

# Trabajo Fin de Máster

**DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE PRODUCCIÓN  
MEDIANTE MODELOS DE SIMULACIÓN PARA CULTIVOS  
EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA  
PROVINCIA DE ALBACETE.**

**Intensificación:**

ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y GESTIÓN DE CUENCAS

**Autor:**

**DANIEL AMAURYS GONZÁLEZ MUÑOZ**

**Tutor:**

**DR. ALBERTO GARCÍA PRATS**

**Cotutor:**

**DR. MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ**

**Cotutor externo:**

**DR. RAMÓN LÓPEZ URREA**

**JULIO 2020**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Determinación de las funciones de producción mediante modelos de simulación para cultivos en escenarios de cambio climático en la provincia de Albacete.

**Título del TFM en inglés:** Determination of crop production functions through simulation models in climate change scenarios in the province of Albacete.

**Título del TFM en Valenciano:** Determinació de les funcions de producció per mitjà de models de simulació per a cultius en escenaris de canvi climàtic en la província d'Albacete.

**Alumno:** Daniel Amaurys González Muñoz

**Tutor:** Dr. Alberto García Prats

**Cotutor:**

Dr. Manuel Pulido Velázquez

**Cotutor externo:**

Dr. Ramón López Urrea

**Fecha de Lectura:** Julio 2020

### Resumen

#### En español (máximo 5000 caracteres)

EL OBJETIVO DE ESTE TRABAJO DE FIN DE MÁSTER ES SIMULAR EN EL SOFTWARE AQUACROP-OS CULTIVOS BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA DETERMINAR QUÉ IMPACTO SE PRODUCE EN EL RENDIMIENTO DEBIDO A LA VARIACIÓN EN LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS QUE SE ESPERAN EN EL FUTURO.

EN PRIMER LUGAR, CON LOS RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS EN LA PROVINCIA DE ALBACETE ESPECÍFICAMENTE EN UNA FINCA EXPERIMENTAL SE MODELA EN EL SOFTWARE AQUACROP-OS LAS CONDICIONES DE LOS CULTIVOS, ES DECIR, LAS VARIABLES CLIMÁTICAS, PRÁCTICAS DE CULTIVO, LA GESTIÓN DEL RIEGO Y LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO CON EL OBJETIVO DE SIMULAR LA REALIDAD Y OBTENER RESULTADOS QUE SE AJUSTEN A LOS VALORES DE RENDIMIENTO Y EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS ESTUDIOS UTILIZADOS.

POSTERIORMENTE, CON LOS PARÁMETROS CALIBRADOS SE PROCEDE A SIMULAR ESTOS MISMOS CULTIVOS EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN PERIODOS DE 30 AÑOS, SIENDO ESTOS 2041-2070 Y 2071-2100, YA CON ESTOS RESULTADOS DETERMINAR EL IMPACTO QUE SE TIENE EN EL RENDIMIENTO.

SE ESPERA QUE EL CULTIVO DE LA CEBOLLA BAJO LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EXPERIMENTE UNA DISMINUCIÓN EN EL RENDIMIENTO DE ALREDEDOR DE UN 30% PARA EL AGUA APLICADA EN COMPARACIÓN CON EL ESTUDIO ANALIZADO, MIENTRAS QUE LOS

CULTIVOS DE TRIGO Y GIRASOL OBTENGAN RENDIMIENTOS SUPERIORES EN COMPARACIÓN CON LOS ESTUDIOS UTILIZADOS.

### **En valenciano (máximo 5000 caracteres)**

L'OBJECTIU D'AQUEST TREBALL DE FI DE MÀSTER ÉS SIMULAR EN EL PROGRAMARI \*AQUACROP-US CULTIUS SOTA ESCENARIS DE CANVI CLIMÀTIC PER A DETERMINAR QUIN IMPACTE ES PRODUÏX EN EL RENDIMENT DEGUT A LA VARIACIÓ EN ELS PARÀMETRES CLIMÀTICS QUE S'ESPEREN EN EL FUTUR.

EN PRIMER LLOC, AMB ELS RESULTATS D'ASSAJOS REALITZATS A LA PROVÍNCIA D'ALBACETE ESPECÍFICAMENT EN UNA FINCA EXPERIMENTAL ES MODELA EN EL PROGRAMARI \*AQUACROP-US LES CONDICIONS DELS CULTIUS, ÉS A DIR, LES VARIABLES CLIMÀTIQUES, PRÀCTIQUES DE CULTIU, LA GESTIÓ DEL REG I LES CARACTERÍSTIQUES DEL SÒL AMB L'OBJECTIU DE SIMULAR LA REALITAT I OBTINDRE RESULTATS QUE S'AJUSTEN ALS VALORS DE RENDIMENT I \*EVAPOTRANSPIRACIÓ DELS ESTUDIS UTILITZATS.

POSTERIORMENT, AMB ELS PARÀMETRES CALIBRATS ES PROCEDEIX A SIMULAR AQUESTS MATEIXOS CULTIUS EN ESCENARIS DE CANVI CLIMÀTIC EN PERÍODES DE 30 ANYS, SENT AQUESTS 2041-2070 I 2071-2100, JA AMB AQUESTS RESULTATS DETERMINAR L'IMPACTE QUE ES TÉ EN EL RENDIMENT.

S'ESPERA QUE EL CULTIU DE LA CEBA SOTA ELS ESCENARIS DE CANVI CLIMÀTIC EXPERIMENTE UNA DISMINUCIÓ EN EL RENDIMENT D'AL VOLTANT D'UN 30% PER A L'AIGUA APLICADA EN COMPARACIÓ AMB L'ESTUDI ANALITZAT, MENTRE QUE ELS CULTIUS DE BLAT I GIRA-SOL OBTINGUEN RENDIMENTS SUPERIORS EN COMPARACIÓ AMB ELS ESTUDIS UTILITZATS.

### **En inglés (máximo 5000 caracteres)**

THE AIM OF THIS MASTER'S DEGREE WORK IS TO SIMULATE IN THE SOFTWARE AQUACROP-OS CROPS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS TO DETERMINE WHAT IMPACT OCCURS ON THE PERFORMANCE DUE TO THE EXPECTED CLIMATE PARAMETERS.

FIRSTLY, WITH THE RESULTS OF TESTS CARRIED OUT IN THE PROVINCE OF ALBACETE SPECIFICALLY ON AN EXPERIMENTAL FARM THE CONDITIONS OF CROPS ARE MODELED IN THE AQUACROP-OS SOFTWARE, THAT IS, CLIMATE VARIABLES, CULTIVATION PRACTICES, THE MANAGEMENT OF IRRIGATION AND THE CHARACTERISTICS OF THE SOIL IN ORDER TO SIMULATE THE REALITY AND OBTAINING RESULTS THAT ADJUST TO THE YIELD AND EVAPOTRANSPIRATION VALUES OF THE STUDIES USED.

LATER, WITH THE CALIBRATED PARAMETERS, WE PROCEED TO SIMULATE THESE CROPS IN CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN PERIODS OF 30 YEARS, WITH THESE BEING 2041-2070 AND 2071-2100, ALREADY WITH THESE RESULTS DETERMINING THE IMPACT THAT THE YIELD HAS.

ONIONS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS ARE EXPECTED TO EXPERIENCE A REDUCTION IN YIELD OF AROUND 30% WHILE WHEAT AND SUNFLOWER CROPS EXPERIENCE YIELD VALUES HIGHER THAN THOSE ACHIEVED IN THE STUDIES ANALYZED.

**Palabras clave español (máximo 5):** EVAPOTRANSPIRACIÓN; RENDIMIENTO; CAMBIO CLIMÁTICO; AQUACROP; FUNCIONES DE PRODUCCIÓN

**Palabras clave valenciano (máximo 5):** EVAPOTRANSPIRACIÓ; RENDIMENT; CANVI CLIMÀTIC; AQUACROP; FUNCIONS DE PRODUCCIÓ

**Palabras clave inglés (máximo 5):** EVAPOTRANSPIRATION; YIELD; CLIMATE CHANGE; AQUACROP; CROP PRODUCTION FUNCTIONS

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, en especial a mis padres José Daniel y Nancy por brindarme su cariño y apoyo todos los días y por enseñarme que en la vida todo con esfuerzo y dedicación se puede lograr.

A mis nuevos amigos y compañeros del máster por hacer mi estadía en España agradable, aún lejos de casa me hacían sentir como en mi hogar, así como también a mis viejos amigos por mantener la comunicación y brindarme su apoyo.

Quiero agradecer a mis profesores del máster y tutores del TFM, Alberto García y Manuel Pulido por tomar de su tiempo para ayudarme cuando tenía alguna duda, así como también a mi cotutor, Ramón López por suministrarme la información de sus estudios que resultaban necesarias para poder completar este trabajo.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.1.1. Cultivos de estudio.....	1
1.1.2. Modelos de circulación general.....	2
1.1.3. Modelos climáticos regionales.....	2
1.2. Modelo AquaCrop.....	2
1.3. AquaCrop OS.....	5
1.4. Finca “Las Tiasas”.....	6
2. OBJETIVOS.....	6
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
3.1. Datos AquaCrop-OS.....	8
3.1.1. Datos climáticos.....	8
3.1.2. Datos del suelo.....	9
3.1.3. Datos de riego.....	10
3.1.4. Datos de cultivo.....	10
3.1.5. Otros datos.....	13
3.2. Calibración AquaCrop-OS.....	13
3.2.1. Análisis estadístico.....	14
3.3. Periodos de simulación en cambio climático.....	15
3.4. Corrección del sesgo.....	16
3.5. Concentraciones Co2.....	18
3.6. Gestión del riego.....	18
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
4.1. Resultados calibración.....	19
4.1.1. Trigo de primavera.....	19
4.1.2. Cebolla.....	20
4.1.3. Girasol.....	22
4.2. Resultados de las funciones de producción.....	23
4.2.1. Criterio selección año representativo.....	24
4.2.2. Trigo de primavera.....	25
4.2.3. Girasol.....	31
4.2.4. Cebolla.....	37
4.3. Análisis de la varianza (ANOVA) y medias por mínimos cuadrados.....	43
4.3.1. Trigo de primavera.....	43



4.3.2.	Girasol.....	45
4.3.3.	Cebolla.....	47
5.	CONCLUSIONES.....	49
6.	BIBLIOGRAFÍA .....	50



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Publicaciones utilizadas para el trabajo .....	7
Tabla 2. Periodos de simulación .....	8
Tabla 3. Textura de los suelos .....	9
Tabla 4. Valores hidrogeológicos de los suelos .....	9
Tabla 5. Resumen datos de riego .....	10
Tabla 6. Parámetros para el cultivo de trigo de primavera .....	11
Tabla 7. Parámetros para el cultivo de la cebolla .....	11
Tabla 8. Parámetros para el cultivo del girasol .....	12
Tabla 9. Contenido de agua de los cultivos .....	13
Tabla 10. Criterio para la evaluación del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Molnar, 2011) .....	14
Tabla 11. Modelos de circulación general (GCM) .....	15
Tabla 12. Estrategias de riego en escenarios de cambio climático .....	18
Tabla 13. Calibración ETc y fc para el trigo de primavera .....	19
Tabla 14. Calibración rendimiento para el trigo de primavera .....	20
Tabla 15. Calibración ETc y fc para la cebolla .....	20
Tabla 16. Calibración rendimiento para la cebolla .....	21
Tabla 17. Calibración ETc y fc para el girasol .....	22
Tabla 18. Calibración rendimiento para el girasol .....	23
Tabla 19. Funciones de producción del trigo de primavera .....	29
Tabla 20. Comparación rendimiento del trigo de primavera .....	30
Tabla 21. Funciones de producción del girasol .....	35
Tabla 22. Comparación rendimiento del girasol .....	36
Tabla 23. Funciones de producción de la cebolla .....	41
Tabla 24. Comparación rendimiento de la cebolla .....	42
Tabla 24. Varianza para rendimiento del trigo de primavera - suma de cuadrados tipo III .....	43
Tabla 25. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del trigo de primavera .....	44
Tabla 26. Varianza para rendimiento del girasol - suma de cuadrados tipo III .....	45
Tabla 27. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del girasol .....	46
Tabla 28. Varianza para rendimiento de la cebolla - suma de cuadrados tipo III .....	47
Tabla 29. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento de la cebolla .....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona radicular se expresa como un depósito. (Steduto et al., 2012).....	4
Figura 2. Esquema de cálculo de AquaCrop, indicación de los procesos afectados por estrés hídrico y estrés de temperatura (Raes et al., 2018).....	5
Figura 3. Calibración ETc para el trigo de primavera .....	19
Figura 4. Calibración fc para el trigo de primavera.....	20
Figura 5. Calibración ETc para la cebolla .....	21
Figura 6. Calibración fc para la cebolla.....	21
Figura 7. Calibración ETc para el girasol .....	22
Figura 8. Calibración fc para el girasol.....	23
Figura 9. Trigo de primavera - RCP 4.5 (2041-2070) .....	25
Figura 10. Trigo de primavera - RCP 4.5 (2071-2100).....	26
Figura 11. Trigo de primavera - RCP 8.5 (2041-2070).....	27
Figura 12. Trigo de primavera - RCP 8.5 (2071-2100).....	28
Figura 13. Funciones de producción del trigo de primavera.....	29
Figura 14. Girasol - RCP 4.5 (2041-2070) .....	31
Figura 15. Girasol - RCP 4.5 (2071-2100) .....	32
Figura 16. Girasol - RCP 8.5 (2041-2070) .....	33
Figura 17. Girasol - RCP 8.5 (2071-2100) .....	34
Figura 18. Funciones de producción del girasol.....	35
Figura 19. Cebolla - RCP 4.5 (2041-2070).....	37
Figura 20. Cebolla - RCP 4.5 (2071-2100).....	38
Figura 21. Cebolla - RCP 8.5 (2041-2070).....	39
Figura 22. Cebolla - RCP 8.5 (2071-2100).....	40
Figura 23. Funciones de producción de la cebolla.....	41
Figura 24. Varianza para rendimiento del trigo de primavera.....	43
Figura 25. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del trigo de primavera .....	44
Figura 26. Varianza para rendimiento del girasol.....	45
Figura 27. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del girasol .....	46
Figura 28. Varianza para rendimiento de la cebolla .....	47
Figura 29. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento de la cebolla.....	48

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Generalidades

El agua es considerada como un recurso económico, ambiental, cultural y de bienestar social limitado. Debido a esto, la sociedad muestra un interés constante por el agua. Además de las incertidumbres que tenemos de manera habitual ahora debemos sumar las que se añaden como consecuencia del impacto del cambio climático (CEDEX, 2012). El agua es fundamental para la producción agrícola y nuestra seguridad alimentaria, según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el sector agrícola es el mayor consumidor de agua del planeta debido a su función productiva, además de que el regadío demanda hoy en día alrededor de un 70% del agua dulce extraída para uso humano.

El aumento de las temperaturas y el cambio en los patrones de precipitaciones derivados del cambio climático tienen efectos directos sobre el rendimiento de los cultivos, así como también efectos indirectos a través de los cambios en la disponibilidad de agua disponible para riego (*Cambio Climático*, 2009). Debido a esto resulta necesario analizar las posibles repercusiones en la gestión de los recursos hídricos para posteriormente generar acciones de adaptación que permitan manejar el proceso de planificación, evaluación y operación del agua destinada para riego (Ojeda et al., 2012).

#### 1.1.1. Cultivos de estudio

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es en la actualidad el cereal más cultivado en el mundo y puede ser considerado como la especie agrícola más antigua que fue cultivada por el hombre, este dato evidencia la capacidad que tiene el trigo de crecer y generar producción en situaciones y condiciones muy diferentes (Hernández Córdova et al., 2015). En ambientes semiáridos con lluvias limitadas e irregulares, el cultivo del trigo de primavera puede reducir el uso del agua y aumentar la productividad de la misma, ya que se aprovecha la lluvia de primavera cosechando antes de que se alcancen las altas demandas evaporativas del verano (R. López-Urrea et al., 2009) .

La cebolla (*Allium cepa* L.) es un vegetal que representa la especie más cultivada del género *Allium* (Engineers, 2015). Según las estadísticas de la FAO (FAOSTATS) la cebolla es un cultivo que va en franco crecimiento de su producción a nivel mundial. Una serie de estudios evidencian los altos requerimientos de agua que necesitan las cebollas, dadas estas limitaciones es importante determinar cuáles serían sus requerimientos en regiones con recursos hídricos limitados (R. López-Urrea, Olalla, et al., 2009) .

El girasol (*Helianthus annuus* L.) debido a que cuenta con unos requisitos de producción considerados de bajos a moderados, produce un aceite de alta calidad con alto contenido de proteínas y además se utilizan todas las partes de la planta, puede ser considerado como uno de los cultivos oleaginosos más importantes del mundo (Škorić, 1992). Producto de su capacidad de adaptación ante condiciones climáticas secas, el cultivo del girasol ha ido en aumento en varias regiones de España donde se utiliza para producir aceite, alimentar al ganado y producir biodiesel (Ramón López-Urrea et al., 2014).

### **1.1.2. Modelos de circulación general**

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático, por sus siglas en inglés IPCC, un modelo de circulación general (GCM) es la representación numérica de los procesos físicos que ocurren en la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre, estos modelos son las herramientas más avanzadas que tenemos disponibles que nos permiten simular la respuesta que tendrá el sistema climático global ante un incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero.

Los modelos de circulación general pueden servir para estimar proyecciones sobre como el clima de nuestro planeta puede variar en el futuro, estos resultados son de interés para que la comunidad internacional tome decisiones sobre acciones de mitigación del cambio climático, sin embargo, los impactos en el clima y las estrategias de adaptación a utilizar ocurrirán a escalas más regionales y nacionales por lo que resulta imprescindible realizar proyecciones a mucho mayor detalle con el objetivo de poder analizar los eventos de una manera localizada («What Is Regional Downscaling?», s. f.) .

### **1.1.3. Modelos climáticos regionales**

Debido a que los modelos de circulación general pueden proporcionar información de predicción confiables pero a escalas de alrededor de 1000 por 1000 km que cubrirían paisajes con condiciones diferentes y con un potencial climatológico muy variable nacen los modelos climáticos regionales que se basan en reducciones estadísticas empíricas aplicados e impulsados por modelos de circulación general para que estos pueden proporcionar información a escalas mucho más pequeñas que permitan evaluar y planificar los impactos de una manera más detallada («What Is Regional Downscaling?», s. f.).

## **1.2. Modelo AquaCrop**

AquaCrop es un programa creado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, conocida por sus siglas en el idioma inglés como FAO. AquaCrop nace de la necesidad de determinar el rendimiento de los cultivos como resultado de la utilización del agua (Steduto et al., 2012). Este programa necesita de un pequeño número de variables y parámetros haciéndolo más sencillo de aplicar en comparación con otros modelos disponibles.

AquaCrop evoluciona del enfoque clásico utilizado para relacionar la evapotranspiración (ET) con el rendimiento del cultivo (Y) presentado por Doorenbos y Kassam (1979), en la publicación No. 33 del Estudio de Riego y Drenaje de la FAO que presentaba la relación entre el rendimiento de los cultivos y el consumo del agua de la siguiente manera (Steduto et al., 2009):

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

Siendo  $Y_x$  y  $Y_a$  los rendimientos máximo y real, mientras que  $ET_x$  y  $ET_a$  la evapotranspiración máxima y real, y el  $K_y$  el factor de respuesta del rendimiento, esta ecuación es una función de productividad del agua y se puede aplicar para todos los cultivos agrícolas (Steduto et al., 2012).

Lo que AquaCrop hace es separar la ET en transpiración del cultivo ( $Tr$ ) y evaporación del suelo ( $E$ ), evitando así que se considere la evaporación como un consumo productivo del agua, llevando a obtener la ecuación fundamental del motor de crecimiento de AquaCrop (Steduto et al., 2009):

$$B = WP \times \sum Tr \quad (2)$$

En la ecuación anterior, WP es la productividad del agua expresada como biomasa por unidad de transpiración ( $Tr$ ) acumulada, este valor tiende a ser constante para una determinada condición climática y para algunos cultivos incrementa con la concentración de  $CO_2$  en el aire, AquaCrop utiliza un WP normalizado con el objetivo de poder aplicarlo en diferentes ubicaciones y temporadas, incluyendo escenarios para el clima futuro (Steduto et al., 2009)

$$WP^* = \left[ \frac{B}{\sum \left( \frac{Tr}{ET_o} \right)} \right]_{[CO_2]} \quad (3)$$

El componente  $[CO_2]$  de la ecuación corresponde a una concentración específica de dióxido de carbono en el aire y la  $ET_o$  como la demanda evaporativa de la atmósfera.

Aquacrop para poder diferenciar las variedades de un mismo cultivo se utilizan los grados días acumulados (GDD) que sirven como un reloj interno que permite tomar en cuenta los regímenes de temperatura en la fenología del cultivo simulado (Steduto et al., 2012).

Una característica crucial del AquaCrop es la simulación del dosel a través de su expansión, envejecimiento, conductancia y senescencia lo cual determina la cantidad de agua transpirada y posteriormente la biomasa producida. Se expresa la cantidad de follaje en función de la cobertura del dosel para simplificar la simulación ya que este parámetro puede ser medido por observación o a través de teledetección y no como una función del índice de área foliar (LAI) (Steduto et al., 2012).

Finalmente, el rendimiento es calculado a partir del índice de cosecha (HI) ya que en la mayoría de los cultivos solo una parte de la biomasa producida se usa por los órganos cosechables que posteriormente producirían rendimiento, bajo la siguiente ecuación (Steduto et al., 2012):

$$Y = HI * B \quad (4)$$

El componente del suelo en AquaCrop se ejemplifica mediante un perfil de suelo y en caso de que exista una capa freática se usan las características de la misma, el suelo se divide en dirección vertical usando diferentes capas u horizontes que se ajustan a diferentes características físicas del suelo tales como: contenido de humedad en su punto de saturación, la capacidad de campo, el punto

de marchitez permanente y la conductividad hidráulica en su punto de saturación (Steduto et al., 2012).

En la Figura 1 se expresa la manera en la que AquaCrop simula el movimiento del agua en el perfil del suelo y como esta se almacena en el mismo, la cantidad de agua que hay en la zona radicular se toma como una lámina de agua equivalente ( $W_r$ ) o también como el agotamiento de la zona radicular ( $D_r$ ), siendo el agua total disponible en el suelo (TAW) el volumen de agua que se encuentra retenido en la zona radicular, entre el valor de la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Steduto et al., 2012).

Las entradas en este balance son la precipitación, el riego y el ascenso capilar, mientras que las salidas son la evapotranspiración, la percolación profunda y la escorrentía, AquaCrop utiliza una función exponencial para el drenaje que sirve para describir como disminuye el movimiento entre el punto de saturación y la capacidad de campo, mientras que para el agua de se desplaza en el ascenso capilar mediante una relación exponencial (Steduto et al., 2012).

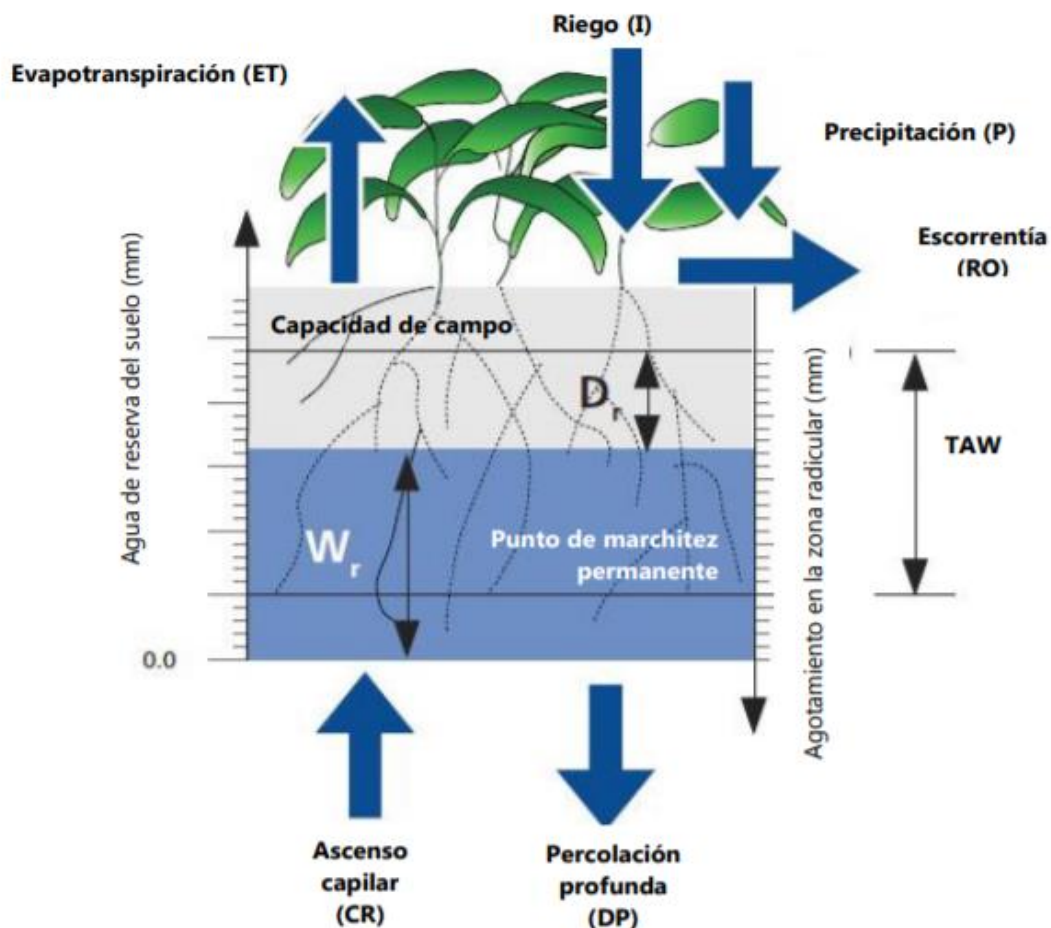


Figura 1. Zona radicular se expresa como un depósito. (Steduto et al., 2012).



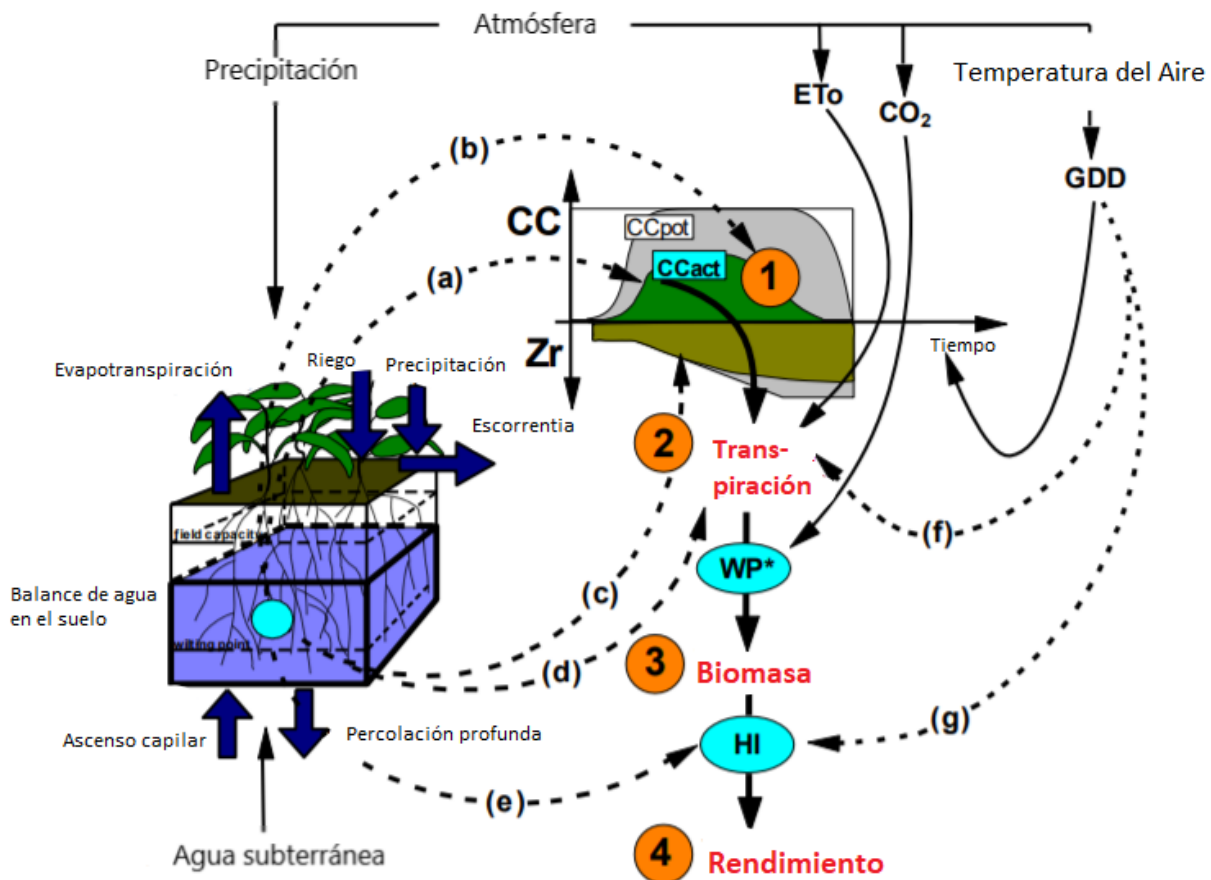


Figura 2. Esquema de cálculo de AquaCrop, indicación de los procesos afectados por estrés hídrico y estrés de temperatura (Raes et al., 2018).

En la Figura 2 representa el esquema que utiliza AquaCrop para simular el continuo suelo, planta y atmósfera, es decir, las variables climáticas que representan el régimen térmico, precipitaciones, las concentraciones de dióxido de carbono y la demanda de evaporación de la atmósfera, así como también los procesos de desarrollo, crecimiento y rendimiento de los cultivos, el balance de agua en el suelo y el manejo y prácticas que se tienen con el suelo, dando como un resultado final el rendimiento del cultivo (Steduto et al., 2012).

### 1.3. AquaCrop OS

AquaCrop-OS es la versión de código abierto del programa original desarrollado por la FAO, su código fuente se encuentra disponible de manera gratuita y además cuenta con un manual necesario para la utilización de este.

A pesar de la extensa documentación que se tiene sobre los procedimientos de cálculo que utiliza el programa original de AquaCrop, una de las limitaciones de este y de los demás programas que existen para modelar cultivos es que están distribuidos y compilados en un archivo ejecutable (Raes et al., 2018), esta característica dificulta la tarea de realizar simulaciones de manera paralela.

Para solventar esta y otras limitaciones se desarrolló el programa AquaCrop-OpenSource (AquaCrop-OS), el cual cuenta con una serie de características innovadoras y permite ser implementado en Matlab (MATLAB, 2019) a diferencia del programa original que está distribuido como un ejecutable para Windows, AquaCrop-OS puede ser utilizado en otros sistemas operativos y cuenta con la capacidad para realizar simulaciones de manera simultánea, reduciendo así los tiempos requeridos para ejecutar simulaciones bajo diferentes condiciones y en grandes periodos de tiempo como en el caso del estudio bajo escenarios de cambio climático (Foster et al., 2017).

El programa fue desarrollado utilizando el manual de AquaCrop que contiene los procedimientos de cálculo. Se desarrollaron una serie de pruebas con el objetivo de reproducir de manera precisa los resultados obtenidos en el programa, dando como consecuencia que al compararlos solo se encontraron pequeñas discrepancias causadas por el redondeo en los resultados (Foster et al., 2017). Por lo que se puede decir que resulta fiable la utilización de esta versión de código abierto.

El programa AquaCrop-OS facilita la generación de los archivos de entrada ya que utilizan ficheros de texto permitiendo que se puedan manipular de manera sencilla por algún lenguaje de programación, reduciendo así los tiempos necesarios para ejecutar simulaciones.

#### **1.4. Finca “Las Tiesas”**

El Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP) bajo el marco del proyecto EFEDA instaló una estación meteorológica de referencia para datos y productos de teledetección en el año de 1995 localizada entre los términos municipales de Albacete y Barrax (39°02'31"N, 2°04'56" O y 698m snm) (ITAP • Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, s. f.).

Esta estación obtiene parámetros cada 10 minutos de datos de velocidad de viento, dirección, temperatura, humedad del aire a varias alturas, valores de radicación, precipitación y temperatura del suelo. Con esos datos calculan la evapotranspiración de referencia usando la ecuación de la FAO Penman-Monteith, valor necesario para conocer las necesidades hídricas de los cultivos (ITAP • Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete, s. f.). -

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es determinar las funciones de producción en escenarios de cambio climático para los cultivos de girasol, cebolla y trigo realizando simulaciones con el programa AquaCrop-OS. Para poder lograr este objetivo se especificaron una serie de objetivos específicos que son los siguientes:

- 1- Calibrar los modelos para los tres cultivos en el programa AquaCrop-OS, simulando las condiciones en las que se desarrollaron en una finca experimental en Albacete, tomando como referentes los valores de rendimiento, evapotranspiración y fracción del desarrollo del dosel obtenidos en los estudios.
- 2- Generar los ficheros para simulación en cambio climático, con los datos meteorológicos entre los años 2041 y 2100, aplicando corrección al sesgo para los mismos.



3- Simular bajo los parámetros obtenidos en la calibración, utilizando los ficheros de datos meteorológicos en escenarios de cambio climático, los datos de concentración de dióxido de carbono y variando la gestión del riego.

4- Procesar los datos bajo análisis estadístico para tabular y graficar los resultados obtenidos.

Este objetivo principal es una puesta en práctica de 2 de las aplicaciones de AquaCrop especificadas en el documento llamado Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua (FAO-66), específicamente los casos 11 y 15, siendo estos:

**1) Caso 11 – Desarrollo de funciones de productividad del agua con AquaCrop y su utilización en sistemas de apoyo a las decisiones.**

En este caso se generan graficas de rendimiento expresado en toneladas por hectárea en función del agua de riego aplicada en milímetros (Steduto et al., 2012).

**2) Caso 15 – Efectos del cambio climático en la producción de cultivos y el uso del agua.**

En este caso se evalúan los efectos del calentamiento global sobre los rendimientos y el uso del agua, se utilizan los valores de los escenarios de cambio climático como valores de entrada al modelo, logrando así una predicción sobre los cambios en el rendimiento y los requerimientos hídricos (Steduto et al., 2012).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el presente trabajo se utiliza el programa AquaCrop-OS por las características que se mencionaron en la introducción, tales como, la facilidad para generar los ficheros de entrada, capacidad de simulaciones paralelas y la fiabilidad en los resultados al momento de contrastarlos con el programa original de AquaCrop creado por la FAO.

Se utilizan los datos de tres estudios realizados en la finca “Las Tiasas” cada uno asociado a un cultivo diferente y a un año en particular, a continuación, se mencionan cada uno de ellos con sus respectivos autores, año del estudio y el cultivo estudiado.

*Tabla 1. Publicaciones utilizadas para el trabajo*

Cultivo	Año del estudio	Título	Autores
<b>Trigo de primavera (Triticum aestivum L.)</b>	2003	Water use of spring wheat to raise water productivity	R. López-Urrea, A. Montoro, J. González-Piqueras, P. López-Fuster, E. Fereres

<b>Cebolla (Allium cepa L.)</b>	2005	Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (Allium cepa L.) under semiarid conditions	R. López-Urrea, F. Martín de Santa Olalla, A. Montor, P. López-Fuster
<b>Girasol (Helianthus annuus L.)</b>	2009	Consumptive water use and crop coefficients of irrigated sunflower	R. López-Urrea, A. Montoro, T.J. Trout

### 3.1. Datos AquaCrop-OS

Para cada uno de los cultivos se especifican los datos de inicio y finalización de la simulación coincidiendo con los datos de siembra y de cosecha de los estudios antes mencionados.

Tabla 2. Periodos de simulación

Cultivo	Inicio simulación	Final simulación	Cantidad de días
<b>Trigo de primavera</b>	07/02/2003	04/07/2003	148
<b>Cebolla</b>	27/03/2005	10/09/2005	168
<b>Girasol</b>	21/04/2009	07/09/2009	140

A continuación, se presentan los demás datos necesarios para realizar las simulaciones en AquaCrop-OS, luego de las fechas de simulación se debe de ingresar los datos climáticos, datos del cultivo, condiciones iniciales, datos del suelo y datos sobre la gestión del suelo.

#### 3.1.1. Datos climáticos

Para los datos climáticos de temperatura mínima ( $T_{min}$ ), temperatura máxima ( $T_{max}$ ), precipitación (Pr<sub>cp</sub>) y evapotranspiración del cultivo de referencia ( $E_{To}$ ) se usaron los datos suministrados por la estación agrometeorológica ubicada en la finca experimental "Las Tiesas" siendo estos para cada uno de los años de los estudios correspondientes.

En aquellas situaciones en que faltaban datos se completaban utilizando los suministrados por las estaciones agroclimáticas del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente disponibles en la web del Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla La-Mancha (SIAR), específicamente la estación La Gineta (39°5'56.7791" N, 2°0'51.5632" O y 722m snm) por su cercanía con la finca "Las Tiesas".

En el caso de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se utilizaron los datos históricos del observatorio de Mauna Loa en Hawái que se encuentran disponibles en la misma base de datos del AquaCrop-OS (Steduto et al., 2009).

### 3.1.2. Datos del suelo

En cuanto a los datos del suelo, estos fueron extraídos de las publicaciones mencionadas en la tabla 1, los valores utilizados fueron iguales, debido a que los estudios fueron llevados a cabo en el mismo lugar y presentan los mismos valores en cada uno de ellos.

El suelo es clasificado como Calcixercept petrocálcico (Soil Survey Staff, 2006), con una textura “silty clay loam” que se tomó como referencia para usar valores que tiene AquaCrop en su base de datos de textura de los suelos, y fueron usados cuando estos nos estaban disponibles en las publicaciones antes mencionadas. A continuación, se presentan las tablas resumen con la textura de los suelos y los valores hidrogeológicos utilizados.

Tabla 3. Textura de los suelos

Cultivo	Profundidad (cm)	Textura
<b>Trigo de primavera</b>	35	Arcilla franca limosa (13.4% de arena, 48.9% de limo, 37.7% de arcilla)
<b>Cebolla</b>	40	Arcilla franca limosa (13.4% de arena, 48.9% de limo, 37.7% de arcilla)
<b>Girasol</b>	35	Arcilla franca limosa (13% de arena, 49% de limo, 38% de arcilla)

Tabla 4. Valores hidrogeológicos de los suelos

Cultivo	Capacidad de campo (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Punto de marchitez permanente (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Ksat (mm/día)
<b>Trigo de primavera</b>	0.34	0.21	150
<b>Cebolla</b>	0.34	0.21	150
<b>Girasol</b>	0.34	0.21	150

### 3.1.3. Datos de riego

En cuanto a los valores de riego, se utilizaron los datos de los estudios antes mencionados que expresan como fueron las aplicaciones del riego, así como también el calendario de este que tiene la fecha y la cantidad de agua suministrada al cultivo, en la tabla siguiente se muestra un resumen de los valores utilizados en el AquaCrop-OS.

Tabla 5. Resumen datos de riego

Cultivo	Total (mm)	Profundidad (mm)	Cantidad de veces	Notas
<b>Trigo de primavera</b>	243	Entre 8 y 18	26	Se aplicaba cada 3 a 8 días cuando la ETc era aproximadamente igual a 5 mm/día.
<b>Cebolla</b>	805	Entre 4 y 18	57	Se aplicaba cada 2 a 4 días
<b>Girasol</b>	556	Entre 8 y 28	27	Se aplicaba cada 3 a 10 días en dependencia del valor de la ETc.

### 3.1.4. Datos de cultivo

En lo referente a los datos del cultivo que fueron los parámetros para los cuales se buscó la calibración se utilizaron valores extraídos de los estudios antes citados y en combinación con los parámetros que se recomiendan en el manual de referencia del programa AquaCrop, los cuales se basan en parámetros conservativos o parámetros que dependen de la especie en cuestión, esto para los cultivos del trigo de primavera y el girasol.

En el caso de la cebolla se utilizaron los datos del estudio y se asignaron valores dentro de lo razonable para poder calibrarlo, esto debido a que no se tienen datos oficiales de parte del manual de referencia del programa AquaCrop.

Estos valores que se brindan en los anejos de AquaCrop deben ser considerados como valores preliminares e iniciales y están sujetos a revisión, ya sea por calibración del usuario o por futuras revisiones al programa mismo (Raes et al., 2018).

A continuación una tabla a manera de resumen de los parámetros utilizados y con los que se obtuvieron mejores resultados en comparación con los que se extrajeron de los estudios. Para ver datos exactos utilizados en la simulación de los cultivos, ver anejo 1.

Tabla 6. Parámetros para el cultivo de trigo de primavera

Trigo de primavera		
Parámetro	Valor	Unidad o significado
Emergencia	280	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Enraizamiento máximo	725	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Senescencia	1380	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Madurez	2400	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Rendimiento	1200	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Duración rendimiento	700	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Densidad de plantación	4500000	planta/hectárea
Max. Profundidad de enraizamiento	2	metros
Zr min.	0.3	metros (profundidad mínima efectiva de enraizamiento)
Temperatura base	0	°C
Temperatura máxima	26	°C
Cobertura inicial dosel	1.5	cm <sup>2</sup> /planta
Máxima cobertura del dosel	90	%
Coef. De crecimiento del dosel	0.0047	%GDD/día
Coef. De disminución del dosel	0.0051	%GDD/día
Productividad del agua normalizada (WP*)	18	g/m <sup>2</sup>
Índice de cosecha	50	%

Tabla 7. Parámetros para el cultivo de la cebolla

Cebolla		
Parámetro	Valor	Unidad o significado
Emergencia	85	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Enraizamiento máximo	500	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Senescencia	2015	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Madurez	2400	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Rendimiento	900	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Duración rendimiento	900	GDD (Grados días acumulados)
Densidad de plantación	400000	planta/hectárea
Max. Profundidad de enraizamiento	0.35	metros
Zr min.	0.2	metros (profundidad mínima efectiva de enraizamiento)
Temperatura base	5	°C
Temperatura máxima	30	°C
Cobertura inicial dosel	5	cm <sup>2</sup> /planta
Máxima cobertura del dosel	72	%
Coef. De crecimiento del dosel	0.0075	%GDD/día
Coef. De disminución del dosel	0.0080	%GDD/día
Productividad del agua normalizada (WP*)	17	g/m <sup>2</sup>
Índice de cosecha	60	%

Tabla 8. Parámetros para el cultivo del girasol

Girasol		
Parámetro	Valor	Unidad o significado
Emergencia	200	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Enraizamiento máximo	1584	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Senescencia	1300	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Madurez	2400	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Rendimiento	1253.5	GDD (Grados días acumulados desde siembra)
Duración rendimiento	987	GDD (Grados días acumulados)
Densidad de plantación	80000	planta/hectárea
Max. Profundidad de enraizamiento	1.5	metros
Zr min.	0.3	metros (profundidad mínima efectiva de enraizamiento)
Temperatura base	4	°C
Temperatura máxima	30	°C
Cobertura inicial dosel	5	cm <sup>2</sup> /planta
Máxima cobertura del dosel	73	%
Coef. De crecimiento del dosel	0.0135	%GDD/día
Coef. De disminución del dosel	0.0028	%GDD/día
Productividad del agua normalizada (WP*)	15	g/m <sup>2</sup>
Índice de cosecha	33	%

### 3.1.5. Otros datos

Para las simulaciones de los cultivos no se utilizaron datos de aguas subterráneas, mientras que en el caso de las condiciones iniciales fueron usados los valores del suelo a capacidad de campo. El manejo del suelo fue ajustado de modo que los valores de evapotranspiración fuesen similares a los obtenidos en los estudios antes mencionados, esto se lograba variando los valores de cobertura de “mulch” en el suelo.

### 3.2. Calibración AquaCrop-OS

Para lograr la calibración de los modelos, se usó el método de la prueba y el error, analizando las variables de salida del AquaCrop-OS del rendimiento seco ( $Y$ ), evapotranspiración diaria como suma de transpiración del cultivo y evaporación del suelo ( $ET_c$ ) y la fracción de cobertura del dosel ( $f_c$ ) en comparación con los valores extraído de los estudios utilizados.

Para el análisis del rendimiento, el programa AquaCrop-OS reporta las salidas en rendimiento seco por lo que debe ser convertido a rendimiento fresco. Para convertir a rendimiento fresco se utiliza un contenido de agua en referencia al grano comercial y se calcula bajo la siguiente ecuación.

$$Y = \frac{Y_{seco}}{1 - \frac{\%H}{100}} \quad (5)$$

$Y$  hace referencia al rendimiento fresco,  $Y_{seco}$  al rendimiento seco que da como resultado el AquaCrop-OS y  $\%H$  al contenido de agua. La siguiente tabla expresa los valores de contenido de agua usado para cada uno de los cultivos.

Tabla 9. Contenido de agua de los cultivos

Cultivo	%H	Nota
Trigo de primavera	15	Según los valores recomendados entre (10-15%) según el manual de referencia de AquaCrop (Raes et al., 2018).
Cebolla	88	Según los valores promedio de materia seca de entre (11-14%) que representan valores de %H entre (86-89%) (Hendriksen & Hansen, 2001).

<b>Girasol</b>	11	Según los valores recomendados entre (10-15%) según el manual de referencia de AquaCrop (Raes et al., 2018).
----------------	----	--

### 3.2.1. Análisis estadístico

Para la calibración de los valores de evapotranspiración y fracción de cobertura del dosel se compararon los valores obtenidos en la simulación y los resultados medidos en los estudios. Se usaron las medidas de la raíz del error cuadrático medio (RSME) y el coeficiente de eficiencia de Nash (NSE).

Para facilitar el cálculo se usa el paquete “hydroGOF” en el lenguaje de programación R ya que el mismo fue creado con el objetivo de determinar la bondad en el ajuste entre valores observados y simulados durante la calibración, validación y aplicación de modelos (Zambrano-Bigiarini, 2017).

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Sim_i - Med_i)^2} \quad (6)$$

En la ecuación del RSME, la n representa la cantidad de datos medidos, Sim hace referencia a los datos simulados y Med a los datos medidos, la unidad del RSME es la misma que tienen los datos simulados y medidos y mientras su valor se acerca más a cero, mejor es la bondad del ajuste.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Med_i - Sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Med_i - \overline{Med})^2} \quad (7)$$

En la ecuación del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), la i representa la cantidad de datos medidos, Sim hace referencia a los datos simulados y Med a los datos medidos, mientras que  $\overline{Med}$  al promedio de los valores medidos, la unidad del NSE es adimensional y va desde el menos infinito hasta el uno, un valor de NSE=1 hace referencia a un modelo perfectamente ajustado por lo que mientras más cercano a ese valor, mejor ajustado está el modelo.

Se toma en cuenta el siguiente criterio para determinar que significa el valor de NSE obtenido:

Tabla 10. Criterio para la evaluación del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Molnar, 2011)

Indicador	Excelente	Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	Insuficiente
<b>NSE</b>	> 0.8	0.6 – 0.8	0.4 – 0.6	0.2 – 0.4	< 0.2



En el caso del rendimiento se calcula el porcentaje de diferencia ya sea de aumento o disminución entre el valor obtenido en la simulación luego de ser convertido a rendimiento fresco y el valor obtenido por el estudio en cuestión.

$$\%dif = \frac{|Sim - Med|}{|Med|} \times 100\% \quad (8)$$

En la ecuación anterior, Sim hace referencia al dato simulado y Med al dato medido.

### 3.3. Periodos de simulación en cambio climático

Después de cumplir el objetivo específico número 1, referente a calibrar los modelos para los tres cultivos en el programa AquaCrop-OS, el siguiente paso realizado es el de generar los ficheros para la simulación en cambio climático teniendo en consideración los datos meteorológicos y las concentraciones de dióxido de carbono.

Los periodos de simulación en cambio climático utilizados son establecidos en intervalos de 30 años, resultando en dos, que son del año 2041 hasta el 2070 y del 2071 hasta el 2100.

El RCM o modelo climático regional usado fue el RCA4, esto debido a que era el único que contaba con todos los datos para las variables necesarias para poder utilizar AquaCrop-OS y los modelos de circulación general o GCM utilizados se encuentran expresados en la siguiente tabla:

Tabla 11. Modelos de circulación general (GCM)

#	Modelo de circulación general (GCM)
1	CCCma-CanESM2
2	CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0
3	IPSL-IPSL-CM5A-MR
4	MIROC-MIROC5
5	NCC-NorESM1-M
6	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M

Los variables necesarias para generar los ficheros usados en el programa Aquacrop-Os en escenarios de cambio climático y para los diversos modelos que se mencionan en la tabla 11 fueron obtenidas de la plataforma CORDEX, la misma es producto de un esfuerzo coordinado entre diversos programas y organizaciones con el objetivo de homogeneizar y facilitar la obtención de los datos para modelos climáticos regionales («About CORDEX.ORG», s. f.).

En la plataforma CORDEX el dominio utilizado fue el de EUR-44 como resolución espacial, referente a los datos con una resolución de 0.44 grados (EUR-44, 50km).

Se descargaron los datos históricos ya que son necesarios para la corrección del sesgo, así como los de RCP4.5 y RCP8.5, la frecuencia de los datos diaria y las variables utilizadas fueron las necesarias para generar los ficheros de clima en el AquaCrop-OS que exige se le suministre la temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), precipitación (Prcp) y la evapotranspiración (ET0) que ya que no se cuenta como una variable que se puede descargar directamente, se calcula utilizando las variables de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad máxima, humedad mínima, velocidad del viento y radiación.

Tabla 12. Datos descargados de CORDEX

Dominio	Modelo GCM	Experimento	Modelo RCM	Frecuencia	Variables
EUR-44	CCCma-CanESM2	Datos Históricos	RCA4	Diaria	Temperatura máx.
	CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	RCP4.5			Temperatura mín.
	IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCP8.5			Precipitación
	MIROC-MIROC5				Humedad máx.
	NCC-NorESM1-M				Humedad mín.
	NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M				Velocidad viento
					Radiación

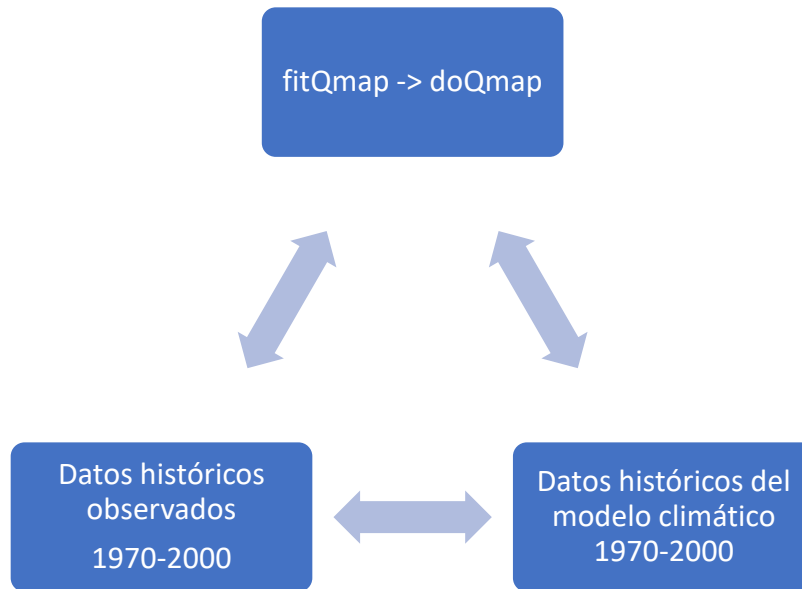
### 3.4. Corrección del sesgo

Con el objetivo de poder contar con proyecciones climáticas más al detalle resulta necesario corregir el sesgo en los datos obtenidos de la plataforma CORDEX ya que los valores que nos brindan se basan en una malla de cálculo que puede resultar relativamente grande si queremos reproducir efectos y obtener datos a nivel local.

Para poder realizar dicha corrección se comparan los datos de los modelos climáticos con datos históricos en un periodo común entre ambos, llamado periodo de control.

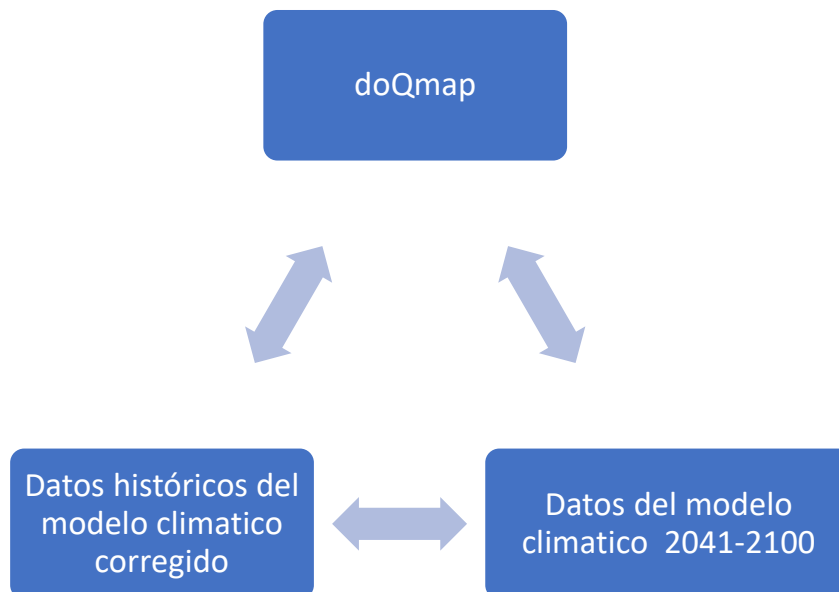
Para este caso se utilizó un método de corrección del sesgo de corrección por cuantiles, y se utiliza el paquete “qmap” en el lenguaje de programación R ya que el mismo se basa en un ajuste empírico de las variables de los modelos climáticos regionales con una interfaz fácil de utilizar (Gudmundsson, 2016).

A manera de esquema se muestra la forma en la que se corrige el sesgo utilizando el paquete “qmap”, primero se obtiene la relación entre los datos históricos observados para el periodo de control de 1970-2000 con los datos históricos que suministra el modelo para el mismo periodo de años utilizando la función fitQmap y posteriormente se corrigen los datos históricos del modelo climático 1970-2000 utilizando la función doQmap.



*Ilustración 3. Relación datos históricos observados y modelo climático*

Luego de que se tienen los datos históricos del modelo climático corregido se procede a corregir los datos del modelo climático utilizando la función doQmap que ya guarda la relación previamente establecida, con lo que finalmente se pueden obtener los datos del modelo climático a utilizar para los años desde 2041 hasta el 2100.



*Ilustración 4. Corrección del sesgo para datos del modelo climático 2041-2100*

### 3.5. Concentraciones Co2

Los datos de concentraciones de dióxido de carbono utilizados fueron los que brindan las trayectorias de concentración representativas o RCP por sus siglas en inglés, se usaron las bases de datos disponibles para las RCP 4.5 y RCP 8.5.

El escenario para la trayectoria RCP 4.5 es uno donde se ve estabilizado el forzamiento radiactivo total antes del 2100 por medio de la utilización de una serie de tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Clarke et al., 2007). Mientras que el escenario para la trayectoria RCP 8.5 se caracteriza por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo, lo que conduce a niveles altos de concentración, el mismo está basado en el escenario A2r que se encuentra detallado en (Riahi et al., 2007).

### 3.6. Gestión del riego

Para la gestión del riego se usan 5 estrategias distintas basadas en la humedad del suelo y en función del TAW o agua total disponible que es una de las opciones que brinda el programa Aquacrop-OS, para este caso sin hacer distinción de la etapa de crecimiento en que se encuentre. Las estrategias se encuentran expresadas en la siguiente tabla:

Tabla 13. Estrategias de riego en escenarios de cambio climático

No.	Estrategia de riego	Código
1	30% del TAW por debajo del cual se activa el riego para las cuatro etapas de crecimiento.	A
2	40% del TAW por debajo del cual se activa el riego para las cuatro etapas de crecimiento.	B
3	50% del TAW por debajo del cual se activa el riego para las cuatro etapas de crecimiento.	C
4	60% del TAW por debajo del cual se activa el riego para las cuatro etapas de crecimiento.	D
5	70% del TAW por debajo del cual se activa el riego para las cuatro etapas de crecimiento.	E

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados calibración

Con los datos especificados anteriormente como parámetros finales para la calibración de los cultivos se llegaron a unos resultados comparables a los obtenidos en los estudios que se utilizaron, a continuación se presentan las tablas y gráficas de comparación.

#### 4.1.1. Trigo de primavera

En el caso del trigo de primavera, a pesar de que la fecha de siembra y la simulación inicia el 7 de febrero del 2003, debido a un mal funcionamiento de las celdas de carga, las lecturas del lisímetro se perdieron por lo que se comienzan a emitir datos a partir del 21 de abril del 2003 (R. López-Urrea et al., 2009).

Los resultados obtenidos con los datos finales para la calibración de la evapotranspiración y la fracción de la cobertura del dosel fue la siguiente:

Tabla 14. Calibración  $ET_c$  y  $f_c$  para el trigo de primavera

	RMSE	NSE
<b><math>ET_c</math></b>	0.98	0.77
<b><math>f_c</math></b>	0.1	0.84

Los valores de 0.77 y 0.84 para el NSE pueden ser considerados como ajustes muy buenos según la tabla 7 antes mencionada.

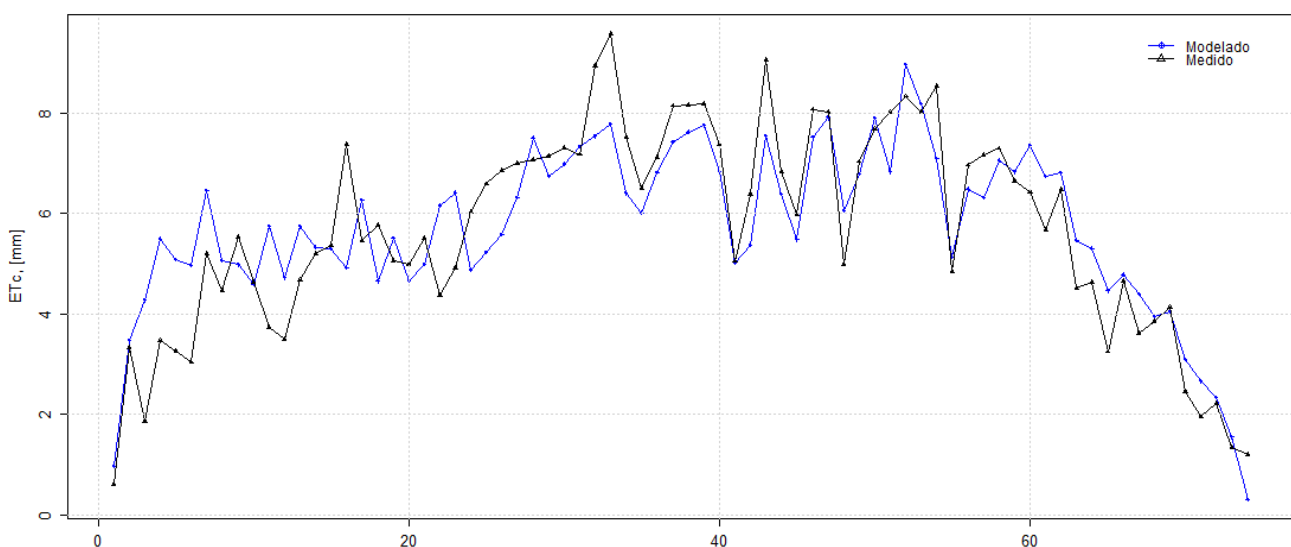


Figura 5. Calibración  $ET_c$  para el trigo de primavera

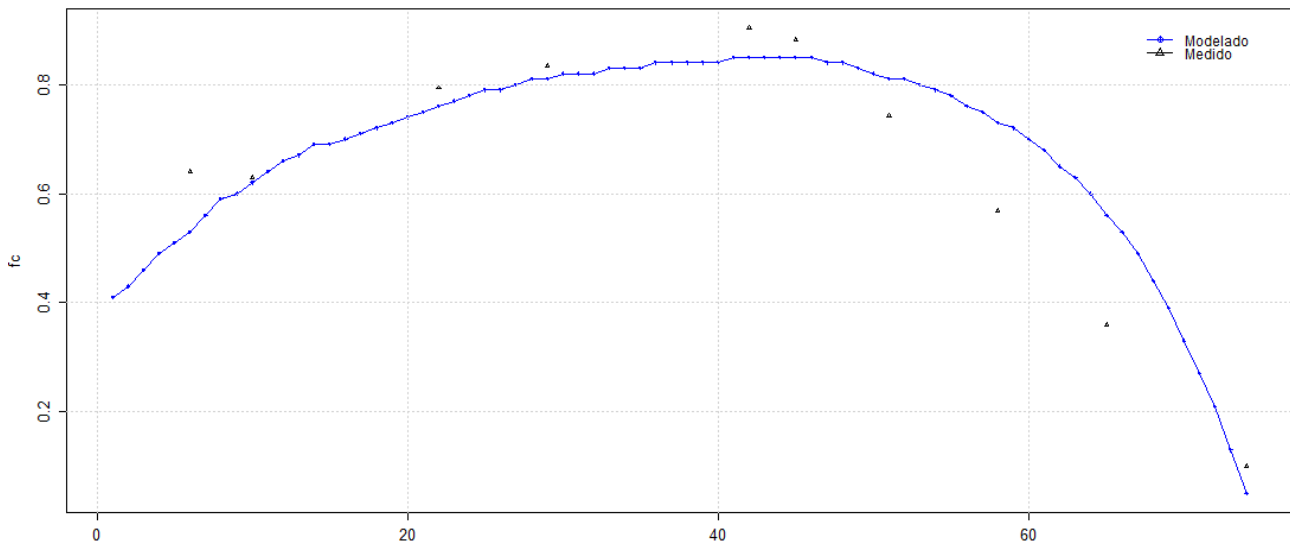


Figura 6. Calibración  $f_c$  para el trigo de primavera

Mientras que en el caso del rendimiento fresco en comparación con el reportado en el estudio, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 15. Calibración rendimiento para el trigo de primavera

Trigo de primavera	
<b>Yseco</b>	6.73 ton/ha
<b>%H</b>	15
<b>Ysim</b>	7.92 ton/ha
<b>Ymed</b>	8.1 ton/ha
<b>%dif</b>	2.25

Se obtuvo un porcentaje de diferencia de 2.25% en disminución, lo que significa que se subestimó el rendimiento del cultivo en 0.18 ton/ha para este caso.

#### 4.1.2. Cebolla

En el caso de la cebolla, se tienen las lecturas del lisímetro a partir del inicio del estudio por lo que los resultados obtenidos con los datos finales para la calibración de la evapotranspiración y la fracción de la cobertura del dosel fue la siguiente:

Tabla 16. Calibración  $ET_c$  y  $f_c$  para la cebolla

	RMSE	NSE
<b><math>ET_c</math></b>	1.25	0.75
<b><math>f_c</math></b>	0.12	0.75

Los valores de 0.75 en el NSE para ambos casos pueden ser considerados como ajustes muy buenos según la tabla 7 antes mencionada.

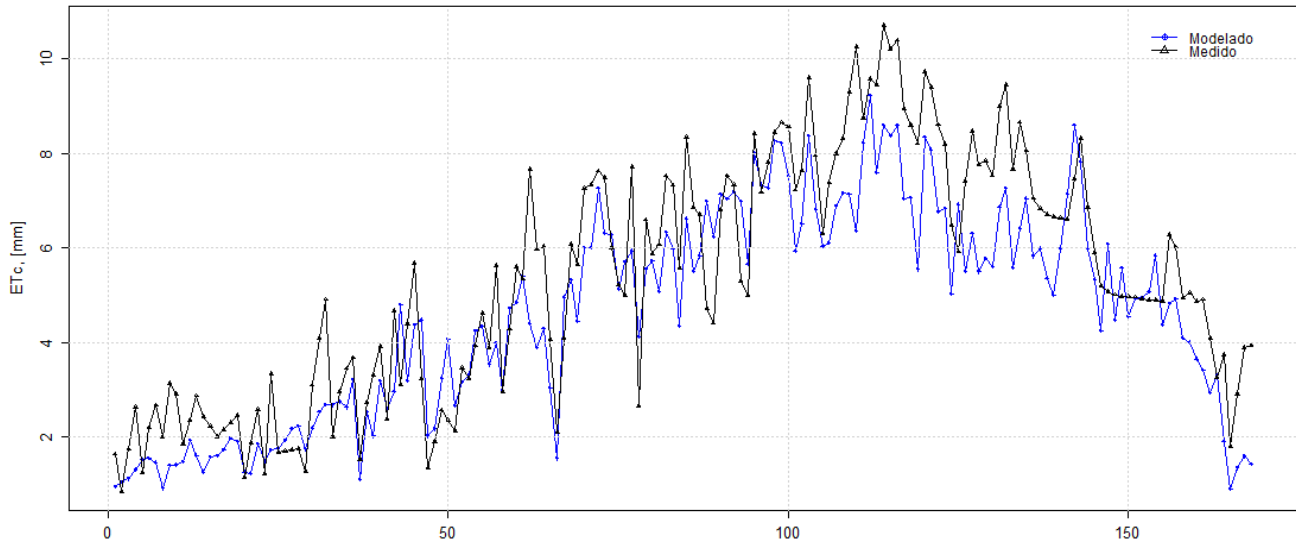


Figura 7. Calibración  $ET_c$  para la cebolla

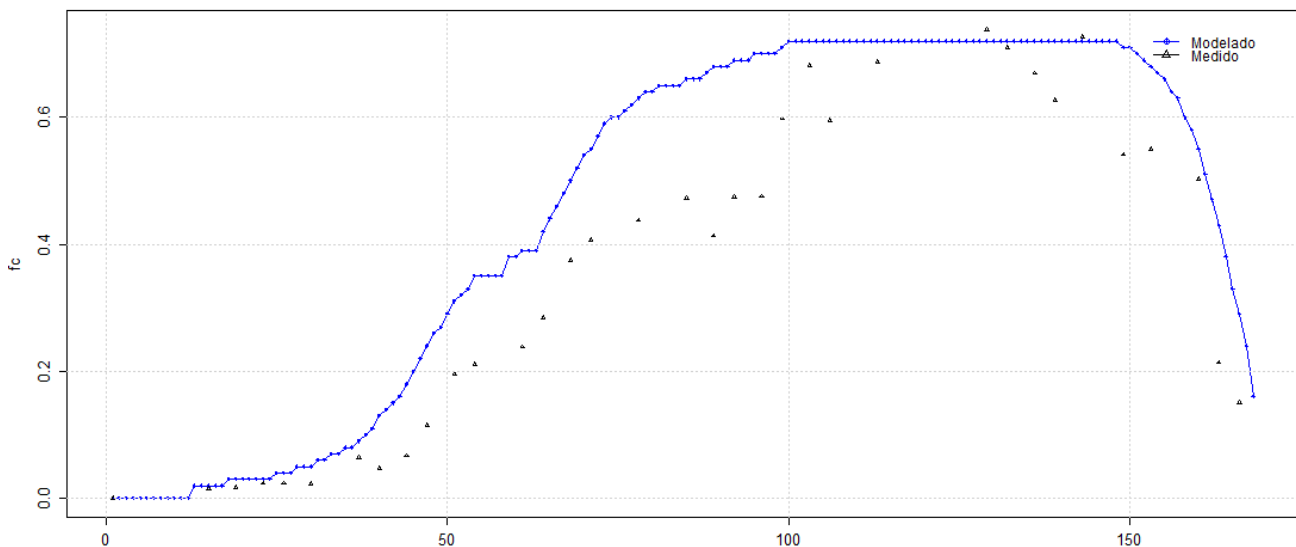


Figura 8. Calibración  $f_c$  para la cebolla

Mientras que en el caso del rendimiento fresco en comparación con el reportado en el estudio, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 17. Calibración rendimiento para la cebolla

Cebolla	
Yseco	10.89
%H	88

<b>Ysim</b>	90.75
<b>Ymed</b>	92.5
<b>%dif</b>	1.89

Se obtuvo un porcentaje de diferencia de 1.89% en disminución, lo que significa que se subestimó el rendimiento del cultivo en 1.75 ton/ha para este caso.

#### 4.1.3. Girasol

En el caso del girasol, se tienen las lecturas del lisímetro a partir del inicio del estudio por lo que los resultados obtenidos con los datos finales para la calibración de la evapotranspiración y la fracción de la cobertura del dosel fue la siguiente:

Tabla 18. Calibración  $ET_c$  y  $f_c$  para el girasol

	<b>RMSE</b>	<b>NSE</b>
<b><math>ET_c</math></b>	1.14	0.85
<b><math>f_c</math></b>	0.08	0.88

Los valores de 0.85 y 0.88 en el NSE pueden ser considerados como ajustes muy buenos según la tabla 7 antes mencionada.

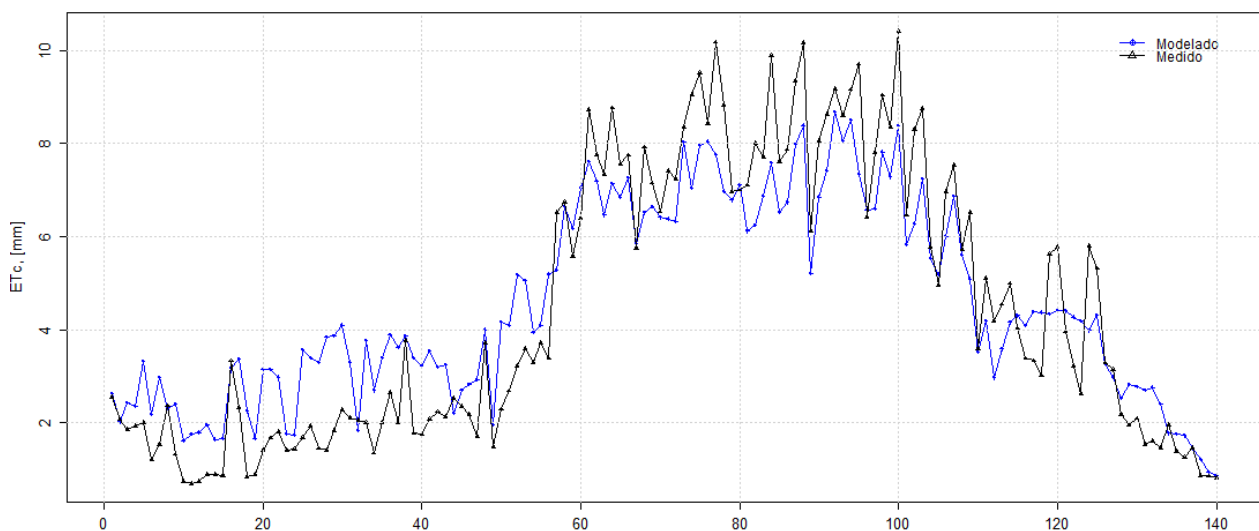


Figura 9. Calibración  $ET_c$  para el girasol



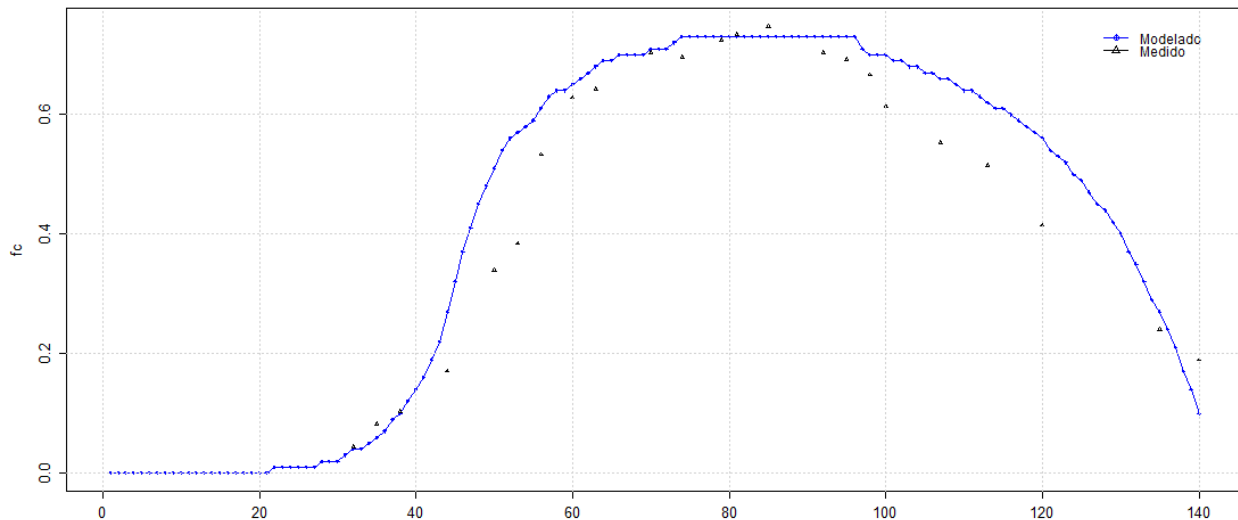


Figura 10. Calibración  $f_c$  para el girasol

Mientras que en el caso del rendimiento fresco en comparación con el reportado en el estudio, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 19. Calibración rendimiento para el girasol

Girasol	
Yseco	3.02
%H	11
Ysim	3.39
Ymed	3.30
%dif	2.83

Se obtuvo un porcentaje de diferencia de 2.83% en aumento, lo que significa que se sobreestimó el rendimiento del cultivo en 0.09 ton/ha para este caso.

#### 4.2. Resultados de las funciones de producción

Graficando los valores del rendimiento expresados como toneladas por hectárea y la cantidad de agua utilizada para riego más la lluvia efectiva expresada en milímetros, bajo las estrategias de riego previamente establecidas, se determinaron las curvas de producción para cada uno de los cultivos, representando el rendimiento en función del agua proporcionada, para las trayectorias de RCP 4.5 y 8.5 y para periodos de tiempo de 30 años, 2041-2070 y 2071-2100.

El valor de agua proporcionada que es la que realmente tiene disponible el cultivo es el resultado de la suma del agua destinada en riego y la lluvia efectiva, la cual se calcula bajo el siguiente balance:

$$\text{Lluvia efectiva} = \text{Lluvia} - \text{Escorrentia Superficial} - \text{Percolación profunda}$$

Debido a que estas gráficas son producto de la relación entre periodos de treinta (30) años, bajo seis (6) modelos diferentes, se tendrían unas ciento ochenta (180) funciones de producción para cada nube de puntos, debido a esto y a la complejidad que resultaría de un análisis de ese tipo, se seleccionan en cada uno de los conjuntos de datos un año representativo para extraer la función de producción en ese conjunto de datos.

#### **4.2.1. Criterio selección año representativo**

Para la elección del año representativo el criterio utilizado fue promediar los valores de riego más la lluvia efectiva, es decir, el agua realmente utilizable para el cultivo y los valores de rendimiento, el año que tenga el menor error cuadrático medio es el que se elige como representativo para ese conjunto de datos y se determina una función de producción específica.

Después de seleccionar el año representativo para cada conjunto de datos, se grafican las funciones de producción junto a la función de producción del año de simulación inicial y se tabulan los valores de rendimiento para varios valores de agua aplicada, con el objetivo de ver el porcentaje de variación entre los valores de rendimiento para cada valor de riego más lluvia efectiva.

### 4.2.2. Trigo de primavera

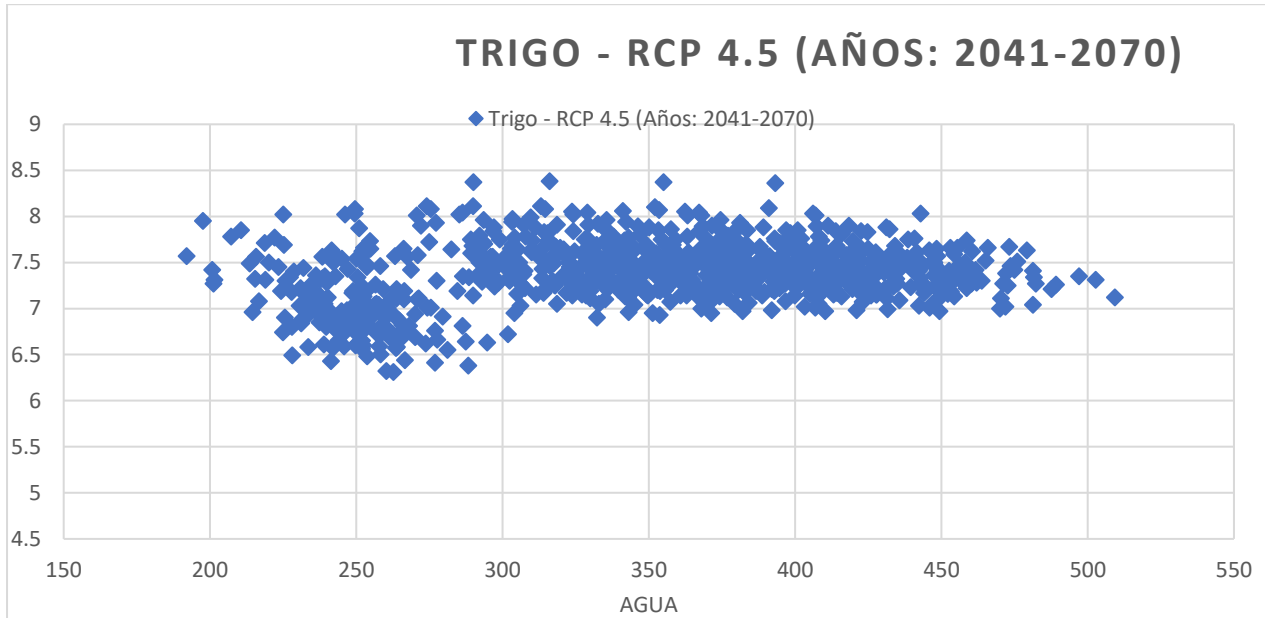


Figura 11. Trigo de primavera - RCP 4.5 (2041-2070)

Año representativo	Función de producción
<b>2057</b>	$y = -4E-05x^2 + 0.0282x + 2.1416$ $R^2 = 0.9453$

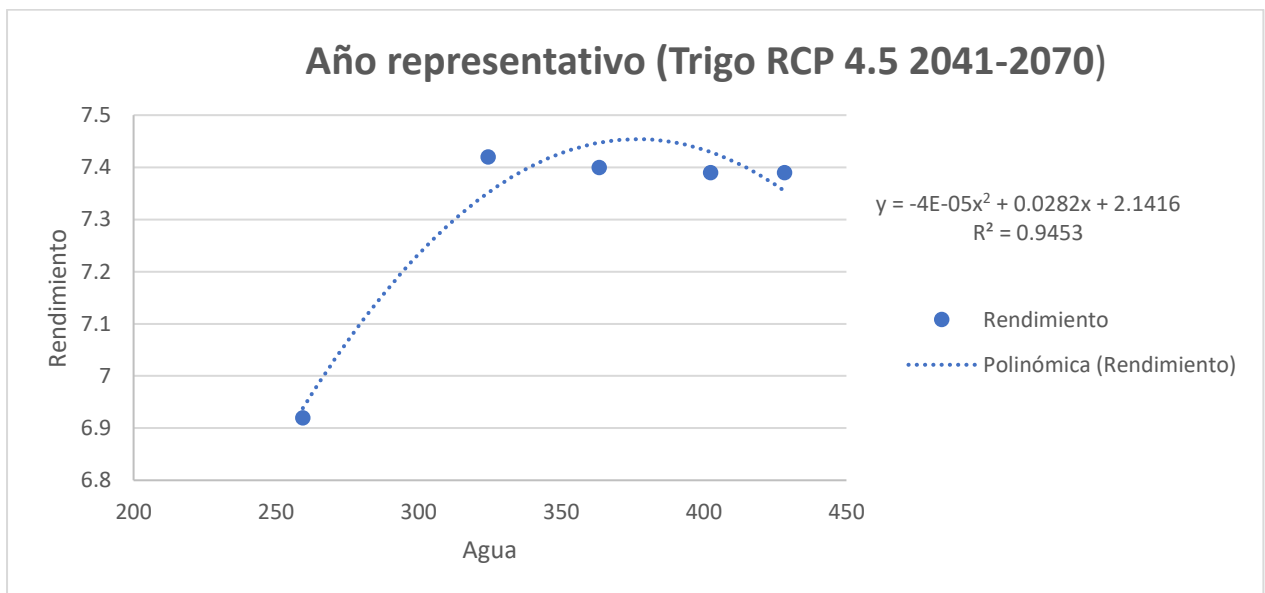


Ilustración 12. Año 2057, Trigo RCP 4.5 (2041-2070)

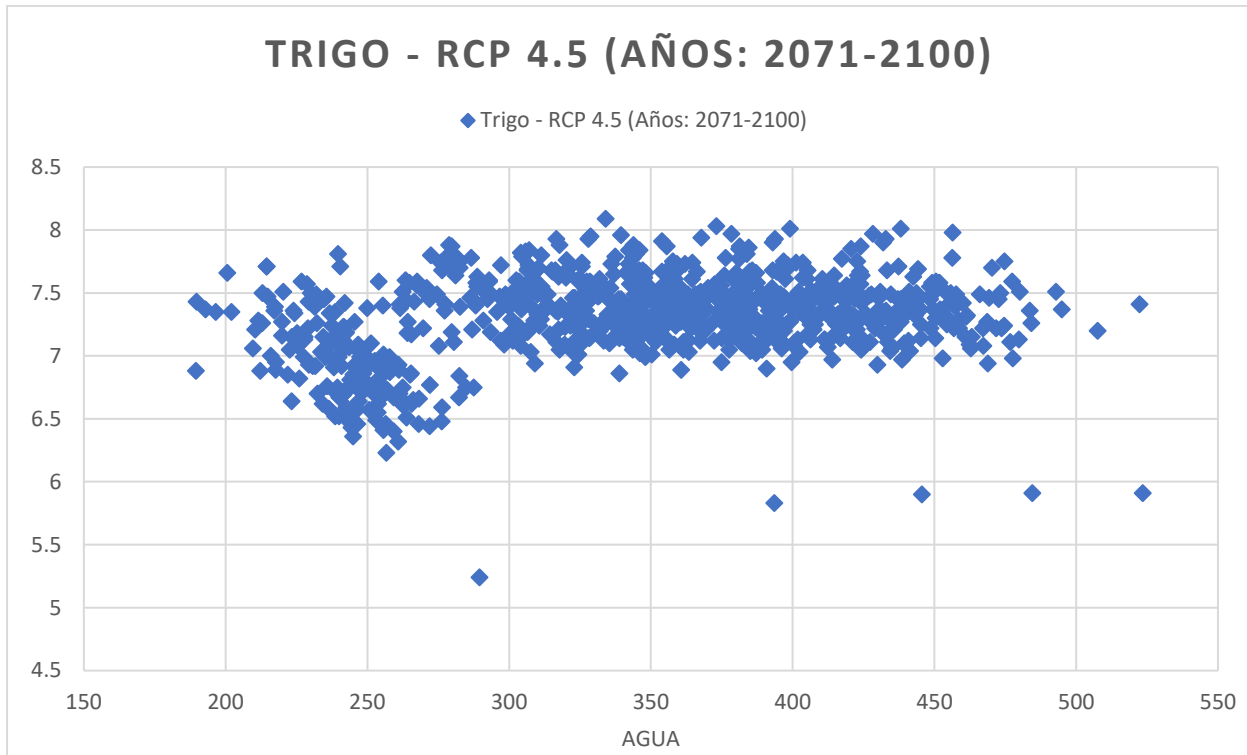


Figura 13. Trigo de primavera - RCP 4.5 (2071-2100)

Año representativo	Función de producción
<b>2098</b>	$y = -3E-05x^2 + 0.0201x + 3.3017$ $R^2 = 0.9511$

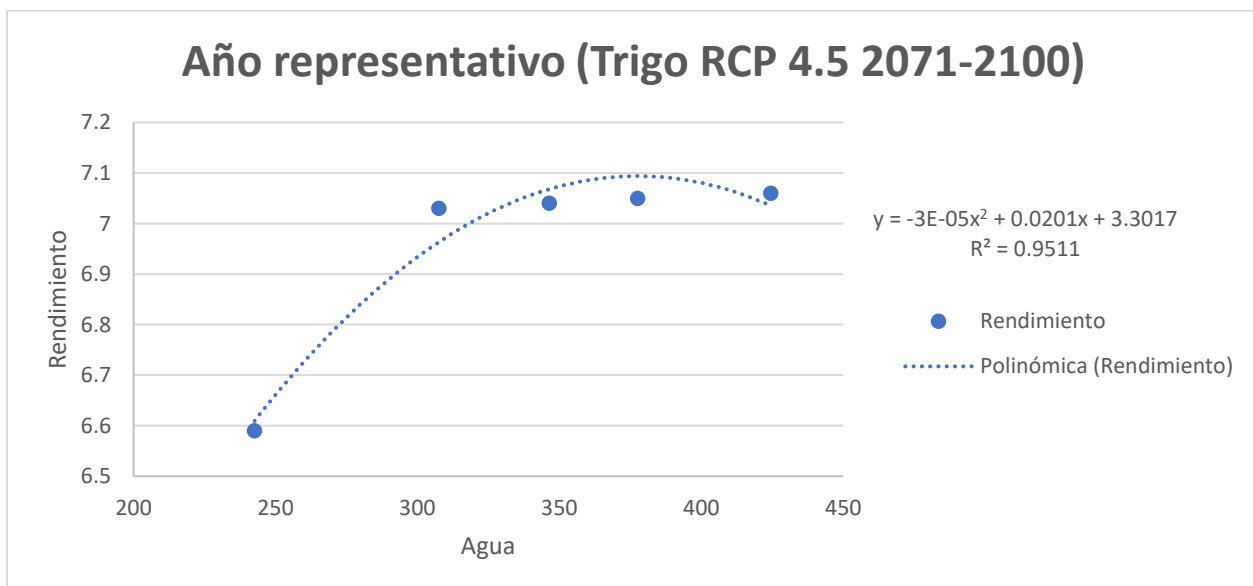


Ilustración 14. Año 2098, Trigo RCP 4.5 (2071-2100)

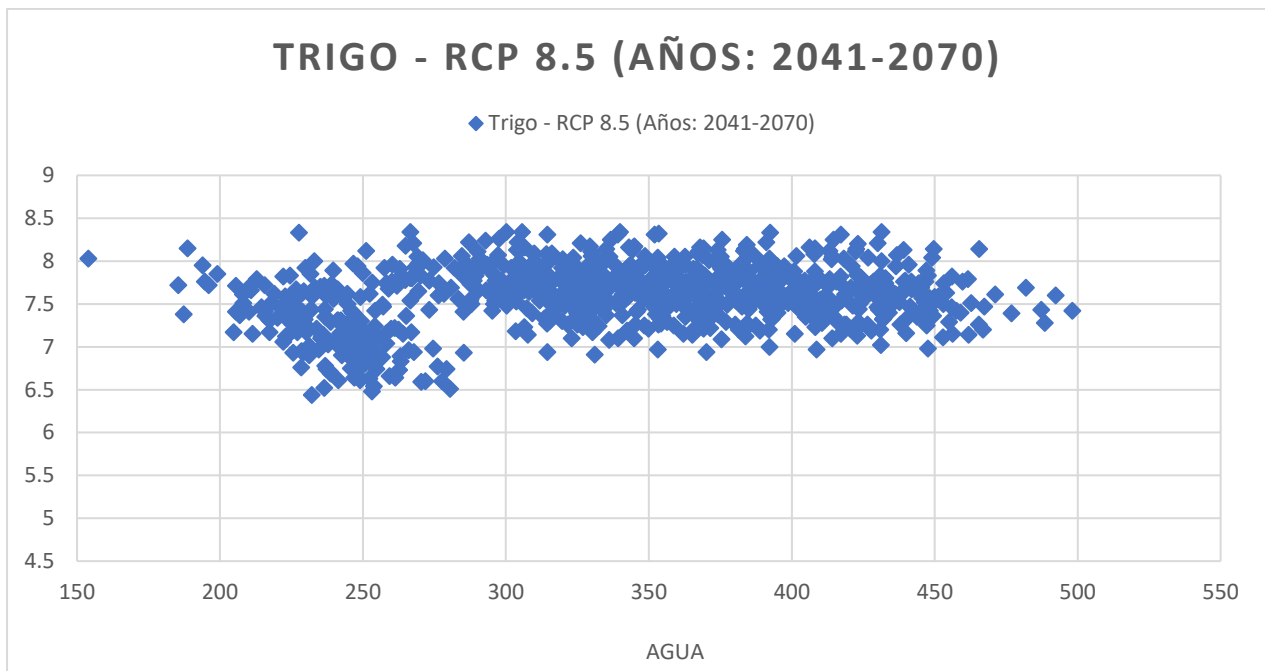


Figura 15. Trigo de primavera - RCP 8.5 (2041-2070)

Año representativo	Función de producción
<b>2060</b>	$y = -4E-05x^2 + 0.0284x + 2.5233$ $R^2 = 0.9199$

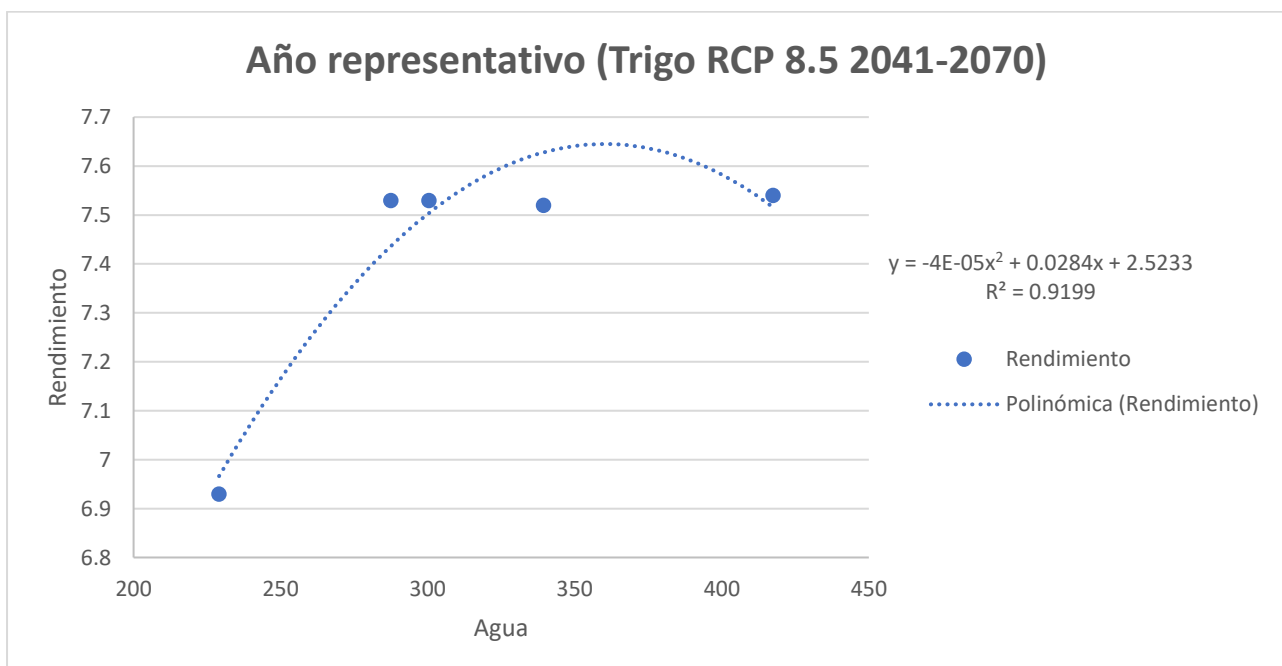


Ilustración 16. Año 2060, Trigo RCP 8.5 (2041-2070)

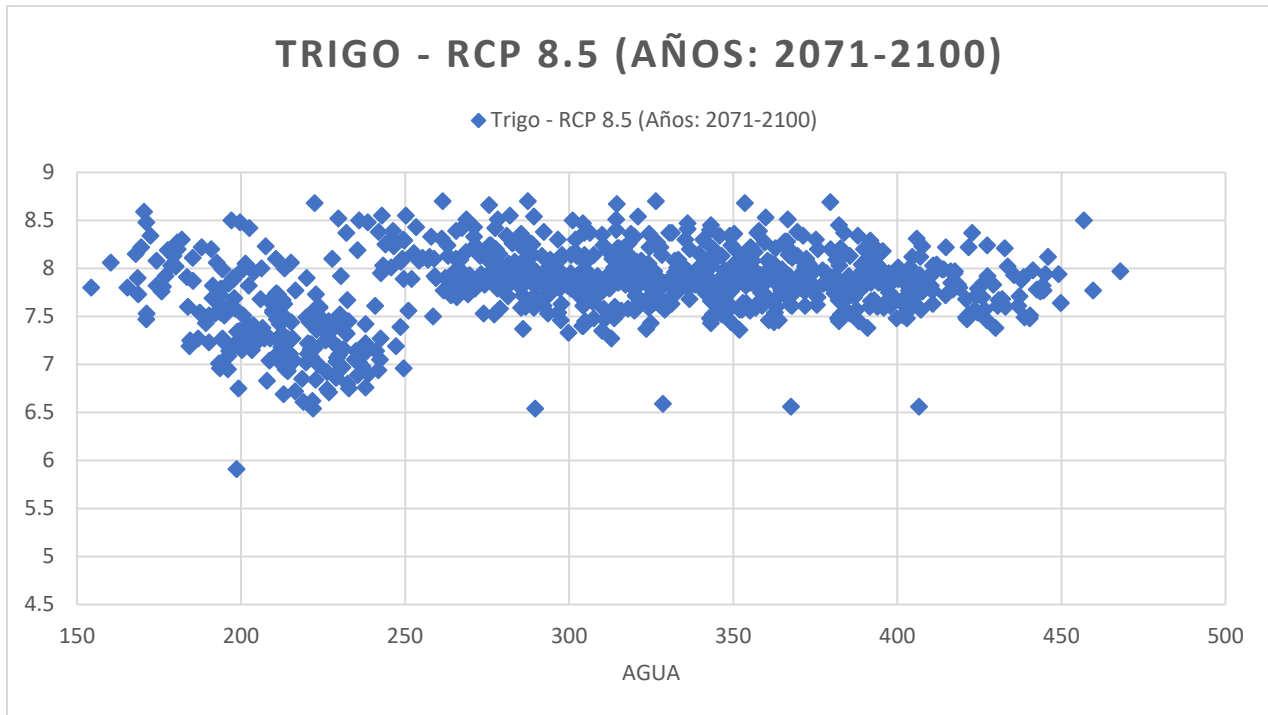


Figura 17. Trigo de primavera - RCP 8.5 (2071-2100)

Año representativo	Función de producción
<b>2099</b>	$y = -3E-05x^2 + 0.0259x + 2.5667$ $R^2 = 0.986$

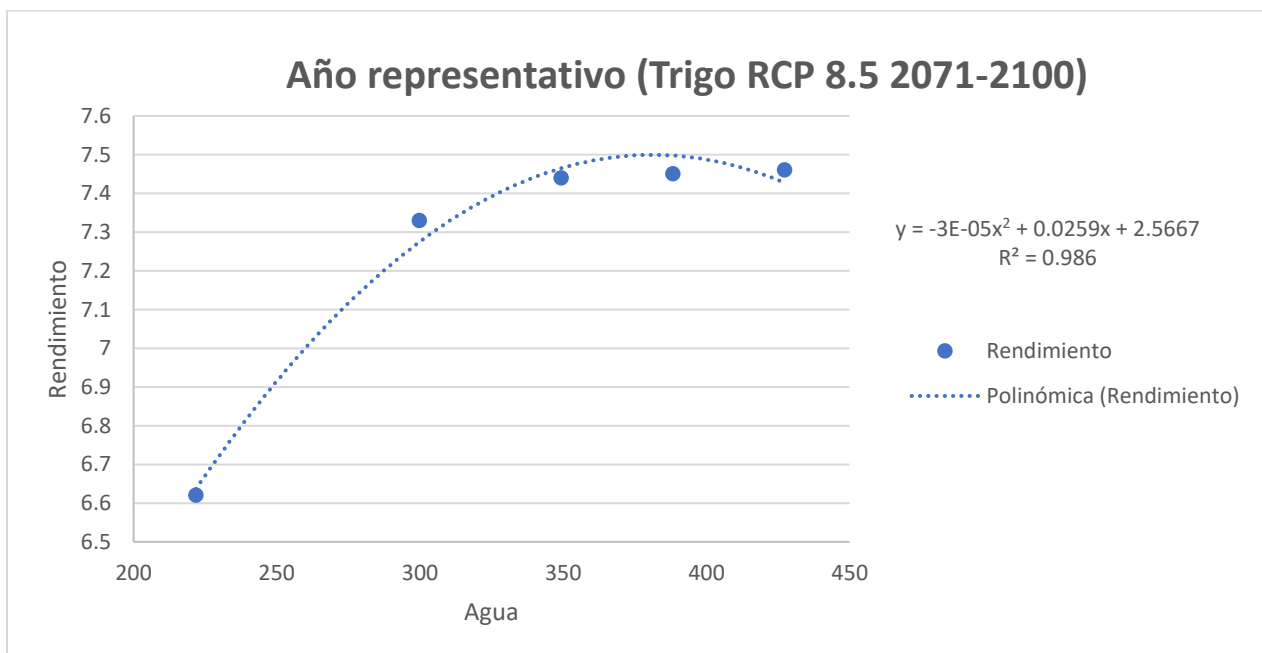


Ilustración 18. Año 2099, Trigo RCP 8.5 (2071-2100)

Tabla 20. Funciones de producción del trigo de primavera

Periodo	Año representativo	RCP	Ecuación
2041 – 2070	2057	4.5	$y = -4E-05x^2 + 0.0282x + 2.1416$
2071 – 2100	2098	4.5	$y = -3E-05x^2 + 0.0201x + 3.3017$
2041 – 2070	2060	8.5	$y = -4E-05x^2 + 0.0284x + 2.5233$
2071 – 2100	2099	8.5	$y = -3E-05x^2 + 0.0259x + 2.5667$

Siendo la variable (y) el rendimiento seco en toneladas por hectárea y la variable (x) la cantidad de agua utilizada para riego más la lluvia efectiva en milímetros.

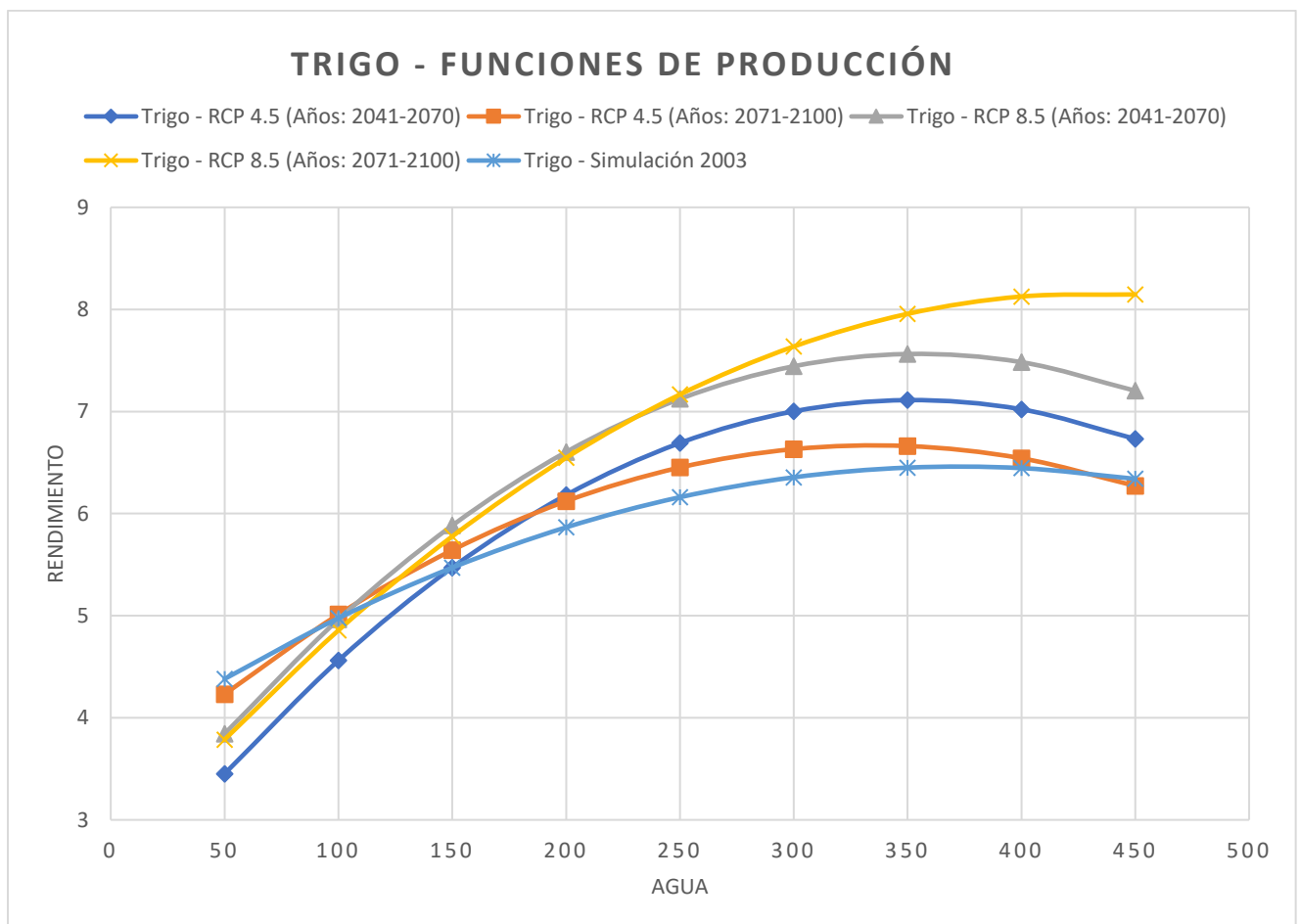


Figura 19. Funciones de producción del trigo de primavera



Simulación 2003		RCP 4.5 (Años: 41-70)		RCP 4.5 (Años: 71-00)		RCP 8.5 (Años: 41-70)		RCP 8.5 (Años: 71-00)	
Agua	Rendimiento	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif
50	4.4	3.5	-21.2%	4.2	-3.4%	3.8	-12.3%	3.8	-13.6%
100	5.0	4.6	-8.3%	5.0	0.7%	5.0	-0.2%	4.9	-2.4%
150	5.5	5.5	0.0%	5.6	3.1%	5.9	7.5%	5.8	5.6%
200	5.9	6.2	5.4%	6.1	4.4%	6.6	12.6%	6.5	11.6%
250	6.2	6.7	8.6%	6.5	4.7%	7.1	15.6%	7.2	16.3%
300	6.4	7.0	10.2%	6.6	4.3%	7.4	17.1%	7.6	20.2%
350	6.5	7.1	10.2%	6.7	3.3%	7.6	17.2%	8.0	23.3%
400	6.4	7.0	8.9%	6.5	1.5%	7.5	16.1%	8.1	26.1%
450	6.3	6.7	6.2%	6.3	-1.1%	7.2	13.6%	8.1	28.5%

Tabla 21. Comparación rendimiento del trigo de primavera

Para valores de menos de 100 mm de agua hay porcentajes negativos que indican una reducción en el rendimiento para cada uno de los escenarios estudiados, mientras que a partir de los 150mm se observan porcentajes de crecimiento en el rendimiento de hasta 28.5% como valor tope en el escenario RCP 8.5 para los años de 2071 al 2100, mientras que el escenario RCP 4.5 para los años 2071 al 2100 mantiene un comportamiento similar al del año de simulación haciendo que los porcentajes de diferencia del rendimiento sean relativamente bajos en comparación con los demás.



### 4.2.3. Girasol

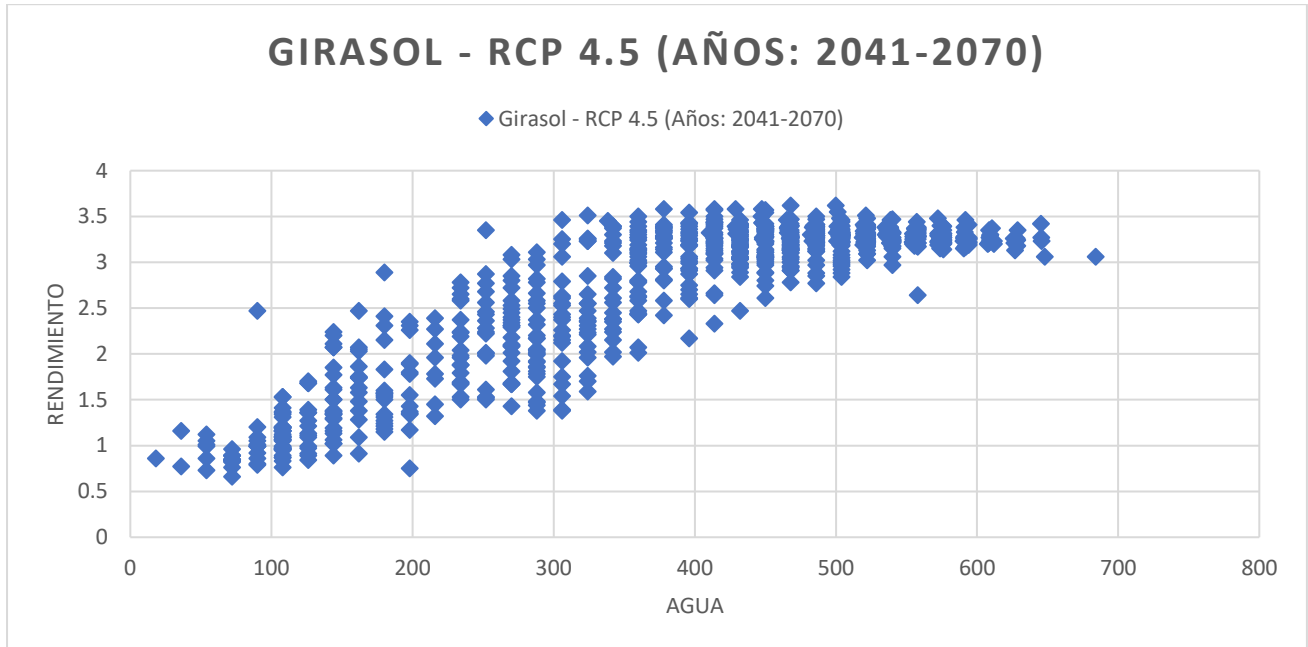


Figura 20. Girasol - RCP 4.5 (2041-2070)

Año representativo	Función de producción
<b>2068</b>	$y = -1E-05x^2 + 0.0145x - 1.6901$ $R^2 = 0.9877$

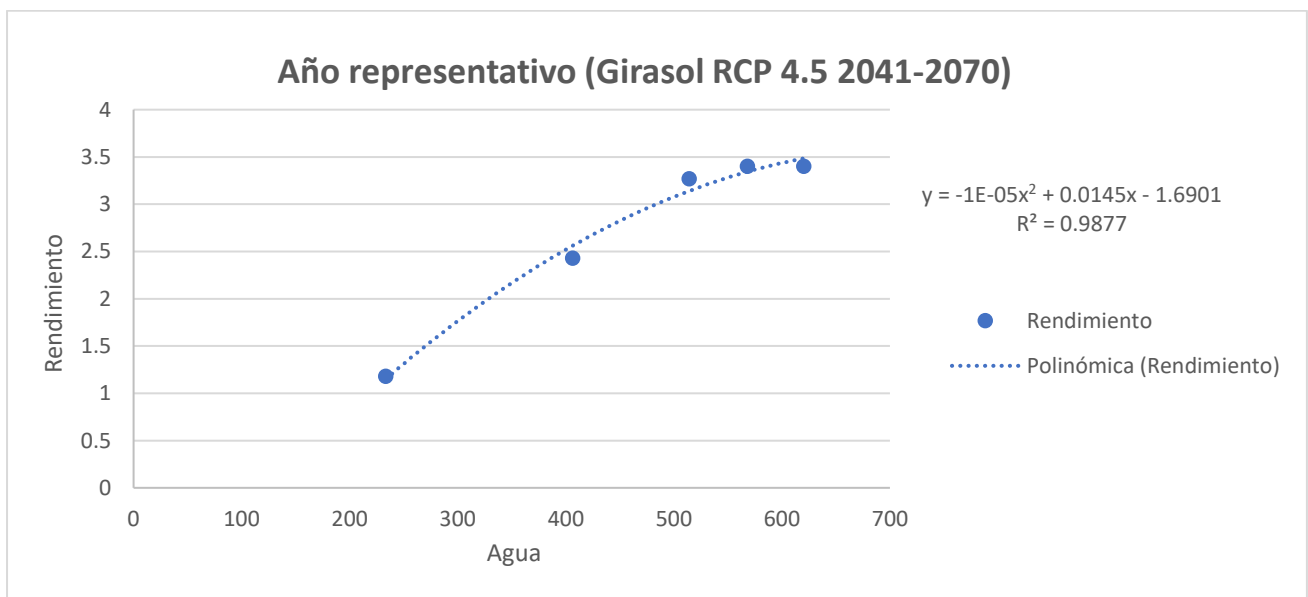


Ilustración 21. Año 2068, Girasol RCP 4.5 (2041-2070)

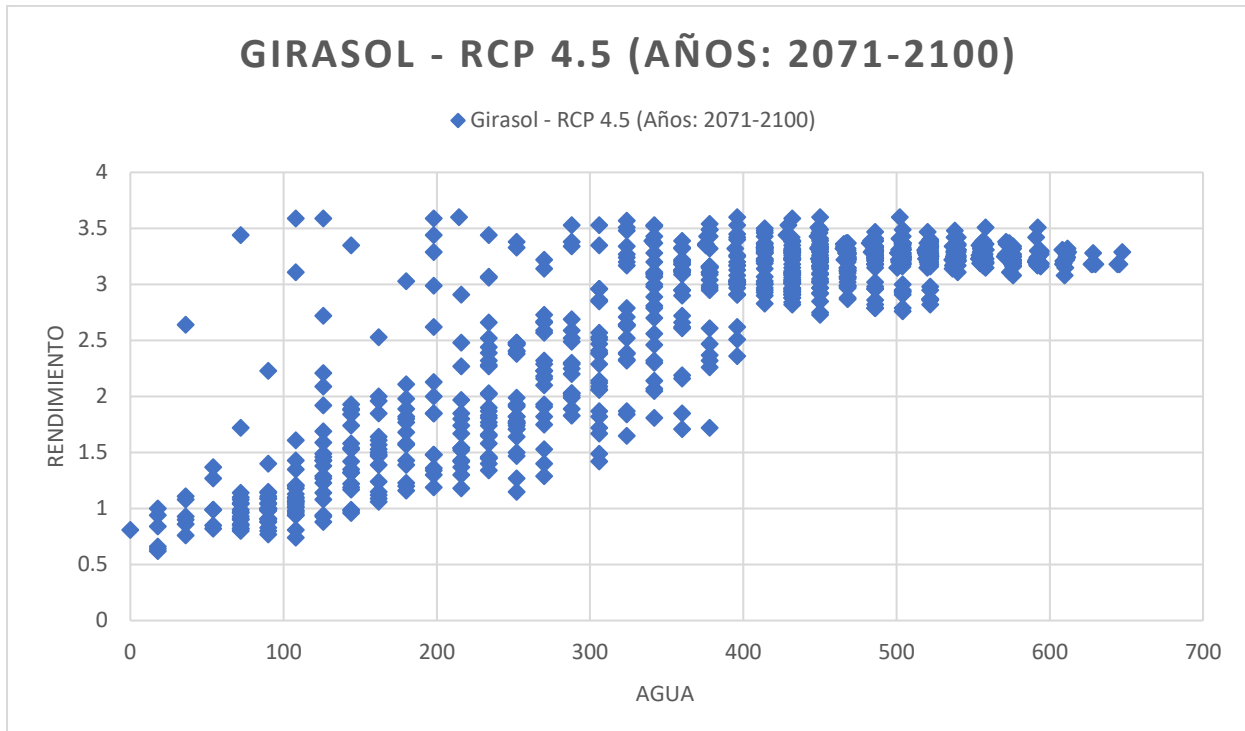


Figura 22. Girasol - RCP 4.5 (2071-2100)

Año representativo	Función de producción
<b>2093</b>	$y = 2E-06x^2 + 0.0041x + 0.0533$ $R^2 = 0.9759$

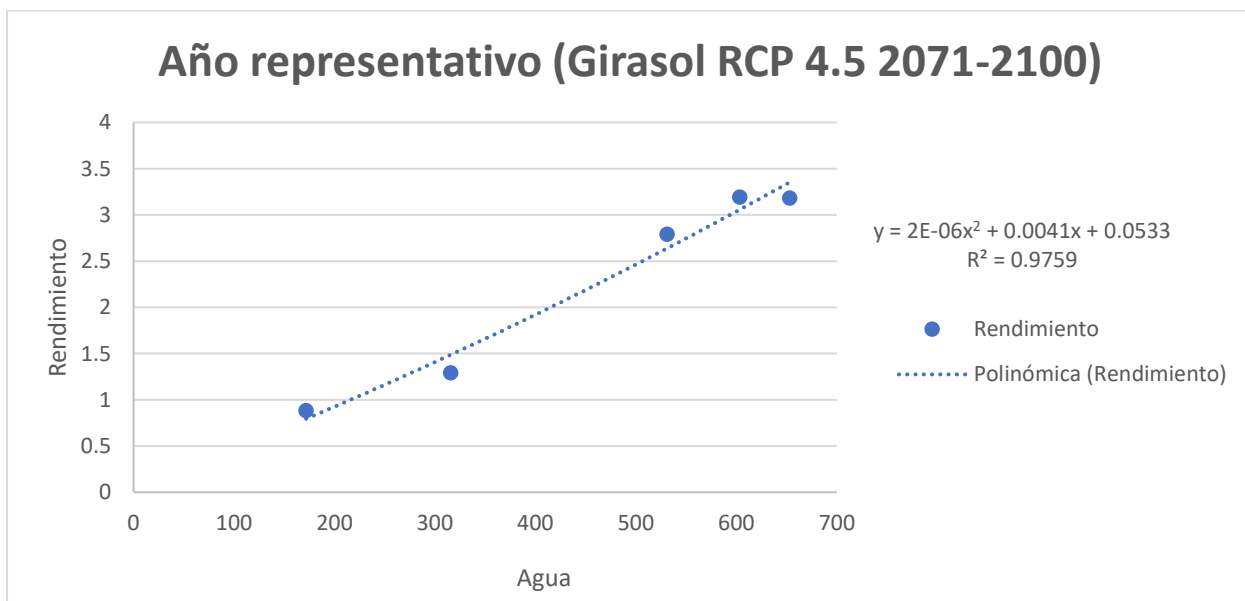


Ilustración 23. Año 2093, Girasol RCP 4.5 (2071-2100)

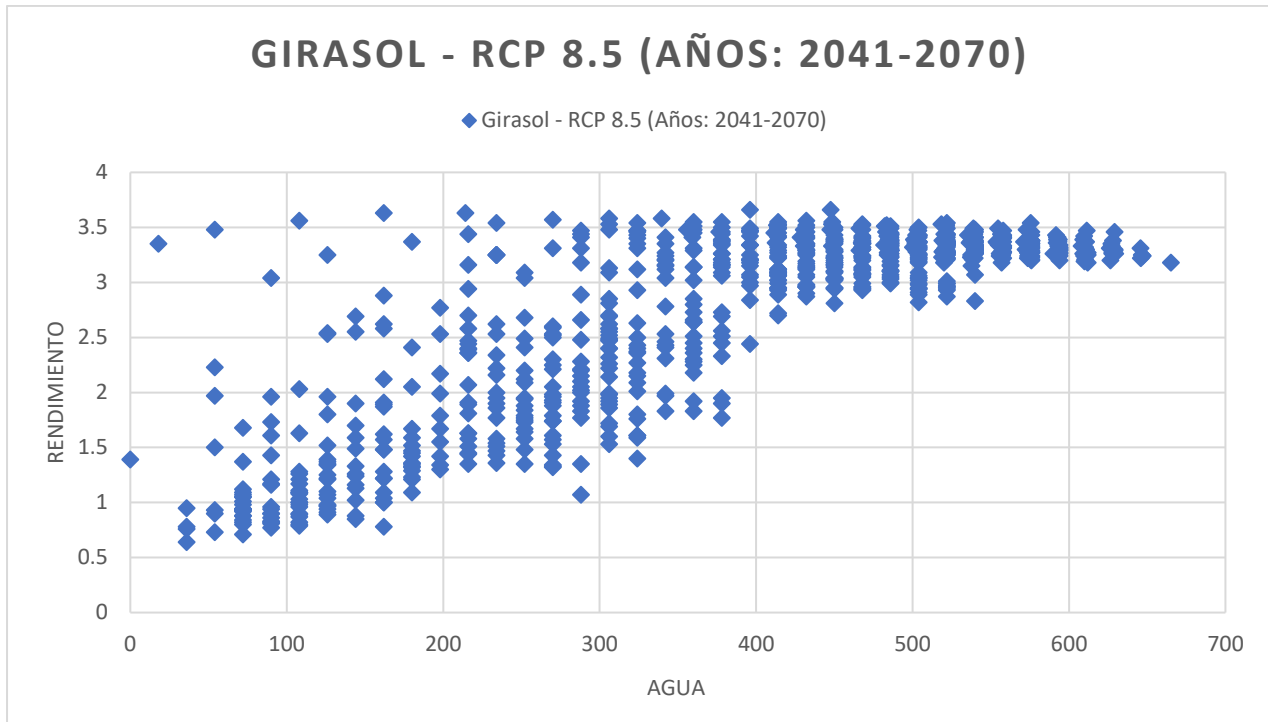


Figura 24. Girasol - RCP 8.5 (2041-2070)

Año representativo	Función de producción
<b>2056</b>	$y = -5E-06x^2 + 0.0093x - 0.3513$ $R^2 = 0.9968$

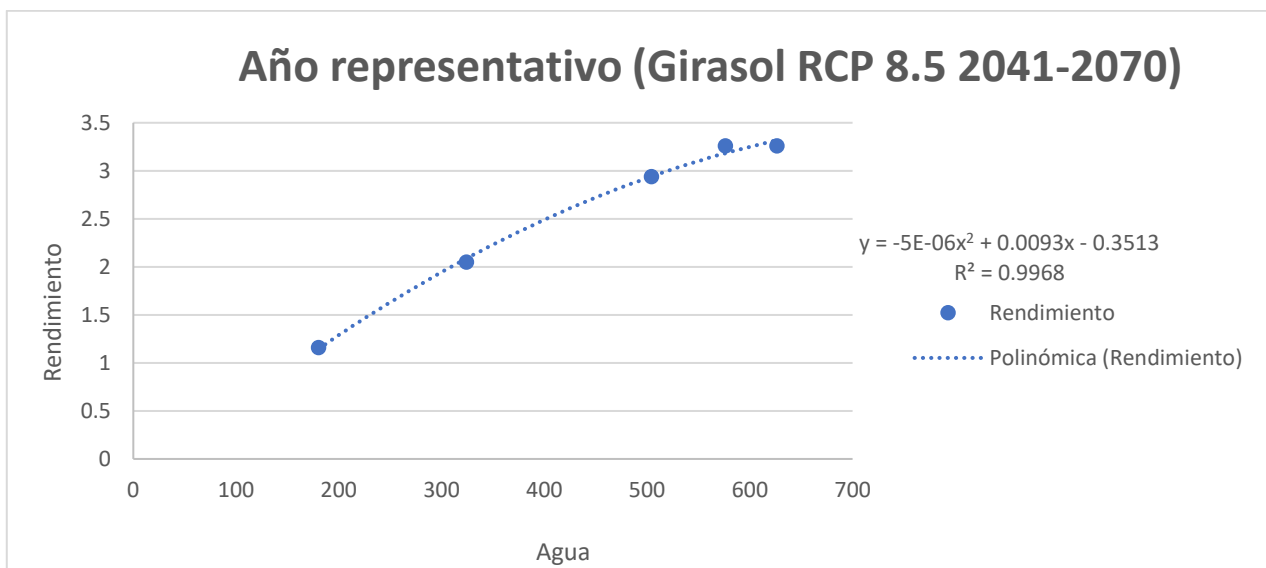


Ilustración 25 Año 2056, Girasol RCP 8.5 (2041-2070)

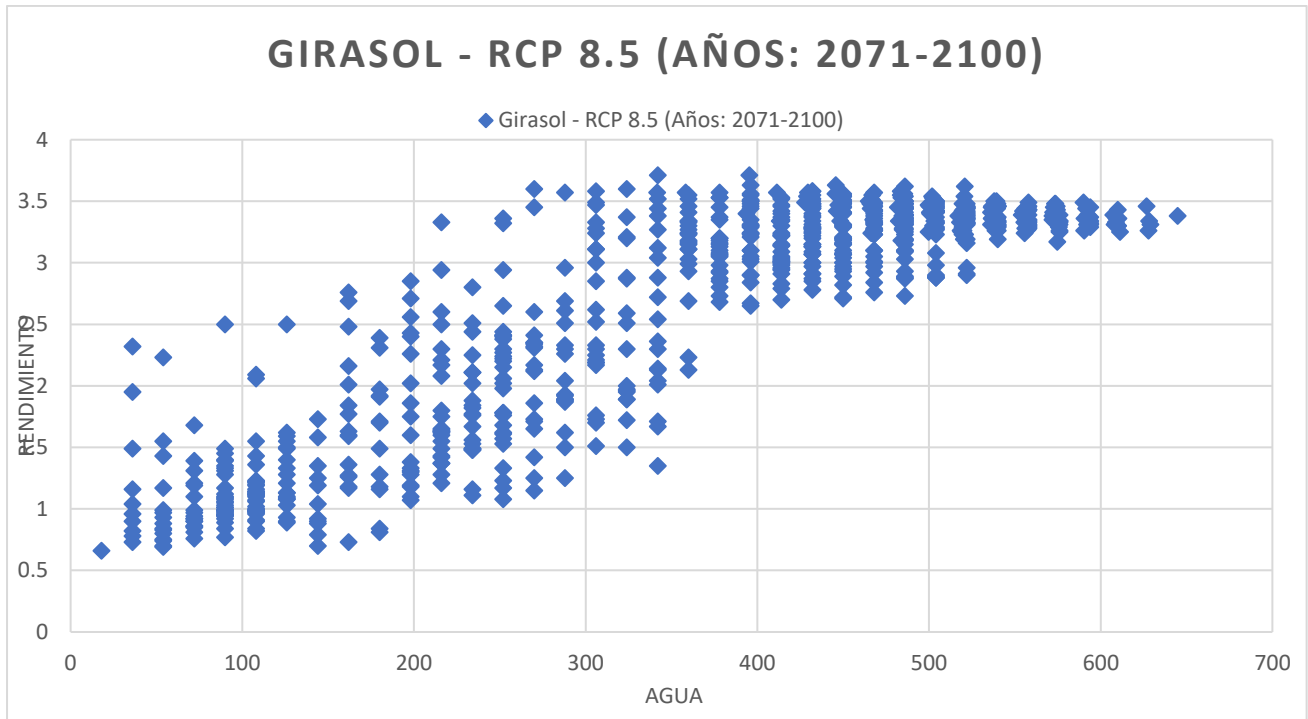


Figura 26. Girasol - RCP 8.5 (2071-2100)

Año representativo	Función de producción
<b>2088</b>	$y = 3E-06x^2 + 0.0031x + 0.3696$ $R^2 = 0.9769$

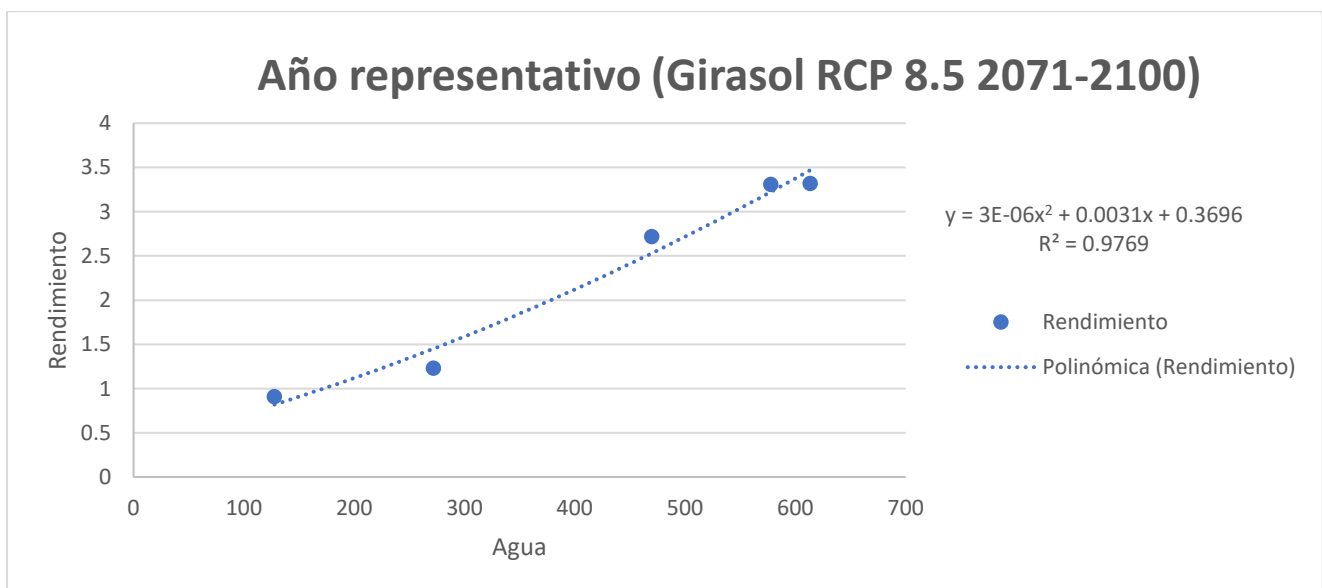


Ilustración 27. Año 2088, Girasol RCP 8.5 (2071-2100)

Tabla 22. Funciones de producción del girasol

Periodo	Año representativo	RCP	Ecuación
2041 – 2070	2068	4.5	$y = -1E-05x^2 + 0.0145x - 1.6901$
2071 – 2100	2093	4.5	$y = 2E-06x^2 + 0.0041x + 0.0533$
2041 – 2070	2056	8.5	$y = -5E-06x^2 + 0.0093x - 0.3513$
2071 – 2100	2088	8.5	$y = 3E-06x^2 + 0.0031x + 0.3696$

Siendo la variable (y) el rendimiento seco en toneladas por hectárea y la variable (x) la cantidad de agua utilizada para riego más la lluvia efectiva en milímetros.

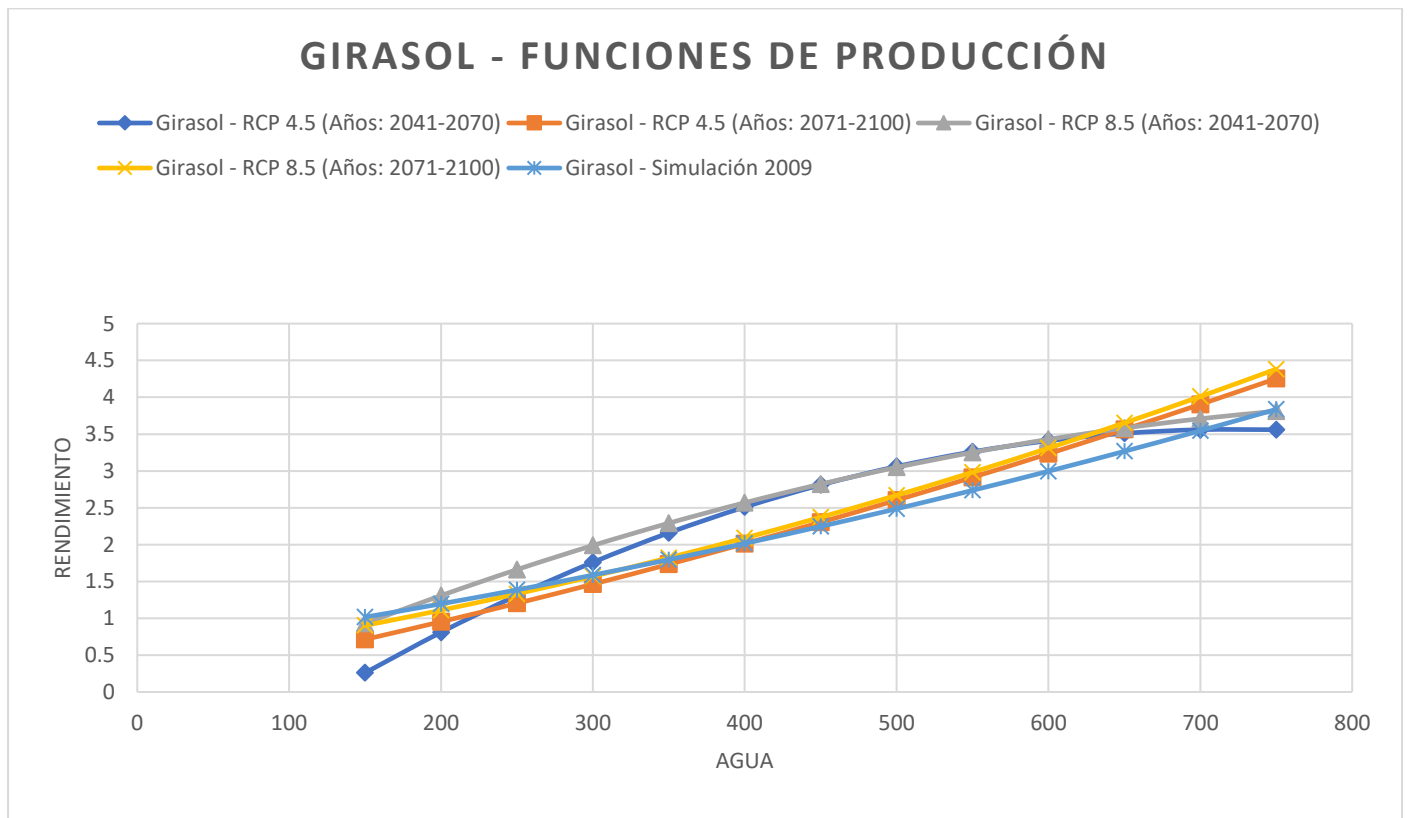


Figura 28. Funciones de producción del girasol



Tabla 23 Comparación rendimiento del girasol

Simulación 2009		RCP 4.5 (Años: 41-70)		RCP 4.5 (Años: 71-00)		RCP 8.5 (Años: 41-70)		RCP 8.5 (Años: 71-00)	
Agua	Rendimiento	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif
150	1.02	0.3	-74.4%	0.71	-29.8%	0.9	-8.4%	0.9	-11.2%
200	1.20	0.8	-32.3%	0.95	-20.3%	1.3	9.4%	1.1	-7.2%
250	1.39	1.3	-5.5%	1.20	-13.2%	1.7	19.8%	1.3	-3.9%
300	1.59	1.8	11.0%	1.46	-7.7%	2.0	25.4%	1.6	-1.0%
350	1.80	2.2	20.2%	1.73	-3.5%	2.3	27.6%	1.8	1.4%
400	2.02	2.5	24.5%	2.01	-0.1%	2.6	27.4%	2.1	3.6%
450	2.25	2.8	25.1%	2.30	2.5%	2.8	25.6%	2.4	5.6%
500	2.49	3.1	23.1%	2.60	4.7%	3.0	22.6%	2.7	7.4%
550	2.74	3.3	19.1%	2.91	6.5%	3.3	18.8%	3.0	9.0%
600	3.00	3.41	13.8%	3.23	7.9%	3.43	14.4%	3.31	10.5%
650	3.27	3.51	7.5%	3.56	9.1%	3.58	9.6%	3.65	11.8%
700	3.55	3.56	0.4%	3.90	10.1%	3.71	4.6%	4.01	13.1%
750	3.84	3.56	-7.2%	4.25	10.9%	3.81	-0.7%	4.38	14.2%

Debido al comportamiento de algunas funciones de producción que tienen forma tendiendo hacia una recta y otras con forma de parábolas, se tienen reducciones en el rendimiento para una misma cantidad de agua de hasta un 74% pero para dosis de riego bien bajas, mientras que a medida que la cantidad de agua va subiendo se experimentan aumentos en el rendimiento para las que se comportan en forma parabólica.

#### 4.2.4. Cebolla

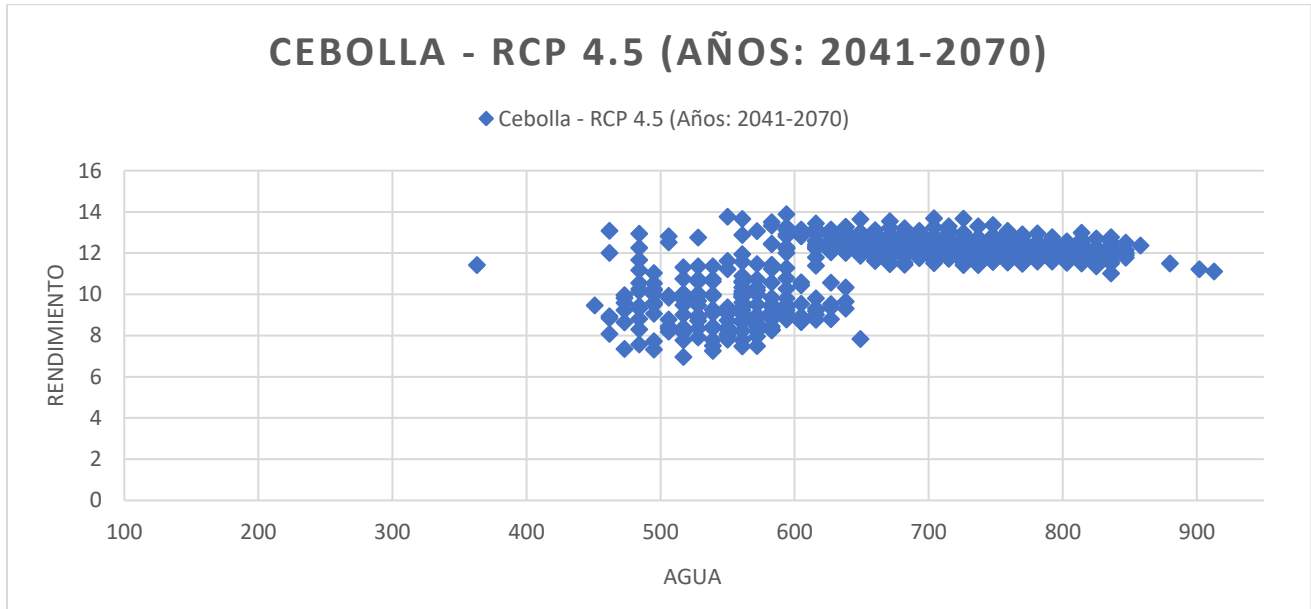


Figura 29. Cebolla - RCP 4.5 (2041-2070)

Año representativo	Función de producción
<b>2061</b>	$y = -7E-05x^2 + 0.113x - 37.172$ $R^2 = 0.9955$

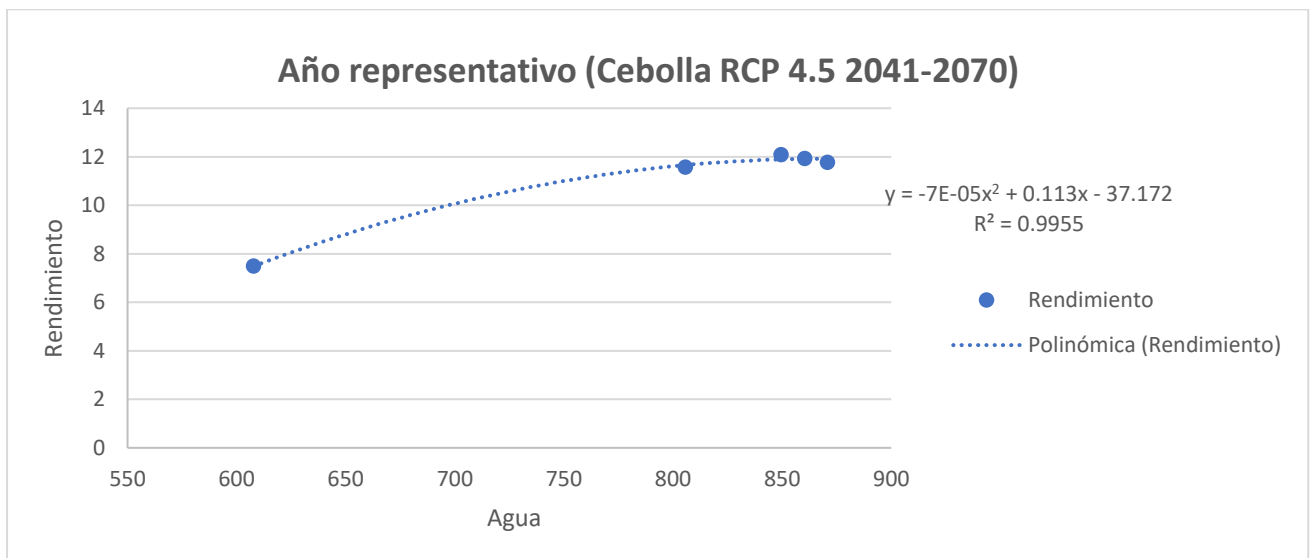


Ilustración 30. Año 2061, Cebolla RCP 4.5 (2041-2070)

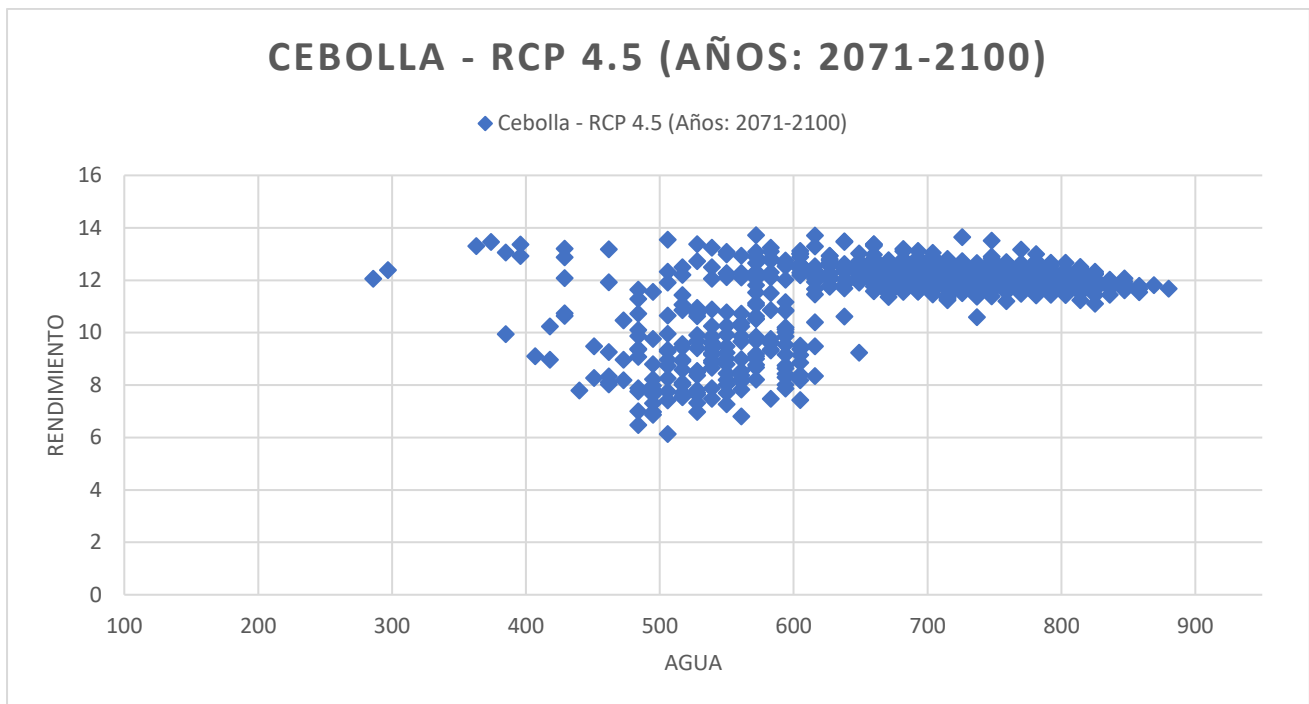


Figura 31. Cebolla - RCP 4.5 (2071-2100)

Año representativo	Función de producción
<b>2092</b>	$y = -7E-05x^2 + 0.1246x - 40.811$ $R^2 = 0.9974$

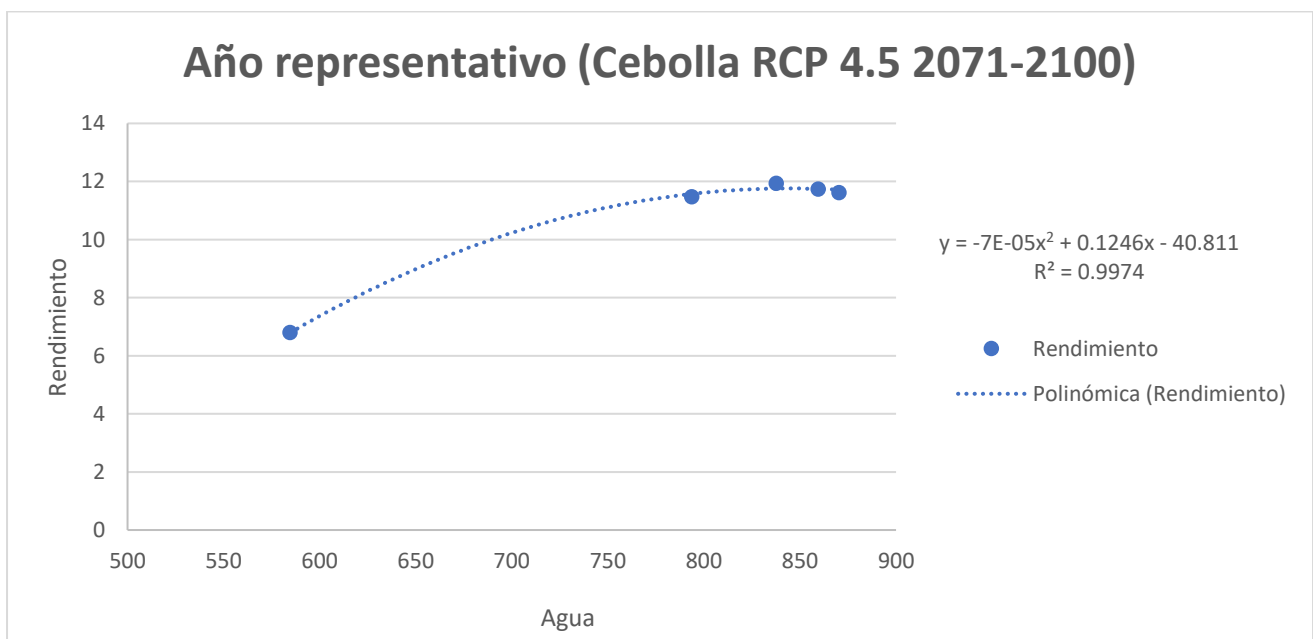


Ilustración 32. Año 2092, Cebolla RCP 4.5 (2071-2100)



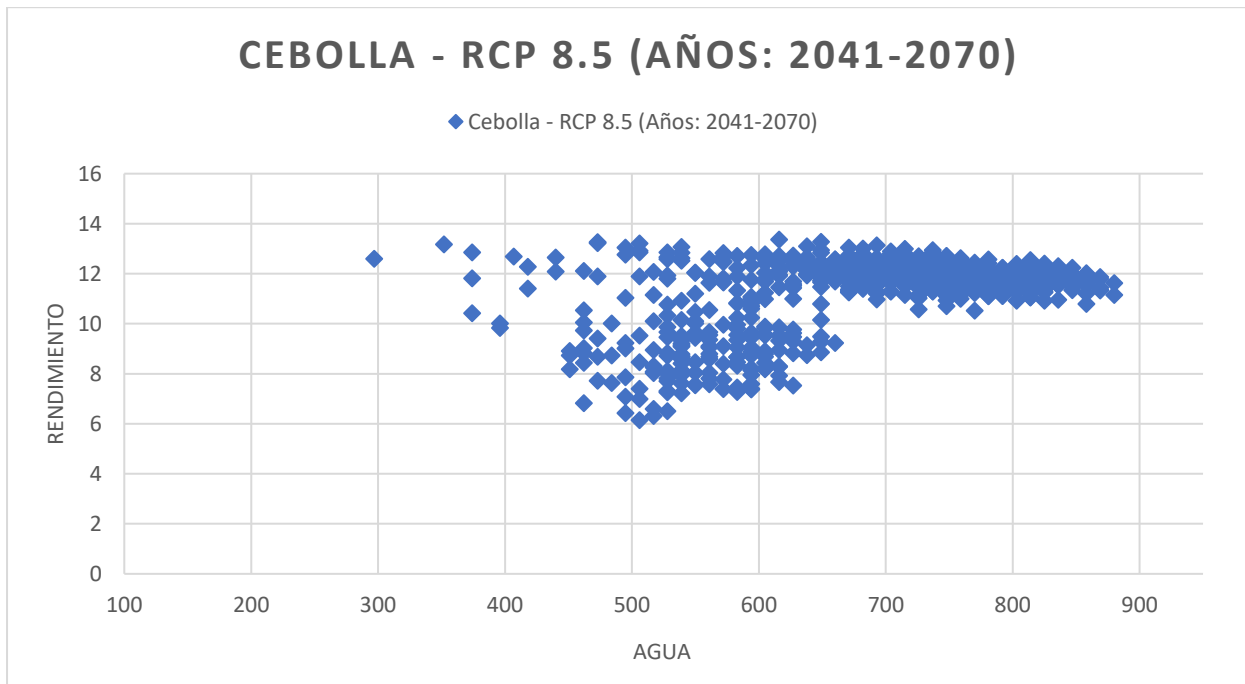


Figura 33. Cebolla - RCP 8.5 (2041-2070)

Año representativo	Función de producción
<b>2053</b>	$y = -9E-05x^2 + 0.1397x - 44.781$ $R^2 = 0.9963$

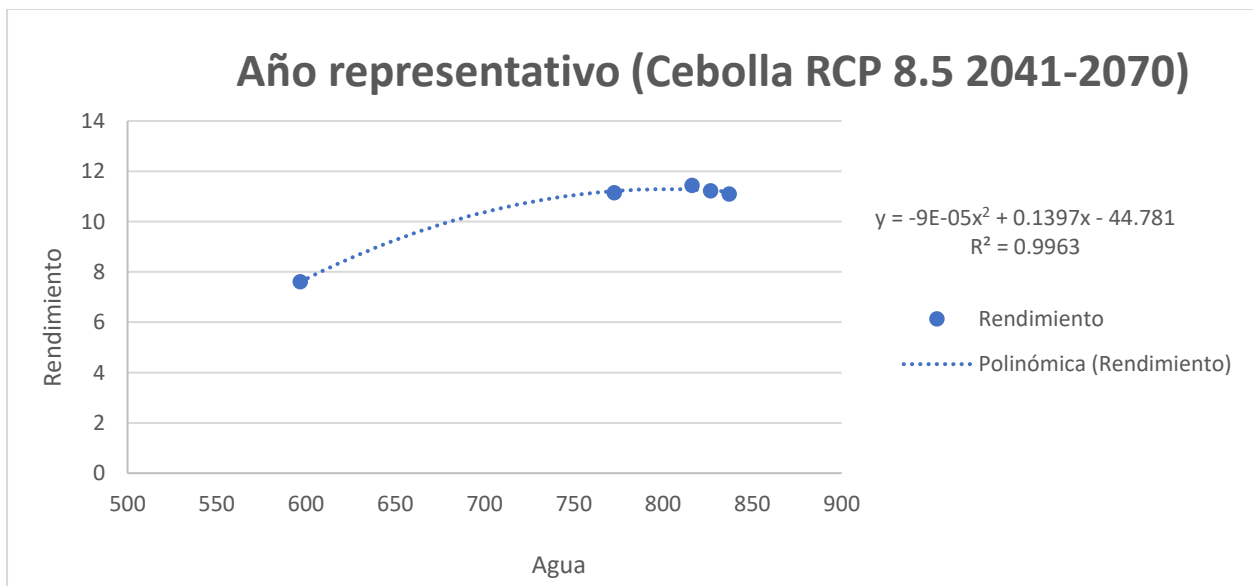


Ilustración 34. Año 2053, Cebolla RCP 8.5 (2041-2070)

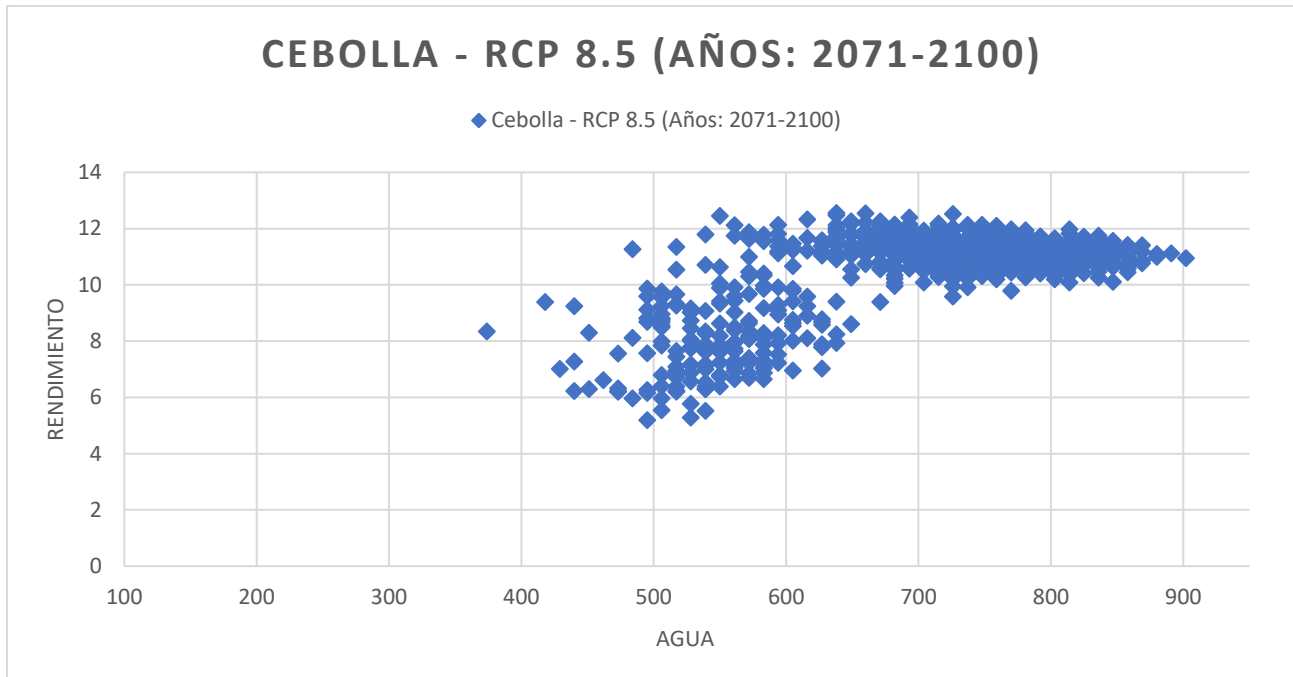


Figura 35. Cebolla - RCP 8.5 (2071-2100)

Año representativo	Función de producción
<b>2089</b>	$y = -6E-05x^2 + 0.1113x - 42.571$ $R^2 = 0.9881$

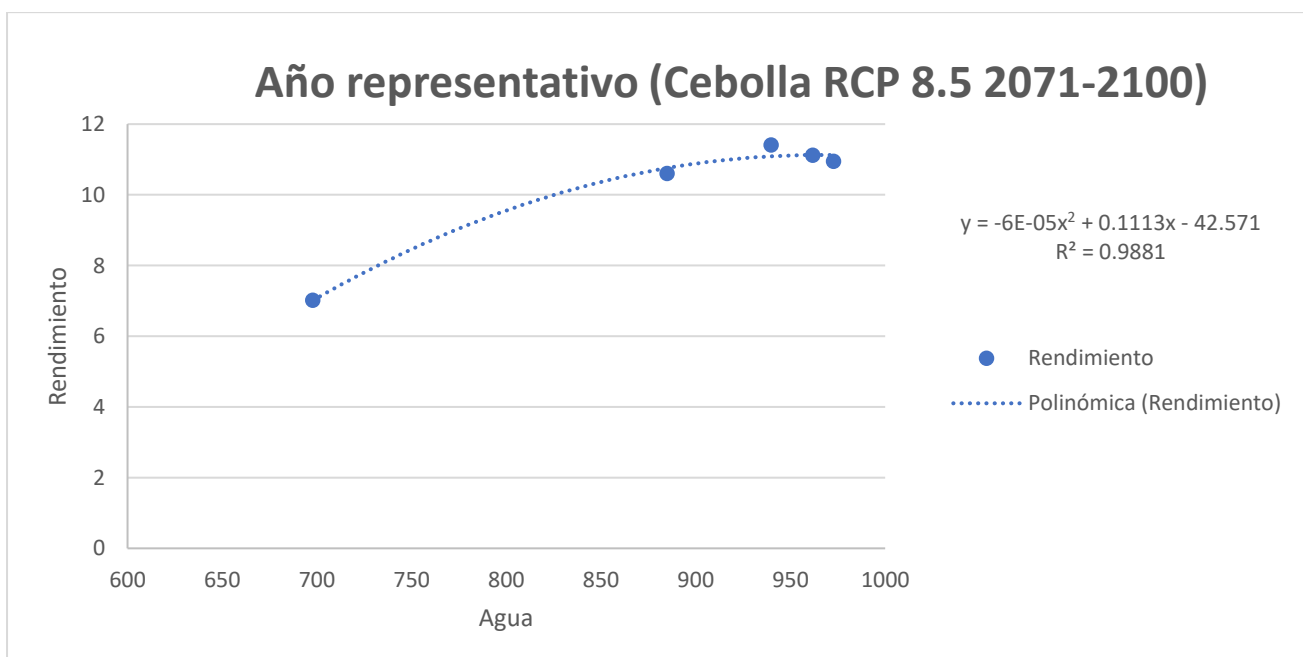


Ilustración 36. Año 2089, Cebolla RCP 8.5 (2071-2100)

Tabla 24. Funciones de producción de la cebolla

Periodo	Año representativo	RCP	Ecuación
2041 – 2070	2061	4.5	$y = -7E-05x^2 + 0.113x - 37.172$
2071 – 2100	2092	4.5	$y = -7E-05x^2 + 0.1246x - 40.811$
2041 – 2070	2053	8.5	$y = -9E-05x^2 + 0.1397x - 44.781$
2071 – 2100	2089	8.5	$y = -6E-05x^2 + 0.1113x - 42.571$

Siendo la variable (y) el rendimiento seco en toneladas por hectárea y la variable (x) la cantidad de agua utilizada para riego más la lluvia efectiva en milímetros.

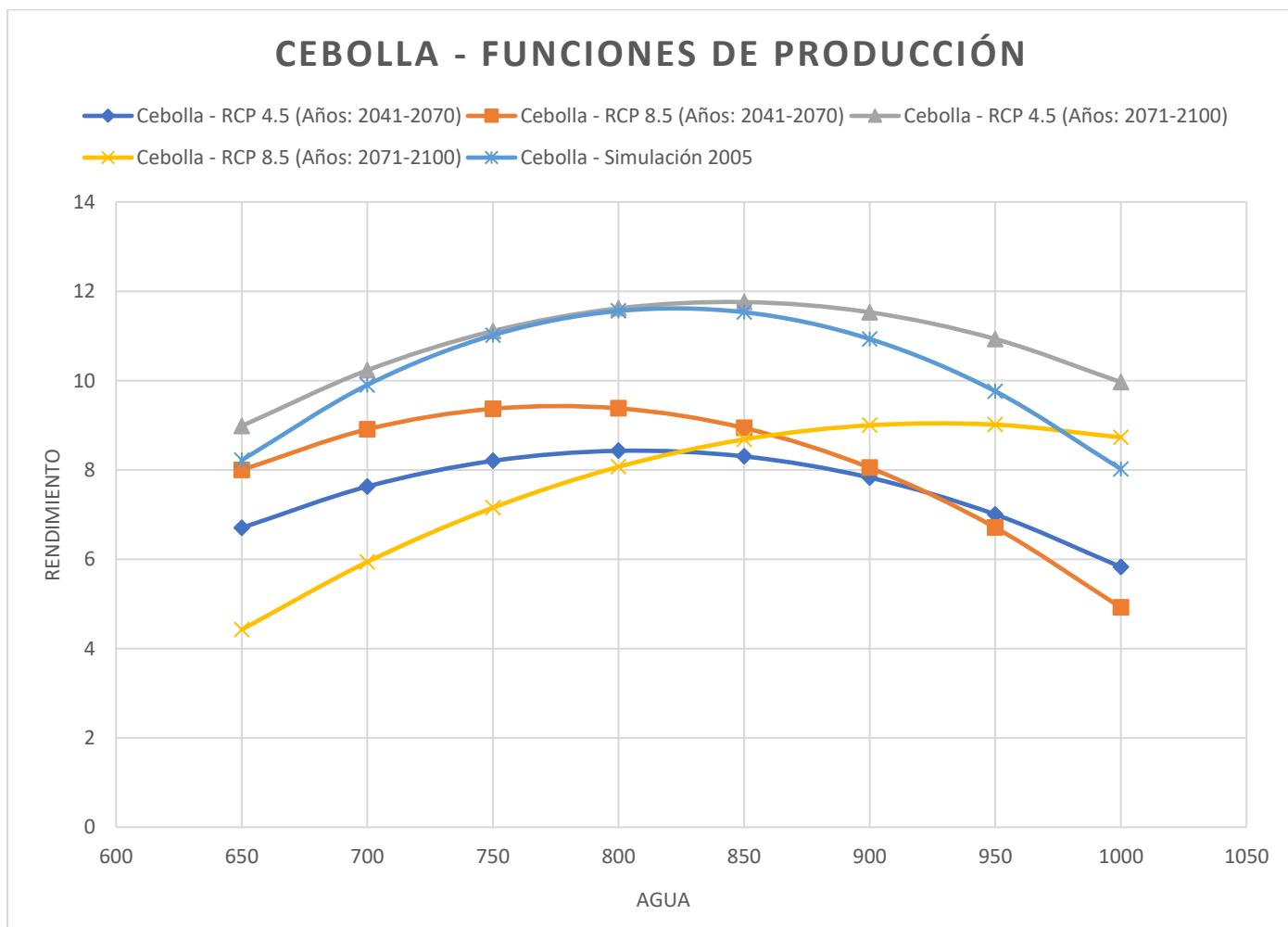


Figura 37. Funciones de producción de la cebolla

Tabla 25. Comparación rendimiento de la cebolla

Simulación 2005		RCP 4.5 (Años: 41-70)		RCP 4.5 (Años: 71-00)		RCP 8.5 (Años: 41-70)		RCP 8.5 (Años: 71-00)	
Agua	Rendimiento	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif	Rendimiento	%dif
650	8.22	6.7	-18.4%	8.98	9.3%	8.0	-2.7%	4.4	-46.2%
700	9.90	7.6	-23.0%	10.23	3.3%	8.9	-10.0%	5.9	-40.0%
750	11.02	8.2	-25.5%	11.11	0.8%	9.4	-15.0%	7.2	-35.1%
800	11.56	8.4	-27.1%	11.62	0.5%	9.4	-18.9%	8.1	-30.2%
850	11.53	8.3	-28.0%	11.76	2.0%	8.9	-22.5%	8.7	-24.7%
900	10.93	7.8	-28.4%	11.53	5.5%	8.0	-26.4%	9.0	-17.7%
950	9.76	7.0	-28.3%	10.93	12.0%	6.7	-31.3%	9.0	-7.7%
1000	8.02	5.8	-27.3%	9.96	24.3%	4.9	-38.7%	8.7	8.8%

Se obtuvo como resultado porcentajes de reducción del rendimiento para cada uno de los escenarios excepto el RCP 4.5 (2071-2100) que tiene una forma muy similar a la obtenida en el año de simulación haciendo que para algunas cantidades de agua suministrada obtenga porcentajes superiores, así como también cabe resaltar el escenario RCP 8.5 (2071-2100) que tiene una forma diferente a las demás curvas, haciendo que el rendimiento necesite de dosis más altas para que empiece a desarrollarse.

Hay que señalar que los máximos de las funciones de producción determinan que solo para el RCP 4.5 del 2071-2100 se podría llegar a los 10.89 ton/ha de rendimiento obtenido en el estudio analizado.

### 4.3. Análisis de la varianza (ANOVA) y medias por mínimos cuadrados

Para cada uno de los cultivos se realiza un análisis de la varianza (ANOVA) multifactorial con el objetivo de descomponer la variabilidad del rendimiento debido a las contribuciones de los factores de estrategia de riego (A, B, C, D y E), la trayectoria RCP (4.5 y 8.5) y la interacción entre ambos para determinar si tienen o no un efecto estadísticamente significativo sobre el valor del rendimiento, utilizando el programa STATGRAPHICS Centurion XVII.

Además de que se tabulan y grafican los valores de las medias por mínimos cuadrados con intervalo de confianza del 95% de cada uno de los cultivos.

#### 4.3.1. Trigo de primavera

Tabla 26. Varianza para rendimiento del trigo de primavera - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Riego	141.353	4	35.3383	324.30	<b>0.0000</b>
B:RCP	114.006	1	114.006	1046.24	<b>0.0000</b>
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	0.627291	4	0.156823	1.44	0.2183
RESIDUOS	384.654	3530	0.108967		
TOTAL (CORREGIDO)	640.64	3539			

Puesto que 2 valores-P son menores que 0.05, los factores de riego y RCP tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Rendimiento con un 95.0% de nivel de confianza, mientras que la interacción entre ambos, no.

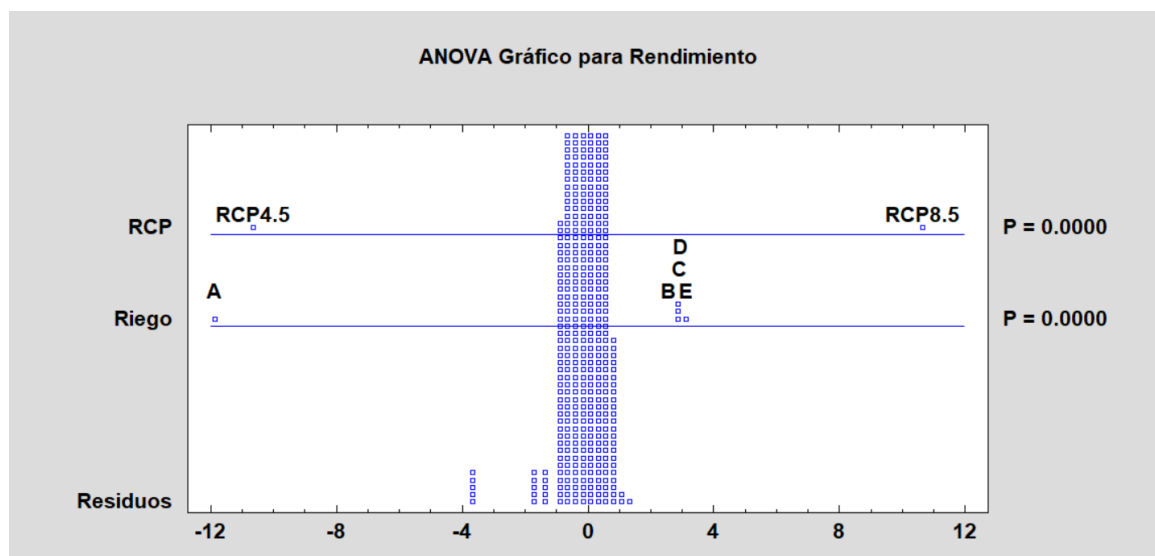


Figura 38. Varianza para rendimiento del trigo de primavera

Tabla 27. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del trigo de primavera

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	3540	7.51364			
Riego					
A	708	7.11403	0.012406	7.08971	7.13834
B	708	7.61014	0.012406	7.58583	7.63446
C	708	7.61213	0.012406	7.58782	7.63645
D	708	7.6134	0.012406	7.58909	7.63772
E	708	7.61849	0.012406	7.59417	7.6428
RCP					
RCP4.5	1770	7.33418	0.00784623	7.3188	7.34956
RCP8.5	1770	7.6931	0.00784623	7.67772	7.70847
Riego por RCP					
A,RCP4.5	354	6.96113	0.0175447	6.92674	6.99552
A,RCP8.5	354	7.26692	0.0175447	7.23253	7.30131
B,RCP4.5	354	7.42573	0.0175447	7.39135	7.46012
B,RCP8.5	354	7.79455	0.0175447	7.76016	7.82894
C,RCP4.5	354	7.42508	0.0175447	7.3907	7.45947
C,RCP8.5	354	7.79918	0.0175447	7.76479	7.83357
D,RCP4.5	354	7.42681	0.0175447	7.39242	7.46119
D,RCP8.5	354	7.8	0.0175447	7.76561	7.83439
E,RCP4.5	354	7.43215	0.0175447	7.39776	7.46653
E,RCP8.5	354	7.80483	0.0175447	7.77044	7.83922

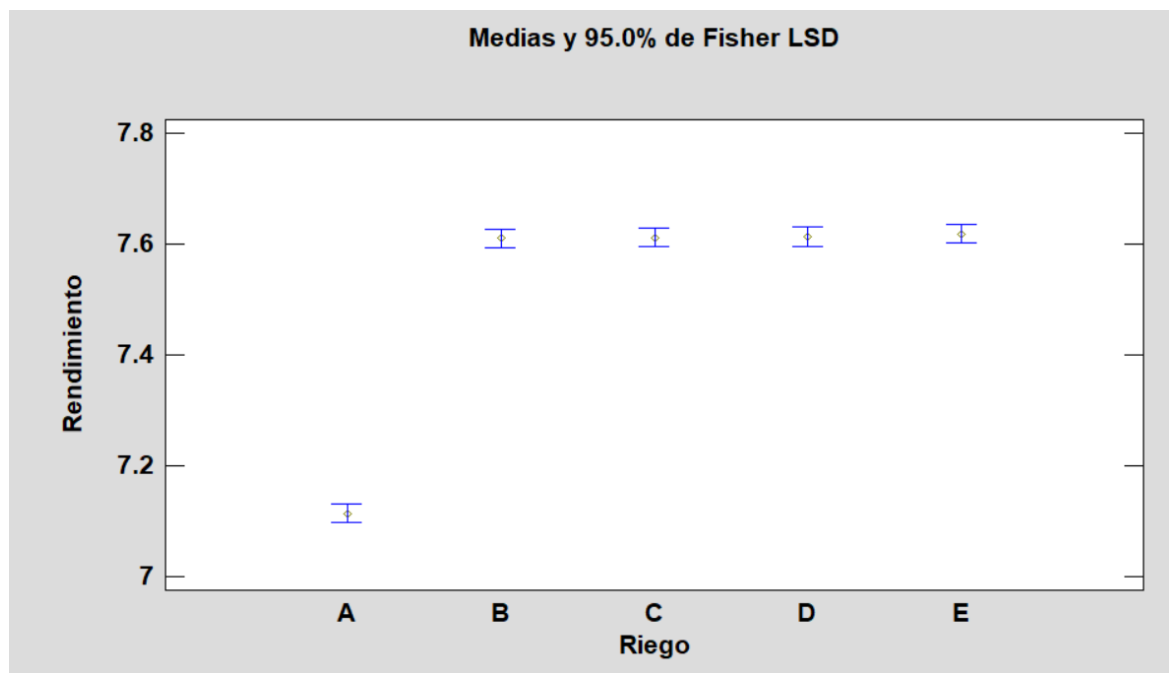


Figura 39. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del trigo de primavera

### 4.3.2. Girasol

Tabla 28. Varianza para rendimiento del girasol - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Riego	2083.36	4	520.839	4030.98	<b>0.0000</b>
B:RCP	0.0136055	1	0.0136055	0.11	0.7456
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	5.12357	4	1.28089	9.91	<b>0.0000</b>
RESIDUOS	456.108	3530	0.129209		
TOTAL (CORREGIDO)	2544.6	3539			

Puesto que 2 valores-P son menores que 0.05, los factores de riego y la interacción entre el riego y la trayectoria RCP tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Rendimiento con un 95.0% de nivel de confianza, mientras la trayectoria RCP de manera individual, no.

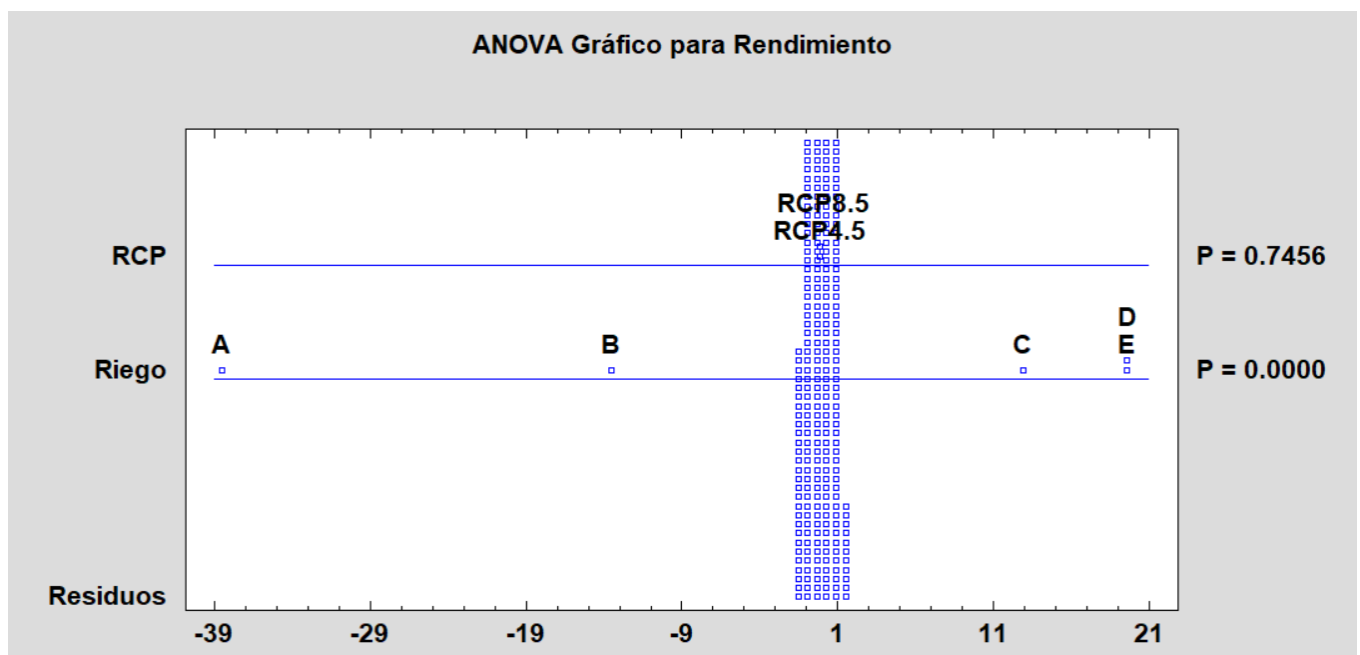


Figura 40. Varianza para rendimiento del girasol

Tabla 29. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del girasol

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	3540	2.68035			
Riego					
A	708	1.38489	0.0135092	1.35841	1.41136
B	708	2.22431	0.0135092	2.19783	2.25079
C	708	3.11407	0.0135092	3.08759	3.14055
D	708	3.33966	0.0135092	3.31318	3.36614
E	708	3.33883	0.0135092	3.31235	3.36531
RCP					
RCP4.5	1770	2.67839	0.00854397	2.66164	2.69514
RCP8.5	1770	2.68231	0.00854397	2.66556	2.69906
Riego por RCP					
A,RCP4.5	354	1.39763	0.0191049	1.36018	1.43507
A,RCP8.5	354	1.37215	0.0191049	1.3347	1.40959
B,RCP4.5	354	2.28732	0.0191049	2.24987	2.32476
B,RCP8.5	354	2.1613	0.0191049	2.12385	2.19874
C,RCP4.5	354	3.10689	0.0191049	3.06945	3.14434
C,RCP8.5	354	3.12124	0.0191049	3.0838	3.15869
D,RCP4.5	354	3.30105	0.0191049	3.2636	3.33849
D,RCP8.5	354	3.37828	0.0191049	3.34083	3.41572
E,RCP4.5	354	3.29907	0.0191049	3.26162	3.33651
E,RCP8.5	354	3.37859	0.0191049	3.34114	3.41603

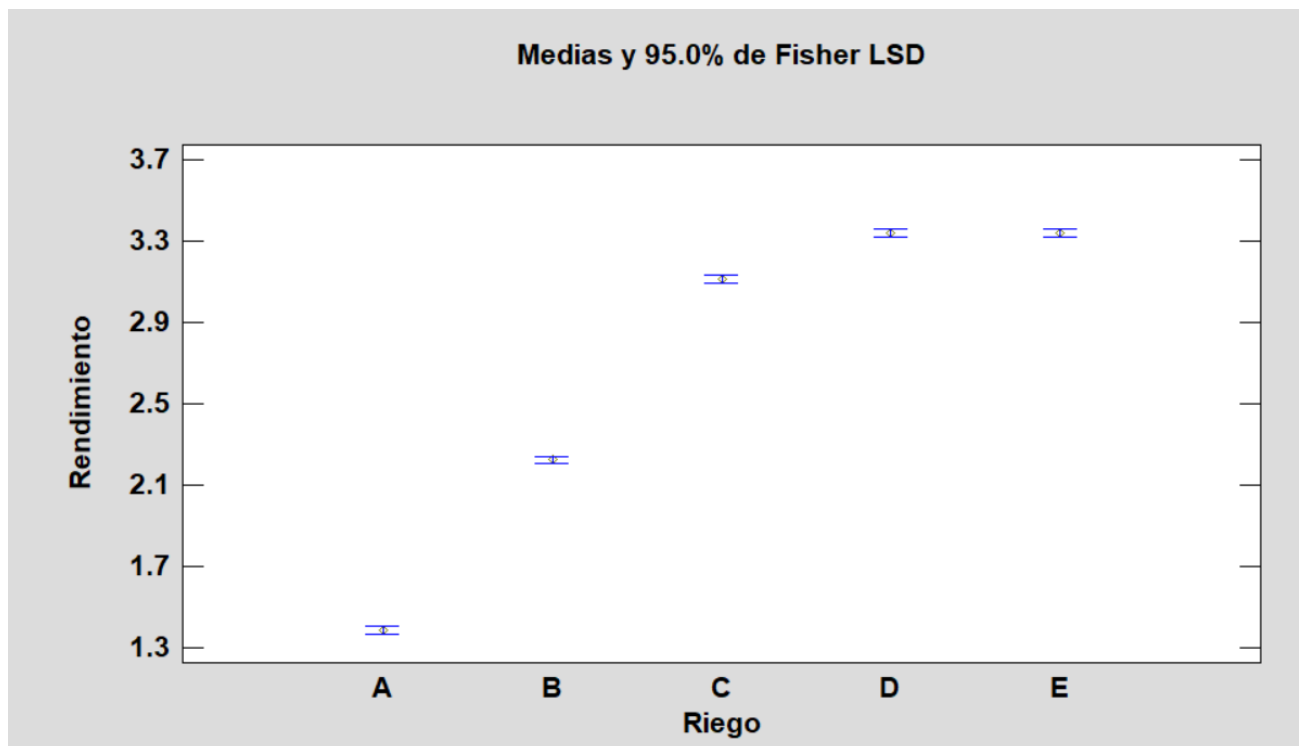


Figura 41. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento del girasol



### 4.3.3. Cebolla

Tabla 30. Varianza para rendimiento de la cebolla - suma de cuadrados tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Riego	4861.84	4	1215.46	2211.04	<b>0.0000</b>
B:RCP	382.509	1	382.509	695.82	<b>0.0000</b>
<b>INTERACCIONES</b>					
AB	4.38633	4	1.09658	1.99	0.0926
RESIDUOS	1940.52	3530	0.549723		
TOTAL (CORREGIDO)	7189.26	3539			

Puesto que 2 valores-P son menores que 0.05, los factores de riego y RCP tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Rendimiento con un 95.0% de nivel de confianza, mientras que la interacción entre ambos, no.

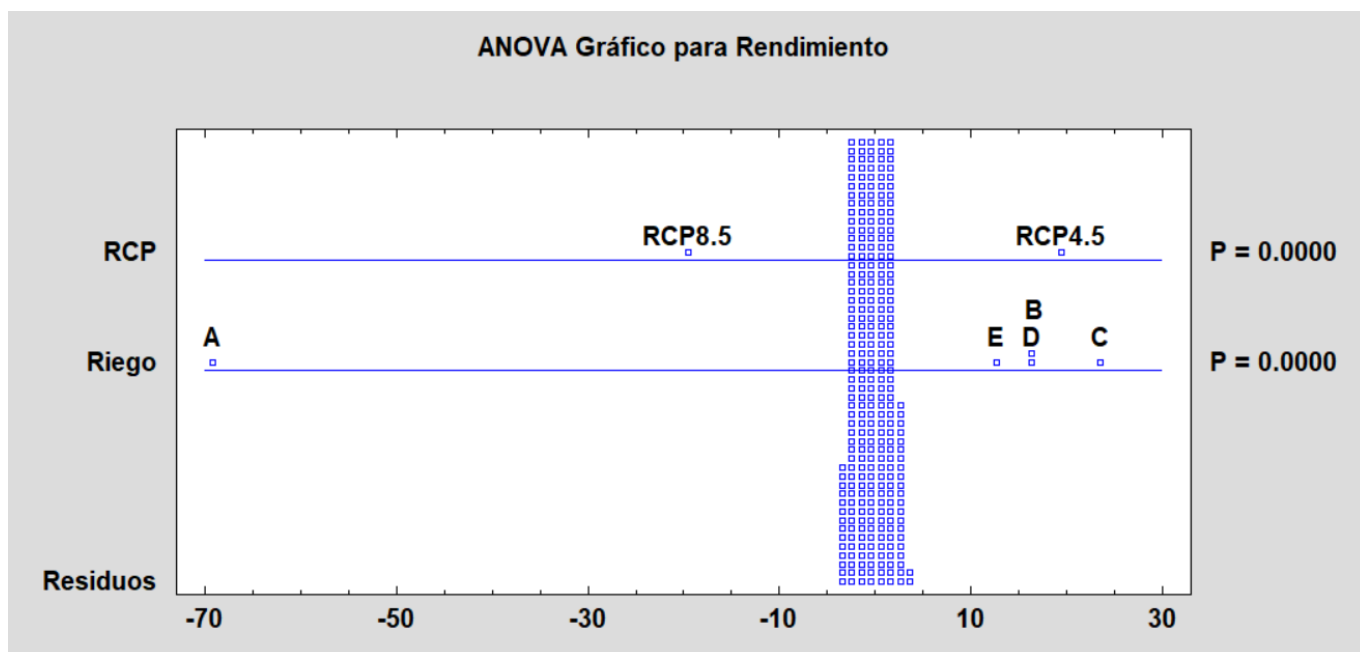


Figura 42. Varianza para rendimiento de la cebolla

Tabla 31. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento de la cebolla

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	3540	11.3084			
Riego					
A	708	8.9765	0.0278648	8.92188	9.03111
B	708	11.8677	0.0278648	11.8131	11.9223
C	708	12.101	0.0278648	12.0464	12.1556
D	708	11.8607	0.0278648	11.8061	11.9153
E	708	11.7363	0.0278648	11.6817	11.7909
RCP					
RCP4.5	1770	11.6372	0.0176232	11.6026	11.6717
RCP8.5	1770	10.9797	0.0176232	10.9452	11.0143
Riego por RCP					
A,RCP4.5	354	9.35977	0.0394067	9.28254	9.43701
A,RCP8.5	354	8.59322	0.0394067	8.51598	8.67046
B,RCP4.5	354	12.2251	0.0394067	12.1478	12.3023
B,RCP8.5	354	11.5103	0.0394067	11.4331	11.5875
C,RCP4.5	354	12.396	0.0394067	12.3188	12.4733
C,RCP8.5	354	11.806	0.0394067	11.7288	11.8833
D,RCP4.5	354	12.1605	0.0394067	12.0833	12.2378
D,RCP8.5	354	11.5609	0.0394067	11.4837	11.6382
E,RCP4.5	354	12.0444	0.0394067	11.9672	12.1217
E,RCP8.5	354	11.4282	0.0394067	11.3509	11.5054

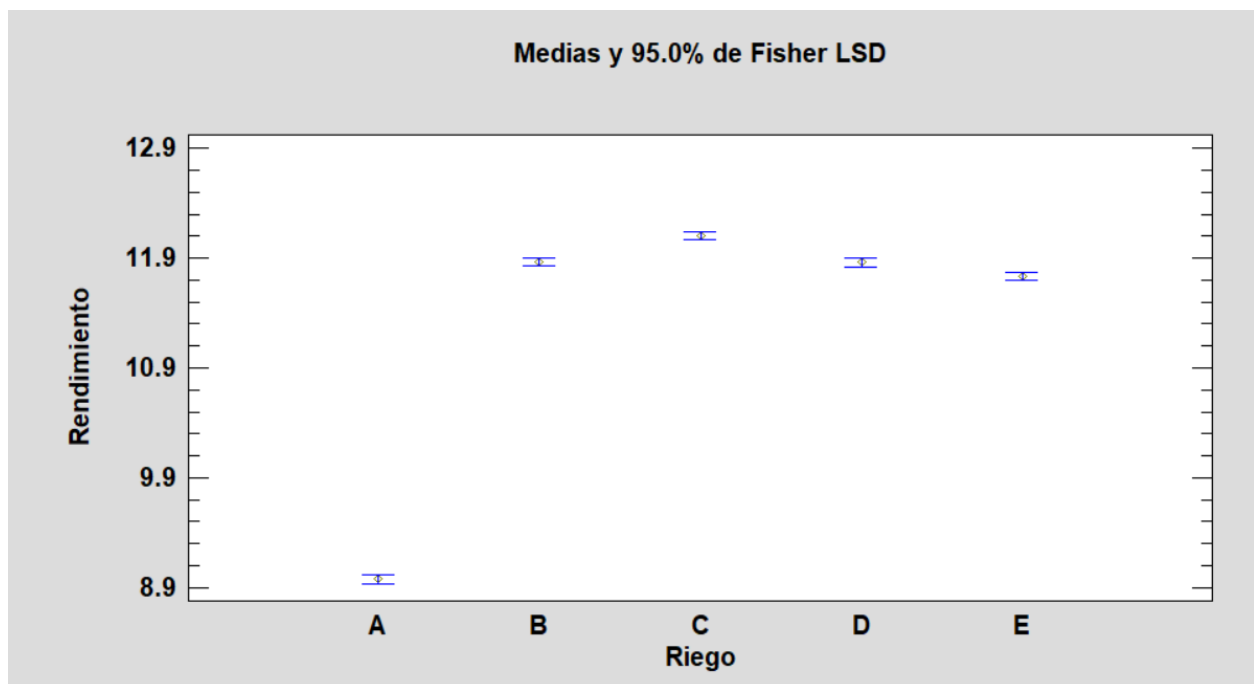


Figura 43. Medias por mínimos cuadrados para rendimiento de la cebolla

## 5. CONCLUSIONES

En conclusión, luego de contar con las funciones de producción bajo el supuesto de un año representativo para cada escenario, obtener en función de la cantidad de agua suministrada el rendimiento esperado y compararlo con el obtenido en el año de simulación inicial se llegan a las siguientes conclusiones:

De los cultivos estudiados, la cebolla es la que se verá más fuertemente influenciada por el clima futuro ya que en todos los escenarios se prevé una disminución significativa en el rendimiento esperado, haciendo que se necesite suministrar mayor cantidad de agua para alcanzar ciertos valores de rendimiento y de que además el valor de 10.89 ton/ha obtenido en estudio analizado solo podría ser alcanzado en uno de los escenarios, el RCP 4.5 (2071-2100) y con un valor de 952.63 mm de agua suministrada en comparación con los 900.47 mm utilizados en el estudio.

En el caso del girasol, se esperaría un incremento en el rendimiento salvo para dosis de agua que se pueden considerar como bajas. Además de que en todas las funciones de producción se podría obtener el rendimiento de 3.02 ton/ha que fue el que se tuvo en el estudio analizado utilizando menor cantidad de agua para los escenarios futuros.

Para el trigo, se tendría una reducción en el rendimiento para valores de agua de menos de 100mm mientras que a medida que se incrementa la cantidad de agua, el rendimiento experimenta porcentajes de crecimiento en comparación con el año de simulación, además de que el valor de 6.73 ton/ha de rendimiento obtenido en el estudio analizado, es posible alcanzarlo en todos los escenarios con menos cantidad de agua salvo el escenario RCP 4.5 para los años de 2071-2100 donde no se alcanza ese tope.

En el caso del análisis ANOVA multifactorial para explicar el rendimiento en función de la trayectoria RCP, la estrategia de riego utilizada y la interacción entre ambas se determinó que para el trigo, una diferencia en el rendimiento se vería explicada por un cambio en la trayectoria RCP o en la estrategia de riego utilizada para un nivel de confianza de un 95%, en el girasol dicha variación en el rendimiento se vería explicada por un cambio en la estrategia de riego o en la interacción de la estrategia de riego y la trayectoria RCP, mientras que para la cebolla un cambio en la trayectoria RCP o en la estrategia de riego explicaría una diferencia en el rendimiento obtenido.

Luego de plasmar estas conclusiones cabe resaltar que las mismas fueron obtenidas bajo los supuestos expresados anteriormente y que los resultados que se tienen son para un año representativo para cada escenario haciendo que solamente contemos con los datos medios y no se tengan completamente el rango de posibles resultados esperados.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- About CORDEX.ORG. (s. f.). *Cordex*. Recuperado 15 de abril de 2020, de <https://cordex.org/about/>
- Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. (2009). International Food Policy Research Institute. <https://doi.org/10.2499/0896295370>
- CEDEX. (2012). *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua*.
- Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., & Richels, R. (2007). Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. En *U.S. Clim. Change Sci.*
- Engineers, N. B. of C. &. (2015). *The Complete Book on Onion & Garlic Cultivation with Processing (Production of Onion Paste, Flakes, Powder & Garlic Paste, Powder, Flakes, Oil): Best small and cottage scale industries, Business consultancy, Business consultant, Business guidance for garlic production, Business guidance for onion production, Business guidance to clients, Business Plan for a Startup Business, Business start-up, Cultivation of garlic, Cultivation of Onion, Dehydrated Garlic & Garlic Powder, Dehydrated Garlic, Dehydrated Onion & Onion Powder, Dehydrated Onion*. ASIA PACIFIC BUSINESS PRESS Inc.
- Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., & Hsiao, T. C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>
- Gudmundsson, L. (2016). *Package 'qmap'*.
- Hendriksen, K., & Hansen, S. L. (2001). INCREASING THE DRY MATTER PRODUCTION IN BULB ONIONS (*Allium cepa* L.). *Acta Horticulturae*, 555, 147-152. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.555.20>

- Hernández Córdova, N., Soto, F., & Llerena, R. R. (2015). *Comportamiento del crecimiento y rendimiento del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.) en tres fechas de siembra*. 36, 86-92.
- ITAP • Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete. (s. f.). Recuperado 3 de marzo de 2020, de <http://www.itap.es/inicio/meteorolog%C3%ADa/estaciones-agrometeorol%C3%B3gicas/>
- López-Urrea, R., Montoro, A., González-Piqueras, J., López-Fuster, P., & Fereres, E. (2009). Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agricultural Water Management*, 96(9), 1305-1310. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.015>
- López-Urrea, R., Olalla, F. M. de S., Montoro, A., & López-Fuster, P. (2009). Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 96(6), 1031-1036. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.02.004>
- López-Urrea, Ramón, Montoro, A., & Trout, T. (2014). Consumptive water use and crop coefficients of irrigated sunflower. *Irrigation Science*, 32, 99-109. <https://doi.org/10.1007/S00271-013-0418-9>
- MATLAB. (2019). *MATLAB*. The MathWorks Inc.
- Molnar, P. (2011). «*Calibration*». *Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management*.
- Ojeda, W., Ibarra, E., Rojano, A., & Iñiguez, y. (2012). *La adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático* (pp. 65-113).
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2018). AquaCrop version 6.0 reference manual. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy*.
- Riahi, K., Grübler, A., & Nakicenovic, N. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7), 887-935. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>

Škorić, D. (1992). Achievements and future directions of sunflower breeding. *Field Crops Research*, 30(3), 231-270. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90003-R](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90003-R)

Soil Survey Staff. (2006). *Keys to Soil Taxonomy* (10th ed.). USDA-Natural Resources Conservation Service.

Statpoint Technologies, Inc. (2016). *Statgraphics Centurion XVII* (17.2.00) [Computer software].

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. In *FAO Irrigation and Drainage Paper No.66*.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>

What is regional downscaling? (s. f.). *Cordex*. Recuperado 15 de junio de 2020, de <https://cordex.org/about/what-is-regional-downscaling/>

Zambrano-Bigiarini, M. (2017). *Package 'hydroGOF'*.



## Anejo 1

### Trigo de primavera

%% ----- Crop parameters for AquaCropOS ----- %%  
3 : Crop Type (1 = Leafy vegetable, 2 = Root/tuber, 3 = Fruit/grain)  
1 : Planting method (0 = Transplanted, 1 = Sown)  
2 : Calendar Type (1 = Calendar days, 2 = Growing degree days)  
1 : Convert calendar to GDD mode if inputs are given in calendar days (0 = No; 1 = Yes)  
07/02 : Planting Date (dd/mm)  
05/07 : Latest Harvest Date (dd/mm)  
280 : Growing degree/Calendar days from sowing to emergence/transplant recovery  
725 : Growing degree/Calendar days from sowing to maximum rooting  
1380 : Growing degree/Calendar days from sowing to senescence  
2400 : Growing degree/Calendar days from sowing to maturity  
1200 : Growing degree/Calendar days from sowing to start of yield formation  
280 : Duration of flowering in growing degree/calendar days (-999 for non-fruit/grain crops)  
700 : Duration of yield formation in growing degree/calendar days  
2 : Growing degree day calculation method  
0 : Base temperature (degC) below which growth does not progress  
26 : Upper temperature (degC) above which crop development no longer increases  
1 : Pollination affected by heat stress (0 = No, 1 = Yes)  
35 : Maximum air temperature (degC) above which pollination begins to fail  
40 : Maximum air temperature (degC) at which pollination completely fails  
1 : Pollination affected by cold stress (0 = No, 1 = Yes)  
5 : Minimum air temperature (degC) below which pollination begins to fail  
0 : Minimum air temperature (degC) at which pollination completely fails  
1 : Transpiration affected by cold temperature stress (0 = No, 1 = Yes)  
14 : Minimum growing degree days (degC/day) required for full crop transpiration potential  
0 : Growing degree days (degC/day) at which no crop transpiration occurs  
0.30 : Minimum effective rooting depth (m)  
2.00 : Maximum rooting depth (m)  
1.5 : Shape factor describing root expansion  
0.028 : Maximum root water extraction at top of the root zone (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/day)  
0.008 : Maximum root water extraction at the bottom of the root zone (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/day)  
1.5 : Soil surface area (cm<sup>2</sup>) covered by an individual seedling at 90% emergence  
4500000 : Number of plants per tontre  
0.90 : Maximum canopy cover (fraction of soil cover)  
0.0051 : Canopy decline coefficient (fraction per GDD/calendar day)  
0.0047 : Canopy growth coefficient (fraction per GDD)  
1.20 : Crop coefficient when canopy growth is complete but prior to senescence  
0.30 : Decline of crop coefficient due to ageing (%/day)  
18 : Water productivity normalized for ET<sub>0</sub> and CO<sub>2</sub> (g/m<sup>2</sup>)  
100 : Adjustment of water productivity in yield formation stage (% of WP)  
0.20 : Crop performance under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration (%)  
0.50 : Reference harvest index  
5 : Possible increase of harvest index due to water stress before flowering (%)





- 10 : Coefficient describing positive impact on harvest index of restricted vegetative growth during yield formation
- 7 : Coefficient describing negative impact on harvest index of stomatal closure during yield formation
- 15 : Maximum allowable increase of harvest index above reference value
- 1 : Crop Determinancy (0 = Indeterminant, 1 = Determinant)
- 100 : Excess of potential fruits
- 0.20 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on affect canopy expansion
- 0.65 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy stomatal control
- 0.70 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy senescence
- 0.80 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination
- 0.65 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy expansion
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy stomatal control
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy senescence
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination
- 5 : Shape factor describing water stress effects on canopy expansion
- 2.5 : Shape factor describing water stress effects on stomatal control
- 2.5 : Shape factor describing water stress effects on canopy senescence
- 1 : Shape factor describing water stress effects on pollination

## Cebolla

- %% ----- Crop parameters for AquaCropOS ----- %%
- 2 : Crop Type (1 = Leafy vegetable, 2 = Root/tuber, 3 = Fruit/grain)
  - 1 : Planting method (0 = Transplanted, 1 = Sown)
  - 2 : Calendar Type (1 = Calendar days, 2 = Growing degree days)
  - 1 : Convert calendar to GDD mode if inputs are given in calendar days (0 = No; 1 = Yes)
  - 27/03 : Planting Date (dd/mm)
  - 11/09 : Latest Harvest Date (dd/mm)
  - 85 : Growing degree/Calendar days from sowing to emergence/transplant recovery
  - 500 : Growing degree/Calendar days from sowing to maximum rooting
  - 2015 : Growing degree/Calendar days from sowing to senescence
  - 2400 : Growing degree/Calendar days from sowing to maturity
  - 900 : Growing degree/Calendar days from sowing to start of yield formation
  - 999 : Duration of flowering in growing degree/calendar days (-999 for non-fruit/grain crops)
  - 900 : Duration of yield formation in growing degree/calendar days
  - 2 : Growing degree day calculation method
  - 5 : Base temperature (degC) below which growth does not progress
  - 30 : Upper temperature (degC) above which crop development no longer increases
  - 1 : Pollination affected by heat stress (0 = No, 1 = Yes)
  - 40 : Maximum air temperature (degC) above which pollination begins to fail
  - 45 : Maximum air temperature (degC) at which pollination completely fails
  - 1 : Pollination affected by cold stress (0 = No, 1 = Yes)
  - 8 : Minimum air temperature (degC) below which pollination begins to fail
  - 5 : Minimum air temperature (degC) at which pollination completely fails
  - 1 : Transpiration affected by cold temperature stress (0 = No, 1 = Yes)
  - 6 : Minimum growing degree days (degC/day) required for full crop transpiration potential
  - 0 : Growing degree days (degC/day) at which no crop transpiration occurs





- 0.20 : Minimum effective rooting depth (m)
- 0.35 : Maximum rooting depth (m)
- 30 : Shape factor describing root expansion
- 0.057 : Maximum root water extraction at top of the root zone (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/day)
- 0.015 : Maximum root water extraction at the bottom of the root zone (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/day)
- 5 : Soil surface area (cm<sup>2</sup>) covered by an individual seedling at 90% emergence
- 400000 : Number of plants per hectare
- 0.72 : Maximum canopy cover (fraction of soil cover)
- 0.00800 : Canopy decline coefficient (fraction per GDD/calendar day)
- 0.00750 : Canopy growth coefficient (fraction per GDD)
- 1.20 : Crop coefficient when canopy growth is complete but prior to senescence
- 0.30 : Decline of crop coefficient due to ageing (%/day)
- 17 : Water productivity normalized for ET<sub>0</sub> and CO<sub>2</sub> (g/m<sup>2</sup>)
- 100 : Adjustment of water productivity in yield formation stage (% of WP)
- 0.3 : Crop performance under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration (%)
- 0.60 : Reference harvest index
- 0 : Possible increase of harvest index due to water stress before flowering (%)
- 4 : Coefficient describing positive impact on harvest index of restricted vegetative growth during yield formation
- 5 : Coefficient describing negative impact on harvest index of stomatal closure during yield formation
- 8 : Maximum allowable increase of harvest index above reference value
- 0 : Crop Determinancy (0 = Indeterminant, 1 = Determinant)
- 9 : Excess of potential fruits
- 0.30 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on affect canopy expansion
- 0.50 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy stomatal control
- 0.92 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy senescence
- 0.90 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination
- 0.65 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy expansion
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy stomatal control
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy senescence
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination
- 3.0 : Shape factor describing water stress effects on canopy expansion
- 3.0 : Shape factor describing water stress effects on stomatal control
- 3.0 : Shape factor describing water stress effects on canopy senescence
- 1 : Shape factor describing water stress effects on pollination

## Girasol

- %% ----- Crop parameters for AquaCropOS ----- %%
- 3 : Crop Type (1 = Leafy vegetable, 2 = Root/tuber, 3 = Fruit/grain)
  - 1 : Planting method (0 = Transplanted, 1 = Sown)
  - 2 : Calendar Type (1 = Calendar days, 2 = Growing degree days)
  - 1 : Convert calendar to GDD mode if inputs are given in calendar days (0 = No; 1 = Yes)
  - 21/04 : Planting Date (dd/mm)
  - 08/09 : Latest Harvest Date (dd/mm)
  - 200 : Growing degree/Calendar days from sowing to emergence/transplant recovery
  - 1584 : Growing degree/Calendar days from sowing to maximum rooting



- 1300 : Growing degree/Calendar days from sowing to senescence
- 2400 : Growing degree/Calendar days from sowing to maturity
- 1253.5 : Growing degree/Calendar days from sowing to start of yield formation
- 380 : Duration of flowering in growing degree/calendar days (-999 for non-fruit/grain crops)
- 987 : Duration of yield formation in growing degree/calendar days
- 2 : Growing degree day calculation method
- 4 : Base temperature (degC) below which growth does not progress
- 30 : Upper temperature (degC) above which crop development no longer increases
- 1 : Pollination affected by heat stress (0 = No, 1 = Yes)
- 40 : Maximum air temperature (degC) above which pollination begins to fail
- 45 : Maximum air temperature (degC) at which pollination completely fails
- 1 : Pollination affected by cold stress (0 = No, 1 = Yes)
- 10 : Minimum air temperature (degC) below which pollination begins to fail
- 5 : Minimum air temperature (degC) at which pollination completely fails
- 1 : Transpiration affected by cold temperature stress (0 = No, 1 = Yes)
- 12 : Minimum growing degree days (degC/day) required for full crop transpiration potential
- 0 : Growing degree days (degC/day) at which no crop transpiration occurs
- 0.30 : Minimum effective rooting depth (m)
- 1.50 : Maximum rooting depth (m)
- 1.3 : Shape factor describing root expansion
- 0.05 : Maximum root water extraction at top of the root zone (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/day)
- 0.015 : Maximum root water extraction at the bottom of the root zone (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/day)
- 5 : Soil surface area (cm<sup>2</sup>) covered by an individual seedling at 90% emergence
- 80000 : Number of plants per hectare
- 0.73 : Maximum canopy cover (fraction of soil cover)
- 0.0028 : Canopy decline coefficient (fraction per GDD/calendar day)
- 0.0135 : Canopy growth coefficient (fraction per GDD)
- 1.10 : Crop coefficient when canopy growth is complete but prior to senescence
- 0.30 : Decline of crop coefficient due to ageing (%/day)
- 15 : Water productivity normalized for ET<sub>0</sub> and CO<sub>2</sub> (g/m<sup>2</sup>)
- 60 : Adjustment of water productivity in yield formation stage (% of WP)
- 0.20 : Crop performance under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration (%)
- 0.33 : Reference harvest index
- 5 : Possible increase of harvest index due to water stress before flowering (%)
- 999 : Coefficient describing positive impact on harvest index of restricted vegetative growth during yield formation
- 3 : Coefficient describing negative impact on harvest index of stomatal closure during yield formation
- 10 : Maximum allowable increase of harvest index above reference value
- 1 : Crop Determinancy (0 = Indeterminant, 1 = Determinant)
- 100 : Excess of potential fruits
- 0.15 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on affect canopy expansion
- 0.60 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy stomatal control
- 0.70 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy senescence
- 1 : Upper soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination
- 0.65 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy expansion
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy stomatal control
- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy senescence



- 1 : Lower soil water depletion threshold for water stress effects on canopy pollination
- 2.5 : Shape factor describing water stress effects on canopy expansion
- 2.5 : Shape factor describing water stress effects on stomatal control
- 2.5 : Shape factor describing water stress effects on canopy senescence
- 1 : Shape factor describing water stress effects on pollination