludwing. 2009. Crop physiology, modelling

- and climate change: impact and adaptation strategies. pp: 511-543. In: V.O. 28 Sadras and D.F. Calderini (Eds.). Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy. Elsevier. Burlington, USA.
5. Battilani, A., T. Letterio., and G. Chiari. 2014. AquaCrop model calibration and validation for processing tomato crop in a sub-humid climate. In XIII International Symposium on Processing Tomato 1081 (pp. 167-174).
 6. Branthôme, FX. 2023. Worldwide (total fresh) tomato production in 2021. [en línea]. Tomato News. <https://www.tomatonews.com/en/worldwide-total-fresh-tomato-production-in-2021_2_1911.html>. [Consulta: 19 junio 2024].
 7. CEPAL (Chile). 2012. La economía del cambio climático en Chile. [en línea]. CEPAL. <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/0/47220/La_economia_del_cambio_climatico_en_Chile_Completo.pdf>. [Consulta: 05 marzo 2024].
 8. Comerma, J., J. S. Kimball, R. J. Luxmore and D. R. Wilkinson. 1985. The Ceres model for dynamic simulation of wheat growth and yield. In Crop simulation models in agricultura. 299-319. Elsevier.
 9. Ctaex. 2024. Producción. [en línea]. Observatorio Tecnológico del Tomate para la Industria. <<https://observatoriotomate.com/produccion/>>. [Consulta: 05 marzo 2024].
 10. Farahani, H., T. A. Howell, and J. M. Mexia-Alvarado. 2009. Application of AquaCrop for predicting cotton yield in the San Joaquin Valley of California. Irrigation Science, 27(2), 117-127.
 11. Flores-Gallardo, H., W. Ojeda-Bustamante, H. Flores-Magdaleno, E. Sifuentes Ibarra y E. Mejía-Saénz. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. Agrocienca 47(4): 347-359.
 12. Geerts, S., and D. Raes. 2009. Yield and water use efficiency of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under different irrigation and fertilization levels in the Bolivian Altiplano. Agricultural Water Management, 96(11-12), 1597-1607.
 13. Heng, L., Hsiao, T., Evett, D., and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for maize yield prediction under different climate conditions in

- the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 96(11-12), 1586-1596.
14. Hernández, N., F. Soto y A. Caballero. 2009. Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales* 30(1): 73-82. [en línea].
 15. Hussein, F., M. Janat and A. Yakoub. 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Span. J. Agric. Res.* 9(4): 1319-1330.
 16. INIA. 2024. Agrometeorología. [en línea]. <<https://agrometeorologia.cl/>>. [Consulta: 05 mayo 2024].
 17. Jamieson, P.D., J.R. Porter and D.R. Wilson. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crop Res.* 27 (4), 337–350.
 18. Katerji, N., P. Campi, and M. Mastrorilli. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14-26.
 19. Linker, R., I. Ioslovich, G. Sylaios, F. Plauborg, and A. Battilani. 2016. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*, 163, 236-243.
 20. Lipovac, A., R. Stricevic, M. Ćosić, and N. Djurović. 2022. Simulation of Water Consumption, Growth and Yield of Tomatoes using the AQUACROP model. *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences, JAFES*, 76(8), 7-14.
 21. Lizana, X.C. and D.F. Calderini. 2013. Yield and grain quality of wheat in response to increased temperatures at key periods for grain number and grain weight determination: considerations for the climatic change scenarios of Chile. *J. Agric. Sci.* 151(2): 209-221.
 22. Loague, K. and R.E. Green. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models; overview and application. *J. Contam. Hydrol*, 7:51-73.
 23. Mearns, L., C. Rosenzweig and R. Goldberg. 1997. Mean and variance change in climate scenarios: methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Clim. Change* 35(4): 367-396. [en línea].

24. Monteith, J. 1996. The quest for balance in crop modeling. *Agron. J.* 88(5): 695–697.
25. Muñoz, M. 2021. Tomate: una especie de exportación. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Ministerio de Agricultura, Chile.
26. Muñoz, M. 2023. Boletín de hortalizas, junio 2023. [en línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). <<https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-hortalizas-junio-2023>>. [Consulta: 01 junio 2024].
27. Ngetich, K.F., D. Raes, C.A. Shisanya, J. Mugwe, M. Mucheru-Muna, D.N, Mugendi and J. Diels. 2012. Calibration and validation of AquaCrop model for maize in sub-humid and semi-arid regions of central highlands of Kenya [en línea]. The Regional Universities Forum for Capacity Building in Agriculture, Uganda. <http://www.ruforum.org/system/files/file/Biennial%202012/PART2_3%20ABSTRACTS/Integrated%20Crop%20Management/Ngetich.pdf>. [Consulta: 05 mayo 2024].
28. Pawar, G. S., M. U. Kale and J. N. Lokhande. 2017. Response of AquaCrop model to different irrigation schedules for irrigated cabbage. *Agricultural Research*, 6(1), 73-81.
29. Peña, A. 2013. Validación del modelo AquaCrop en cinco genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivados en condiciones de disponibilidad de agua contrastantes. Memoria de título. Ing. Agrón. Universidad de Concepción, Fac. Agrón. Chillan, Chile.
30. Peralta, I. E., D. M. Spooner and H. Østergaard. (2018). A genetic history of the tomato. [en línea]. *Annual Review of Plant Biology*, 69(1), 1-28. <<https://www.nature.com/articles/ng.3117>>. [Consulta: 19 junio 2024].
31. Perry, J. 1999. The IWMI water resources paradigm – definitions and implications. (vol. 40) recuperado de <<https://www.sciencedirect.com/journal/agricultural-water>-
32. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao and E. Fereres. 2012. Annex 1: crop parameters [en línea]. FAO. <<http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Annexes.pdf>>

- [Consulta: 19 junio 2024].
33. Red Agrícola Chile. 2020. La producción mundial de tomate industrial crecería 5% en el 2020. [en línea]. Observatorio para la Innovación Silvoagropecuaria y la Cadena Agroalimentaria, Fundación para la Innovación Agropecuaria. <<https://opia.fia.cl/601/w3-article-113099.html#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20mundial%20de%20tomate,por%20sus%20siglas%20en%20ingl%C3%A9s>>. [Consulta: 19 junio 2024].
 34. Rinaldi, M., P. Garofalo, P. Rubino, and P. Steduto. 2011. Processing tomatoes under different irrigation regimes in Southern Italy: Agronomic and economic assessments in a simulation case study. *Journal of Agrometeorology*, 3(1), 39-56.
 35. Roco, F. 2021. Cambio climático: Desafío para la productividad de la agricultura en el sur de Chile. [en línea]. Diario UACH. <<https://diario.uach.cl/cambio-climatico-desafio-para-la-productividad-de-la-agricultura-en-el-sur-de-chile/>>. [Consulta: 05 marzo 2024].
 36. Steduto, P., T.C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101(3): 426-437.
 37. Stolpe, N. B., 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII Región de Chile (Vol. 1). Chillán: Universidad de Concepción. (pp. 19-20).
 38. Syngenta Semillas. 2023. Tomate industrial BQ-273. [en línea]. <<https://www.syngentavegetables.com/es-cl/product/seed/tomate/bq273>>. [Consulta: 20 mayo 2024].
 39. Takács, S., E. Csengeri, Z. Pék, T. Bíró, P. Szuvandzsiev, G. Palotás and L. Helyes. 2021. Performance evaluation of AquaCrop model in processing tomato biomass, fruit yield and water stress indicator modelling. *Water*, 13(24), 3587.
 40. Universidad de Chile. 2006. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, Informe final: Texto [en línea]. CONAMA. <http://www.sinia.cl/1292/articles-50188_recurso_8.pdf>. [Consulta: 05 marzo 2024].
 41. Uribe, N. 2024. Evaluación de parámetros de rendimiento del maíz (*zea mays l.*)

ante riego deficitario sostenido. Memoria de título. Ing. Agrón. Universidad de Concepción, Fac. Agrón. Chillan, Chile.

42. Valcárcel, M., I. Lahoz, C. Campillo, R. Martí, M. Leiva-Brondo, S. Rosello and J. Cebolla-Cornejo 2020. Controlled deficit irrigation as a water-saving strategy for processing tomato. *Scientia Horticulturae*, 261, 108972.
43. Vazquez, G. 2015. Introducción y Tutorial en español al programa "Soil Water Characteristics" Hydraulic Properties Calculator (Saxton y Rawls) para estudiantes de la Maestría de Cuencas Hidrográficas de la Univ Nac de La Plata. 10.13140/RG.2.1.2709.5527.