

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO
DEL CULTIVO DE MAÍZ AMARILLO DURO BAJO
CONDICIONES DE LA MOLINA UTILIZANDO EL MODELO
AQUACROP”**

**Presentado por:
LUIS DANIEL ALARCÓN ALCÁNTARA**

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

**Lima – Perú
2015**

DEDICATORIA

A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. En particular a mis padres, porque sin ellos, ninguna de las metas que he logrado en mi vida tendrían sentido ya que mediante su comprensión, apoyo, consejos e amor incondicional he aprendido a luchar contra cualquier obstáculo que se me ha presentado.

A mi abuelo que siempre estuvo y estará en mi mente en cada paso de mi carrera profesional.

A mis compañeros agrícolas, porque más que amigos fueron parte de mi familia durante estos cinco años de carrera, y es gracias a ellos que puedo decir que muchos de los momentos y las experiencias más gratificantes de mi vida las viví en la Agraria.

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería Agrícola por todo el tiempo que me albergó en sus aulas, y que en esta fase de mi carrera me permitió utilizar sus instalaciones para realizar las observaciones experimentales.

Al Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz de la UNALM por permitirme utilizar el material genético para este trabajo.

Al Fundo de la UNALM por el área experimental y el apoyo de maquinaria proporcionada.

A los practicantes que me apoyaron en la recolección de datos durante la campaña de campo.

A mi asesora, la Dra. Lía Ramos, por el apoyo incondicional brindado durante el desarrollo de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

I.	Introducción	1
II.	Revisión de literatura	3
2.1.	Coeficientes de un cultivo.....	3
2.1.1.	Coeficiente único del cultivo (K_c).....	4
2.1.2.	Coeficiente dual del cultivo ($K_{cb} + K_e$)	5
2.1.3.	Coeficiente de stress hídrico del cultivo (K_s)	7
2.1.4.	Relación entre productividad del cultivo y stress hídrico.....	10
2.2.	Modelo agrometeorológico Aquacrop	11
2.2.1.	Descripción del modelo Aquacrop	11
2.2.2.	Pasos para la modelación en Aquacrop	15
2.2.3.	Etapas fenológicas del cultivo en Aquacrop.....	18
2.2.4.	Balance hídrico en la zona radicular.....	20
2.3.	Cambio climático.....	21
2.3.1.	Escenarios de emisión para cambio climático.....	22
2.3.2.	Modelos de circulación general (GCM).....	24
2.3.3.	Regionalización estadística de escenarios climáticos en el Perú.....	25
2.3.4.	Futuro climático regional para el Perú	27
III.	Materiales y métodos.....	29
3.1.	Zona de estudio	29
3.1.1.	Condiciones climáticas	30
3.2.	Materiales.....	31
3.2.1.	Material genético experimental	31
3.2.2.	Campo experimental.....	31
3.2.3.	Softwares complementarios.....	32
3.3.	Metodos	33
3.3.1.	Diseño experimental.....	34

3.3.2.	Inputs climatológicos requeridos por el modelo	35
3.3.3.	Evaluación de la cobertura del dosel	35
3.3.4.	Determinación de los parámetros del suelo	37
3.3.5.	Medición de la biomasa y profundidad de raíces	39
3.3.6.	Riego de mantenimiento	41
3.3.7.	Evaluación del rendimiento	42
3.3.8.	Parametrización y calibración del modelo.....	44
3.3.9.	Simulación bajo escenarios de cambio climático	47
IV.	Resultados y discusión	49
4.1.	Calendario agrícola	49
4.2.	Calibración y validación en el periodo (2013-2014)	52
4.2.1.	Ajuste del coeficiente basal del cultivo (Kcb).....	53
4.2.2.	Simulación de la cobertura del dosel (CC).....	53
4.2.3.	Simulación de la biomasa aérea seca (BB).....	58
4.2.4.	Simulación del rendimiento (Y)	61
4.3.	Efecto del cambio climático en el rendimiento del periodo 2030-2050	63
4.3.1.	Diferencia porcentual de la evapotranspiración de referencia.....	63
4.3.2.	Diferencia porcentual de la precipitación	65
4.3.3.	Evaluación del efecto del cambio climático en la evapotranspiración y la producción del maíz amarillo duro en La Molina	68
V.	Conclusiones	74
VI.	Recomendaciones	76
VII.	Referencias bibliográficas	77
VIII.	Anexos	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Criterios de selección entre coeficiente único y dual	3
Tabla 2: Principales características para los cuatro escenarios de cambio climático RCP: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5	23
Tabla 3: Características de modelos climáticos globales (GCMs) empleados para la regionalización estadística de escenarios climáticos en el Perú	27
Tabla 4: Características del campo y de la parcela experimental.....	31
Tabla 5: Softwares complementarios utilizados en la investigación.....	32
Tabla 6: Dosis de fertilización para cada tratamiento	34
Tabla 7: Análisis de suelo del campo "Libres 1" de la UNALM	38
Tabla 8: Profundidad de raíces promedio de cada uno de los experimentos para cada día de medición	40
Tabla 9: Comparación entre los parámetros conservativos usados para la calibración en Aquacrop con maíz amarillo en estudios recientes y los usados para la presente investigación.....	44
Tabla 10: Rendimiento del modelo según Molnar (2011).....	46
Tabla 11: Características de los escenarios de cambio climático utilizados	47
Tabla 12: Calendario Agrícola que describe las principales actividades realizadas durante el periodo fenológico del cultivo.....	50
Tabla 13: Parámetros conservativos por defecto y calibrados para el modelo Aquacrop...	52
Tabla 14: Resultados de la prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores promedios de la cobertura del dosel observados en cada fecha de muestreo en comparación con la cobertura del dosel simulada.....	54
Tabla 15: Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la CC en Aquacrop para cada uno de los experimentos evaluados	54
Tabla 16: Resultados de la prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores promedios de la biomasa aérea seca observada en cada fecha de muestreo en comparación con la biomasa aérea seca simulada.....	58
Tabla 17: Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la BB en Aquacrop para cada uno de los experimentos evaluados	59

Tabla 18: Rendimiento promedio del maíz amarillo duro de cada experimento llevado a la humedad comercial.....	62
Tabla 19: Comparación entre el rendimiento promedio evaluado en campo el 14 de abril del 2014 llevados a peso seco y el Rendimiento promedio simulado en Aquacrop para cada experimento. La diferencia está evaluada con respecto a lo observado.	62
Tabla 20: Diferencia Porcentual de la evapotranspiración proyectada promedio estacional y anual (periodo del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico estacional y anual (periodo del año 1980 al 1999) en la estación meteorológica Von Humboldt.	65
Tabla 21: Diferencia Porcentual de la precipitación proyectada promedio estacional y anual (periodo del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico estacional y anual (periodo del año 1980 al 1999) en la estación meteorológica Von Humboldt.	67
Tabla 22: Valores máximos y mínimos de rendimiento simulado para el periodo 2030-2050	70
Tabla 23: Diferencia Porcentual del rendimiento simulado para el periodo del año 2030 al 2050 con respecto al simulado para el periodo del año 1980 al 1999	71
Tabla 24: Comparación del grado de significancia entre la simulación sin la aplicación y con la aplicación de una lámina adicional de riego para la diferencia porcentual entre el periodo simulado del año 2030 al 2050 con respecto al simulado para el periodo del año 1980 al 1999.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva del coeficiente único del cultivo. Fuente: Allen, et al. (2006)	4
Figura 2: Curvas del coeficiente dual del cultivo. Fuente: Allen, et al. (2006).....	6
Figura 3: Stress hídrico (Ks) para varios niveles de agotamiento en la zona radicular (Dr). Fuente: Allen, et al. (2006).....	8
Figura 4: Diferencia en los Ks para cada proceso. Fuente: Allen, et al. (2006).....	9
Figura 5: Esquema de funcionamiento del modelo AquaCrop. Fuente: Raes, et al. (2009)	11
Figura 6: Interfaz del software AquaCrop	12
Figura 7: Representación esquemática de las etapas fenológicas del cultivo en Aquacrop. Fuente: Steduto, et al. (2012).....	18
Figura 8: Zona radicular expresada como un reservorio. Fuente: Steduto, et al. (2012). ...	20
Figura 9: Variación de la temperatura global proyectado al 2100 para cuatro escenarios de cambio climático. Siendo el escenario con emisiones más bajas el RCP 2.6 (línea azul) y el escenario con emisiones más altas el RCP 8.5 (línea roja). Fuente: IPPCC (2013).....	23
Figura 10: Variación de la precipitación y temperatura media, entre los periodos de 1986- 2005 y 2081-2100: para los escenarios RCP 8.5 (más altos) y RCP 2.6 (más bajos). Izquierda: Variación de temperatura media en la superficie. Derecha: Variación de precipitación media. Fuente: IPPCC (2013).....	24
Figura 11: Esquema de los GCM. Fuente: IPPC (2013)	25
Figura 12: Puntos azules indican la ubicación de las 265, 105 y 102 estaciones para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Fuente: SENAMHI (2015)	26
Figura 13: Proyecciones para la precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima con tres modelos GCMs con respecto a la información histórica 1971-2000. Cada escenario RCP 4.5 en línea sólida y RCP 8.5 en línea punteada. El sombreado en gris marca el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de los escenarios. Fuente: SENAMHI (2015).	27
Figura 14: Localización del campo experimental – Campos Libres 1 (UNALM).....	29
Figura 15: Variación diaria de la precipitación- evapotranspiración (a), temperatura- heliofanía (b) y humedad relativa-velocidad del viento (c), durante el desarrollo del estudio.....	30

Figura 16: Esquema de distribución del campo experimental.....	32
Figura 17: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio	33
Figura 18: Diseño experimental	34
Figura 19: Ubicación de plantas para muestreo de CC	36
Figura 20: Medición de la cobertura del dosel según altura de planta: Para plantas menores a 1.4 m (a), para plantas mayores a 1.4m (b).	37
Figura 21: Procedimiento de muestreo para la biomasa seca aérea	39
Figura 22: Esquema donde la planta alcanza la máxima profundidad de raíz)	40
Figura 23: Precipitación diaria y eventos de riego durante el período vegetativo del cultivo. La columna azul es el riego aplicado a los experimentos: Lámina alta (a), Lámina media (b), Lámina baja (c).	41
Figura 24: Variación temporal de la cobertura del dosel (%): Valores simulados por el modelo en línea verde, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con 180 muestras por fecha: Lámina alta (a), Lámina media (b), Lámina baja (c). El boxplot representa el rango intercuartil, sus extremos el primer y tercer cuartil, el centro, el valor medio de los datos observados, los bigotes de la caja, el valor máximo y mínimo registrado, y los outliers se muestran como puntos rojos.	56
Figura 25: Variación temporal de la biomasa por encima del nivel del suelo ($T_n \text{ ha}^{-1}$): Valores simulados por el modelo en línea turquesa, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con 216 muestras por fecha: Lámina alta (a), Lámina media (b), Lámina baja (c). El boxplot representa el rango intercuartil, sus extremos el primer y tercer cuartil, el centro, el valor medio de los datos observados, los bigotes de la caja, el valor máximo y mínimo registrado, y los outliers se muestran como puntos rojos.	60
Figura 26: Diagrama de barras de la evapotranspiración de referencia de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la evapotranspiración mensual histórica para el periodo de Enero 1980 a Diciembre del 1999 en la Estación Von Humboldt.....	64
Figura 27: Diagrama de barras de la precipitación de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la precipitación mensual histórica para el periodo de Enero 1980 a Diciembre del 1999 en la Estación Von Humboldt.....	66

Figura 28: Proyecciones absolutas de la evapotranspiración de referencia acumulada anual para el periodo 2030-2050 con respecto a la simulación histórica del periodo 1980-1999, en color morado. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. El punto celeste corresponde a la evapotranspiración de referencia acumulada anual para el experimento de lámina alta en el periodo 2013-2014. Línea punteada vertical, señala el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones. 68

Figura 29: Proyecciones absolutas de los rendimientos con respecto a la corrida histórica del periodo 1980-1999, en color morado. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. El punto celeste corresponde al rendimiento observado para el experimento de lámina alta en el periodo 2013-2014. Línea punteada vertical señala el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones. 70

Figura 30: Proyecciones absolutas de los rendimientos corregidos sin estrés hídrico mediante la aplicación una lámina óptima de riego con respecto a la corrida histórica del periodo 1980-1999, en color morado. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. El punto celeste corresponde al rendimiento observado para el experimento de lámina alta en el periodo 2013-2014. Sombra en gris, señala el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones. 72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Resultados de análisis de suelo del campo experimental	82
ANEXO 2: Resultados del análisis de agua de riego aplicada al campo experimental.....	83
ANEXO 3: Resultados de la corrida del modelo Aquacrop.....	84
ANEXO 4: Valores de cobertura del dosel evaluados en campo versus simulados.....	85
ANEXO 5: Valores de biomasa aérea seca evaluados en campo versus simulados	88
ANEXO 6: Rendimiento evaluado en campo (maíz amarillo duro)	91

RESUMEN

Experimentos en maíz amarillo, incluyendo condiciones óptimas de riego y de déficit, se llevaron a cabo en La Molina, Lima - Perú y fueron utilizados para evaluar los impactos del estrés hídrico en el rendimiento utilizándose el modelo AquaCrop^[1]. El modelo se evaluó después de su parametrización mediante observaciones de campo de biomasa, cobertura del dosel y los rendimientos finales medidos durante la campaña de noviembre del 2013 a abril 2014. Los resultados mostraron eficiencias de Nash-Sutcliffe (E) entre 0.81 hasta 0.96. Con el fin de evaluar el rendimiento futuro, SENAMHI realizó la reducción de escala estadística (downscaling^[2]) de seis escenarios de cambio climático^[3] para el año 2030 a 2050, que contienen información climática de temperatura, precipitación y de las concentraciones de gases de efecto invernadero definidas en el marco de la quinta fase del proyecto de la comparación de los modelos acoplados (CMIP5) . Con estos datos climáticos futuros, se evaluó el rendimiento futuro del maíz amarillo duro para las condiciones de La Molina, notándose que con el fin de evitar el estrés hídrico, una lámina de riego en el rango de 1200 - 1500 m³/ha sería necesaria.

PALABRAS CLAVE

^[1]Aquacrop, ^[2]Downscaling, ^[3]Escenarios de cambio climático.

ABSTRACT

Maize field experiments, including deficit and full irrigation, were performed in La Molina, Lima - Perú and were used to assess water stress impacts on yields using the AquaCrop^[1] model. The model was assessed after its parameterization using field observations relative to crop evapotranspiration, biomass, canopy cover and final yield data measured during november 2013 to april 2014. Results showed Nash-Sutcliffe (E) values between 0.81 to 0.96. In order to evaluate the future yield, SENAMHI performed the statistical downscaling^[2] of six climate change scenarios^[3] for the year 2030-2050, which contain climate information such temperature, precipitation and greenhouse gases concentrations defined in the framework of the fifth phase of the project comparing coupled models (CMIP5). With this future climate data, future yield of maize for La Molina district was assessed, noticing that in order to avoid water stress, a sheet of irrigation in the range of 1200 - 1500 m³/ha would be needed.

KEY WORDS

^[1]Aquacrop, ^[2]Downscaling, ^[3]Climate change scenarios.

I. INTRODUCCIÓN

Los efectos de cambio climático están afectando la distribución y cantidad de lluvia y con ello la disponibilidad de agua cada vez más escasa para la agricultura. Además, el incremento de la temperatura y con ello un incremento de la evapotranspiración, afectarán el rendimiento de los cultivos, y por tanto, pérdidas en la economía familiar de los agricultores, que influyen en la producción del sector agrícola fuente dinamizador de la economía peruana. Todo esto, aunado al crecimiento poblacional y por consiguiente mayor demanda de alimentos, originan la búsqueda de nuevas tecnologías y maneras apropiadas de producir alimentos utilizando y aprovechando los recursos disponibles pero con alto grado de eficiencia y de manera sostenible.

El maíz amarillo duro es el tercer cultivo en importancia a nivel nacional y constituye uno de los principales enlaces de la cadena agroalimentaria del país. MINAG (2012), por ello, la importancia de asegurar una producción sostenible con miras al futuro es de vital importancia para el desarrollo de la economía nacional. Con la finalidad de evaluar los efectos del cambio climático en el rendimiento del maíz amarillo duro se precisó de un modelo que bajo su estructura englobe parámetros relacionados con el clima y que tenga facilidad de adaptabilidad a las condiciones observadas.

El modelo AquaCrop “Crop-model to simulate yield response to water” de la FAO (<http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>) permite simular el rendimiento del cultivo a través de un modelo de productividad del agua que simula la producción de biomasa en base a la cantidad de agua transpirada de la cobertura vegetal. El agua, la temperatura, la fertilidad, puede provocar estrés en la planta que resulta en una menor transpiración. Ante esto el modelo Aquacrop permite optimizar el rendimiento del cultivo y es particularmente adecuado para hacer frente a las condiciones donde el agua y temperatura son factores claves limitantes de la producción. Steduto, et al. (2012).

En concordancia con la priorización del incremento de la demanda interna; se presenta este estudio donde se evalúa el rendimiento del maíz amarillo duro mediante el modelo agroclimatológico Aquacrop, y se evalúa los efectos del cambio climático al realizarse la modelación bajo diversos escenarios de cambio climático.

El presente trabajo de investigación tiene por finalidad evaluar el efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz amarillo duro a través del modelo agrometeorológico AquaCrop. Esto mediante los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar, evaluar y preparar los inputs requeridos para el modelo Aquacrop.
- Describir la estructura del modelo Aquacrop y calibrar sus parámetros
- Simular el rendimiento del maíz amarillo duro ante diversos escenarios de cambio climático.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. COEFICIENTES DE UN CULTIVO

La evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ET_0 por K_c el cual es un coeficiente que expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia. Esta diferencia puede ser combinada dentro de un coeficiente único o integrado del cultivo, o puede ser separada en dos factores que describen por separado las diferencias en evaporación y transpiración entre las dos superficies. La selección del procedimiento a seguir dependerá del propósito del cálculo, la precisión requerida, la disponibilidad de datos climáticos y la escala temporal bajo la cual se realizan los cálculos Allen, et al. (2006). En la Tabla 1 se presentan los criterios generales de selección.

Tabla 1: Criterios de selección entre coeficiente único y dual

	Coeficiente único del cultivo K_c	Coeficiente dual del cultivo $K_{cb} + K_e$
Propósito del cálculo	<ul style="list-style-type: none">- diseño y planificación del riego- manejo del riego- calendarios básicos de riego- calendarios de riego en tiempo real para aplicaciones no frecuentes de agua (riego por superficie y aspersión)	<ul style="list-style-type: none">- investigación- calendarios de riego en tiempo real- calendarios de riego para aplicaciones de agua con alta frecuencia (micro-irrigación y riego por aspersión automatizado)- riego suplementario- estudios detallados de balance de agua en hidrología y suelos
Escala temporal	diaria, 10 días, mensual (cálculos y datos)	diaria (cálculos y datos)
Método de cálculo	gráfico calculadora de bolsillo computadora	computadora

FUENTE: Fuente: Allen, et al. (2006)

2.1.1. COEFICIENTE ÚNICO DEL CULTIVO (K_c)

En el enfoque del coeficiente único del cultivo, los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo son combinados en un coeficiente K_c único. Este coeficiente integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días), de la evapotranspiración del cultivo.

Debido a que el coeficiente único K_c representa un promedio de la evaporación en el suelo y la transpiración, este procedimiento se utiliza para estimar ET_c para períodos de tiempo semanales o mayores, a pesar de que los cálculos puedan realizarse a nivel diario. El coeficiente único K_c promediado en el tiempo se utiliza para estudios a nivel de planificación y para el diseño de sistemas de riego donde sea razonable y pertinente considerar los efectos promedios del humedecimiento del suelo. Este es el caso de los sistemas de riego por superficie y aspersión donde el intervalo entre riegos sucesivos es de varios días, generalmente de diez o más días. Por lo tanto, para un manejo típico del riego, es válido aplicar el procedimiento del coeficiente único, K_c , promediado temporalmente. Allen, et al. (2006). En la Figura 1 se presentan los cambios en la vegetación y el grado de cobertura del suelo durante el desarrollo de la planta y la maduración, los cuales afectan el coeficiente entre ET_c y ET_o .

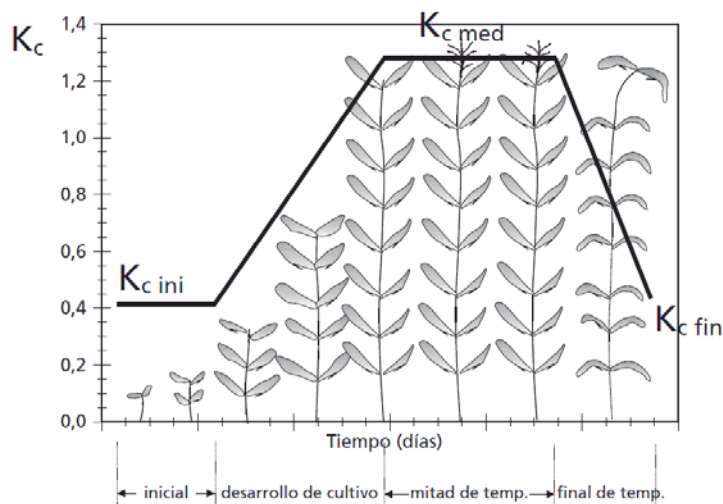


Figura 1: Curva del coeficiente único del cultivo. Fuente: Allen, et al. (2006)

2.1.2. COEFICIENTE DUAL DEL CULTIVO ($K_{cb} + K_e$)

De acuerdo al enfoque del coeficiente dual del cultivo, se determinan por separado los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación en el suelo. Se utilizan dos coeficientes: el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) para describir la transpiración de la planta, y el coeficiente de evaporación del agua del suelo (K_e) para describir la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. El coeficiente único K_c es reemplazado por:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (1)$$

Dónde: K_c , coeficiente único del cultivo; K_{cb} , coeficiente basal del cultivo; y K_e , coeficiente de la evaporación del agua del suelo.

El coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , es definido como el cociente entre ET_c y ET_o cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero donde el contenido promedio de agua en la zona radicular del suelo es adecuado para mantener totalmente la transpiración de la planta. El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. El coeficiente de evaporación en el suelo, K_e , describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. Si el suelo se encuentra húmedo después de una lluvia o riego, el valor de K_e puede ser grande. Sin embargo, en ningún caso, la suma de los coeficientes K_{cb} y K_e podrá exceder un valor máximo, $K_{c\ max}$, el cual es definido por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración. El valor de K_e se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo y será igual a cero cuando no exista agua para la evaporación. La estimación del valor de K_e requiere del cálculo del balance diario del agua en el suelo, para determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo.

El procedimiento del coeficiente dual del cultivo requiere de una mayor cantidad de cálculos numéricos que el procedimiento del coeficiente único, promediado temporalmente, K_c . El procedimiento del coeficiente dual es preferible para los casos de los calendarios de riego en tiempo real, para los cálculos de balance del agua en el suelo, y para los estudios de investigación donde sean importantes tanto los efectos de las variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto resultante

en el valor diario de ET_c , como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujos de percolación profunda.

La suma de los valores de K_{cb} y K_e viene a representar un coeficiente integrado del cultivo, K_c . La curva total de K_c , representada como una línea punteada en la Figura 2 se ilustra el efecto de promediar $K_{cb} + K_e$ a través del tiempo, siendo presentada como una curva suavizada. Es esta curva suavizada la que es elaborada al considerarse el procedimiento de cálculo del coeficiente único del cultivo K_c . La curva de K_c se sitúa por encima de la curva de K_{cb} , encontrándose potencialmente las mayores diferencias durante la etapa inicial y de desarrollo, dependiendo de la frecuencia del humedecimiento del suelo. Allen, et al. (2006).

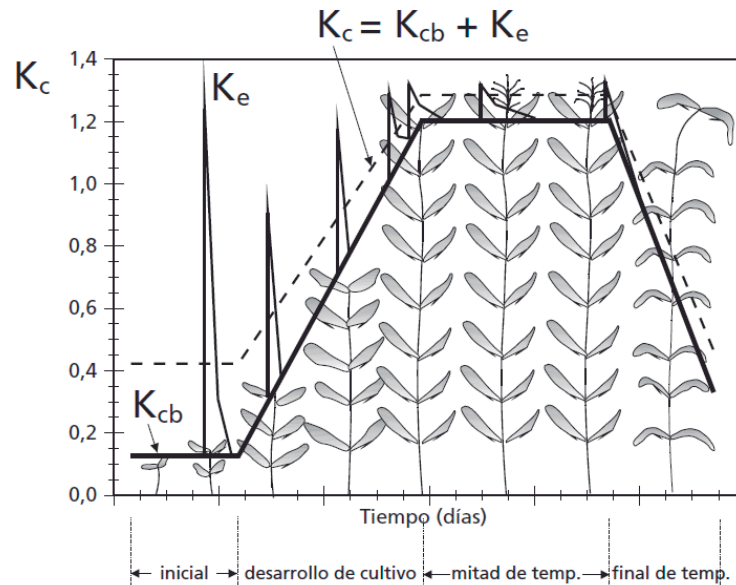


Figura 2: Curvas del coeficiente dual del cultivo. Fuente: Allen, et al. (2006).

2.1.3. COEFICIENTE DE STRESS HÍDRICO DEL CULTIVO (K_s)

Cuando el suelo se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, teniendo libertad de movimiento y pudiendo ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo.

Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, K_s :

$$ET_c = (K_s * K_{cb} + K_e) * ET_o \quad (2)$$

Dónde: ET_c , evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar [mm día⁻¹]; ET_o , evapotranspiración del cultivo de referencia [mm día⁻¹]; K_{cb} , coeficiente basal del cultivo, K_s , coeficiente de estrés hídrico; y K_e , coeficiente de la evaporación del agua del suelo.

Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo, $K_s < 1$. Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo, $K_s = 1$. Allen, et al. (2006).

Los efectos del stress hídrico se ven relacionados directamente con la expansión del dosel de la planta, conductancia estomática, una senescencia temprana en las hojas. El indicador de estrés es el agotamiento en la zona radicular (D_r), y los umbrales son los agotamientos de humedad del suelo en la zona radicular expresados como fracciones (p) del agua disponible total en el suelo (TAW). En el punto en que ya no hay agotamiento, el $K_s = 1.0$. A medida que avanza el agotamiento, el K_s no disminuye de 1.0 hasta que alcanza el umbral superior para efecto del estrés. Este umbral se denomina p_{upper} . Un incremento adicional del agotamiento en la zona radicular produce valores inferiores del K_s , hasta llegar al umbral inferior (denominado p_{lower}), donde el K_s se vuelve cero y el efecto por estrés es máximo (Ver Figura 3).

Un mayor agotamiento por debajo del p_{lower} no tiene efectos adicionales y el K_s sigue siendo cero. En el caso de los estreses hídricos, la forma de la curva puede variar desde muy convexa, pasando por levemente convexa, hasta lineal. Desde el punto de vista conceptual,

mientras más convexa sea la curva, mayor es la capacidad del cultivo para ajustarse y aclimatarse al estrés. Una relación lineal indica una aclimatación mínima o nula. Los umbrales de estrés, así como la forma de la curva, se establecen por calibración y deberían estar basados en el conocimiento de la resistencia o la tolerancia del cultivo a la sequía. Steduto, et al. (2012).

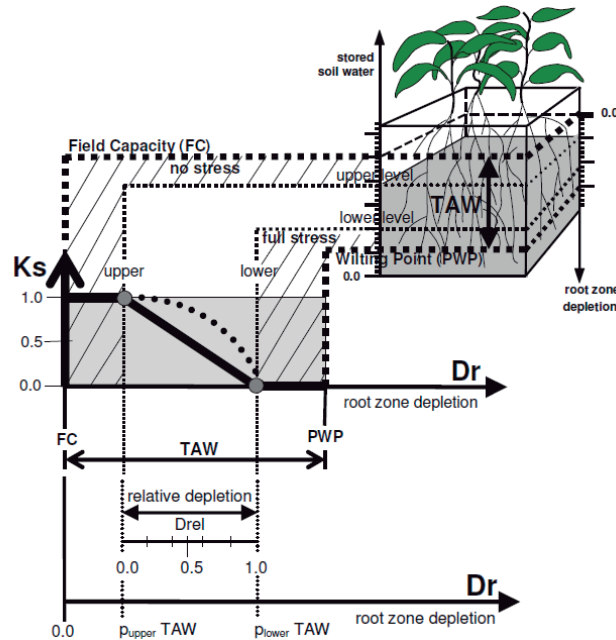


Figura 3: Stress hídrico (K_s) para varios niveles de agotamiento en la zona radicular (D_r). Fuente: Allen, et al. (2006).

De los tres primeros procesos afectados por el estrés hídrico, estudios llevados a cabo han mostrado que la expansión foliar (por ende, el dosel) es el más sensible, y la conductancia estomática es sustancialmente menos sensible. Dependiendo de la especie, la senescencia foliar (por ende, el dosel) puede ser igual o ligeramente menos sensible que la conductancia estomática Steduto, et al. (2012). El ajuste de los tres umbrales superiores para el estrés hídrico de un cultivo debe ser consecuente con estas observaciones. Las diferencias en las curvas del K_s para los tres procesos se pueden ver en el ejemplo del maíz, Figura 4

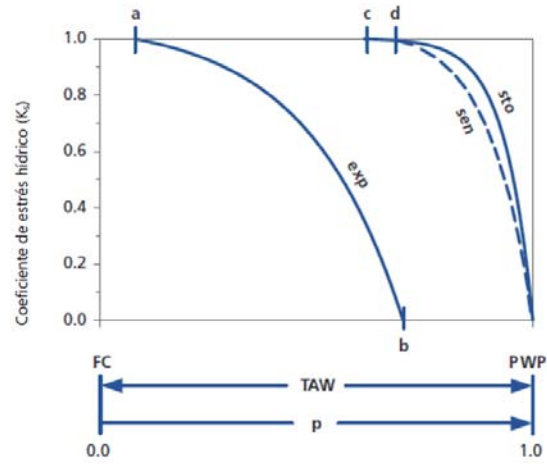


Figura 4: Diferencia en los K_s para cada proceso. Fuente: Allen, et al. (2006).

La curva del coeficiente de estrés (K_s) para la expansión del dosel (exp), conductancia estomática (sto), y senescencia del dosel (sen) del maíz como función del agotamiento en la zona radicular (p). El umbral superior para la expansión está señalado con una a, y el umbral inferior, con una b. Los umbrales superiores para el cierre estomático y la senescencia del follaje están señalados con c y d, respectivamente. Steduto, et al. (2009).

2.1.4. RELACIÓN ENTRE PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO Y STRESS HÍDRICO

En la publicación de Doorenbos & Kassam (1979) de la FAO se presenta una función lineal sencilla para describir la relación entre el uso del agua por el cultivo y la productividad, útil para predecir la reducción en la productividad del cultivo cuando el estrés hídrico es inducido por la falta del agua del suelo:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{caj}}{ET_c}\right) \quad (3)$$

Dónde: K_y , factor de respuesta de la productividad; Y_a , rendimiento real; Y_m , rendimiento máximo; ET_{caj} , evapotranspiración ajustada (real) del cultivo [mm día^{-1}]; y ET_c , evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar (sin estrés hídrico) [mm día^{-1}].

El factor de respuesta del rendimiento (K_y) capta la esencia de las complejas relaciones que existen entre la producción y el uso del agua en un cultivo, donde ocurren procesos biológicos, físicos y químicos. La relación ha demostrado una notable validez y ha brindado un procedimiento utilizable para cuantificar los efectos de los déficits de agua sobre el rendimiento. Steduto, et al. (2012).

En general, la reducción de la productividad debido al déficit de agua es relativamente pequeña durante los periodos de desarrollo vegetativo y de maduración, siendo mayor durante los periodos de floración y formación del fruto. Allen, et al. (2006).

2.2. MODELO AGROMETEOROLÓGICO AQUACROP

2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO AQUACROP

Raes, et al. (2009) describe al modelo AquaCrop como un modelo de desarrollo de follaje, enfocado principalmente a la simulación del desarrollo de la biomasa potencial del cultivo y la producción cosechable en respuesta al agua disponible. Considera el sistema suelo-planta-atmósfera como un continuo, para simular la respuesta de cultivos en términos de rendimiento, y es especialmente adecuado para representar condiciones donde el agua es un factor limitante de la producción. Se requiere datos de entrada consistente en parámetros climáticos, del cultivo, del suelo y agua de riego, datos de gestión del riego. (Ver Figura 5).

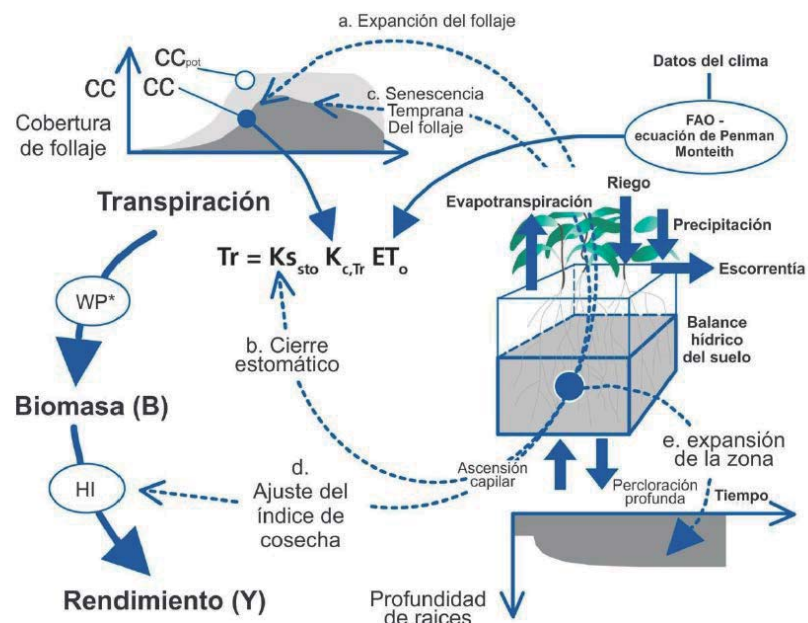


Figura 5: Esquema de funcionamiento del modelo AquaCrop. Fuente: Raes, et al. (2009)

En la Figura 6 se presenta la interfaz principal de AquaCrop en la que se observan los módulos disponibles para realizar la simulación. En la parte superior, en el encabezado “Environment and Crop”, se encuentran los cuatro módulos que componen el modelo: Clima, Cultivo, Prácticas de Manejo y Suelo. Para cada uno de ellos deben especificarse ciertos parámetros.

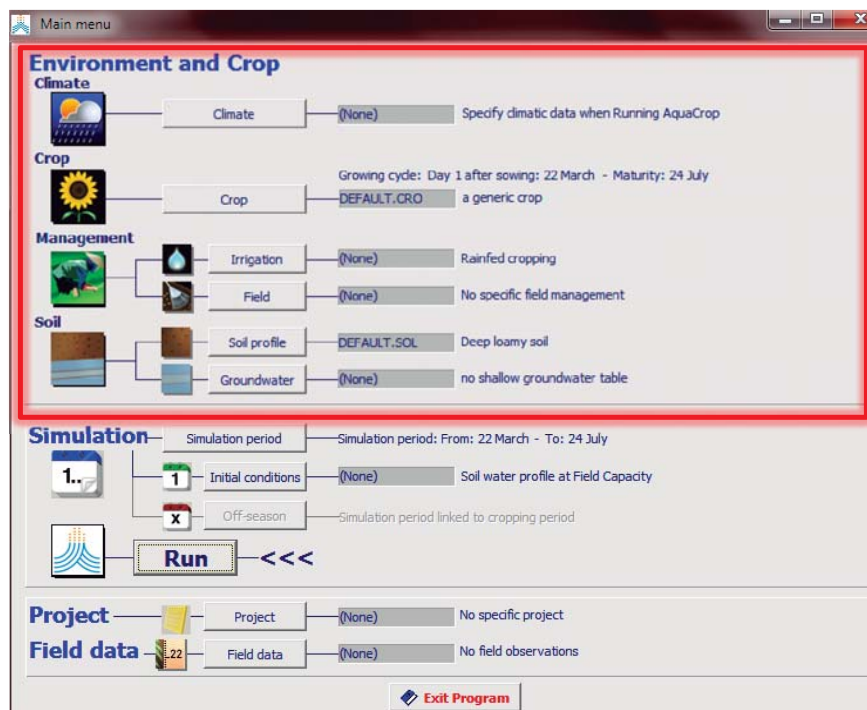


Figura 6: Interfaz del software AquaCrop

A continuación se describen algunos de estos parámetros. En paréntesis después del nombre del parámetro se encuentra el módulo al cual pertenece cada parámetro en el modelo:

- Fecha de siembra (Cultivo): este parámetro permite especificar el día del año en el cual se siembra el cultivo.
- Cobertura de dosel inicial, CCo (Cultivo): este parámetro se requiere para describir la expansión del dosel en los primeros días de sembrado y se obtiene como el producto de la densidad de la planta (número de plantas por hectárea) y del tamaño del dosel a la siembra. En AquaCrop, dado este último, el usuario especifica bien sea la densidad de la planta o la cobertura del dosel inicial, mientras que el programa determina el valor del otro parámetro automáticamente.
- Cobertura del dosel máximo, CCx (Cultivo): este parámetro describe el porcentaje máximo de cobertura del dosel bajo condiciones óptimas.
- Días a dosel máximo, Max CC (Cultivo): este parámetro especifica cuantos días se demora el cultivo en alcanzar el nivel máximo de cobertura del dosel.

- Duración del ciclo (Cultivo): Este parámetro permite especificar cuál es la duración del ciclo de desarrollo del cultivo.
- Índice de Cosecha (Cultivo): La partición de la biomasa en la porción de rendimiento se simula mediante el índice de cosecha (HI). El usuario proporciona el índice de cosecha (HI) de referencia pero el valor que realmente tome el HI puede variar, pues el estrés por agua puede alterar el HI, bien sea negativa o positivamente, dependiendo del tiempo, la severidad y duración del estrés.
- Riegos (Prácticas de Manejo): AquaCrop tiene un submódulo de riego que permite especificar las características del método de riego utilizado en el cultivo. Dentro de las opciones disponibles se puede especificar la no existencia de un método de riego manual (el agua en la zona de raíces proviene entonces de la lluvia), se le puede proporcionar al módulo un cronograma de riego específico (especificando la cantidad de riego por día) o se puede programar automáticamente el riego especificando una condición límite (por ejemplo aplicar una lámina de riego determinada cada vez que la lámina de agua rápidamente aprovechable se agote en un porcentaje dado).
- Fertilidad (Prácticas de Manejo): el porcentaje de fertilidad viene dado por la relación entre los rendimientos observados y los rendimientos óptimos. Este parámetro puede ser calibrado analizando la razón entre una parcela del cultivo bajo las condiciones normales de producción y otra con las condiciones óptimas. Raes, et al. (2011).

El modelo de cultivos de la FAO AquaCrop, Steduto, et al. (2009), simula rendimientos potenciales de los principales cultivos herbáceos en función al agua de consumo en condiciones de secano, suplementario, déficit, y bajo riego en condiciones óptimas.

El motor de crecimiento de AquaCrop es accionado por el agua, en que la transpiración se calcula primero y luego es traducido en biomasa al utilizar un parámetro conservativo del cultivo, la productividad del agua en la biomasa, normalizado por la demanda de evaporación atmosférica y la concentración de CO₂ del aire. La normalización es hacer AquaCrop aplicable a diversos lugares y épocas. Las simulaciones se realizan en tiempo térmico, así como en tiempo calendario o en pasos de tiempo diarios. El modelo utiliza la cobertura del dosel que cubre al suelo en lugar del índice de área foliar (IAF) como base

para el cálculo de la transpiración y para separar la evaporación del suelo de la transpiración del cultivo. El rendimiento del cultivo se calcula como el producto de biomasa seca por encima del suelo y el índice cosecha (HI). A partir de la floración, HI aumenta linealmente con el tiempo después de una fase de retraso, hasta la madurez fisiológica próxima. Aparte del rendimiento, no hay partición de la biomasa en varios órganos. Geerts, et al. (2009).

Las respuestas de los cultivos a los déficit de agua se simulan con cuatro modificadores que son funciones de la parte fraccional disponible de agua en el suelo modulados por demanda evaporativa, basado en la sensibilidad diferencial al estrés hídrico ante cuatro procesos clave de la planta: la expansión del dosel, control estomático de la transpiración, la senescencia del dosel, y HI. El HI puede ser modificado negativa o positivamente, dependiendo del nivel de estrés, el momento y la duración del estrés. AquaCrop utiliza un número relativamente pequeño de parámetros (explícitos e intuitivos en su mayoría) e intenta equilibrar simplicidad, precisión y robustez. El modelo tiene como objetivo llegar a ser usado por investigadores, usuarios finales como los que trabajan para la extensión de servicios, ingenieros consultores, organismos gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, y diversos tipos de asociaciones de agricultores. También está diseñado para adaptarse a la necesidad de los economistas y especialistas en política que utilizan modelos simples para la planificación y el análisis de escenarios. Steduto, et al. (2009).

AquaCrop ha sido previamente calibrado para algunos cultivos en determinados lugares del mundo, algunos de ellos: maíz por Hsiao, et al. (2009), Heng, et al. (2009) y Katerji, et al. (2010), trigo por Andarzian, et al. (2011), algodón por Farahani (2009), cebada por Araya, et al. (2010).

En esta sección sólo se proporciona una descripción breve de AquaCrop, enfatizando aquellos elementos de mayor uso para la adaptación del modelo. Para mayor comprensión de la parte teórica y de manejo, se recomienda visitar la página de la FAO, <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

2.2.2. PASOS PARA LA MODELACIÓN EN AQUACROP

Simulación del desarrollo del cultivo

Según Steduto, et al. (2009), AquaCrop no simula el índice de área foliar (IAF). En lugar de ello, el desarrollo del follaje se expresa como la cobertura verde del dosel (CC), la fracción de la superficie del suelo cubierto por el dosel varía entre 0 (antes de la emergencia) a un máximo (CC_X), que puede estar cerca del 100% dependiendo del tipo de cultivo y la densidad de siembra. La cobertura es una característica crucial de AquaCrop. Su expansión, el envejecimiento, la conductancia y senescencia son las claves determinantes de la cantidad de agua transpirada, que a su vez determina la cantidad de biomasa producida.

El desarrollo del dosel para condiciones no limitantes (CC_{pot}) se basa en el uso de tres parámetros: la cobertura del dosel inicial después de la emergencia (CC_0), la máxima cobertura del dosel alcanzada (CC_X), y el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC). Ecuaciones cinéticas de primer orden son utilizadas para simular el desarrollo del dosel. Bradford & Hsiao (1982). Tras el inicio de la senescencia del dosel, la disminución del CC se simula con un coeficiente de descenso del dosel (CDC). Cuando el agotamiento de humedad en la zona radicular (D_r) cae por debajo de los umbrales de agua, el estrés afecta a la expansión del dosel, la K_s para la expansión del dosel ($K_{s\ exp}$) empieza a caer por debajo de uno para reducir la CGC efectiva, y el desarrollo del dosel se ralentiza. Cuando el D_r alcanza la parte superior del umbral por la senescencia acelerada dosel, CDC se incrementa en $K_{s\ sen}$, dando lugar a declives dosel más rápidos y más tempranos.

Simulación de la transpiración del cultivo (Tr)

Al tener el CC y el clima para cada día, la transpiración del cultivo (Tr) se calcula multiplicando ET_0 , el poder de evaporación de la atmósfera, por el coeficiente de cultivo KC_{Tr} (Ecuación 4). La ET_0 es calculada por la ecuación Penman Monteith como se especifica por la FAO Riego y Drenaje No. 56, Allen, et al. (1998), dándosele al modelo como variable de entrada. El coeficiente de transpiración del cultivo KC_{Tr} es proporcional a CC, pero se ajusta adicionalmente para la advección entre surcos y la tendencia diurna de interceptación de radiación por el dosel, Steduto, et al. (2009).

El máximo del factor proporcional ($K_{C_{Tr,x}}$) varía entre 1.0 y 1.2 para diferentes cultivos agrícolas comunes. Cuando el D_r cae por debajo del umbral superior por reducción de la transpiración, Tr es simulado con el K_s por cierre de estomas ($K_{s_{sto}}$).

$$Tr = K_s \left(K_{C_{Tr,x}} CC^* \right) ET_o \quad (4)$$

Dónde: Tr , transpiración del cultivo [mm día^{-1}]; K_s , coeficiente por estrés; CC^* , cobertura del dosel ajustada [%]; $K_{Tr,x} CC^*$, coeficiente del cultivo; y ET_o , evapotranspiración de referencia del cultivo [mm día^{-1}].

Simulación de la producción de biomasa por encima del nivel del suelo (B)

Utilizando WP^* , la productividad del agua para producir biomasa normalizada, Steduto, et al. (2007), AquaCrop acumula la producción diaria de biomasa (B) hasta el final de la temporada a partir de la transpiración (Tr) y la evapotranspiración diaria (ET_o) correspondiente (Ecuación 5).

Según Steduto & Albrizio (2005) el estrés hídrico, salvo en casos muy graves, tiene un efecto insignificante en WP^* si los nutrientes no son limitantes, por lo que el efecto sobre la B está completamente relacionado por la reducción en Tr .

$$B = WP^* \sum \left(\frac{Tr}{ET_o} \right) \quad (5)$$

Dónde: B , biomasa por encima del nivel del suelo [Kg.m^{-2}]; WP^* , productividad del agua normalizada [g.m^{-2}]; Tr , transpiración del cultivo [mm día^{-1}]; y ET_o , evapotranspiración de referencia diaria del cultivo [mm día^{-1}].

Xu & Hsiao (2004) mencionan que la normalización de WP implica dos factores ambientales: la demanda evaporativa de la atmósfera representada por la ET_o , y la concentración de dióxido de carbono del aire ($[CO_2]$) teniendo como año de referencia, el 2000. Estos dos factores tienen un impacto importante en la productividad del agua, definida como el ratio de biomasa producida (potenciada por el incremento de $[CO_2]$) a causa del agua transpirada. La normalización hace que WP^* sea aplicable a diversos lugares y temporadas, ya que incluye las variaciones de ET_o , y en lapso de tiempo de años, incluye el aumento de $[CO_2]$. La normalización para la demanda evaporativa se obtiene dividiendo la Tr entre ET_o para cada día. La normalización de $[CO_2]$ aplica un multiplicador (f_{CO_2}), que depende del ratio y la diferencia entre $[CO_2]$ en el año de referencia arbitraria (año 2000) y del año cuando el cultivo fue sembrado. La $[CO_2]$ actual

de cada año es el promedio medido en la estación del observatorio de Mauna Loa, Hawaii, EE.UU.

Simulación del rendimiento del cultivo (Y)

El rendimiento del cultivo (Y) se calcula como el producto de la biomasa (B) final y el índice de cosecha (HI). El HI real se obtiene al ajustar, durante la simulación, el índice de cosecha de referencia (HI_o) con un factor de ajuste (f_{HI}) por efectos del estrés. HI_o es la fracción de B que es cosechable cuando se observa que se encuentre en condiciones de no estrés y es uno de los parámetros específicos del cultivo. Y se calcula como:

$$Y = f_{HI} HI_o B \quad (6)$$

Dónde: Y, rendimiento del cultivo [$Kg.m^{-2}$]; f_{HI} , factor de ajuste por efectos de estrés; HI_o , índice de cosecha de referencia [%]; y B, biomasa por encima del nivel del suelo [$Kg.m^{-2}$].

El factor f_{HI} depende de la extensión y el momento en el cual se origine el stress hídrico; como también de la temperatura durante el ciclo de cultivo. El estrés hídrico a menudo reduce el HI, pero puede también aumentar el HI mediante la inhibición del crecimiento vegetativo, que compite con granos o frutos por nutrientes. Así, el valor de f_{HI} puede variar entre un máximo específico del cultivo (hasta 1.6) y cero (fracaso completo). Durante la formación del rendimiento, f_{HI} es modelado para elevarse por encima de 1 cuando hay estrés hídrico leve que inhibe la expansión dosel pero que no es aún lo suficientemente fuerte como para provocar el cierre de estomas y reducir fotosíntesis. Así f_{HI} depende de $K_{s\ exp}$ y $K_{s\ sto}$. Durante la floración, la polinización puede verse obstaculizada por la escasez de agua, el frío o el estrés por calor, cada uno con su propia función K_s , que resulta en una f_{HI} menor que 1.

Por último, un período de relleno del fruto/grano demasiado corto o la etapa de formación del tubérculo, causada por el estrés inducido por senescencia temprana, dará lugar a reducciones en f_{HI} y HI, porque no existiría tiempo suficiente para el llenado el grano, tubérculo o almacenamiento de las raíces de tuberosas.

2.2.3. ETAPAS FENOLÓGICAS DEL CULTIVO EN AQUACROP

Muchas de las diferencias entre las variedades de un cultivo se relacionan con el tiempo de duración de las etapas de desarrollo. El usuario debe especificar el tiempo para alcanzar una etapa particular o su duración en la variedad local. Estas etapas se muestran en la Figura 7: tiempo para el 90 % de emergencia de las plántulas, para iniciar la floración, para iniciar la senescencia del dosel, para la madurez fisiológica y la duración de la floración.

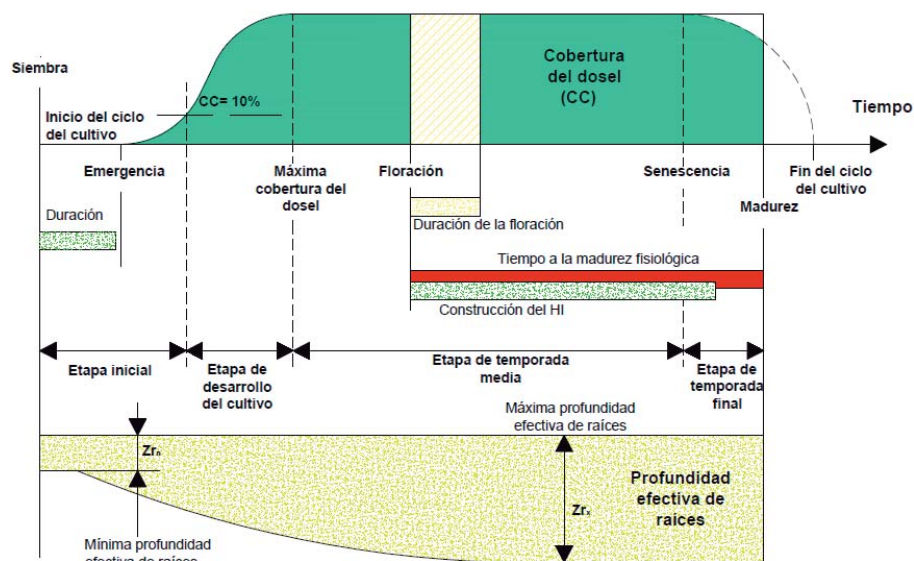


Figura 7: Representación esquemática de las etapas fenológicas del cultivo en Aquacrop. Fuente: Steduto, et al. (2012)

Etapa inicial

Esta etapa contempla el momento de la siembra, donde se requiere indicar la densidad de plantación. Engloba también al tiempo de emergencia, siendo este un indicador que el 90% de las plántulas en el terreno experimental han emergido, es probable que este tiempo sea estimado y no determinado a partir del conteo real de las plántulas.

Según Steduto, et al. (2012) se deben ajustar los valores simulados y medidos de cobertura del dosel (CC) de tal manera que coincidan en la etapa de plántula y al inicio de la estación. No obstante, el ajuste debe implementarse únicamente después de que los parámetros conservativos relevantes (tamaño inicial del dosel por plántula y el coeficiente

de crecimiento del dosel) se hayan parametrizado de manera adecuada y de que la densidad de la plantación se haya determinado.

La etapa inicial termina cuando la cobertura del dosel alcanza un valor del 10%, momento en el cual las semillas germinadas pueden extraer agua para luego desarrollar un crecimiento en profundidad, habiéndose comenzado este proceso después de la emergencia.

Etapa de desarrollo del cultivo

Las raíces siguen creciendo a profundidad, el tallo comienza un período de rápida elongación y la máxima cobertura del dosel (CCx) es alcanzada cuando el cultivo no se encuentra bajo condiciones de estrés. El crecimiento de la cobertura en esta etapa está condicionado por el parámetro conservativo, coeficiente de crecimiento del dosel (CGC), que al no ser conocido, será estimado al indicar el tiempo que la cobertura tarda en llegar a su máximo valor.

Etapa de temporada media

En esta etapa, se inicia el periodo reproductivo, teniendo una suma importancia el establecimiento de los días exactos a la floración, y la duración de la misma ya que se encuentra ligado a la sub o sobre estimación de la construcción del índice de cosecha (HI) que por último, proporcionaría un rendimiento erróneo.

El crecimiento de las raíces se ralentiza a diferencia del crecimiento exponencial en la etapa de desarrollo del cultivo, y llega a su valor máximo (Z_{r_x}) casi al término de esta etapa. Y la etapa culmina al inicio de la senescencia del dosel, como resultado del amarilleamiento de las hojas, bajo condiciones óptimas sin estrés hídrico

Etapa de temporada final

Aquí la madurez fisiológica del grano es alcanzada. Steduto, et al., (2012) menciona que AquaCrop utiliza como tiempo de madurez predeterminado el momento en que la cobertura del dosel se reduce al 5 % de la cobertura del dosel máxima alcanzada. También, los usuarios pueden cambiar el tiempo de madurez de acuerdo con sus propios datos de tal manera que se tenga un dato más sólido.

2.2.4. BALANCE HÍDRICO EN LA ZONA RADICULAR

En una forma esquemática, la zona radicular puede ser considerada como un reservorio (Figura 8). Al mantener un registro de los flujos de agua de entrada y salida en los límites de la zona radicular, la cantidad de agua retenida en la zona radicular se puede calcular en cualquier momento de la temporada por medio de un balance hídrico del suelo.

El agua es añadida al reservorio en el suelo por la lluvia y el riego. Cuando la intensidad de la lluvia es demasiado alta, parte de la precipitación se puede perder por escorrentía superficial y sólo una fracción se infiltrará. El agua infiltrada no siempre puede ser retenida en la zona radicular. Cuando la zona radicular se encuentra demasiado húmeda, parte del agua del suelo se filtra fuera de la zona radicular y se pierde como percolación profunda. El agua también puede ser transportada hacia arriba a la zona radicular por el ascenso capilar de la tabla de agua subterránea poco profunda. Procesos como la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo eliminan el agua del embalse. Raes, et al. (2012).

Cuando se calcula el balance de agua en el suelo, la cantidad de agua almacenada en la zona radicular se puede expresar como una lámina de agua equivalente (W_r) o como el agotamiento en la zona radicular (D_r). El agua disponible total en el suelo (TAW) es la cantidad de agua retenida en la zona radicular, entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. En la capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular (D_r) es cero y, en el punto de marchitez permanente, D_r es igual a TAW. Steduto, et al. (2012).

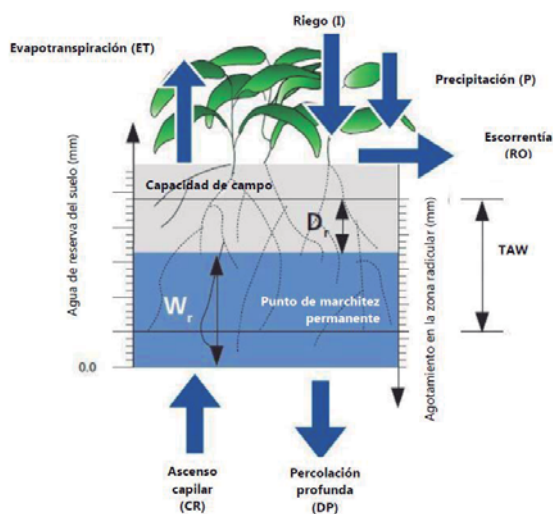


Figura 8: Zona radicular expresada como un reservorio. Fuente: Steduto, et al. (2012).

El balance diario del agua en la zona radicular del suelo, expresado en términos de agotamiento al final del día, es por lo tanto:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (7)$$

Dónde: $D_{r,i}$, agotamiento de humedad en la zona radicular al final del día i [mm]; $D_{r,i-1}$, contenido de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ [mm]; P_i , precipitación en el día i [mm]; RO_i , escurrimiento superficial en el día i [mm]; I_i , lámina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo [mm]; CR_i , ascenso capilar proveniente de la mesa de agua subterránea en el día i [mm]; $ET_{c,i}$, evapotranspiración del cultivo en el día i [mm]; y DP_i , pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda al día i [mm].

2.3. CAMBIO CLIMÁTICO

Las proyecciones de los cambios en el sistema climático se elaboran empleando una jerarquía de modelos climáticos, que van desde modelos climáticos sencillos a otros integrales. Estos modelos climáticos son simuladores del sistema climático (Atmósfera, Hidrósfera, Criósfera, Biósfera y Litósfera) mediante la resolución de las ecuaciones de las leyes y principios de la física que gobiernan los procesos en cada componente del sistema y los intercambios de energía y masa entre sí, SENAMHI (2015).

Estos modelos climáticos se encuentran en pleno desarrollo desde el AR4 (Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el cambio climático - 2007) y sus avances permiten los cálculos pertinentes para adecuarse a las políticas medioambientales, como por ejemplo para el dióxido de carbono (CO₂), compatible con una meta de estabilización climática especificada.

Luego del AR4, el último avance que el IPCC ha aprobado en su XXXVI reunión plenaria realizada en setiembre 2013, fue la contribución al Quinto Informe de Evaluación (AR5, de sus siglas en inglés) del Grupo de Trabajo I, dedicado a las bases científicas físicas del cambio climático. En términos generales, se puede decir que, en lo referente a las bases físicas, el AR5 confirma y refuerza, los resultados del anterior informe. Este informe se basa en nuevas evidencias extraídas de un mayor número de observaciones, modelos climáticos mejorados, una mejor comprensión de los procesos y retroalimentaciones del sistema climático, y un mayor número de proyecciones de cambio climático.

2.3.1. ESCENARIOS DE EMISIÓN PARA CAMBIO CLIMÁTICO

Un escenario climático futuro es una representación plausible que indica cómo posiblemente se comportará el clima en una región en una cierta cantidad de años, tomando en cuenta datos históricos y usando modelos matemáticos de proyección, generalmente para precipitación y temperatura (IPCC, 2007). El uso de múltiples escenarios y modelos climáticos han permitido describir una amplia gama de posibles evoluciones futuras del clima de la Tierra. Para las nuevas simulaciones de modelos climáticos, realizados en el marco de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, se ha utilizado un nuevo conjunto de escenarios: las rutas representativas de concentración (RCP, de sus siglas en inglés), cabe señalar que algunos nuevos RPC pueden contemplar efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI, a diferencia de los escenarios de emisión utilizados en el AR4 (denominados SRES, de sus siglas en inglés). En todas las RCP, las concentraciones atmosféricas de CO₂ son más elevadas en el 2100 respecto al día de hoy, como resultado de un mayor aumento de las emisiones de CO₂ acumuladas en la atmósfera durante el siglo XXI. En este nuevo tipo de escenarios se han definido fijar los niveles de forzantes radiativas hacia el año 2100, en vez de considerarse ciertos niveles futuros de emisión de GEI. La forzante radiativa (FR) se define como la diferencia entre la radiación entrante a la Tierra versus la radiación que se entrega de vuelta al espacio, lo que implica que si la diferencia es positiva se tendrá calentamiento, producto de la acumulación de energía en la superficie terrestre. La FR total para el año 2100 varía desde 2,6 a 8,5 W/m², tal como se aprecia en la Tabla 2. De igual modo se observa según el tipo de RCP un cambio de temperatura superficial media muy significativa, con rangos desde 0.4°C hasta 2.6°C para el periodo de 2046 -2065 y de 0.3°C hasta 4.8°C para el periodo de 2081-2100.

Según el Quinto informe de evaluación del IPCC (2013), cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes (clasificadas por sectores), de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono. En la Figura 9, se visualiza los cuatro escenarios que comprenden las RCP, uno donde los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP 2.6), dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5).

Tabla 2: Principales características para los cuatro escenarios de cambio climático RCP: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5

RCP	FR	Tendencia del FR	[CO ₂]en 2100	Rango probable para el Cambio de temperatura superficial media (°C)	
				2046 -2065	2081-2100
<u>RCP 2.6</u>	2.6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm	0.4 – 1.6	0.3 -1.87
<u>RCP 4.5</u>	4.5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm	0.9 -2.0	1.1 – 2.6
<u>RCP 6.0</u>	6,0 W/m ²	creciente	670 ppm	0.8 – 1.8	1.4 – 3.1
<u>RCP 8.5</u>	8.5 W/m ²	creciente	936 ppm	1.4 – 2.6	2.6 – 4.8

FUENTE: IPCC (2013)

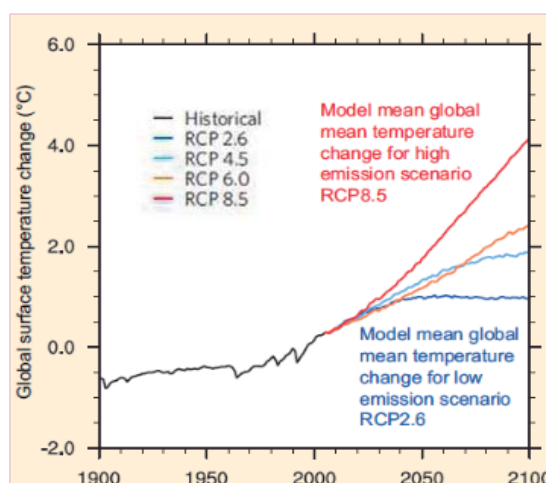


Figura 9: Variación de la temperatura global proyectado al 2100 para cuatro escenarios de cambio climático. Siendo el escenario con emisiones más bajas el RCP 2.6 (línea azul) y el escenario con emisiones más altas el RCP 8.5 (línea roja). Fuente: IPPCC (2013)

De acuerdo a la Figura 10 (izquierda), se visualiza que en la mayoría de las regiones habrá más episodios relacionados con extremos de altas temperaturas y menos relacionados con extremos de bajas temperaturas, causando que la tierra se va a calentar más rápido que el océano, y el Ártico se calentará más rápido que los trópicos. Por otro lado, de acuerdo a la misma Figura 10 (derecha), se observa que el contraste en la precipitación estacional media entre las regiones secas y húmedas aumentará en la mayor parte del globo. Las regiones situadas en latitudes altas y en el océano Pacífico ecuatorial verán incrementarse sus precipitaciones.

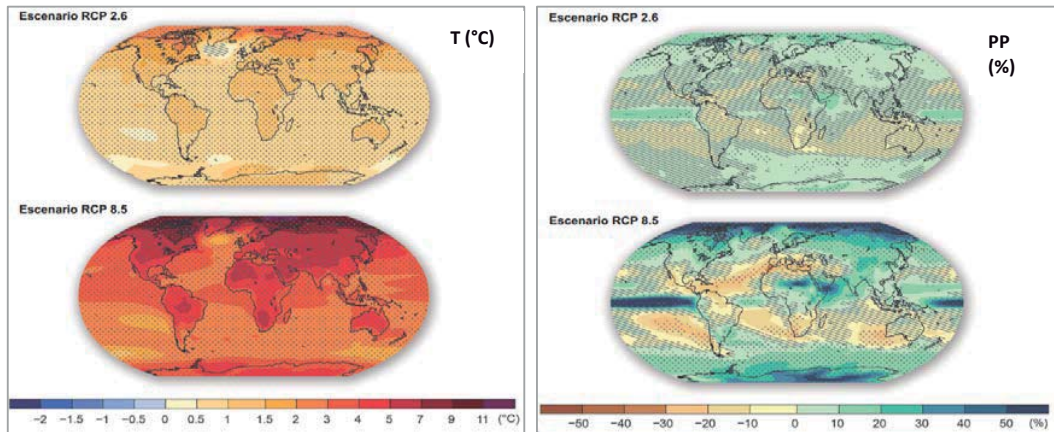


Figura 10: Variación de la precipitación y temperatura media, entre los periodos de 1986-2005 y 2081-2100: para los escenarios RCP 8.5 (más altos) y RCP 2.6 (más bajos). Izquierda: Variación de temperatura media en la superficie. Derecha: Variación de precipitación media. Fuente: IPCC (2013)

Por consiguiente, el aumento en las forzantes radiactivas para las próximas décadas y decenios hace imperante la necesidad de modelar los posibles efectos a nivel hidrológico y la consecuente modificación en la disponibilidad de recursos hídricos en las cuencas a nivel global, herramientas necesarias en la gestión y explotación de los recursos hídricos en el mediano y largo plazo.

2.3.2. MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL (GCM)

Según la definición del IPCC (2007), los modelos de circulación general (GCM, de sus siglas en inglés) constituyen una simplificación e idealización del sistema climático, por lo que es considerada como la herramienta más avanzada disponible en la simulación de la respuesta global a las concentraciones de gases de efecto invernadero cada vez mayores.

Estos modelos tienen como resultados series de tiempo de variables meteorológicas como temperatura y precipitación. Para ello, los GCM representan procesos físicos en la atmósfera, criósfera y superficie terrestre; utilizando una grilla tridimensional del globo, con resoluciones horizontales típicas del orden de 250 a 600 km y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, llegando incluso a 30 capas en el océano (ver Figura 11). La grilla es por tanto bastante gruesa, siendo imposible de modelar los procesos que ocurren a menores escalas (como formación de nubes y procesos hidrológicos a nivel de cuenca).

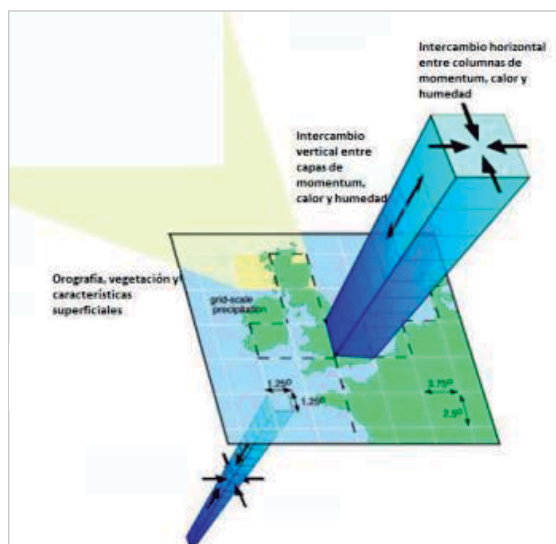


Figura 11: Esquema de los GCM. Fuente: IPCC (2013)

Entonces los GCM muestran buena habilidad para simular la evolución de las circulaciones de escala global, esta bondad no es muy útil para el estudio de impactos locales debido a que la resolución espacial de esos modelos está por encima de la escala de los impactos locales que se desean analizar. Existen dos aproximaciones para lidiar con esta diferencia de escala e información: los métodos de reducción de escala estadística y dinámica (Amador et al., 2009).

La regionalización estadística asume una relación entre las variables a una gran escala espacial y el clima local, como precipitación y temperatura. Se utiliza la ecuación de transferencia (por ejemplo regresión lineal) para determinar esa relación. Por otra parte con respecto al segundo método, la regionalización dinámica usa la información de modelos globales pero se ejecuta con una mayor resolución espacial en un proceso llamado anidación, SENAMHI (2015).

2.3.3. REGIONALIZACIÓN ESTADÍSTICA DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS EN EL PERÚ

En contraste con la resolución grosera de los actuales GCMs (~200 km), casi todos los efectos del cambio climáticos ocurren a escala local (100 m – 1 km) y su modelación requiere resolución de mesoescala. Este ajuste de escala es particularmente importante en

regiones de topografía compleja: montañas, zonas costeras, lagos, etc. como es el caso del Perú.

La regionalización climática son técnicas las cuales permiten derivar información a escala más fina desde las salidas de los GCM para estudios de impacto. Por lo tanto, considerando la experiencia desarrollada en la regionalización de escenarios de cambio climático en el Perú, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, en adelante) de acuerdo al Marco conceptual del Proyecto “AMICAF”, ha usado de técnicas de regionalización o de disminución de escala “downscaling”, lo que ha permitido obtener información adaptadas a las características específicas del Perú. En este sentido, para el desarrollo de dicha técnica fue necesario una base de datos observacionales para desarrollar y validar los diferentes modelos de regionalización estadística, por lo que el SENAMHI proporcionó la información diaria de las variables climáticas: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, para el conjunto de estaciones a nivel nacional (Ver Figura 12).

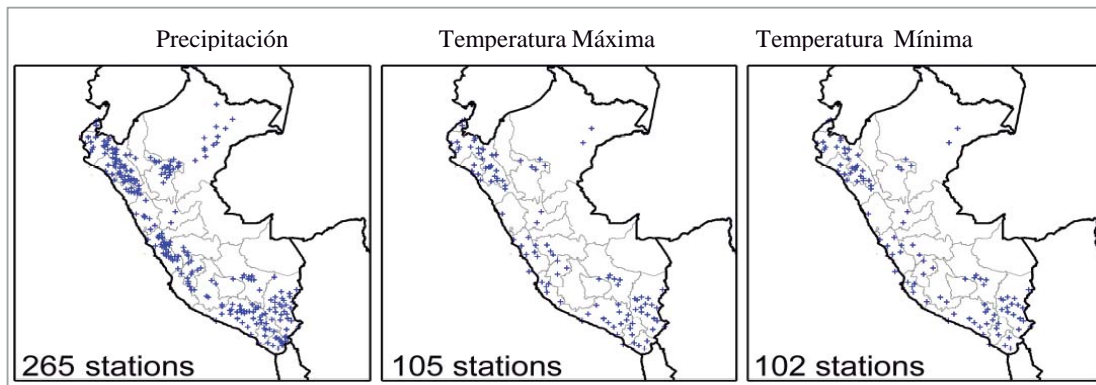


Figura 12: Puntos azules indican la ubicación de las 265, 105 y 102 estaciones para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Fuente: SENAMHI (2015)

El SENAMHI proporcionó proyecciones de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, hacia el período 2050 (media centrada del periodo 2036-2065) para un conjunto de 6 posibles escenarios (3 GCM X 2 RCPs). Para ello usó tres GCMs (CanESM, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR, ver Tabla 3) y dos RCPs (RCP4.5 y RCP8.5).

Tabla 3: Características de modelos climáticos globales (GCMs) empleados para la regionalización estadística de escenarios climáticos en el Perú

Nombre GCM	Instituto	Resolución	Referencia
CanESM2	CCCMA	2.8° x 2.8°	Chylek, et al (2011)
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	1.4° x 1.4°	Voldoire, et al (2011)
MPI-ESM-MR	MPI	1.8° x 1.8°	Raddatz, et al (2007), Jungclaus et al (2010)

FUENTE: SENAMHI (2015)

En los resultados obtenidos por el SENAMHI, de acuerdo a la Figura 13, se observa que se tiene un incremento medio (respecto a 1971-2000) en todo el país entre 2°C a 3°C y 4°C a 6°C para la temperatura máxima y mínima, respectivamente. En relación a la precipitación, a pesar de su variabilidad espacial, se proyecta un incremento medio a nivel nacional de entre 10 a 20 por ciento.

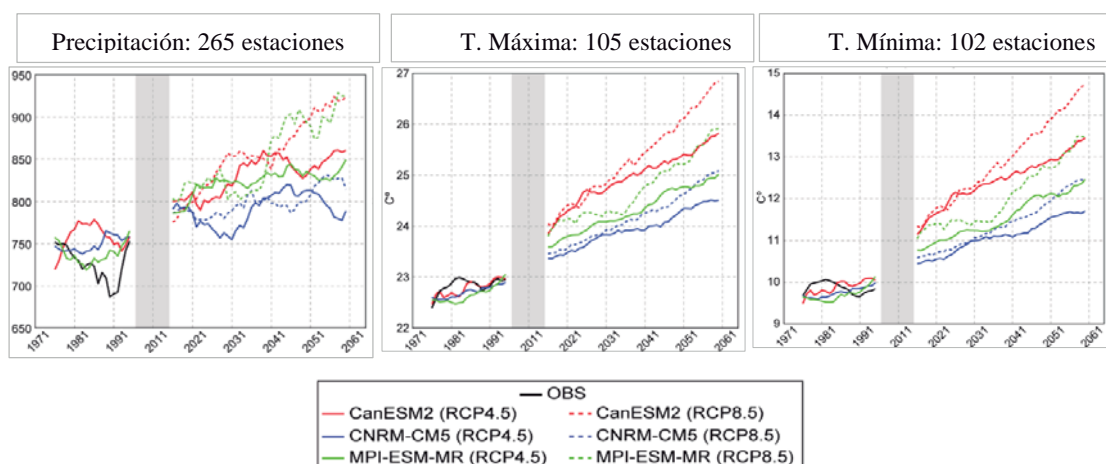


Figura 13: Proyecciones para la precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima con tres modelos GCMs con respecto a la información histórica 1971-2000. Cada escenario RCP 4.5 en línea sólida y RCP 8.5 en línea punteada. El sombreado en gris marca el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de los escenarios. Fuente: SENAMHI (2015).

2.3.4. FUTURO CLIMÁTICO REGIONAL PARA EL PERÚ

En el estudio del IPCC (2013) se muestran las evaluaciones regionales de cambio climático, principalmente sobre temperatura de aire superficial y precipitaciones, basado en un conjunto de múltiples modelos de proyecciones. Según el estudio, para el caso de Sur América se ve afectado por varios fenómenos climáticos. Todas las variaciones del clima

que el Perú exhibe de un año a otro es conocido como variabilidad interanual, están determinadas en gran medida por la presencia de El Niño/Oscilación Sur (ENOS) y los eventos extremos asociados a éste, los que causan grandes pérdidas económicas por sus efectos.

SENAMHI (2009) indica que los eventos ENOS más intensos modulan el comportamiento interanual, generando anomalías positivas de diferente intensidad a lo largo del Perú. De manera que en la Sierra Central y Sur muestran una variabilidad interanual muy similar, pero con tendencias opuestas, donde los eventos ENOS parecen ser la principal fuente dinámica que modula, con mayor intensidad, estas regiones. Las tendencias lineales de la temperatura máxima media anual y estacional muestran un predominio de valores positivos (aumento) sobre todo el territorio con valores de $+0,2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ en promedio y, en general, estos son estadísticamente significativos en las zonas altas del sur del Perú. De igual modo las tendencias anuales y estacionales de las temperaturas mínimas promedio son en su mayoría positivas con valores de $0,1- 0,2^{\circ}\text{C}/\text{década}$, con excepción de varias estaciones ubicadas al norte del lago Titicaca.

La distribución temporal de la temperatura mínima muestra su dependencia de las fases del fenómeno ENOS, que altera la variabilidad interanual, dependiendo de su intensidad. Las tendencias de las temperaturas mínimas medias se incrementaron, en promedio, ligeramente en menor proporción que las temperaturas máximas. Estas tendencias observadas se encuentran dentro del rango estimado por el IPCC4 para todo la Tierra, entre los años de 1981 a 2005 ($0,18^{\circ}\text{C}/\text{década}$). Asimismo también se analiza que estas tendencias de las temperaturas presentan valores regionales muy particulares que, posiblemente, además de la influencia antropogénica, existan otros aspectos tales como las islas de calor, crecimiento de las ciudades, alteraciones de las propiedades del suelo, deforestación, etc., las que originan comportamientos diferenciados en las tendencias observadas en las estaciones meteorológicas de una misma región (SENAMHI, 2009).

En el caso de la precipitación total anual para el Perú se presenta incrementos (tendencias positivas) en el período de 1965 al 2006, marcados sobre la costa norte, con valores entre 30 y 40 por ciento sobre sus promedios, mientras que la selva norte presenta disminuciones (tendencias negativas) desde la década de 1960 hasta fines del siglo pasado, con valores entre 20 y 30 por ciento sobre sus promedios con significancia estadística. (SENAMHI, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El ensayo se realizó en el campo “libre 1” del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el margen izquierdo del Río Rímac, valle de Ate Bajo, distrito de la Molina, provincia de Lima, región de Lima. Se encuentra situado a $12^{\circ}05'06''$ S, $76^{\circ}57'06''$ W y 251 m.s.n.m, correspondiente a la formación Desierto Subtropical, típico de la costa central del Perú.

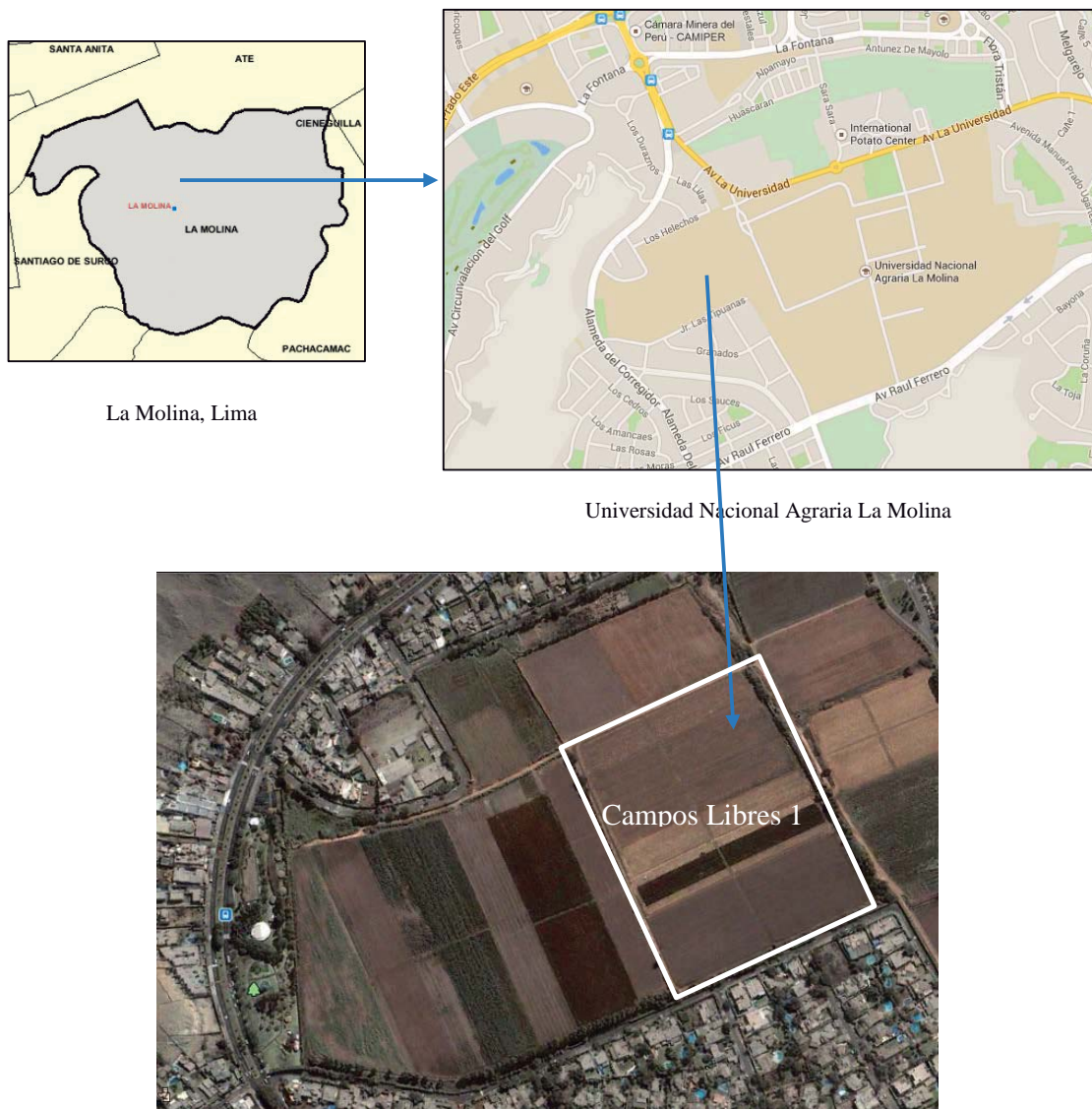


Figura 14: Localización del campo experimental – Campos Libres 1 (UNALM)

3.1.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS

La información diaria climatológica fue adquirida de la estación meteorológica Von Humboldt (12° 00' 05" latitud sur, 76° 57' 00" longitud oeste, a una elevación de 243.7 m). La Figura 15 resume la información climática diaria correspondiente al período vegetativo del cultivo (20 de Noviembre 2013 al 16 de Abril 2014), en la cual se incluye la temperatura máxima y mínima (°C), velocidad de viento (m s^{-1}), precipitación (mm), humedad relativa (%) , heliofanía (horas y decimales) y la evapotranspiración de referencia (ETo, mm d^{-1}) determinada con el método de la FAO-Penman Monteith. Allen, et al. (2006), calculada en el software ETo Calculator. Los días después de la siembra son abreviados con las siglas: "DDS".

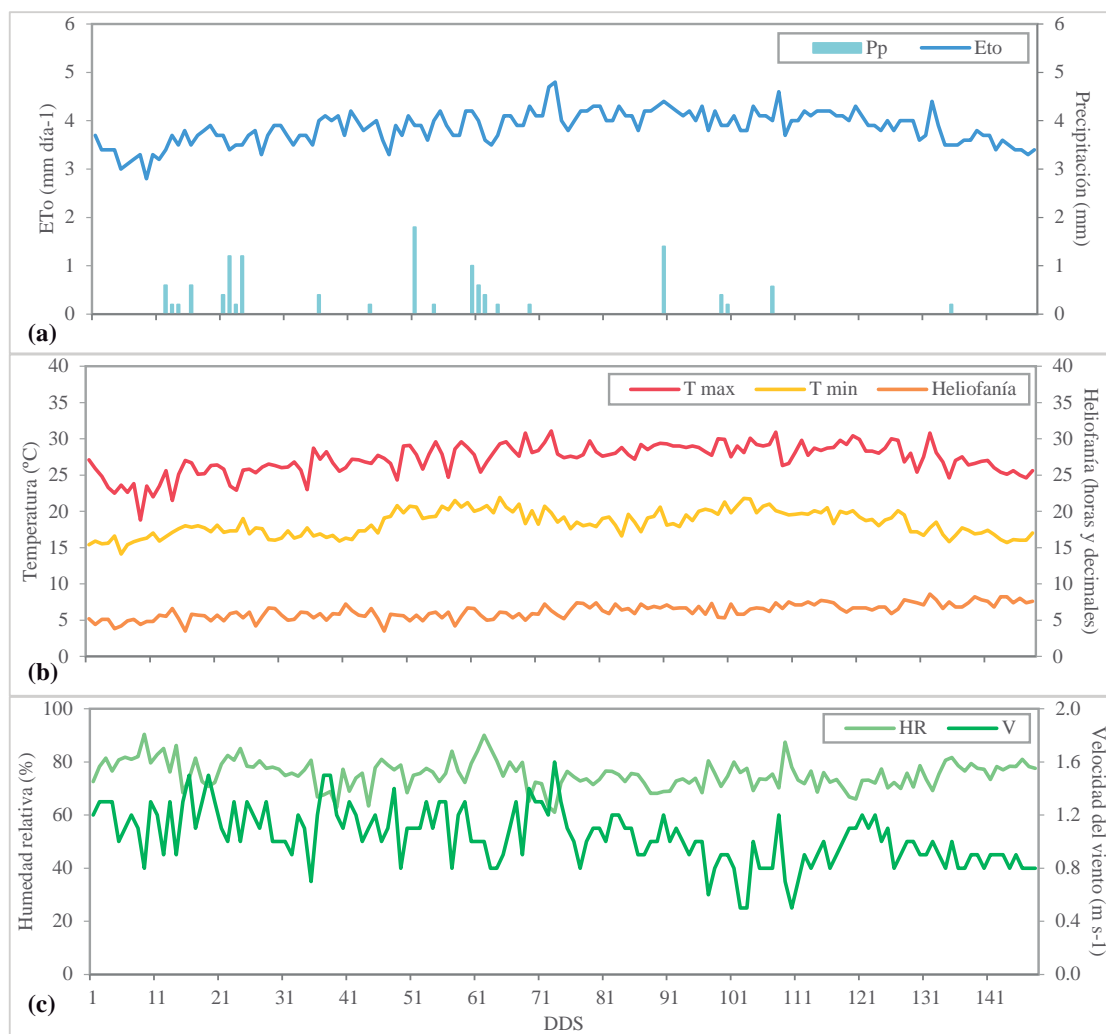


Figura 15: Variación diaria de la precipitación-evapotranspiración (a), temperatura-heliofanía (b) y humedad relativa-velocidad del viento (c), durante el desarrollo del estudio.

3.2. MATERIALES

3.2.1. MATERIAL GENÉTICO EXPERIMENTAL

El material genético experimental usado fue el híbrido del maíz amarillo DK7088, híbrido comercial producido por la corporación Monsanto y expendido por la empresa HORTUS en el Perú. Este es un híbrido con un gran potencial de rendimiento gracias a su grano grande y a su excelente peso. Presenta un potencial de rendimiento por encima de las 12 ton/ha y una altura de planta promedio de 235 cm con 18 hojas en promedio; las cuales a su vez, tienen una posición semierecta. Las mazorcas poseen forma cilíndrica, con un número de hileras de 16 a 18 por mazorca, y un peso de 1000 granos de 322.94 g. Los granos son de textura cristalina ligera y poseen un color amarillo anaranjado. En condiciones de verano, la cosecha se realiza entre los 130 a 140 días. En condiciones de invierno, entre los 155 a 175 días.

3.2.2. CAMPO EXPERIMENTAL

El campo experimental estuvo constituido por una parcela del campo “Libres 1” (perteneciente al Fundo de la UNALM), con 2592 m² como área efectiva de ensayo, sin incluir los bordes del campo (Figura 16). La superficie estuvo dividida en 3 bloques experimentales espaciados 1.6 m entre ellos. Cada bloque experimental fue separado en 18 parcelas (unidades experimentales) de 48 m² cada una, que hacían un total de 54 parcelas de 2592 m², con 6 surcos cada una. (Ver Tabla 4).

Tabla 4: Características del campo y de la parcela experimental

Campo experimental		Parcela Experimental	
Número de bloques	3	Área (m ²)	48
Ancho de calle (m)	1.6	Área total de las parcelas (m ²)	2592
Número de parcelas experimentales	54	Longitud de surco (m)	10
Número de surcos por parcela	6	Nº de surcos	6
Número de parcelas por bloque	18	Distancia entre surcos (m)	0.8
Longitud de cada parcela (m)	10	Distancia entre golpes (m)	0.3
Área de cada parcela (m ²)	48	Nº de golpes/ surco	33
		Nº de semillas /golpe	3
		Nº de plantas /golpe al desahíje	2

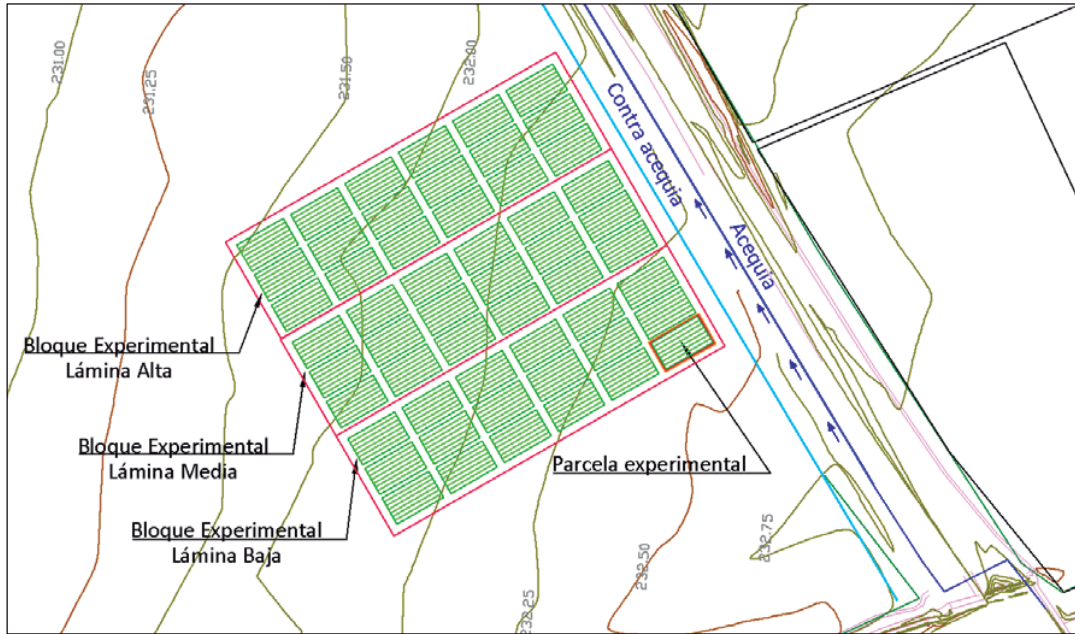


Figura 16: Esquema de distribución del campo experimental

3.2.3. SOFTWARES COMPLEMENTARIOS

La Tabla 5 muestra la relación de software utilizados para procesar la información que el Aquacrop necesita.

Tabla 5: Softwares complementarios utilizados en la investigación

Softwares	Descripción
ETo Calculator	Su principal función es calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) de acuerdo a los estándares de la FAO.
Statistica	Utilizado para el manejo estadístico de los resultados de la simulación del modelo
Autocad	Utilizado para la referenciación espacial de las fotografías de cobertura del dosel tomadas en campo
ArcGis	Utilizado para la referenciación espacial de las fotografías de cobertura del dosel tomadas en campo

3.3. METODOS

La metodología seguida en la presente investigación comprende de los siguientes procedimientos: (1) recolección de datos de campo y data climática, (2) preparación de inputs para el modelo, (3) calibración y validación del modelo, (4) simulación futura, y (5) proyección climática, los cuales se resumen en el diagrama de flujo de la Figura 17.

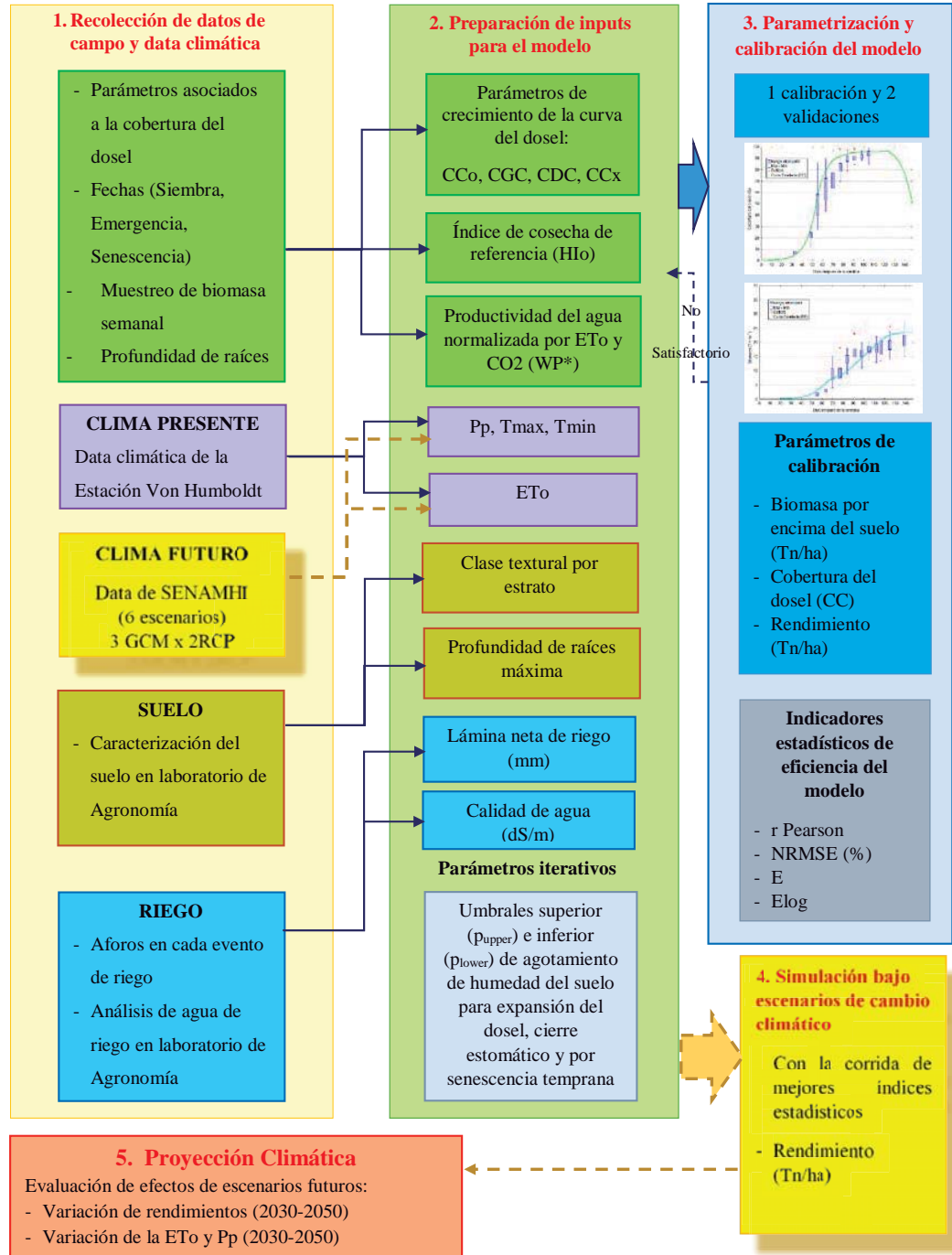


Figura 17: Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio

3.3.1. DISEÑO EXPERIMENTAL

El campo experimental fue dividido en 3 bloques experimentales diferenciados por la cantidad de lámina de riego aplicada (alta, media y baja), donde la primera sirvió a manera de calibración y las dos últimas para la validación espacial del modelo (Figura 18). Cada uno de los bloques experimentales estuvo constituido por 18 parcelas las cuales estuvieron diferenciadas entre sí por la distribución de la dosis de fertilización según su codificación (Tabla 6). Estas 3 dosis de fertilización fueron repetidas 6 veces en cada uno de los bloques experimentales.

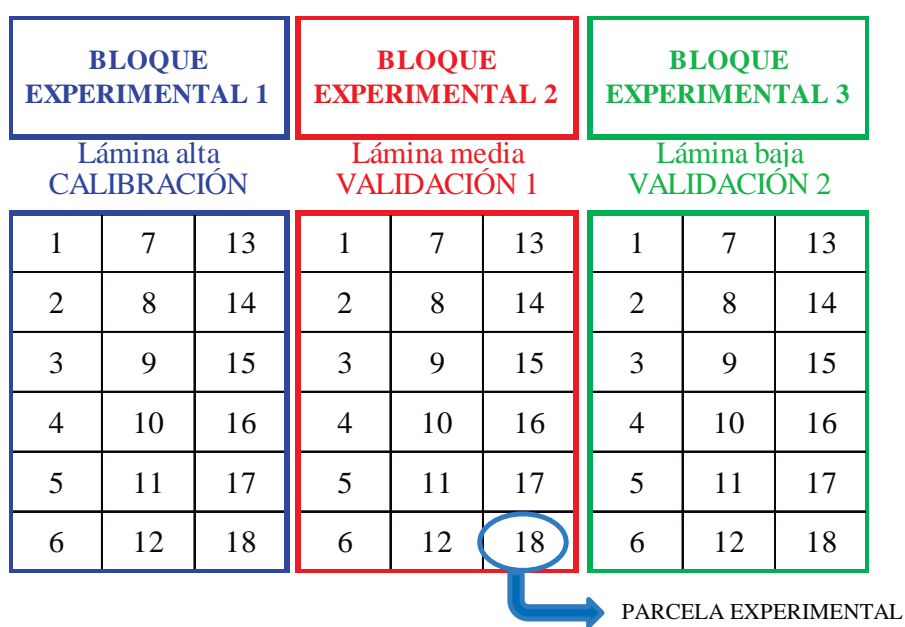


Figura 18: Diseño experimental

Tabla 6: Dosis de fertilización para cada tratamiento

Código de parcela	Dosis de fertilización N-P-K
Parcela 1 a la 6	120 - 160 - 140
Parcela 7 a la 12	220 - 160 - 140
Parcela 13 a la 18	250 - 160 - 140

3.3.2. INPUTS CLIMATOLÓGICOS REQUERIDOS POR EL MODELO

La data climática requerida por el modelo Aquacrop para la simulación presente fueron los valores de la temperatura máxima y mínima del aire (°C), evapotranspiración de referencia del cultivo en condiciones favorables (ET_o) y precipitación. La ET_o fue estimada usando el software “ET_o Calculator”, el cual solicita como parámetros de entrada la temperatura máxima y mínima, velocidad del viento a los 2m por encima de la superficie del suelo, heliofanía, y la humedad relativa media. El periodo de simulación presente de los parámetros fue de Noviembre del 2013 hasta Abril del 2014. Récords de 5 mm y 7.4 mm en el valor de la precipitación fueron reportados durante los meses en los cuales se realizó el experimento en el 2013 y 2014 respectivamente. Las variaciones de temperatura, ET_o y precipitación durante el período fenológico del experimento se mostraron previamente en la Figura 15.

3.3.3. EVALUACIÓN DE LA COBERTURA DEL DOSEL

AquaCrop necesita inputs del desarrollo de la cobertura dosel (CC) en la mayor medida posible; dado la complejidad de la medición de CC, estas fueron tomadas semanalmente. El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se identificó y marcó nueve plantas en el centro de cada una de las 54 parcelas experimentales, y se midió la CC durante todo el ciclo del desarrollo del maíz. (Figura 19)
- Mientras la planta tenía una altura menor a 1.40 m se utilizó un marco de madera enmallado (50 cm x 50 cm) para cuantificar cuanta superficie del marco era cubierto por las hojas. El enmallado fue diseñado con cuadrículas de 1cm² y una vez colocado el marco por encima de la planta, se necesitaba una cámara fotográfica para guardarla en el registro. Cada foto era registrada al colocar un papel con el código de la parcela experimental en el marco. (Figura 20-a).
- Cuando la planta superaba los 1.4 m, se utilizó un marco de 1m², el cual se colocaba en la superficie alrededor de la planta (Figura 20-b) y se utilizó un brazo con un ángulo recto que contaba con un soporte en su terminación donde se colocó la cámara fotográfica, aproximadamente a 4 metros por encima del suelo.

Previamente a ubicar el brazo por encima de la planta, se configuraba el temporizador de la cámara. Con esto se obtuvo fotografías de la porción de cobertura que cubría el marco en el suelo en todas las plantas. Al igual que el otro método, cada planta fue registrada según el código de la parcela experimental.

- El procesamiento de los datos se llevó a cabo con una computadora, y la determinación de la cobertura estuvo basada en la siguiente ecuación:

$$CC(\%) = \frac{\text{Área cubierta por las hojas}}{\text{Área total de referencia}} \quad (8)$$

Donde el área total de referencia, venía a ser el marco agronómico determinado en función al distanciamiento entre planta y planta (30 cm) y al de entre surco y surco (80 cm). Por lo tanto, se requirió el software AutoCad en el cual se pudo escalar cada una de las fotos en función al marco de referencia que contaba con medidas conocidas, por último se definió el perímetro del área cubierta por las mediante polilíneas.

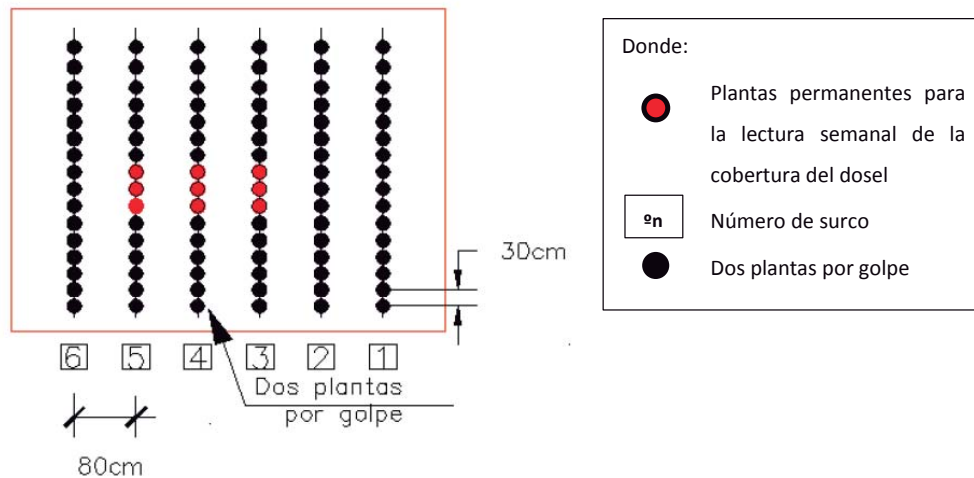


Figura 19: Ubicación de plantas para muestreo de CC

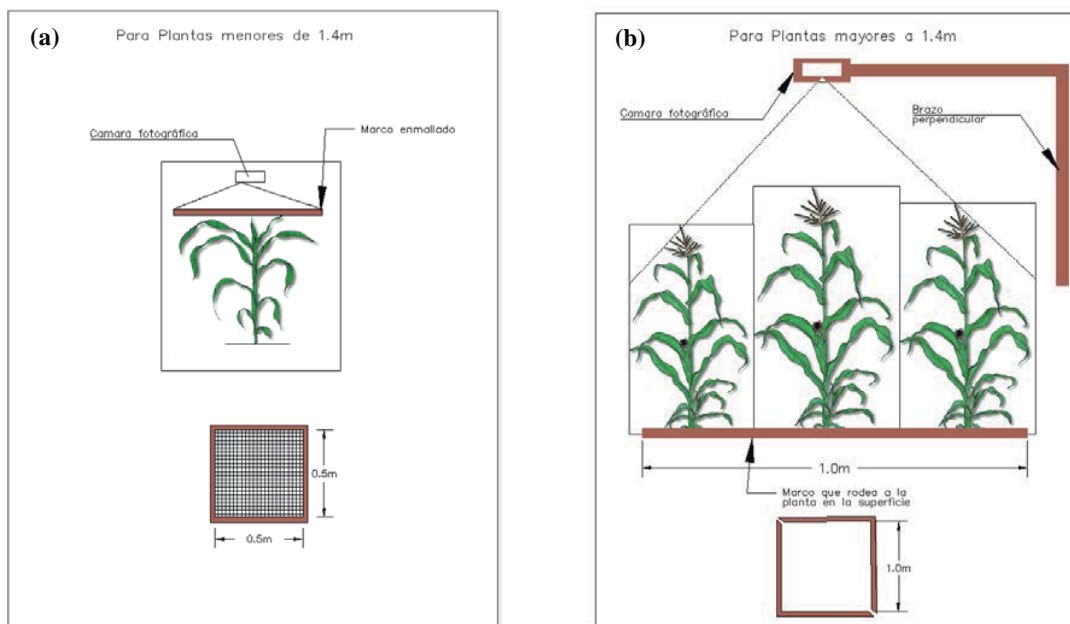


Figura 20: Medición de la cobertura del dosel según altura de planta: Para plantas menores a 1.4 m (a), para plantas mayores a 1.4m (b).

3.3.4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SUELO

Para una mejor caracterización edáfica y determinación de los coeficientes hídricos del suelo necesarios como inputs del modelo, se realizó una calicata observando 3 horizontes claramente definidos el primer nivel fue de una profundidad de 0-30 cm. con una clase textural franco, el segundo nivel fue de los 30 a 60 cm de profundidad, mostrando una clase textural franco arenosa y el tercer nivel de los 60 cm de profundidad hasta el fondo de la calicata (90 cm), con una clase textural franco areno limosa. Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes perteneciente a la Facultad de Agronomía de la UNALM, obteniéndose los siguientes parámetros: textura del suelo, capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM), los cuales se resumen en la Tabla 7. El ensayo determinó el terreno no contaba con capas restrictivas que no permita el desarrollo normal de las raíces. El escaneo del resultado original del ensayo otorgado por el laboratorio se encuentra en el Anexo 1.

Tabla 7: Análisis de suelo del campo "Libres 1" de la UNALM

Solicitante		: Fundo UNALM		Predio:		: Libre-1		Provincia		: Lima		Referencia		: H.r. 43512-003C-14						
Departamento		: Lima		Fecha:		: 30/01/2014		Distrito		: La Molina										
Determinación (unidad de medida)	PH	C.E	CaCO3	M.O.	P	K	Análisis Mecánico			Clase Textural	Cationes Cambiables					Suma de bases	Saturación de bases	Suma de cationes	P.M.	
							Arena	Limo	Arcilla		Ca+2	Mg +2	K+	Na+	Al +3 +H+					%
Horizontes	Distancia (1:1)	(1:1)	%	%	ppm	ppm	%	%	%											
AP	0-30 cm	0.69	1.8	0.07	2.6	49	37	45	18	Fr.	9.68	1.37	0.11	0.04	0.00	11.2	11.2	100	20.69	11.42
C	30-60 cm	0.81	2.6	0.43	9.1	94	67	19	14	Fr.A	4.57	1.45	1.10	0.08	0.00	7.2	7.2	100	13.97	7.20
Método de Análisis	60-90 cm	0.59	7.1	0.47	3.1	58	55	23	22	Fr.Ar.A	5.14	1.65	1.05	0.16	0.00	8	8	100	18.12	9.80
	Calicata	Potenci ómetro (1:1)	Extracto acuoso en relacion suelo-agua (1:1)	Gasométrico utilizan calcarómetro (%)	Walkley y Black (%)	Olsen Modificado	Extracción con acetato de amonio (CH3COONH4) N, pH 7.0	Hidrómetro de Bouyoucos	Triángulo Textural	Acetato de Amonio (CH3COONH4)N; Ph 7.0	Absorción atómica	Amarillo de Thiazol	Fotometría de Llama	Fotometría de Llama	Método de Yuan, extracción con KCLIN			Bureta cm3		

A : Arena

A.Fr : Arena Franca

Fr : Franco

Fr.A : Franco Arenoso

Fr : Franco

Fr.L : Franco Limoso

L : Limoso

3.3.5. MEDICIÓN DE LA BIOMASA Y PROFUNDIDAD DE RAÍCES

Los muestreos de biomasa seca por encima del nivel del suelo se hicieron semanalmente. El procedimiento consistió en el picado y secado de la planta en un horno a 105 °C por 48 horas, para luego ser pesada. La metodología de muestreo consistió en la extracción de una planta por cada parcela experimental cada semana (Figura 21), por lo que se recolectó 54 muestras semanales de todo el campo experimental. El surco contiguo al de donde se extrajo la muestra la semana anterior, sería el de donde se sacaría la planta para el siguiente muestreo. Al completar la diagonal pasadas varias semanas de muestreo, se pasó al primer surco, de donde se continuó el muestreo hasta formar otra diagonal perpendicular a la anterior. Se tuvo en consideración el no tocar las 9 plantas de monitoreo de CC que se encontraban en el centro de cada parcela experimental.

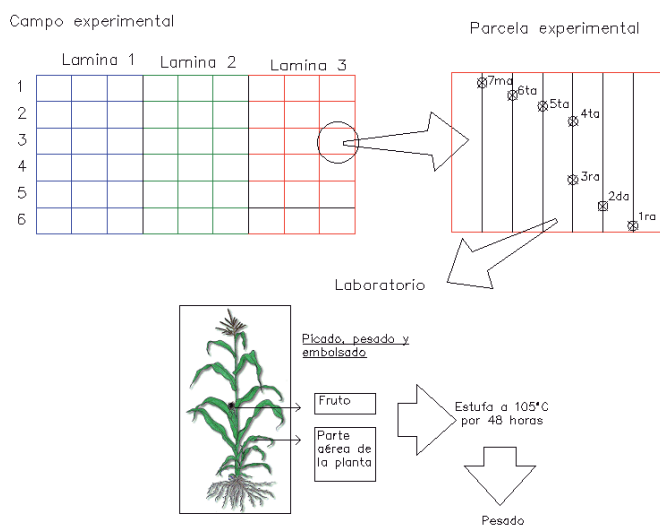


Figura 21: Procedimiento de muestreo para la biomasa seca aérea

A su vez, las mediciones de las profundidades de raíces fueron realizadas en las mismas plantas de donde se extrajo los muestreos de biomasa. Se limpió y se estiró la raíz más larga para ser medida con una wincha. Para calibrar Aquacrop se necesita la máxima profundidad de raíz alcanzada en el período de desarrollo del cultivo (Figura 22).

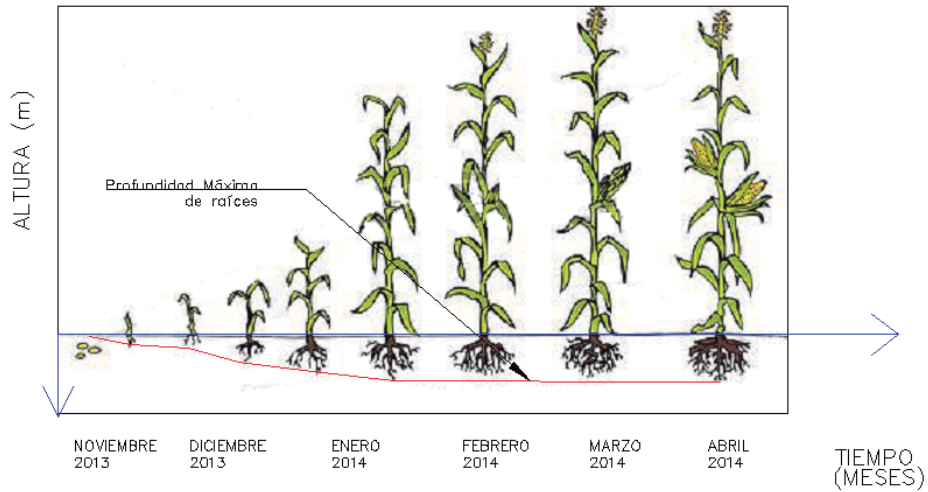


Figura 22: Esquema donde la planta alcanza la máxima profundidad de raíz)

La medición de las profundidades de raíces cesó el día en que la profundidad máxima fue alcanzada, el día 97 después del primer día de siembra. (Tabla 8). La profundidad de raíces es baja debido a que la semilla fue sembrada en seco.

Tabla 8: Profundidad de raíces promedio de cada uno de los experimentos para cada día de medición

Día de medición	Profundidad de raíces (cm)		
	L. alta	L. media	L. baja
55	24.5	19.8	17.0
59	25.4	20.7	27.2
70	27.9	25.1	27.3
76	29.5	28.2	29.1
83	32.7	29.9	30.6
97	33.1	31.0	32.8

3.3.6. RIEGO DE MANTENIMIENTO

La Figura 23 muestra la precipitación diaria y el riego de mantenimiento aplicado al terreno de cultivo durante el período experimental. El agua fue conducida a través de una acequia que se extendía a lo largo de la cabecera del campo experimental, que luego traspasaba su agua a una contra acequia, y esta última a los surcos de los bloques experimentales. El ingreso de agua a los 3 bloques experimentales fue controlado de tal manera, que cada uno de ellos recibió una lámina de riego diferenciada (alta, media y baja) de acuerdo al tiempo de riego otorgado (1 hr, 0.5 hr, 0.25 hr) respectivamente. Además del control del tiempo de riego, se realizaron aforos en la contra acequia y en los surcos de cada bloque experimental mediante el método del flotador. El total de agua aplicada a los bloques experimentales de lámina alta, media y baja durante el periodo vegetativo fue de 385, 210 y 120 mm respectivamente.

El análisis de la calidad del agua se realizó, al igual que los análisis de suelo, en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes perteneciente a la Facultad de Agronomía de la UNALM, (Ver Anexo 2), obteniéndose resultados de pH de 7.08 y de conductividad eléctrica (CE) de 0.57 dS/m.

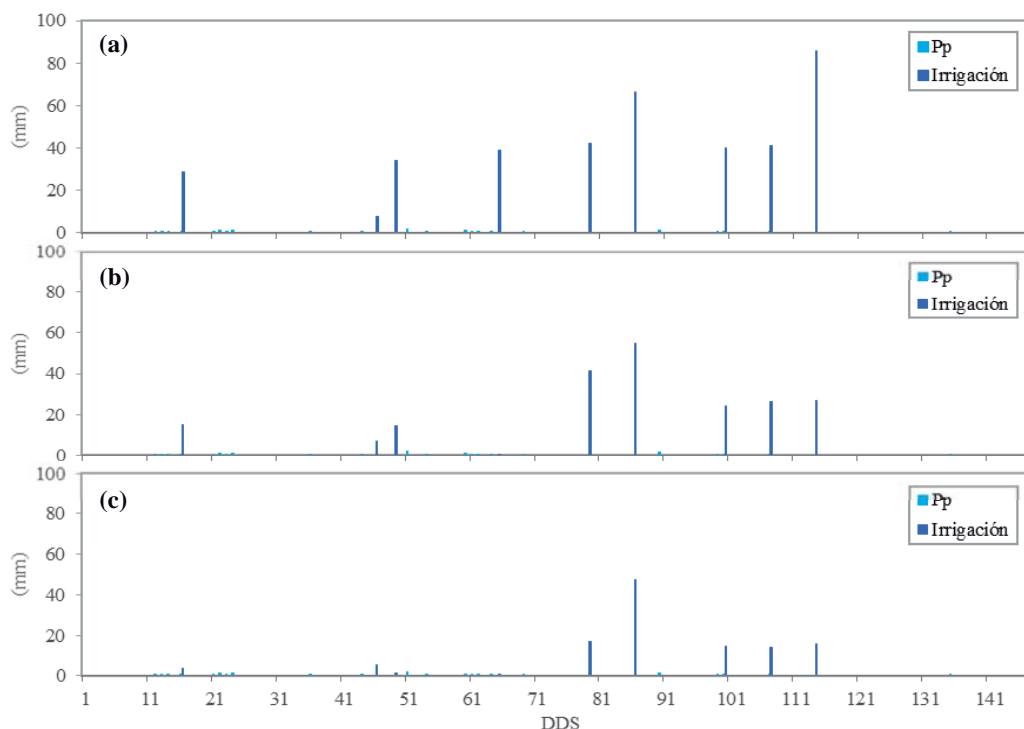


Figura 23: Precipitación diaria y eventos de riego durante el período vegetativo del cultivo. La columna azul es el riego aplicado a los experimentos: Lámina alta (a), Lámina media (b), Lámina baja (c).

3.3.7. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO

El rendimiento fue evaluado el 16 de abril del 2014, para ello en un libro de campo se anotaron datos biométricos de las plantas de los surcos centrales de cada parcela experimental por separado. Estos datos son detallados a continuación:

Número de mazorcas cosechadas

Se contó el número de mazorcas cosechadas del surco central de cada parcela experimental.

Peso de mazorcas en campo

Se registró el peso de las mazorcas del surco central de cada parcela experimental.

Peso de granos de mazorcas en campo

Se registró el peso de los granos de las mazorcas del surco central de cada parcela experimental.

Porcentaje de humedad del grano

Se determinó el valor de 10 mazorcas al azar del total de mazorcas cosechadas en cada parcela, a las cuales se les desgranó 3 hileras para obtener una mezcla aproximada de 300 g. Posteriormente se calculó la humedad del grano utilizando un equipo determinador de humedad (Esteinlite).

Porcentaje de desgrane

De las mazorcas escogidas de los surcos centrales de las parcelas experimentales, las cuales fueron pesadas, luego desgranadas para luego pesar los granos separadamente, se aplicó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Desgrane} = \frac{\text{Peso de Grano}}{\text{Peso de Mazorca}} \times 100$$

(9)

Procesamientos de los datos biométricos para determinar los rendimientos kg/ha

Una vez que se recolectaron en el libro de campo los datos de cada parcela, se procedió a vaciarlos por entrada y repeticiones en sumarios especialmente preparados para el cálculo de rendimiento en grano por hectárea.

Corrección por humedad (Fh)

El peso será llevado al 14% de humedad comercial del grano, mediante la siguiente expresión:

$$Fh = \frac{(100 - \% H)}{(100 - 14)} \quad (10)$$

Dónde: *Fh*, factor de corrección por humedad; % H, porcentaje de humedad al momento de la cosecha; y 14 %; porcentaje establecido en la norma de comercialización del ITINTEC.

Peso de campo de plantas expresado en Kg/planta

Para determinar el rendimiento por planta de cada una de las parcelas experimentales, se dividió el número de plantas entre su peso para hallar el peso promedio por parcela de una mazorca con sus granos. Luego este valor fue multiplicado por el porcentaje de desgrane y por el factor de corrección por humedad para saber el rendimiento al 14% de humedad de los granos de una planta por parcela experimental.

$$Pc \text{ planta} = \text{Peso por planta} \times Fh \times D \quad (11)$$

Dónde: *Pc*, peso de campo [Kg/planta]; *Fh*, factor de corrección por humedad al 14% y *D*, porcentaje de desgrane [%].

Corrección del peso de campo expresado en Tn/ha

Para llevar el rendimiento por planta a rendimiento por hectárea, se multiplicó el primero por la densidad de siembra.

$$R = Pc \text{ planta} \times \text{Densidad siembra} \quad (12)$$

Dónde: *R*, rendimiento en grano al 14% de humedad [Tn/ha] y *Pc*, peso de campo [Kg/planta].

3.3.8. PARAMETRIZACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

El modelo Aquacrop usa un largo número de parámetros que incluyen numerosos parámetros conservativos, de los cuales se espera que cambien casi poco con el tiempo, manejo o localización. En la Tabla 9 se presenta de manera comparativa, los parámetros conservativos usados en estudios recientes para la calibración en Aquacrop con maíz amarillo y los implementados en el presente estudio.

Tabla 9: Comparación entre los parámetros conservativos usados para la calibración en Aquacrop con maíz amarillo en estudios recientes y los usados para la presente investigación

Raest et al. 2012	Paredes et al. 2014	Usados en esta investigación
Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (cco)	Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (cco)	Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (cco)
Umbrales superior e inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel y forma de la curva de estrés	Umbrales superior e inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel y forma de la curva de estrés	Umbrales superior e inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel y forma de la curva de estrés
Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés	Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés	Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés
Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés	Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés	Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés
-	Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC)	Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC)
-	Coeficiente de disminución del dosel (CDC)	Coeficiente de disminución del dosel (CDC)
-	Grado de determinación del cultivo vinculada/no vinculada con la floración	-
-	Disminución del coeficiente de cultivo como resultado del envejecimiento	-
-	Productividad del agua normalizada por ETo y CO2 (WP*)	Productividad del agua normalizada por ETo y CO2 (WP*)
-	Coeficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintetizados durante la formación del fruto en la productividad del agua normalizada	-
-	Índice de cosecha de referencia (HIo)	Índice de cosecha de referencia (HIo)

FUENTE: Elaborado a partir de estudios de Raes (2012) y Paredes (2014).

Como se puede ver en la definición de los parámetros, la Curva CC tiene una especial importancia tanto en el modelamiento de la transpiración del cultivo y en la evaporación del agua del suelo (Ecuación 5). Por eso, las pruebas de error y ensayo estuvieron enfocadas en los parámetros que determinan la Curva CC, como: CC_x , CGC y CDC explicados en la Sección 3.2.3. El proceso es repetido iterativamente de tal manera que se llegue a la aproximación más cercana entre los datos simulados y los valores observados durante el período experimental de cada una de las unidades experimentales.

Para la revisión del correcto ajuste del modelo con respecto a los datos observados se utilizaron diversos indicadores estadísticos, así como en diversos estudios previos similares a este. Rosa, et al. (2012), Paredes, et al. (2014).

Coefficiente de correlación de Pearson (r)

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es un índice de dependencia lineal entre dos variables; sus valores adimensionales varían de menos uno a uno, Hirsh, et al. (1992). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (13)$$

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

Raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)

Para calcular la magnitud del desvío entre los valores simulados con los datos observados, se utilizó la raíz del error cuadrático medio, normalizado por el rango de la variable (Normalized Root-Mean Square Error, NRMSE), con el fin de tener una métrica independiente de la variable o la magnitud de ésta.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n}} \quad (14)$$

Dónde: NRMSE, error medio cuadrático normalizado [%]; $X_{m\acute{a}x}$, valor máximo de la serie de datos de la variable analizada; $X_{m\acute{i}n}$, valor mínimo de la serie de datos de la variable analizada; RMSE, error medio cuadrático [unidades de la variable analizada].

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (15)$$

Dónde: P_i , valores simulados o predecidos; O_i , valores observados y n , cantidad de datos registrados.

El rango de valores que puede tomar va desde 0 hasta 100 por ciento. Un ajuste perfecto es aquel que se acerca cada vez más a 0, mientras que valores mayores indican un menor ajuste.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)

La prueba de calidad de la aproximación del modelo de Nash & Sutcliffe (1970), eficiencia del modelo (E, no dimensional). Del cual, Moriasi, et al. (2007) menciona que este es un estadístico normalizado que determina cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

Dónde: E, Eficiencia de Nash – Sutcliffe; P_i , Valores simulados o predecidos; O_i , Valores observados; y \bar{O} , Promedio de los valores observados.

Si la simulación es perfecta, $E=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $E=0$. Grado de ajuste de la simulación en función al valor de E son resumidos en la Tabla 10 según Molnar (2011).

Tabla 10: Rendimiento del modelo según Molnar (2011)

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (E)	Ajuste
< 0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

FUENTE: Molnar (2011)

3.3.9. SIMULACIÓN BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Para la simulación futura, se utilizó la información climática de temperatura máxima, mínima y precipitación a escala de diez días de la estación Von Humboldt para el periodo 2030-2050 a partir de los trabajos realizados por SENAMHI en cooperación con el Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria, los cuales realizaron la regionalización estadística (downscaling) de 6 escenarios de cambio climático hasta el año 2060. Este método adapta las salidas de modelos numéricos denominados modelos de circulación global (GCM) que se ajustan mejor a las características fisiográficas del Perú, variación de temperatura y de concentración de gases de efecto invernadero expresada en las rutas representativas de concentración (RCP). Ver Tabla 11.

Tabla 11: Características de los escenarios de cambio climático utilizados

Escenario de cambio climático	Descripción
CanESM2 (RCP 4.5)	Escenario con una resolución espacial de 2.8° x 2.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 0.9 a 2.0 °C y concentraciones de [CO2] de 538 ppm al año 2100
CNRM-CM5 (RCP 4.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.4° x 1.4° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 0.9 a 2.0 °C y concentraciones de [CO2] de 538 ppm al año 2100
MPI-ESM-MR (RCP 4.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.8° x 1.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 0.9 a 2.0 °C y concentraciones de [CO2] de 538 ppm al año 2100
CanESM2 (RCP 8.5)	Escenario con una resolución espacial de 2.8° x 2.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 1.4 a 2.6 °C y concentraciones de [CO2] de 936 ppm al año 2100
MPI-ESM-MR (RCP 8.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.8° x 1.8° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 1.4 a 2.6 °C y concentraciones de [CO2] de 936 ppm al año 2100
CNRM-CM5 (RCP 8.5)	Escenario con una resolución espacial de 1.4° x 1.4° con incrementos de temperatura hacia el año 2060 entre 1.4 a 2.6 °C y concentraciones de [CO2] de 936 ppm al año 2100

Las salidas de estos escenarios son las variables climáticas: T_{max} , T_{min} y precipitación para diversas estaciones meteorológicas del Perú. Sin embargo, estas no fueron determinadas para la estación meteorológica Von Humboldt, la más cercana a la zona de estudio, por lo que mediante el uso de un código R se interpolaron 720 mapas generados a partir las variables climáticas halladas para estaciones meteorológicas cercanas a la Von Humboldt, y mediante otro código R, se extrajo las variables climáticas para la

serie 2030-2050 a escala de diez días para luego, determinar la evapotranspiración de referencia (ET_o) mediante la fórmula de Hargreaves & Samani (1985) mediante la información de Temperaturas medias y de Radiación Solar (Ecuación 17).

$$ET_o = 0.0135(t_{med} + 17.78) R_s \quad (17)$$

Dónde: ET_o, evapotranspiración de referencia diaria [mm/día]; t_{med}, temperatura media [°C]; y R_s, radiación solar incidente [convertida en mm/día].

La radiación solar incidente, R_s, se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (la que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como R₀, y la leemos en tablas en función de la latitud del lugar y del mes.

Obtención de la Radiación Solar incidente (R_s)

Para el cálculo de la radiación solar incidente, Samani (2000) propone la siguiente expresión:

$$R_s = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (18)$$

Dónde: R_s, radiación solar incidente; R₀, radiación solar extraterrestre (tabulada); KT, coeficiente; t_{max}, temperatura diaria máxima; y t_{min}, temperatura diaria mínima.

Puesto que los valores de R₀ están tabulados y las temperaturas máximas y mínimas son datos proporcionados por SENAMHI, la dificultad para aplicar esta sencilla expresión la encontramos en el coeficiente KT. Para evaluar la Radiación Solar Extraterrestre (R₀) se utilizó una tabla que relaciona la latitud y el mes de R₀. Esta tabla está en MJ/m²/día y para pasar a mm/día (de agua evaporada) se multiplicó por el valor 0.408, Allen, et al (1998).

El coeficiente KT de la ecuación 18 es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves, citado en Samani (2000), recomienda KT= 0.162 para regiones del interior y KT= 0.19 para regiones costeras.

Sustituyendo del valor de R_s de la ecuación 18 en la ecuación 17, y tomando para el coeficiente KT el valor medio de 0.17, resulta la expresión citada con más frecuencia en la bibliografía:

$$ETo = 0.0023(t_{med} + 17.78) R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (19)$$

Donde los componentes de la Ecuación 19, (ETo, R_o, t_{max}, t_{min}, t_{med}), son los mismos que los de las ecuaciones 17 y 18.

Al obtenerse la ETo para cada una de las fechas de simulación futura, se pudo completar el archivo de clima del Aquacrop y posterior a ello se realizó las corridas del modelo para los 6 escenarios de cambio climático. Para el análisis de los resultados se evaluaron las variaciones de los rendimientos y la ETo con respecto a la del periodo vegetativo monitoreado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CALENDARIO AGRÍCOLA

Las más importantes actividades realizadas durante el período fenológico del cultivo son listadas en la Tabla 12, de la cual se toma especial consideración en el número de días a los cuales se lleva a cabo la emergencia, la máxima cobertura del dosel, inicio de senescencia e inicio de la madurez; siendo estos 6, 61, 90 y 132 respectivamente.

Los días en los cuales sucedieron importantes acontecimientos en el periodo reproductivo del cultivo (prefloración, floración y postfloración) pudieron ser observados en campo, los cuales son determinantes para saber en qué momento afecta más el déficit de riego. Los días a la floración con respecto al inicio de la siembra fue de 48, teniendo una duración de 63 días, los cuales están vinculados de forma directa a la formación del grano y por ende al valor de rendimiento del cultivo.

Tabla 12: Calendario Agrícola que describe las principales actividades realizadas durante el periodo fenológico del cultivo

Día	Mes	Año	Acumulado	Concepto	Detalles
10	Nov	2013	-3	Preparación de suelo	Riego de machaco
13	Nov	2013	-4	Preparación de suelo	Arado, voltear terreno
17	Nov	2013	-1	Preparación de suelo	Rastra de discos y nivelar
18	Nov	2013	-2	Preparación de suelo	Surcado a distancia 0.80 m
20	Nov	2013	1	Siembra manual	En seco, dos semillas por golpe a distanciamiento 0.20-0.30 m
4	Dic	2013	15	Riego de ensaño	Prueba de infiltración y prueba de avance
12	Dic	2013	23	Segundo Riego	Aforo en contracequia y surcos
21	Dic	2013	32	Primer Abonamiento	Fertilización manual: N (75, 100, 125), P(169), K(149)
28	Dic	2013	39	Riego con mangas	Solo lamina alta. Con tanque de 1m ³
4	Ene	2014	46	Riego de mantenimiento	Aforo en contracequia y surcos
6	Ene	2014	48	Muestreo Biomasa/Alt. Planta/Cobert. dosel/ Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
7	Ene	2014	49	Riego de mantenimiento	Aforo en contracequia y surcos
8	Ene	2014	50	Deshierbo	
8-9	Ene	2014	50	Aplicación de insecticida para Cogollero	Insecticida sólido Granolate
9	Ene	2014	51	Deshierbo/ Calicata conductividad hidráulica	Luego procesado en el lab. de Mecánica de suelos
10	Ene	2014	52	Deshierbo	Limpieza de calles
13	Ene	2014	55	Muestro Biomasa/Alt. Planta/Cobert. del dosel	En cada parcela de todas las unidades experimentales
15	Ene	2014	57	Segundo Abonamiento y Aporque	Manual: N (75, 100, 125). Tractor hizo cambio de surco
16	Ene	2014	58	Estabilización plantas después del aporque	Los tallos quedaron inclinados. Había que ayudar a colocarlos vertical al suelo
16, 17	Ene	2014	58	Deshierbo	Limpieza de límites de campo, calles internas
16, 17, 21	Ene	2014	59	Aplicación de insecticida para Cogollero	Con mochila: Proclaim 5 5G (insecticida), CITOMEG (pegamento)
20	Ene	2014	62	Acondicionamiento del surco	Después del aporque
21	Ene	2014	63	Muestreo Biomasa/ Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
23	Ene	2014	65	Riego de mantenimiento	Aforo en contracequia y surcos. Tiempo de riego por surco = 1hr
25	Ene	2014	67	Cobertura del dosel	

(Continuación)

Día	Mes	Año	Acumulado	Concepto	Detalles
27	Ene	2014	69	Retiro de malezas	Manual
27	Ene	2014	69	Floración	Visita de Prof. Amelia Huaranga
28	Ene	2014	70	Muestreo Biomasa/Alt. Planta/Cobert. dosel/ Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
30	Ene	2014	72	Riego de mantenimiento	Aforo en contracequia y surcos. Tiempo de riego por surco = 1hr
31	Ene	2014	73	Retiro de malezas	Manual
3	Feb	2014	76	Inicio de llenado de grano	
3	Feb	2014	76	Muestreo Biomasa/Alt. Planta/Cobert. Dose/ Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
4	Feb	2014	77	Ocurrencia de la polinización y fecundación	
6	Feb	2014	79	Inicio de llenado de grano perлита	
6	Feb	2014	79	Riego de mantenimiento	
10	Feb	2014	83	Muestreo Biomasa/Alt. Planta/Cobert. Dose/ Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
13	Feb	2014	86	Riego de mantenimiento	
17	Feb	2014	90	Muestreo Biomasa/Alt. Planta/Cobert. Dose/ Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
24	Feb	2014	97	Muestreo Biomasa/Alt. Planta/Cobert. Dose/ Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
27	Feb	2014	100	Riego de mantenimiento	
3	Mar	2014	104	Muestreo Biomasa/Alt. Planta/Prof. Raíces	En cada parcela de todas las unidades experimentales
6	Mar	2014	107	Riego de mantenimiento	
10	Mar	2014	111	Muestreo Biomasa	En cada parcela de todas las unidades experimentales
13	Mar	2014	114	Último Riego de mantenimiento	
17	Mar	2014	118	Muestreo Biomasa	En cada parcela de todas las unidades experimentales
24	Mar	2014	125	Muestreo Biomasa	En cada parcela de todas las unidades experimentales
6	Abril	2014	138	Muestreo Biomasa	En cada parcela de todas las unidades experimentales
9	Abril	2014	141	Cosecha de Grano de Maiz Amarillo Duro	Muestreo de un surco COMPLETO por parcela, además de 10 plantas seleccionadas del mismo surco
14	Abril	2014	147	Evaluación de Mazorca	Pesado, Medida de contenido de humedad, Sanidad (Protocolo agronómico)

4.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN EN EL PERIODO (2013-2014)

Como se mencionó en la Sección 4.3.8, una apropiada parametrización de la curva de crecimiento del dosel (CC) es el principal requisito para una correcta estimación de la biomasa y evapotranspiración del cultivo, por ende mejores predicciones del rendimiento. El modelo Aquacrop fue calibrado y validado haciéndose simulaciones con los parámetros: cobertura del dosel (CC) y biomasa (BB).

Los parámetros conservativos que Aquacrop presenta por defecto en el módulo de cultivo, “Crop”, fueron calibrados para el presente estudio y se muestran en la Tabla 13. La lámina aplicada a cada experimento fue añadida en el módulo “Irrigation” del software, obteniéndose un rendimiento distinto en cada bloque experimental evaluado.

Tabla 13: Parámetros conservativos por defecto y calibrados para el modelo Aquacrop

Descripción	Valor		Unidad
	Defecto	Calibrado	
Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90 % de emergencia (cco)	0.49	0.27	% día ⁻¹
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)	14.2	11.1	%
Coefficiente de disminución del dosel (CDC)	7	9.8	%
Cobertura máxima del dosel (CC _x)	96	89	%
Índice de cosecha de referencia (HIo)	48	48	%
Productividad del agua normalizada por ETo y CO ₂ (WP*)	33.7	33	g/m ²
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p upper)	0.14	0.35	-
Umbral inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (p lower)	0.72	0.7	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel (S)	2.9	3	-
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (p upper)	0.69	0.7	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático (S)	6	3.8	-
Umbral superior de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (p upper)	0.69	0.65	-
Forma de la curva de estrés de agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana (S)	2.7	3	-
Coefficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo (K _{cb medio})	1.15	1.14	

4.2.1. AJUSTE DEL COEFICIENTE BASAL DEL CULTIVO (K_{cb})

El coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) varía durante el desarrollo de la cobertura del dosel, partiendo de cero cuando la cobertura del dosel por encima del suelo es escasa, incrementándose en la medida que el cultivo se desarrolla y la cobertura es más densa, y cuando esta llega a un valor máximo que Aquacrop denomina ($K_{cb \text{ medio}}$). Este es el parámetro ajustado en el módulo del Cultivo en el modelo, ya que es utilizado como referencia a para los demás K_{cb} durante toda la etapa de crecimiento y decrecimiento del dosel.

La cobertura máxima del dosel es alcanzada en la mitad de la etapa de la floración para luego empezar a decrecer. El valor del coeficiente de transpiración basal de la temporada media del cultivo ($K_{cb \text{ medio}}$) fue calibrado con un valor de 1.14 (Tabla 13 última fila), el cual es menor al obtenido por Allen, et al. (1998), similar al de Abedinpour, et al. (2012), $K_{cb \text{ medio}} = 1.14$, pero es más alto que el usado en la investigación de Heng, et al., (2009), $K_{cb \text{ medio}} = 1.05$. El parámetro $K_{cb \text{ medio}}$ es ajustado de tal manera que simule la cobertura y la biomasa observada en campo, este valor tiene una relación directa con la transpiración del cultivo (Ecuación 4), y está directamente relacionado con la cantidad de biomasa producida (Ecuación 5), por ende, el rendimiento esperado.

4.2.2. SIMULACIÓN DE LA COBERTURA DEL DOSEL (CC)

Un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística T-Student fue utilizada para cuantificar el grado de dependencia entre la media de las 180 muestras de cobertura del dosel registradas en 10 fechas para cada bloque experimental y los valores simulados por el modelo, obteniéndose, como muestra la Tabla 14, grados de significación positiva en los 3 experimentos evaluados para valores de coeficiente de Pearson entre 0.90 y 0.98 indicados en la Tabla 15.

Los 180 datos de cobertura del dosel registrados durante el periodo vegetativo del cultivo en cada uno de los bloques experimentales, así como el gráfico de ajuste lineal entre lo simulado y los valores promedios observados al 95% de confianza se muestran en el Anexo 4.

Tabla 14: Resultados de la prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores promedios de la cobertura del dosel observados en cada fecha de muestreo en comparación con la cobertura del dosel simulada.

Prueba estadística T-Student	Experimento L. alta		Experimento L. media		Experimento L. baja	
	Simulado	Promedio observados	Simulado	Promedio observados	Simulado	Promedio observados
Media muestral (\bar{x})	72.93	65.91	62.61	57.18	38.63	40.17
Varianza muestral (s^2)	1062.32	956.82	734.31	659.67	430.84	310.37
Observaciones	10	10	10	10	10	10
Dif. hipotética de las medias	0		0		0	
Grados de libertad	18		18		18	
Estadístico t	0.47		0.44		0.43	
t tabla	1.73		1.73		1.73	
	Correlación positiva significativa (Estadístico $t \leq t_{\text{tabla}}$)		Correlación positiva significativa (Estadístico $t \leq t_{\text{tabla}}$)		Correlación positiva significativa (Estadístico $t \leq t_{\text{tabla}}$)	

La Tabla 15 presenta los indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la cobertura del dosel en Aquacrop, de los cuales se observa que el experimento sometido a condiciones óptimas de riego obtiene indicadores estadísticos más próximos a los valores óptimos en comparación a los experimentos sometidos a estrés hídrico.

Tabla 15: Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la CC en Aquacrop para cada uno de los experimentos evaluados

Experimento	r	NRMSE (%)	E
L. alta	0.98	13.8	0.90
L. media	0.96	15.4	0.87
L. baja	0.90	22.3	0.71
Óptimo esperado	1	0	1

Con los valores obtenidos en la Tabla 14 y la Tabla 15, se puede decir que con un nivel de significancia del 5% y la prueba estadística t-Student para el coeficiente de Pearson, la correlación es positiva significativa en todos los experimentos, siendo el experimento de lámina alta con un r Pearson de 0.98 el que más aproxima los valores simulados a los observados para la curva del dosel. Mientras que los valores de las eficiencias de Nash-Sutcliffe (E) que varían entre 0.71 a 0.90 consideran la simulación, según la tabla de Molnar (2011), como “muy buena” a “excelente”, lo cual indicaría que la simulación explica de manera eficiente la variabilidad de los datos de cobertura del dosel observados. Por ello, la calibración del modelo fue realizada con el experimento de

lámina alta, mientras que la validación espacial, con los experimentos de lámina media y baja.

La Figura 24 muestra el ajuste del valor medio de los datos observados a los datos simulados de la cobertura del dosel (CC) para cada uno de los experimentos evaluados, mostrándose la variación temporal a lo largo del periodo del experimento (noviembre 2013 – abril 2014).

La Figura 24 muestra que en los tres experimentos evaluados, la simulación no genera tendencias a la subestimación o sobrestimación a lo largo del período vegetativo del cultivo, sin embargo, cada experimento presenta diferencias en la forma de la curva de simulación durante la etapa media del cultivo (70 a 90 días después de la siembra), correspondiente a la etapa de floración, que según Yzarra, et al. (2010) representa la fase crítica que demanda la mayor cantidad de agua y puede afectar negativamente al rendimiento debido al estrés que provoca en la fisiología de la planta. Por otro lado, Heisey & Edmeades (1999) informan que durante el período de prefloración, floración y post-floración se provocan pérdidas de 25%, 50% y 21% en el rendimiento, respectivamente y que el momento crítico de estrés hídrico del maíz se ubica entre los 7 días previos al inicio de la floración y 15 días posterior a esta; en esta etapa la reducción de rendimiento es mayor y puede ser 2 a 3 veces mayor que en otra fase de crecimiento.

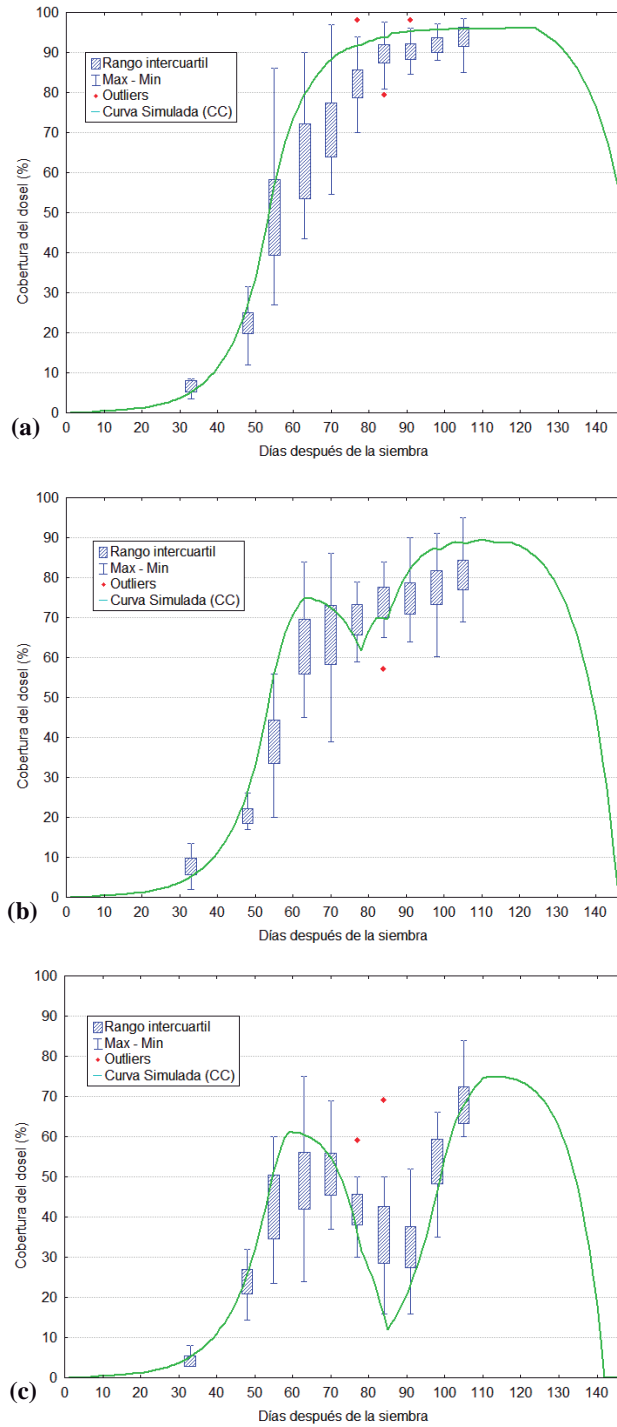


Figura 24: Variación temporal de la cobertura del dosel (%): Valores simulados por el modelo en línea verde, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con 180 muestras por fecha: Lámina alta (a), Lámina media (b), Lámina baja (c). El boxplot representa el rango intercuartil, sus extremos el primer y tercer cuartil, el centro, el valor medio de los datos observados, los bigotes de la caja, el valor máximo y mínimo registrado, y los outliers se muestran como puntos rojos.

Las curvas de simulación de los experimentos bajo estrés hídrico durante la etapa media (Figura 24-b y Figura 24-) respectivamente, obtuvieron mayor concavidad con respecto al de lámina alta (Figura 24-a), donde la curva sigue una tendencia exponencial. La tendencia del experimento de lámina media (Figura 24-b) se podría deber a que la lámina de riego aplicada (210.3 mm) no fue la suficiente para que se lleve a cabo el correcto desarrollo del periodo de prefloración y floración, generándose así, estrés hídrico por expansión de dosel 15 días antes de la floración (Ver corrida en el Anexo 3) debido a que se alcanza el umbral superior (p_{upper}) para efecto de este estrés, el cual se acentúa hasta mediados de la floración en conjunto con el estrés por cierre de estomas y senescencia temprana lo que genera en total un promedio de reducción en el rendimiento de 25%. Algo similar sucede en la simulación del experimento de lámina baja (Figura 24-c) donde el estrés hídrico es más significativo, debido a la baja lámina de riego aplicada durante el periodo vegetativo (119.8 mm), la cual sobrepasa el umbral superior (p_{upper}) para efecto del estrés por expansión del dosel, cierre de estomas y senescencia aproximadamente 15 días antes de la floración. Esto genera un decrecimiento notorio en la producción de cobertura y biomasa en el periodo de prefloración, floración y postfloración, lo que produce una reducción promedio del rendimiento de 49%.

Los valores de estimación reportados en los valores de NRMSE obtenidos en las simulaciones analizadas varían en el rango de 13.8 a 22.3%, siendo estos mayores a los reportados por Hsiao, et al. (2009), 4.8 a 13.6% o los de García-Vila & Fereres (2012), mayores a 13%, pero siendo menores a los de los estudios realizados por Heng, et al. (2009) en maíz amarillo duro en secano (7.2% a 34.5%).

Por otro lado, los dos experimentos bajo condiciones de estrés hídrico, obtuvieron indicadores estadísticos con ($r= 0.96$, $NRMSE= 15.4\%$ y $E=0.87$) para el experimento de lámina media y ($r= 0.90$, $NRMSE= 22.3\%$ y $E=0.71$) para el experimento de lámina baja. Esto se debería, como se puede ver en la Figura 24-b y Figura 24-c, que para el caso de la simulación del experimento de lámina media se estaría sobrestimando la cobertura del dosel en el período de desarrollo del cultivo, mientras que para el experimento de lámina baja se estaría haciendo lo mismo, pero en la etapa de temporada media del cultivo.

4.2.3. SIMULACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA SECA (BB)

Un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística T-Student fue utilizada para cuantificar el grado de dependencia entre la media de las 180 muestras de biomasa aérea seca registradas en 12 fechas para cada bloque experimental y los valores simulados por el modelo, obteniéndose, como muestra la Tabla 16, grados de significación positiva en los 3 experimentos evaluados para valores de coeficiente de Pearson entre 0.90 y 0.99 indicados en la Tabla 17.

Los 216 datos de biomasa aérea registrados durante el periodo vegetativo del cultivo en cada uno de los bloques experimentales, así como el gráfico de ajuste lineal entre lo simulado y los valores promedios observados al 95% de confianza se muestran en el Anexo 5.

Tabla 16: Resultados de la prueba T-Student para cuantificar el grado de dependencia de los valores promedios de la biomasa aérea seca observada en cada fecha de muestreo en comparación con la biomasa aérea seca simulada.

Prueba estadística T-Student	Experimento L. alta		Experimento L. media		Experimento L. baja	
	Simulado	Promedio observados	Simulado	Promedio observados	Simulado	Promedio observados
Media muestral (x)	17.02	16.46	13.62	13.55	9.17	9.30
Varianza muestral (s ²)	83.58	76.80	47.63	40.61	16.17	17.92
Observaciones	12	12	12	12	12	12
Dif. hipotética de las medias	0		0		0	
Grados de libertad	22		22		22	
Estadístico t	0.15		0.02		0.08	
t tabla	1.72		1.72		1.72	
	Correlación positiva significativa (Estadístico t<=t tabla)		Correlación positiva significativa (Estadístico t<=t tabla)		Correlación positiva significativa (Estadístico t<=t tabla)	

La Tabla 17 presenta los indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la biomasa aérea seca en Aquacrop, de los cuales se observa que el experimento sometido a condiciones óptimas de riego obtiene indicadores estadísticos más próximos a los valores óptimos en comparación a los experimentos sometidos a estrés hídrico.

Tabla 17: Indicadores estadísticos que evalúan la eficiencia de la modelación de la BB en Aquacrop para cada uno de los experimentos evaluados

Experimento	Biomasa (Ton ha ⁻¹)		r	NRMSE (%)	E
	Obs.	Sim.			
L. alta	32.14	33.57	0.99	1.8	0.96
L. media	20.76	23.42	0.93	18.9	0.83
L. baja	15.97	15.72	0.90	19.3	0.81
	Óptimo esperado		1	0	1

Con los valores obtenidos en la Tabla 16 y la Tabla 17, se puede decir que con un nivel de significancia del 5% y la prueba estadística t-Student para el coeficiente de Pearson, la correlación es positiva significativa en todos los experimentos, siendo el experimento de lámina alta con un r Pearson de 0.99 el que más aproxima los valores simulados a los observados para la biomasa aérea seca. Mientras que los valores de las eficiencias de Nash-Sutcliffe (E) que varían entre 0.81 a 0.96 consideran la simulación, según la tabla de Molnar (2011), como “muy buena” a “excelente”, lo cual indicaría que la simulación explica de manera eficiente la variabilidad de los datos de biomasa aérea seca observada. Por ello, la calibración del modelo fue realizada con el experimento de lámina alta, mientras que la validación espacial, con los experimentos de lámina media y baja.

La Figura 25 muestra el ajuste del valor medio de los datos observados a los datos simulados de la biomasa aérea seca (BB) para cada uno de los experimentos evaluados, mostrándose la variación temporal a lo largo del periodo del experimento (noviembre 2013 – abril 2014).

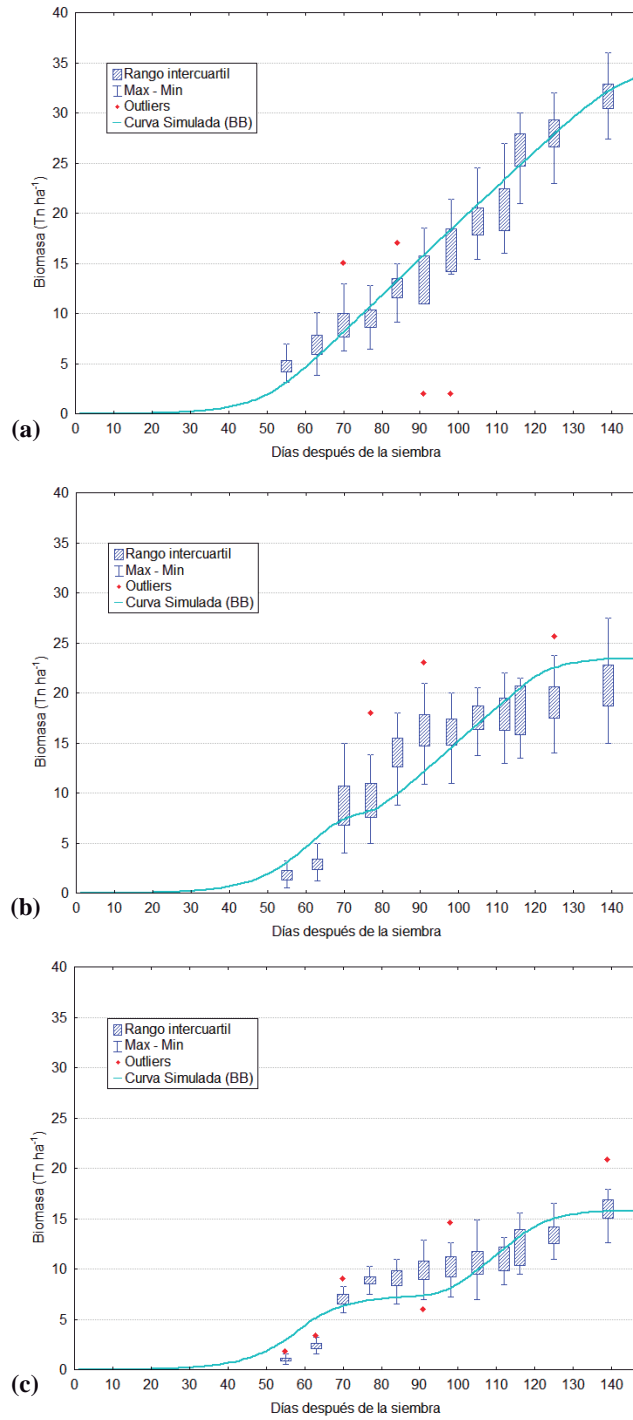


Figura 25: Variación temporal de la biomasa por encima del nivel del suelo ($Tn\ ha^{-1}$): Valores simulados por el modelo en línea turquesa, valores observados en campo agrupados en “boxplots” con 216 muestras por fecha: Lámina alta (a), Lámina media (b), Lámina baja (c). El boxplot representa el rango intercuartil, sus extremos el primer y tercer cuartil, el centro, el valor medio de los datos observados, los bigotes de la caja, el valor máximo y mínimo registrado, y los outliers se muestran como puntos rojos.

La Figura 25-a muestra que la simulación en el experimento de lámina alta, tiene similitud entre la media de los boxplots y la curva de simulación a lo largo del periodo vegetativo. Al contrario, la simulación con los experimentos de lámina media y baja, demuestran ligeras tendencias en los periodos de temporada media y final del cultivo.

La simulación con el experimento de lámina media y baja, Figura 25-b y la Figura 25-c respectivamente, muestran una tendencia a la subestimación de producción de biomasa durante la simulación del periodo de temporada media (70 a 100 días después de la siembra), y una tendencia a la sobrestimación durante el periodo de temporada final (120 días después de la siembra hasta el fin del ciclo vegetativo).

Como se mostró en la Ecuación 4 y 5 en la Sección 3.2.2, la biomasa está ligada de forma directa al coeficiente basal del cultivo, y este último, a la transpiración. El coeficiente basal fue calibrado a un valor de $K_{cb\ medio}=1.4$, notándose que ante una ligera variación en centésimas, se producían cambios significativos en la transpiración, y estando este último parámetro, completamente ligado a la producción de biomasa, se demuestra que la subestimación se puede deber más a la dependencia del valor de $K_{cb\ medio}$ adoptado para la calibración, y no a los cambios en los umbrales de estrés hídrico.

Los indicadores estadísticos más favorables le corresponden a la simulación con el experimento de lámina alta ($r= 0.99$, $NRMSE= 1.8\%$ y $E=0.96$), el cual simula las condiciones más óptimas de riego. Por otro lado, los dos experimentos usados para la validación, obtuvieron indicadores estadísticos más desfavorables, con ($r= 0.93$, $NRMSE= 18.9\%$ y $E=0.83$) para el experimento de lámina media y ($r= 0.90$, $NRMSE= 19.3\%$ y $E=0.81$) para el experimento de lámina baja. Esto se debería, como se explicó anteriormente, a la ligera subestimación y sobrestimación de la biomasa en tramos de la etapa de la temporada media y final del cultivo (Ver Figura 25-b y Figura 25-c).

4.2.4. SIMULACIÓN DEL RENDIMIENTO (Y)

La Tabla 18 muestra los rendimientos de los experimentos obtenidos al evaluarse las características de la mazorca en la fecha de cosecha del grano de maíz el 14 de abril del 2014. En dicha tabla, se puede observar que el rendimiento más alto fue obtenido en el bloque experimental bajo la aplicación de lámina alta de riego, y los más bajos en los

demás experimentos donde la aplicación de riego fue el limitante. Estos rendimientos se encuentran llevados a la humedad comercial del 14%.

La metodología aplicada para la evaluación del rendimiento en campo fue explicada previamente en la Sección 4.3.7, y los cálculos realizados para la determinación del rendimiento se muestran detalladamente en el Anexo 6.

Tabla 18: Rendimiento promedio del maíz amarillo duro de cada experimento llevado a la humedad comercial

Experimento	Rendimiento evaluado al 14% de humedad (Tn/ha)
L. alta	17.40
L. media	15.08
L. baja	10.03

Sin embargo, para la comparación con los rendimientos simulados en el modelo Aquacrop, los rendimientos evaluados en campo debieron ser llevados a una humedad de 0% o al peso seco, debido a que el modelo obtiene los rendimientos en esta condición de humedad. Los resultados evaluados en campo y los simulados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Comparación entre el rendimiento promedio evaluado en campo el 14 de abril del 2014 llevados a peso seco y el Rendimiento promedio simulado en Aquacrop para cada experimento. La diferencia está evaluada con respecto a lo observado.

Experimento	Rendimiento (Ton ha ⁻¹)		Diferencia	
	Obs.	Sim.	Absoluta	Porcentual
L. alta	15.27	15.71	-0.44	-2.90
L. media	13.23	12.85	0.38	2.86
L. baja	8.80	8.42	0.38	4.28
	Óptimo esperado		0	0

Lo rendimientos simulados conversan con los rendimientos evaluados en campo y llevados a peso seco, siendo los experimentos de lámina media y alta, los que más se acercan a los valores observados.

Diferencias en el rango de -0.44 a 0.38 Tn ha⁻¹ entre lo simulado y lo observado reflejan una buena estimación del rendimiento por parte del modelo Aquacrop.

4.3. EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RENDIMIENTO DEL PERIODO 2030-2050

Antes de presentar los resultados de los rendimientos simulados en Aquacrop para el periodo de análisis (2030-2050), se realizó una evaluación de la significancia de la data climática futura con respecto a la data histórica obtenida de la estación Von Humboldt (periodo 1980-1999). Esta evaluación se realizó para los modelos de regionalización estadística usados por SENAMHI en las dos rutas representativas de concentración (RCP4.5, más optimista) y (RCP8.5, más pesimista).

4.3.1. DIFERENCIA PORCENTUAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

En la Figura 26 se observa el comportamiento de la evapotranspiración de referencia de los modelos de circulación general bajo el efecto del escenario más optimista (RCP4.5) y el más pesimista (RCP8.5) durante el periodo 2030-2050, notándose que existe una similitud en ambos escenarios, que describiría el incremento similar en la temperatura, que adquiere una mayor diferenciación a mediados de fines del siglo XXI.

Estos resultados comparados con la data histórica del periodo 1980-1999 obtenida de la estación Von Humboldt, presentan un aumento en el valor de la evapotranspiración de referencia durante los meses de mayo a noviembre o también llamada temporada seca.

Aunque los valores de evapotranspiración de referencia de los modelos de circulación general bajo los RCP4.5 y 8.5 sean en general más altos que los valores históricos, se analizará si otorgan o no, un efecto significativo sobre los valores históricos.



Figura 26: Diagrama de barras de la evapotranspiración de referencia de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la evapotranspiración mensual histórica para el periodo de Enero 1980 a Diciembre del 1999 en la Estación Von Humboldt.

En la Tabla 20, se aprecia que tanto en el escenario más optimista (RCP4.5) y en el más pesimista (RCP8.5), durante la estación de verano se presentan cambios significativos en el modelo CANESM2, a diferencia de los demás modelos de circulación general (GCM), que presentan cambios muy significativos.

A nivel anual, los modelos en el escenario más optimista (RCP4.5) obtienen menores valores de diferencia porcentual con respecto al más pesimista (RCP8.5). Todos los modelos obtienen una diferencia porcentual muy significativa con respecto al histórico,

siendo el modelo CANESM2 el que tiene un mayor valor porcentual anual con respecto a los demás y el modelo MPI-ESM-MR, el menor. Por otro lado, los valores de variaciones porcentuales estacionalmente más altas se dan en otoño, en invierno con valores que promedian el 50%.

Tabla 20: Diferencia Porcentual de la evapotranspiración proyectada promedio estacional y anual (periodo del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico estacional y anual (periodo del año 1980 al 1999) en la estación meteorológica Von Humboldt.

Estación	Modelos Climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Verano	-0.9	-4.9	-6.8	0.6	-3.8	-5.2
Otoño	18.2	13.4	10.7	20.1	14.9	13.1
Invierno	52.4	46.6	43.6	55.2	48.4	44.3
Primavera	24.7	19.8	16.6	27.0	21.2	16.7
Anual	19.7	15.0	12.3	21.7	16.4	13.5

Cambio No significativo ($-cv \geq x \geq cv$)
 Cambio Significativo ($x < -2cv, -cv$ | U | $2cv, cv >$)
 Cambio Muy Significativo ($x < -2cv$ | $x \geq 2cv$)

Se debe considerar que el periodo vegetativo del maíz amarillo duro observado en el presente estudio y los simulados en los escenarios futuros recaen principalmente en la temporada de verano. Por tanto, el grado de significancia de las variaciones porcentuales de la ETo está más vinculado a los efectos producidos durante esta estación del año, siendo el modelo CANESM2 el menos significativo, y el MPI-ESM-MR el más significativo.

4.3.2. DIFERENCIA PORCENTUAL DE LA PRECIPITACIÓN

En la Figura 27 se observa el comportamiento de la precipitación de los modelos de circulación general bajo el efecto del escenario más optimista (RCP4.5) y el más pesimista (RCP8.5) durante el periodo 2030-2050, notándose incrementos sustantivos en ambos escenarios con respecto al histórico, pero con picos más altos en el RCP8.5.

Los ligeros eventos de precipitación reportados en el periodo histórico 1980-1999 no aportan mejorías significativas al riego de los cultivos sembrados en condiciones climáticas como la reportada en la estación Von Humboldt, pero en los promedios de las precipitaciones mensuales de la serie 2030-2050 se podría suponer que la precipitación podría autorregular efectos negativos del incremento de temperatura en posibles

escenarios climáticos. Esta suposición puede ser corroborada al evaluar las disponibilidades hídricas en las simulaciones del rendimiento bajo escenarios climáticos.

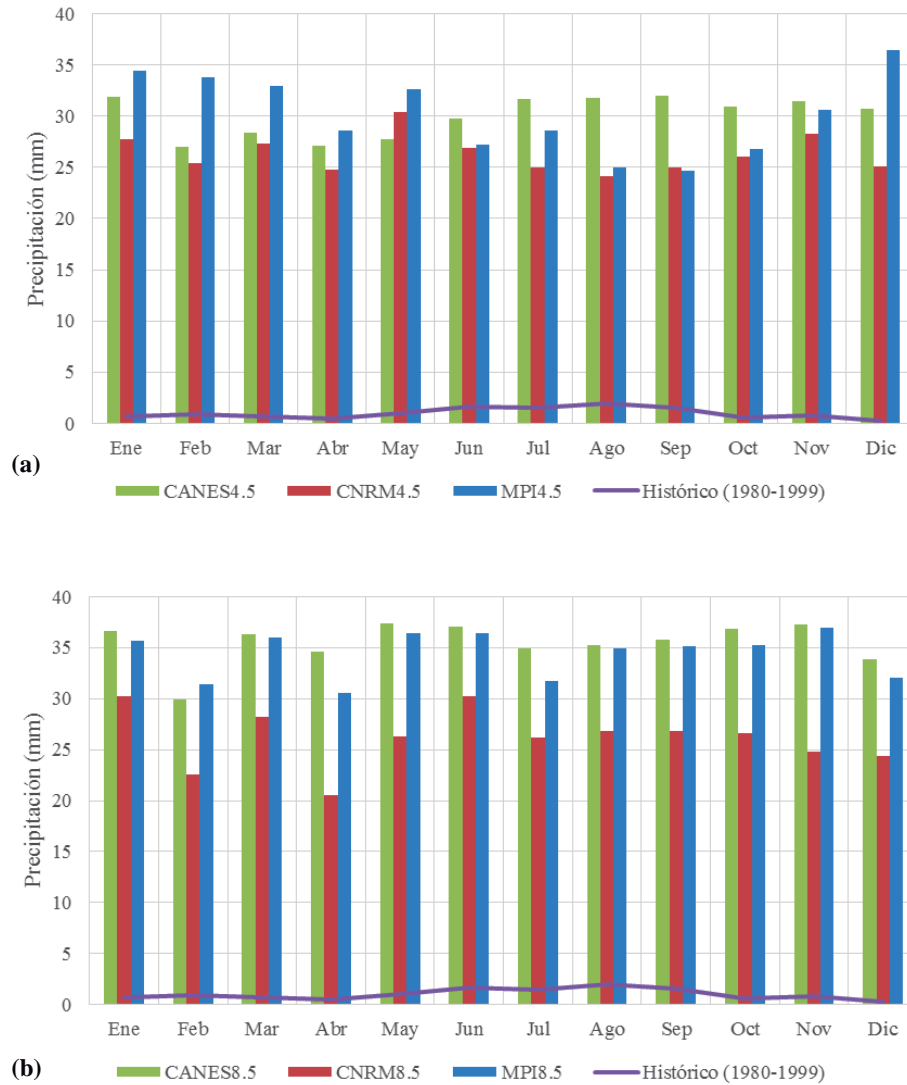


Figura 27: Diagrama de barras de la precipitación de los modelos climáticos a nivel mensual en el periodo de Enero 2030 a Diciembre del 2050 en los escenarios: RCP4.5 (a) y del RCP 8.5 (b). Las líneas continuas representan la precipitación mensual histórica para el periodo de Enero 1980 a Diciembre del 1999 en la Estación Von Humboldt.

En la Tabla 21 , se aprecia que tanto en el escenario más optimista (RCP4.5) y en el más pesimista (RCP8.5), durante todas las estaciones del año, cambios muy significativos se presentan en todos los modelos de circulación general (GCM). Los porcentajes de diferencia porcentual sobrepasan el 100% en el rango de 10 a 50 veces más, a pesar que

esta diferencia porcentual se nota a simple vista en la Figura 27, del análisis porcentual se puede notar que en la estación de verano, en la cual se realizó la simulación, las variaciones porcentuales más altas se presentan en el modelo MPI-ESM-MR. Por otro lado, el escenario más pesimista (RCP8.5) obtiene variaciones porcentuales más altas que el escenario más optimista (RCP4.5) durante la estación de verano.

Tabla 21: Diferencia Porcentual de la precipitación proyectada promedio estacional y anual (periodo del año 2030 al 2050) con respecto al promedio histórico estacional y anual (periodo del año 1980 al 1999) en la estación meteorológica Von Humboldt.

Estación	Modelos Climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
Verano	3732	3428	4341	4410	3451	4422
Otoño	2590	2511	2710	3367	2349	3187
Invierno	1783	1362	1443	1990	1474	1909
Primavera	4008	3406	4042	4661	3248	4503
Anual	5107	4455	5125	6064	4419	5873

Cambio No significativo ($-cv \geq x \geq cv$)

Cambio Significativo ($x < -2cv, -cv$] U [$2cv, cv >$)

Cambio Muy Significativo ($x < -2cv$ U $x \geq 2cv$)

4.3.3. EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN Y LA PRODUCCIÓN DEL MAÍZ AMARILLO DURO EN LA MOLINA

La data climática utilizada para las proyecciones del rendimiento del cultivo en el periodo de análisis 2030-2050, se realizaron con tres modelos de circulación general: CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR, y en los escenarios climáticos: RCP4.5 y RCP8.5. Para ello, en Aquacrop se utilizaron los parámetros conservativos del experimento de lámina alta, usado para la calibración espacial, dados sus buenos índices estadísticos. Por su parte, las condiciones climáticas futuras fueron añadidas en el módulo Clima de Aquacrop considerándose: precipitación, temperatura máxima, mínima y la evapotranspiración de referencia del periodo 2030-2050.

La Figura 28 muestra la evapotranspiración de referencia acumulada anual simulada por Aquacrop tanto para la serie futura 2030-2050 y la serie histórica 1980-1999.

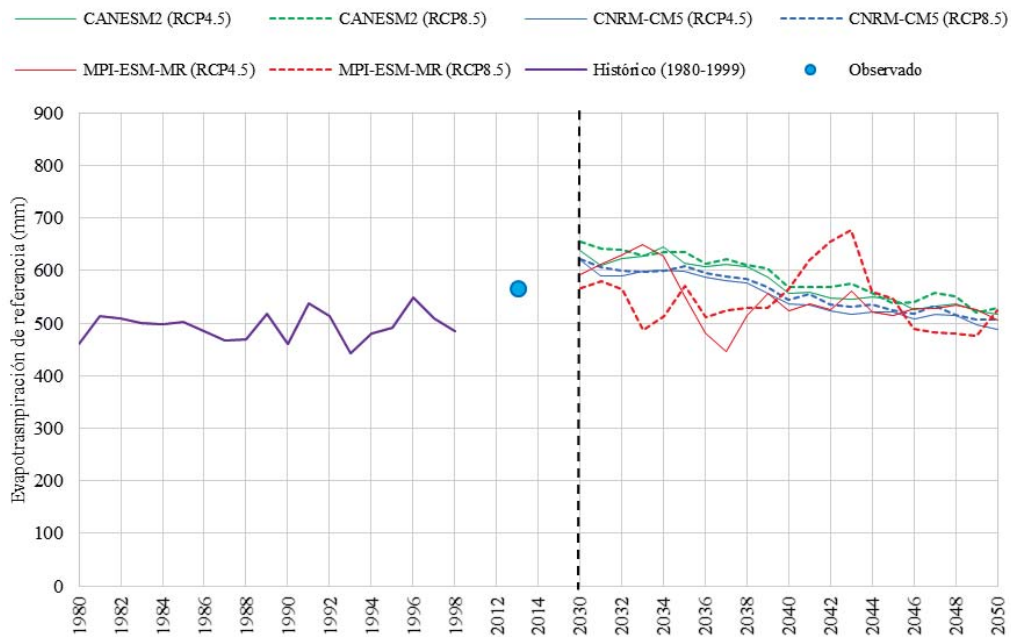


Figura 28: Proyecciones absolutas de la evapotranspiración de referencia acumulada anual para el periodo 2030-2050 con respecto a la simulación histórica del periodo 1980-1999, en color morado. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. El punto celeste corresponde a la evapotranspiración de referencia acumulada anual para el experimento de lámina alta en el periodo 2013-2014. Línea punteada vertical, señala el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.

En la simulación del modelo para la serie futura (2030-2050), se obtuvieron valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) mayores a los simulados para el periodo histórico (1980-1999) en aproximadamente 200 mm (Ver Figura 28). Esto está asociado a los mayores valores de temperatura superficial (°C) de los escenarios de cambio climático futuro, los cuales estarían generando un mayor estrés en el cultivo y posiblemente reduzcan la tasa de crecimiento de biomasa.

La simulación del modelo CANESM2, tanto en el RCP4.5 y el RCP8.5, obtuvo valores de ET_o más altos que los demás, y tendría concordancia con el análisis de significancia de la diferencia porcentual entre la evapotranspiración de referencia futura e histórica (Tabla 20), que indica que en la estación de verano, la menor significancia se presenta en dicho modelo.

Los picos de ET_o más bajos se encuentran en el modelo MPI-ESM-MR, que a pesar que en ciertos años obtiene valores altos de ET_o, vuelve a decaer pronunciadamente, mostrando el pico más bajo en el año 2038 con 450 mm aproximadamente. Esto también, está relacionado con el análisis de significancia de la diferencia porcentual entre la evapotranspiración de referencia futura e histórica (Tabla 20), la cual indica que la mayor significancia se presenta en dicho modelo.

Las diferencias entre el escenario más optimistas (RCP4.5) y el más pesimista (RCP8.5) al analizar cada modelo son mínimas a causa de la ligera diferencia en el aumento de la temperatura futura durante la primera mitad del siglo XXI. Pero una tendencia a la estabilización de la ET_o acumulada se nota en los últimos años de la simulación del periodo 2030-2050 donde se puede observar una ET_o acumulada similar a la observada durante el periodo observado entre nov. 2013 y abril del 2014.

En la Figura 29 se muestran los rendimientos anuales obtenidos para el modelamiento de la serie futura 2030-2050. Dichos rendimientos son más bajos que el obtenido durante la campaña del 2013-2014 para el bloque experimental de lámina alta, en aproximadamente 4 Tnha⁻¹. Esto estaría ocurriendo debido principalmente a que se estaría sobrepasando los umbrales de estrés hídrico durante el periodo de floración, lo cual afecta el proceso de maduración del maíz. Esta disminución en el rendimiento para todos los escenarios futuros indicaría que en la serie futura 2030-2050, el cultivo necesitaría una mayor cantidad de agua.

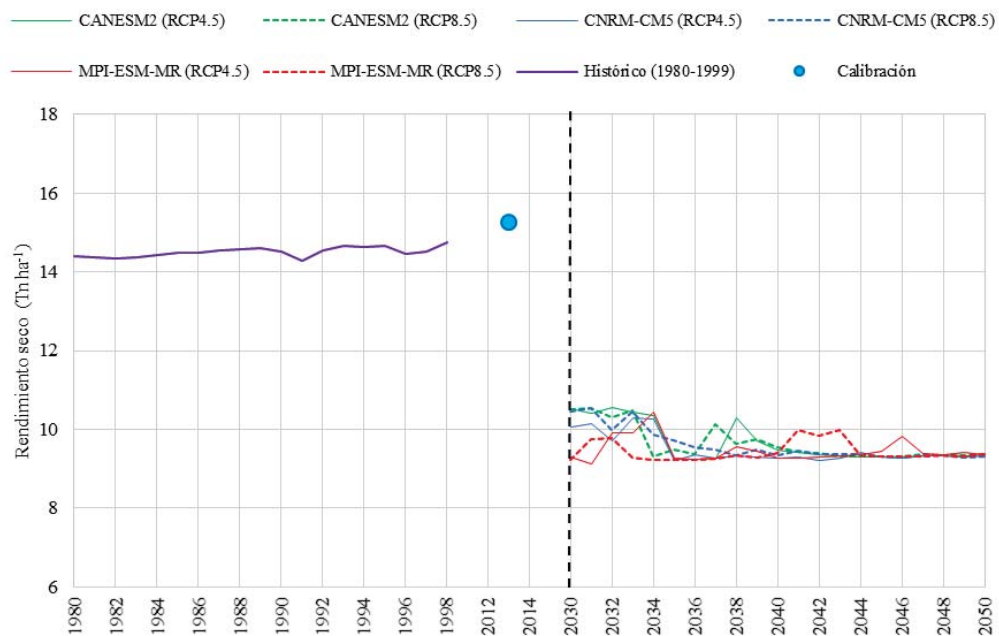


Figura 29: Proyecciones absolutas de los rendimientos con respecto a la corrida histórica del periodo 1980-1999, en color morado. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. El punto celeste corresponde al rendimiento observado para el experimento de lámina alta en el periodo 2013-2014. Línea punteada vertical señala el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.

En general, los rendimientos obtenidos en el modelamiento bajo el escenario más optimista (RCP4.5) presentan menor número de picos de bajo de rendimiento en relación a los modelamientos bajo el escenario más pesimista (RCP8.5). De ellos, el modelo MPI-ESM-MR obtuvo los rendimientos más bajos, ver Tabla 22.

Tabla 22: Valores máximos y mínimos de rendimiento simulado para el periodo 2030-2050

Escenarios	Rendimiento (2030-2050)	
	máximo	mínimo
CANESM2 (RCP4.5)	10.6	9.2
CANESM2 (RCP8.5)	10.5	9.3
CNRM-CM5 (RCP4.5)	10.3	9.2
CNRM-CM5 (RCP8.5)	10.5	9.3
MPI-ESM-MR (RCP4.5)	10.4	9.1
MPI-ESM-MR (RCP8.5)	10.0	9.2

Mientras que los rendimientos más altos y más estabilizados a lo largo de la serie futura (2030-2050) pertenecen al modelo CANESM2, que también está acorde al valor más alto de ETo futuro y al grado de significancia baja que obtuvo en la Tabla 20.

Además, se analizó el grado de significancia de la diferencia porcentual de los rendimientos simulados en la serie futura 2030-2050 con respecto a los rendimientos históricos simulados del periodo 1980-1999 con el fin de evaluar el efecto del cambio climático. Los resultados se muestran en la Tabla 23, en la cual se nota que todos los rendimientos futuros producen cambios muy significativos sobre el rendimiento histórico simulado.

Tabla 23: Diferencia Porcentual del rendimiento simulado para el periodo del año 2030 al 2050 con respecto al simulado para el periodo del año 1980 al 1999

Modelos Climáticos y escenarios					
RCP 4.5			RCP 8.5		
CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
-32.3	-33.7	-34.7	-32.3	-32.7	-34.7

Cambio No significativo ($-cv \geq x \geq cv$)
 Cambio Significativo ($x < -2cv, -cv$ U $[2cv, cv >$)
 Cambio Muy Significativo ($x < -2cv$ U $x \geq 2cv$)

Para evitar el estrés hídrico y disminuir el grado de significancia se realizó simulaciones añadiéndose eventos de riego adicionales a la lámina de riego evaluada, con la finalidad de obtener un rendimiento similar al observado en el periodo 2013-2014. Para ello, se aprovechó el balance hídrico reportado por Aquacrop, el cual detalla en qué momentos se presentan los déficit hídricos, y en base a lo anterior, se determinó que se necesitaría de una aplicación de 150 mm de lámina de riego adicionales a los 385 mm aplicados durante el periodo 2013-2014, con lo cual no se generaría estrés hídrico en los escenarios futuros y además se puede reducir el grado de significancia sobre el rendimiento histórico.

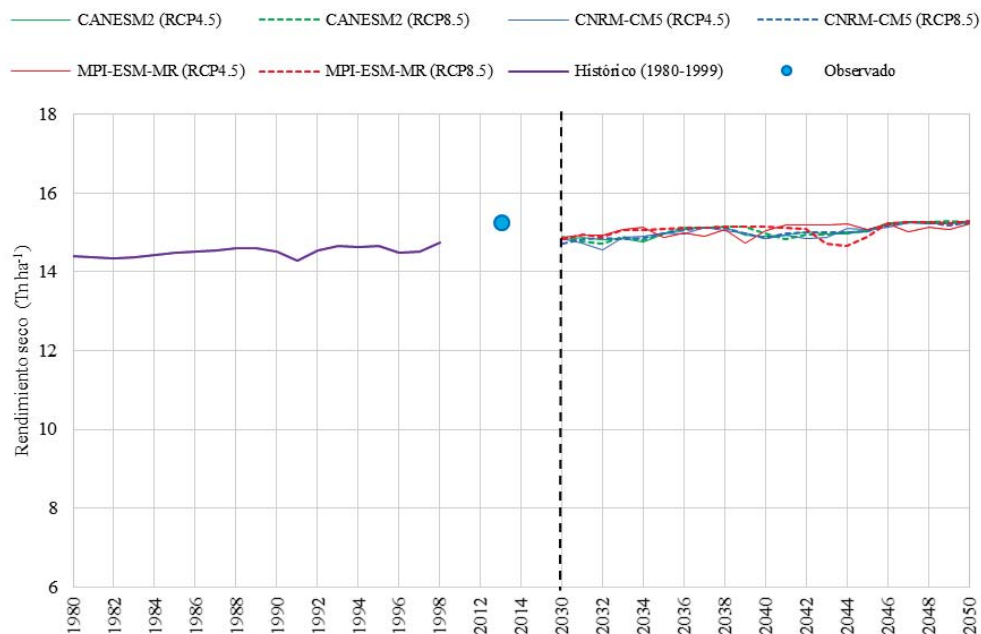


Figura 30: Proyecciones absolutas de los rendimientos corregidos sin estrés hídrico mediante la aplicación una lámina óptima de riego con respecto a la corrida histórica del periodo 1980-1999, en color morado. La línea continua corresponde al escenario RCP4.5 y discontinua al escenario RCP8.5. El punto celeste corresponde al rendimiento observado para el experimento de lámina alta en el periodo 2013-2014. Sombra en gris, señala el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones.

Los 150 mm de riego adicionales fueron distribuidos en varios eventos de riego, principalmente durante la floración. La Figura 30 evidencia rendimientos no afectados por el estrés hídrico, y que en todos los escenarios futuros, mantienen pequeñas variaciones a lo largo de la serie 2030-2050.

A su vez, se evaluó los cambios en el grado de significancia antes de la aplicación de la lámina adicional, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 24. De esto se puede demostrar que con la aplicación de una lámina adicional de 150 mm, la diferencia porcentual con respecto a la corrida anterior disminuye de muy significativa a No significativa.

Tabla 24: Comparación del grado de significancia entre la simulación sin la aplicación y con la aplicación de una lámina adicional de riego para la diferencia porcentual entre el periodo simulado del año 2030 al 2050 con respecto al simulado para el periodo del año 1980 al 1999.

Lámina de riego	Modelos Climáticos y escenarios					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	CANESM2	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR
385 mm	-32.3	-33.7	-34.7	-32.3	-32.7	-34.7
535 mm	2.86	2.56	3.05	2.85	2.73	3.23

Cambio No significativo ($-cv \geq x \geq cv$)
 Cambio Significativo ($x < -2cv, -cv$ U $2cv, cv >$)
 Cambio Muy Significativo ($x < -2cv$ U $x \geq 2cv$)

Cabría resaltar que esta simulación aplica para el grado de productividad del híbrido DK7088 analizado, y evidenciaría que el manejo de la parcela evaluada requeriría de cambios en la tecnología de riegos, a su vez un posible cambio por híbridos de mayor rendimiento puede eliminar el problema de déficit hídrico. Pero por lo observado, la medida más rápida para lograr la contingencia ante estos posibles eventos futuros, es migrar el riego por gravedad a otras tecnologías de riego.

V. CONCLUSIONES

Se evaluó el rendimiento del híbrido del maíz amarillo duro DK7088, ante diversos escenarios de cambio climático en La Molina a través del modelo agrometeorológico Aquacrop. Para ello, se recopiló los parámetros necesarios por el modelo durante el periodo vegetativo del maíz amarillo observado entre el 20 de Noviembre del 2013 y el 16 de Abril del 2014 en el campo “libre 1” del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Siendo las principales conclusiones, las siguientes:

1. Con el seguimiento del trabajo de campo, se obtuvieron rendimientos secos del cultivo de 15.3, 13.2 y 8.8 Tn/ha con láminas de riego de 3850, 2100 y 1200 m³/ha en los experimentos de lámina alta, media y baja respectivamente. Y con los datos obtenidos en campo, se elaboró la estructura del modelo Aquacrop, siendo los parámetros más sensibles del modelo, los asociados a la curva del dosel (CC) añadidos al módulo de Cultivo del modelo.
2. Se modeló el rendimiento del maíz amarillo duro con el software Aquacrop bajo diferentes condiciones de riego por gravedad en La Molina, calibrándose con un bloque experimental en condiciones óptimas de riego, y validándose espacialmente con dos bloques experimentales bajo condiciones de estrés hídrico. Posteriormente, mediante el uso de indicadores estadísticos se evaluó las variables: cobertura del dosel (CC) y la biomasa aérea seca (B) simulada por el modelo, (que al compararse con los valores observados en campo, obtuvieron una alta correlación, que según Molnar (2011), califica a la simulación como muy buena a excelente.
3. Se cuantificó el grado de dependencia entre los valores simulados y observados con un nivel de significancia del 5% en la prueba estadística T-Student para la media de 180 muestras de cobertura del dosel registradas en 10 fechas y 216 muestras de biomasa aérea seca registradas en 12 fechas para cada bloque experimental, obteniéndose, grados de significación positiva en los 3 experimentos evaluados para valores de coeficiente de Pearson entre 0.90 y 0.99 en ambos parámetros evaluados, lo cual indica una dependencia lineal positiva entre los valores simulados y los observados.

4. El rendimiento del maíz amarillo duro ante escenarios de cambio climático en el periodo futuro 2030-2050, sufriría efectos de estrés hídrico al usar las mismas condiciones y el sistema de riego evaluado, presentándose disminuciones de aproximadamente 4 Tn/ha con respecto al valor de 15.27 Tn/ha evaluado en la campaña 2013-2014. Para evitar el estrés hídrico, se necesitaría adicionar una lámina de riego en el rango de 1200 - 1500 m³/ha, distribuidas principalmente durante la etapa de floración. A pesar de ello, esta cantidad de agua de riego adicional no llega a ser tan alta, y se debería a que la precipitación en los escenarios futuros también aumenta, lo cual estaría autorregulando el déficit hídrico.

VI. RECOMENDACIONES

Se necesita realizar un mayor número de campañas de campo en diferentes tipos de cultivo y bajo la aplicación de distintas tecnologías de riego para poder calibrar y validar de manera más eficiente el modelo.

Con el objetivo de llegar a mejores resultados en la modelación de eventos bajo estrés hídrico, se necesitaría medir el contenido de agua en el suelo de forma semanal. Y así, de manera indirecta, se podría evaluar la partición de la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo al compararse los resultados medidos en campo y los del balance de agua en el suelo que genera Aquacrop.

Políticas del punto de vista agronómicas ante posibles eventos del fenómeno del Niño pueden ser decididas a partir de la evaluación de experimentos en diversas zonas del Perú. Por esto, se necesitaría analizar diversas condiciones climáticas de diferentes cultivos y bajo condiciones distintas de manejo para poder analizar y planificar estrategias que eviten afecciones directas a la economía del país.

Por último, dados los resultados obtenidos de la variedad de maíz amarillo duro evaluada, se podría recomendar al MINAGRI y al Programa de Maíz de la UNALM, realizar mayores estudios de los efectos de estrés hídrico en esta variedad porque el rendimiento de ella no se ve afectado como es el caso de otros híbridos de maíz.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abedinpour, M. y otros, (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agric. Water Manage.* 55-66.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M., (1998). Crop Evapotranspiration. Guidelines lines for computing crop water requirements. Irrigation and drainage paper, No.56. FAO. Roma.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M., (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje Manual 56. Roma.

Allen, R., Pereira, R. & Raes, D., (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56 Disponible en Internet en: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>.

Amador, J.A. y Alfaro, E. (2009). Métodos de reducción de escala: Aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. 39-52.

Andarzian, B. y otros, (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Manage*, Volumen 100.

Araya, A. y otros, (2010). Test of AquaCrop modelin simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeumvulgare*). *Agricultural Water Manage*, Volumen 97.

Bradford, K. & Hsiao, T., (1982). Physiological responses to moderate water stress. *Physiological Plant Ecology II*. New York.

Chylek, P. y otros, (2011). Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM. *Atmospheric Chemistry Physics Discussions* 11:22, 893-2290, DOI 10.5194/ acpd-11-22893-201.

Doorenbos, J. & Kassam, A., (1979). Yield response to water. FAO Estudio de Riego y Drenaje No. 33. Roma.

Dorenbos, J. & Pruitt, W., (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Riego y Drenaje, 24. FAO. 195 pp. (Este trabajo ha sido actualizado por la FAO mediante el de Allen et al. 1998).

Farahani, H., Izzi, G. & Oweis, T., (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, Issue 101.

García-Vila, M. & Fereres, E., (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *Eur. J. Agron*, Issue 36. 21-31.

Geerts, S. y otros, (2009). Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop.

IPCC (2013). Cambio climático 2013: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al quinto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R., Stocker, F. y Qin, D. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

Hargreaves, G. & Samani, Z., (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.* 96-99.

Heisey, P. & Edmeades, G., (1999). Maize production in Drought-Stressed Environments: Technical Options and Research Resources Allocation Part I. In: CIMMYT. *World Maize Facts and Trends 1997/98*. CIMMYT. México.

Heng, L. y otros, (2009). Validating the FAO-AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, Volumen 101.

Hirsh, R., Helsel, D., Cohn, T. & Gilroy, E., (1992). *Handbook of Hydrology*. s.l.:McGraw-Hill.

Hsiao, T. y otros, (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Journal of Agronomy*, Volumen 101.

Jungclaus, J. y otros, (2010). Climate and carbon-cycle variability over the last millenium. *Climate of the past* 6(5): 753-737, DOI 10.5194/ cp-6-723-2010.

Katerji, N., Campi, P. & Mastrorilli, M., (2010). Productivity evapotranspiration, andwater use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop undercontrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Manage*, Volumen 130.

MINAG, (2012). Principales aspectos de la cadena agroproductiva. Lima.

Molnar, P., (2011). "Calibration". *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental. Zürich. Switzerland.

Moriasi, D. y otros, (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, 50(3). 885-900.

Nash, J. & Sutcliffe, J., (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1—A discussion of principles. *J. Hydrol*, 10(3). 282-290.

Paredes, P., Rodrigues, G., Alves, I. & Pereira, L., (2014). Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. *Agricultural water manage*, Issue 135. 27-39.

Raddatz, T. y otros, (2007). Will the tropical land biosphere dominate the climate-carbon cycle feedback during the twenty-first century?.. *Climate Dynamics* 29 (6): 565-574, DOI 10. 1007/s00382-007-0247-8.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. & Fereres, E., (2009). The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Journal of Agronomy*. 438-447.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. & Fereres, E., (2011). *AquaCrop Version 3.1 Plus ReferenceManual*. FAO. Roma.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. & Fereres, E., (2012). AquaCrop Version 4.0. III: Calculation procedures. Roma.

Rosa, R. y otros, (2012). Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. *Agricultural water manage*, Issue 103. 62-77.

Samani, Z., (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4). 265-267.

SENAMHI, (2009). Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030.

SENAMHI, (2015). Regionalización Estadística de Escenarios Climáticos en Perú. Lima.

Steduto, P. & Albrizio, R., (2005). Resource-use efficiency of field grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency.. *Agric. For. Meteorol*, Issue 130. 269-281.

Steduto, P., Hsiao, T. & Fereres, E., (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, Issue 25.

Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E. & Raes, D., (2012). Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage paper 66*. Roma.

Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D. & Fereres, E., (2009). AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Journal of Agronomy*. 426-437.

Voldoire, A. y otros, (2011). The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation. *Climate Dynamics* DOI 10.1007/ s00382-011-1259.


Xu, L. & Hsiao, T., (2004). Predicted versus measured photosynthetic water-use efficiency of crop stands under dynamically changing field environments. *J. Exp. Bot*, Issue 55. 2395-2411.

Yzarra, W., Trebejo, I. & Noriega, V., (2010). Evaluación del efecto del clima en la producción y productividad del maíz amarillo duro en la costa central del Perú. Lima: SENAMHI, UNALM.


VIII. ANEXOS

ANEXO 1

Resultados del análisis de suelo del campo experimental (Campos Libres 1) obtenido del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes perteneciente a la Facultad de Agronomía de la UNALM



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMÍA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

Solicitante : FUNDO UNALM

Departamento : LIMA

Distrito : LA MOLINA

Referencia : H.R. 43512-003C-14

Provincia : LIMA


Predio : CAMPOLIBRES

Fecha : 30/01/14

Lab.	Número de Muestra		C.E. (1:1)	pH (1:1)	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables			Suma de Cationes	Suma de Sat. De Bases %		
	Claves	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺⁺ mg/100g	Mg ⁺⁺ mg/100g	K ⁺ mg/100g			NH ₄ ⁺ mg/100g	Al ⁺⁺⁺ + H ⁺ mg/100g
351	18F3-15		8.02	0.69	1.80	0.07	2.6	49	37	45	18	Fr.	11.20	9.68	1.37	0.11	0.04	0.00	11.20	100
352	18F4-15		8.10	0.81	2.60	0.43	9.1	94	67	19	14	Fr.A.	7.20	4.57	1.45	1.10	0.08	0.00	7.20	100
353	1812-15		8.12	0.59	7.10	0.47	3.1	58	55	23	22	Fr.Ar.A.	8.00	5.14	1.65	1.05	0.16	0.00	8.00	100

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

Número de Muestra		C.C. %	P.M. %
351	18F3-15	20.69	11.42
352	18F4-15	13.97	7.20
353	1812-15	18.12	9.80





Sady Garcia Bendezi
Jefe del Laboratorio


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

ANEXO 2

Resultados del análisis de agua de riego aplicada al campo experimental (Campos Libres 1) obtenido del Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes perteneciente a la Facultad de Agronomía de la UNALM

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE AGRONOMIA LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES	
ANALISIS DE AGUA		
SOLICITANTE :	FUNDO UNALM	
PROCEDENCIA :	LIMA/ LIMA/ LA MOLINA	
REFERENCIA :	H.R. 43513	
No. Laboratorio	006	
No. Campo	Agua de Pozo Azahares	
pH	7.08	
C.E. dS/m	0.57	
Calcio meq/L	4.67	
Magnesio meq/L	0.66	
Potasio meq/L	0.09	
Sodio meq/L	0.68	
SUMA DE CATIONES	6.10	
Nitratos meq/L	0.04	
Carbonatos meq/L	0.00	
Bicarbonatos meq/L	2.41	
Sulfatos meq/L	1.46	
Cloruros meq/L	2.50	
SUMA DE ANIONES	6.41	
Sodio %	11.15	
RAS	0.42	
Boro ppm	0.13	
Clasificación	C2-S1	

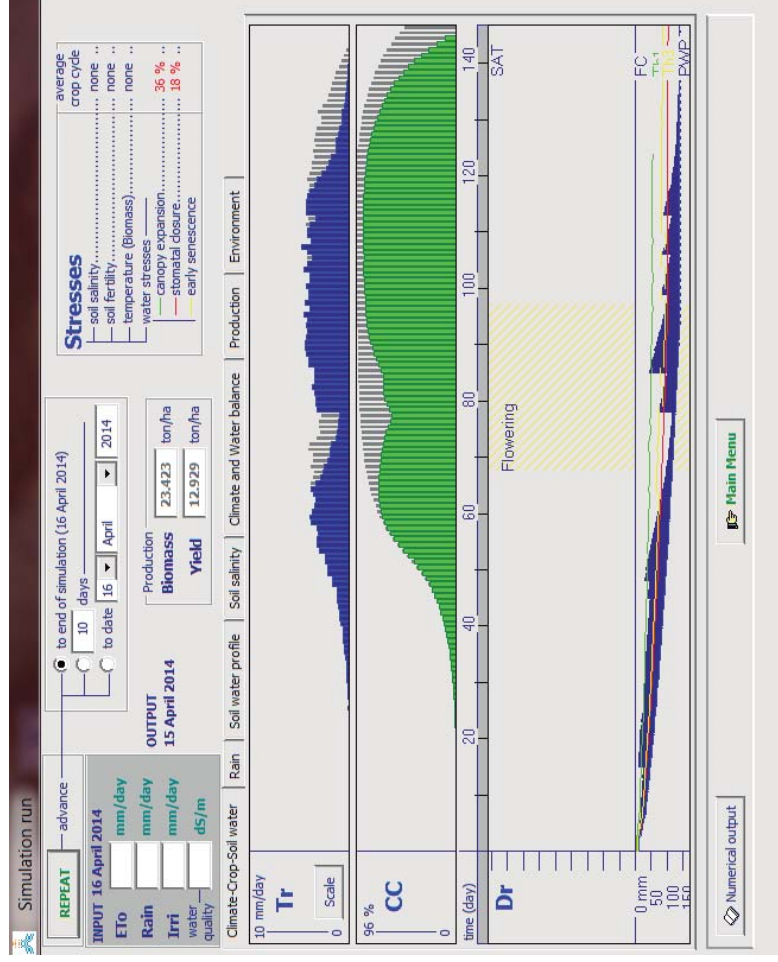
La Molina, 13 de Enero del 2014


Gady García Bendezi
Jefe del Laboratorio

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

ANEXO 3

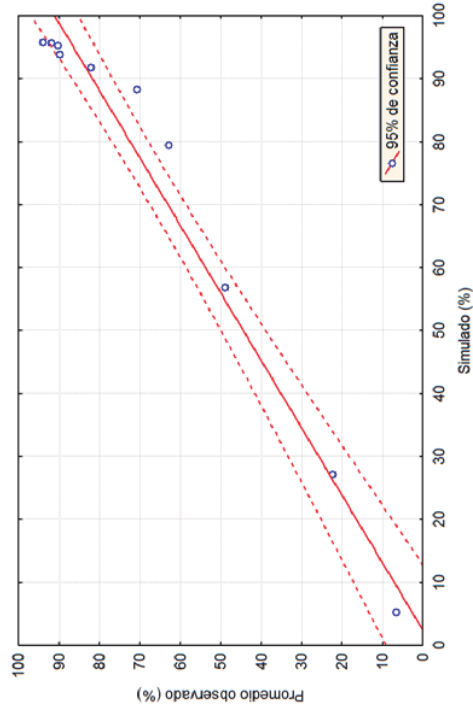
Resultados de la corrida del experimento de lámina media, donde se nota que se sobrepasa los umbrales de estrés hídrico durante el periodo de floración



ANEXO 4

Valores de cobertura del dosel evaluados durante el periodo vegetativo del cultivo comparados con valores simulados por Aquacrop mediante r Pearson

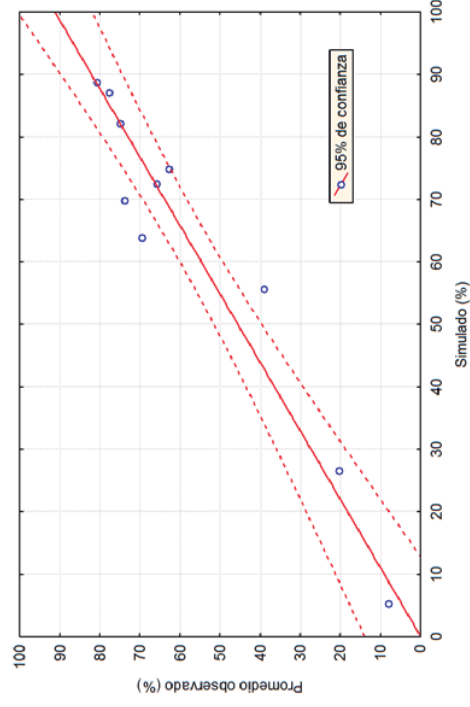
DDS	COBERTURA DEL DOSEL (LAMINA ALTA)												Promedio Observado	Promedio Simulado						
	Tratamiento 1						Tratamiento 2								Tratamiento 3					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			1	2	3	4	5	6
33	8.4	7.8	3.6	4.5	6.0	5.4	7.6	4.1	8.0	7.4	4.3	5.8	6.4	5.8	8.0	4.0	5.1	6.1	6.6	5.2
48	28.0	23.0	21.0	31.6	29.0	19.8	19.6	29.0	22.1	20.0	12.0	12.0	24.0	23.5	26.0	20.0	20.2	21.0	22.3	27.1
55	50.0	32.0	60.0	31.6	41.7	68.0	53.0	34.1	38.0	34.0	29.3	36.0	50.0	39.0	34.0	27.0	42.7	74.0	48.9	56.8
63	59.0	48.0	43.6	51.0	60.0	51.0	65.0	54.0	62.4	49.0	39.0	47.0	60.0	48.0	47.0	46.2	57.0	69.0	62.8	79.5
70	62.0	56.0	80.0	66.0	72.8	54.5	62.0	70.0	73.0	63.5	57.3	63.3	64.7	55.0	69.0	62.0	66.0	57.0	70.7	88.3
77	75.0	74.0	94.0	81.1	89.8	60.0	74.0	76.0	77.7	74.0	85.0	81.1	72.0	61.0	78.0	76.0	85.0	70.0	82.1	91.8
84	80.4	78.2	80.0	84.4	90.5	62.0	89.0	90.2	85.0	80.0	88.7	87.9	78.8	74.1	79.7	88.0	80.9	79.4	89.7	93.8
91	87.1	89.4	96.0	80.7	74.0	70.0	84.6	88.3	87.0	91.0	85.4	90.0	80.0	81.6	87.4	85.2	92.6	89.9	90.2	95.3
98	91.0	94.3	82.4	92.4	95.0	87.9	93.0	92.6	90.0	97.1	88.0	94.0	88.2	93.0	90.0	89.6	96.0	91.7	91.8	95.7
105	98.0	95.0	96.0	97.0	98.0	95.4	98.4	94.3	90.1	98.0	89.0	95.0	88.4	94.1	94.3	85.0	97.0	94.3	93.9	95.8



ANEXO 4

(Continuación)

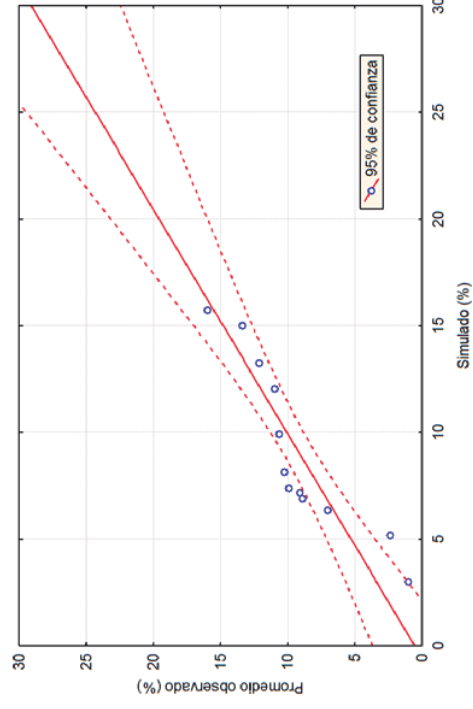
DDS	COBERTURA DEL DOSEL (LAMINA MEDIA)																		Promedio Observado	Promedio Simulado
	Tratamiento 1						Tratamiento 2						Tratamiento 3							
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
33	10.0	3.0	12.0	5.0	7.0	13.0	12.0	9.0	8.0	13.5	6.4	5.4	4.0	7.0	6.0	2.0	11.0	4.7	7.8	5.2
48	20.1	22.0	21.0	18.8	29.0	25.5	20.4	17.3	26.0	23.0	25.4	10.5	17.0	17.8	17.0	23.0	15.7	24.1	20.3	26.5
55	30.0	39.0	45.0	24.0	47.0	31.0	37.0	41.0	25.4	39.0	30.0	25.0	41.0	56.0	42.0	39.0	20.0	30.5	39.0	55.6
63	60.0	45.0	50.0	44.0	49.0	45.4	51.0	84.0	75.0	67.0	56.0	62.0	53.0	59.0	78.0	50.0	34.8	49.4	62.7	74.8
70	74.0	56.0	54.0	46.0	54.0	50.0	55.0	59.0	77.0	84.0	60.0	80.0	60.0	39.0	55.0	64.7	53.4	56.0	65.7	72.5
77	79.0	73.0	57.0	51.3	64.0	59.8	67.2	59.0	67.9	73.0	58.0	75.0	71.0	72.0	63.2	76.0	61.1	60.4	69.5	63.8
84	86.0	77.0	59.4	72.0	67.0	65.6	65.0	72.0	65.0	79.0	57.0	69.0	80.0	79.0	76.0	83.0	74.0	75.0	73.8	69.8
91	88.0	86.0	60.0	80.0	84.0	70.5	85.0	65.4	70.0	75.0	70.0	76.0	74.0	64.0	75.0	68.0	67.0	71.5	74.8	82.1
98	89.0	88.8	71.0	81.0	78.0	77.0	70.8	69.8	79.0	79.0	83.0	74.9	77.0	80.0	69.0	65.8	71.0	60.3	77.5	87.1
105	92.0	89.0	74.0	82.0	80.5	83.0	86.3	75.8	77.0	82.0	95.0	91.0	83.0	78.0	70.0	75.0	76.0	85.0	80.7	88.7



ANEXO 4

(Continuación)

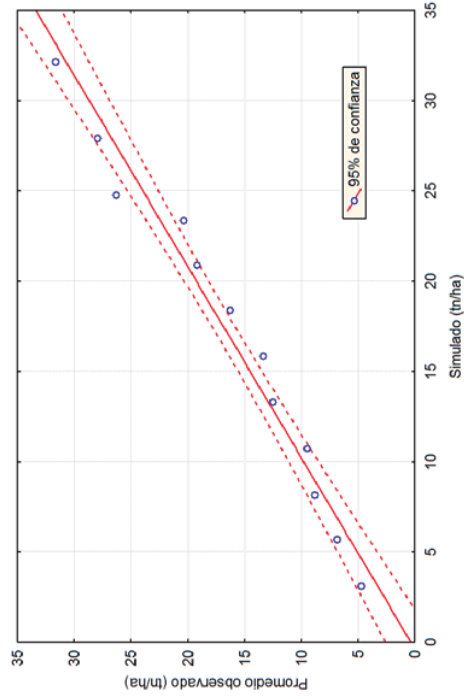
DDS	COBERTURA DEL DOSEL (LAMINA BAJA)																		Promedio Observado	Promedio Simulado
	Tratamiento 1						Tratamiento 2						Tratamiento 3							
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
33	8.0	5.4	3.9	4.8	3.4	3.8	3.1	4.2	3.3	3.5	4.1	5.8	3.2	2.9	3.2	3.0	2.9	3.4	4.1	5.2
48	17.5	17.8	25.0	26.0	31.0	30.0	26.0	21.0	14.4	28.0	32.0	26.0	22.5	25.0	16.0	21.0	10.1	19.6	23.9	25.6
55	30.0	55.0	37.0	59.0	36.0	39.4	35.0	23.5	49.0	30.5	40.9	50.2	43.0	37.0	60.0	39.0	45.0	28.5	42.5	51.1
63	43.0	54.0	71.0	54.0	39.0	43.0	38.0	24.0	49.0	45.0	43.0	65.0	50.0	55.0	48.0	45.4	57.0	42.0	49.0	60.5
70	58.0	56.0	41.0	59.0	50.0	55.0	50.0	37.0	45.0	48.0	41.9	61.0	52.0	48.0	37.0	54.0	51.0	43.8	50.7	54.8
77	59.0	40.0	50.4	39.0	38.0	36.0	39.0	41.0	42.4	30.0	39.0	56.0	50.0	46.0	40.9	36.0	45.0	44.0	41.9	36.2
84	24.0	29.0	16.0	28.0	40.0	26.0	35.0	42.0	32.0	26.0	40.0	50.0	69.0	31.0	48.0	49.0	36.0	27.0	35.5	15.5
91	16.0	18.0	20.0	26.0	30.0	35.0	37.0	46.0	40.0	47.0	52.0	32.0	44.0	35.0	32.0	26.0	31.0	37.0	32.4	23.1
98	53.0	41.0	65.0	51.0	49.0	66.0	50.0	35.0	54.0	55.2	60.0	40.0	58.0	51.0	62.0	64.5	50.0	50.0	53.8	46.5
105	72.0	84.0	73.0	66.0	60.0	70.5	65.0	71.0	64.0	67.0	61.0	50.0	63.0	65.0	63.0	67.0	61.0	69.0	67.8	67.8



ANEXO 5

Valores de biomasa aérea seca evaluada durante el periodo vegetativo del cultivo comparados con valores simulados por Aquacrop mediante r Pearson

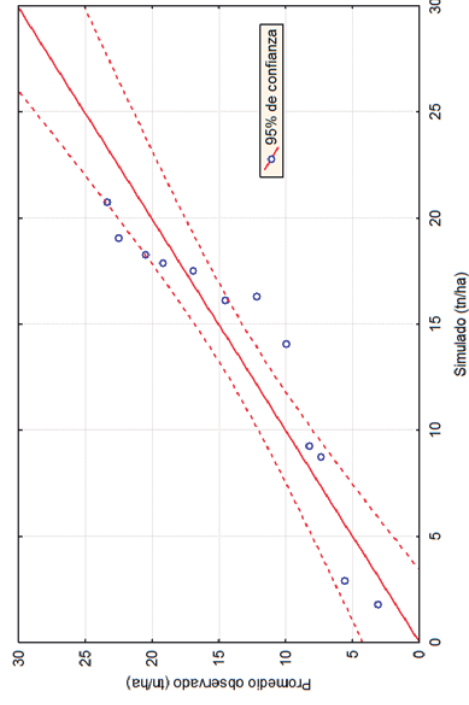
DDS	BIOMASA AÉREA (LAMINA ALTA)																		Promedio Observado	Simulado
	Tratamiento 1						Tratamiento 2						Tratamiento 3							
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6		
55	3.5	6.0	5.0	4.2	4.6	6.5	3.3	5.8	3.6	3.8	3.8	3.4	7.0	5.5	5.0	3.1	4.5	5.0	4.7	3.1
63	5.8	4.5	9.0	6.8	5.1	9.0	5.3	5.7	7.4	9.5	6.9	6.2	4.3	3.8	7.4	6.8	5.0	8.0	6.9	5.7
70	8.5	9.3	11.0	6.6	8.4	13.0	7.4	8.7	8.8	9.8	8.4	7.0	8.4	10.0	6.4	6.7	11.0	6.6	8.8	8.2
77	11.0	10.0	11.6	8.8	12.8	8.8	10.9	9.4	9.0	10.2	11.7	10.1	10.6	10.4	7.4	7.9	6.5	7.5	9.5	10.7
84	12.0	12.0	13.1	12.0	14.8	17.0	14.3	12.0	11.0	13.8	13.2	10.8	11.7	13.0	9.1	12.8	15.0	10.2	12.5	13.3
91	13.0	18.0	16.3	12.0	18.5	18.4	17.4	15.4	12.0	15.0	16.5	11.8	12.0	16.0	11.0	13.0	15.0	11.0	13.3	15.9
98	20.0	21.4	19.4	19.5	19.4	20.0	18.7	16.2	16.0	15.6	17.0	14.1	15.7	19.0	13.9	14.1	17.0	14.4	16.3	18.4
105	22.0	23.0	22.5	20.5	20.2	23.0	20.4	17.8	19.0	17.6	19.0	16.5	17.4	24.5	18.3	15.4	17.6	16.5	19.2	20.9
112	26.3	25.8	25.4	22.0	20.5	25.0	21.8	21.0	19.8	24.7	18.0	17.4	19.0	27.0	21.4	17.0	22.0	20.4	20.4	23.4
116	27.0	28.0	27.9	22.0	21.0	26.3	22.0	28.0	28.0	27.0	29.0	20.8	21.6	29.0	21.0	26.5	28.7	30.0	26.3	24.8
125	28.0	29.6	28.4	27.8	29.0	28.0	25.1	30.0	30.3	30.0	30.0	27.0	23.0	32.0	23.2	29.0	28.4	23.6	28.0	27.9
139	36.0	35.4	33.4	33.0	31.0	33.8	31.8	31.0	34.0	32.0	30.9	29.3	27.6	34.0	29.0	30.4	29.7	27.4	31.7	32.1



ANEXO 5

(Continuación)

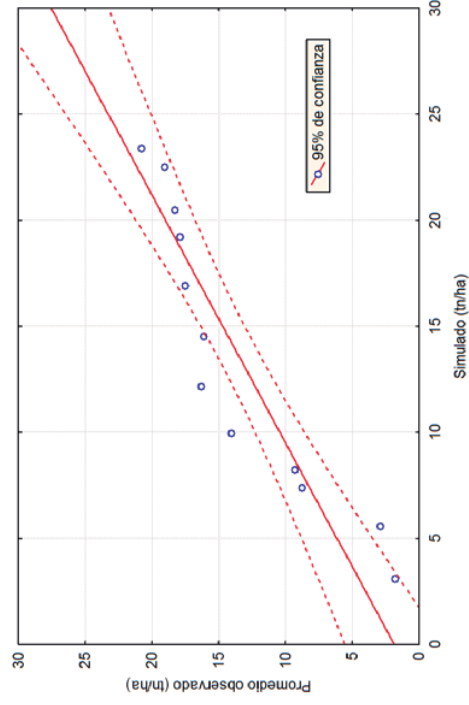
DDS	BIOMASA AÉREA (LAMINA MEDIA)																		Promedio Observado	Simulado	
	Tratamiento 1						Tratamiento 2						Tratamiento 3								
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			
55	2.4	1.2	1.5	2.0	1.5	1.9	2.2	2.8	1.9	3.2	2.1	1.2	1.2	0.5	1.9	0.6	1.2	0.7	0.8	1.8	3.1
63	4.0	2.4	3.0	2.8	4.2	2.1	4.2	3.5	3.5	2.7	2.5	4.2	4.2	3.0	2.8	2.4	2.5	1.9	3.8	2.9	5.6
70	5.8	5.5	6.7	5.3	6.4	7.4	8.5	5.1	12.0	4.2	11.0	11.0	11.0	5.5	4.0	3.0	3.0	6.7	4.8	8.7	7.4
77	6.0	12.0	8.0	6.9	7.3	10.4	11.0	9.9	13.8	7.0	13.0	13.0	13.0	7.3	8.3	5.0	8.9	7.9	5.3	9.3	8.2
84	11.0	12.5	12.0	8.8	16.0	13.7	12.3	13.0	15.3	13.0	14.0	14.6	14.6	12.7	11.2	6.8	10.8	8.8	9.4	14.1	10.0
91	14.0	19.0	18.0	12.6	17.0	14.2	15.2	14.3	15.9	16.0	14.2	16.0	16.0	15.2	13.4	11.8	11.9	11.6	10.9	16.3	12.2
98	16.8	16.3	21.0	14.2	15.7	15.0	19.0	16.0	16.0	17.0	15.0	16.3	16.3	16.6	14.0	13.0	12.8	12.7	13.5	16.1	14.5
105	17.0	17.7	21.5	16.2	18.0	15.9	19.1	17.0	16.2	17.5	16.5	16.5	17.9	17.0	15.3	14.8	13.5	13.0	14.0	17.5	16.9
112	17.9	18.2	22.0	19.0	19.5	20.0	20.7	18.1	16.5	18.6	18.0	18.3	18.3	18.7	16.0	15.0	13.8	13.4	15.0	17.9	19.2
116	19.0	19.4	23.5	21.2	20.0	21.0	20.9	18.6	17.0	19.1	19.0	19.7	19.7	19.0	17.7	15.1	14.2	14.5	16.5	18.3	20.5
125	20.0	17.0	23.8	24.0	23.0	22.0	22.2	19.1	20.5	19.5	19.1	20.0	20.0	19.5	18.3	15.5	15.0	15.0	18.0	19.1	22.5
139	24.0	21.0	27.5	24.6	26.0	25.0	24.7	20.0	25.8	20.8	19.3	24.9	24.9	20.6	20.8	15.8	15.4	15.1	17.2	20.8	23.4



ANEXO 5

(Continuación)

DDS	BIOMASA AÉREA (LAMINA BAJA)																		Promedio Observado	Simulado	
	Tratamiento 1						Tratamiento 2						Tratamiento 3								
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6			
55	1.8	1.0	0.5	0.7	0.9	1.1	0.9	1.2	1.2	1.2	0.8	0.8	1.0	1.0	0.9	1.6	0.6	1.1	1.3	1.0	3.0
63	2.3	3.4	2.3	2.6	2.9	2.6	1.8	2.4	2.7	3.2	3.2	1.9	1.6	2.5	1.9	2.5	1.9	2.6	2.4	2.4	5.2
70	6.4	6.5	7.7	6.0	2.0	8.3	8.0	7.3	6.4	7.5	7.4	6.1	6.1	5.9	6.3	6.7	7.0	7.0	5.7	7.0	6.4
77	8.9	8.7	6.2	7.6	8.2	9.4	8.8	7.9	9.2	8.1	8.8	8.4	8.4	9.4	10.2	9.2	9.1	7.5	7.5	8.9	6.9
84	8.4	6.5	8.0	9.1	8.7	10.9	8.1	9.6	10.4	9.1	11.0	9.9	11.0	10.2	11.0	7.8	8.0	9.7	10.2	9.1	7.2
91	7.0	8.2	9.2	8.8	9.0	12.1	9.0	10.6	11.5	10.9	11.2	10.8	10.8	10.9	12.8	10.8	10.3	10.6	10.8	9.9	7.4
98	7.8	11.0	10.3	10.7	10.7	12.5	10.4	8.6	12.6	11.2	12.7	9.2	11.4	11.4	14.5	11.4	11.0	11.8	10.8	10.2	8.1
105	8.0	8.9	11.1	13.9	11.4	13.2	11.6	8.9	13.2	12.9	13.4	14.0	12.6	12.8	8.9	10.4	11.7	12.4	11.4	10.6	9.9
112	9.0	10.7	10.8	16.9	12.5	14.6	12.3	10.4	14.0	13.2	14.0	13.2	14.0	13.0	12.8	13.0	11.5	13.1	12.5	11.0	12.0
116	11.1	11.4	12.0	18.0	13.0	15.8	13.6	12.5	14.5	14.5	15.0	15.0	13.0	14.0	10.0	13.2	12.4	15.0	13.0	12.1	13.2
125	11.6	13.0	14.6	19.2	15.9	16.5	14.5	13.0	15.0	15.1	16.2	13.4	13.4	14.7	12.7	13.2	13.2	16.4	14.8	13.4	15.0
139	15.0	14.8	16.8	20.8	17.5	12.6	14.2	15.0	16.0	16.1	17.4	15.3	15.3	15.8	15.0	15.5	14.6	17.9	17.1	16.0	15.7



ANEXO 6

Determinación del rendimiento evaluado el 14 de abril del 2014 en el campo experimental Campos Libres I

Evaluación de maíz DEKAL 7088 Hortus - Experimento Lamina alta						
Peso muestreado	Núm. Plantas	% de desgrane	Peso por planta (Kg)	Corrección Factor Humedad	Peso corregido por planta (Kg)	Rendimiento al 14% humedad (Tn/ha)
36.2	49	97.7	0.36	0.85	0.31	22.95
37.5	52	87.7	0.32	0.91	0.29	21.67
38.0	58	83.8	0.27	0.84	0.23	17.26
27.8	47	92.8	0.27	0.90	0.25	18.47
22.6	35	90.7	0.29	0.91	0.27	19.90
18.3	24	98.0	0.37	0.87	0.32	24.28
26.9	43	77.7	0.24	0.88	0.21	15.99
28.6	49	96.7	0.28	0.87	0.24	18.34
27.6	43	77.4	0.25	0.84	0.21	15.62
29.4	47	87.5	0.27	0.90	0.25	18.45
29.4	47	84.7	0.26	0.89	0.23	17.61
26.9	42	75.0	0.24	0.86	0.21	15.39
17.5	28	73.3	0.23	0.86	0.20	14.76
28.8	45	77.3	0.25	0.85	0.21	15.85
32.5	48	68.7	0.23	0.88	0.21	15.38
17.5	28	66.1	0.21	0.84	0.17	13.09
27.4	46	60.9	0.18	0.87	0.16	11.84
21.6	32	74.3	0.25	0.87	0.22	16.43
Promedio						17.40

ANEXO 6

(Continuación)

Evaluación de maíz DEKAL 7088 Hortus - Experimento Lamina media						
Peso muestreado	Núm. Plantas	% de desgrane	Peso por planta (Kg)	Corrección Factor Humedad	Peso corregido por planta (Kg)	Rendimiento al 14% humedad (Tn/ha)
20.6	33	73.1	0.23	0.83	0.19	14.17
16.4	28	78.8	0.23	0.91	0.21	15.72
20.6	41	86.9	0.22	0.86	0.19	14.08
22.2	34	83.7	0.27	0.86	0.24	17.67
17.2	28	74.5	0.23	0.86	0.20	14.80
29.9	46	78.9	0.26	0.84	0.22	16.19
23.2	40	85.7	0.25	0.83	0.21	15.46
12.6	22	70.3	0.20	0.83	0.17	12.59
18.8	32	77.3	0.23	0.86	0.20	14.65
29.9	58	73.5	0.19	0.88	0.17	12.53
30.1	47	84.5	0.27	0.86	0.23	17.49
20.9	58	73.7	0.13	0.88	0.12	8.79
17.0	28	84.3	0.26	0.88	0.23	16.94
21.9	35	86.9	0.27	0.89	0.24	18.13
27.5	51	73.5	0.20	0.82	0.16	12.21
15.2	24	84.8	0.27	0.85	0.23	17.04
16.3	25	83.2	0.27	0.88	0.24	17.89
29.4	47	74.2	0.23	0.87	0.20	15.06
Promedio						15.08

ANEXO 6

(Continuación)

Evaluación de maíz DEKAL 7088 Hortus - Experimento Lamina baja						
Peso muestreado	Núm. Plantas	% de desgrane	Peso por planta (Kg)	Corrección Factor Humedad	Peso corregido por planta (Kg)	Rendimiento al 14% humedad (Tn/ha)
19.7	45	67.0	0.15	0.87	0.13	9.56
26.4	51	66.4	0.17	0.91	0.16	11.78
24.9	53	64.9	0.15	0.85	0.13	9.68
19.2	41	60.0	0.14	0.85	0.12	8.93
16.0	32	71.3	0.18	0.87	0.16	11.65
20.6	36	75.2	0.21	0.85	0.18	13.66
13.5	32	56.7	0.12	0.85	0.10	7.61
20.9	41	61.0	0.16	0.88	0.14	10.27
15.2	28	69.3	0.19	0.86	0.16	12.14
25.8	54	58.3	0.14	0.87	0.12	9.14
24.9	48	67.2	0.17	0.84	0.15	11.00
27.1	59	53.3	0.12	0.84	0.10	7.66
17.1	35	55.7	0.14	0.85	0.12	8.72
23.5	45	63.4	0.17	0.88	0.15	10.94
21.0	42	62.9	0.16	0.89	0.14	10.47
19.0	38	59.8	0.15	0.89	0.13	9.95
19.2	37	61.0	0.16	0.87	0.14	10.28
16.8	39	52.7	0.11	0.84	0.10	7.16
					Promedio	10.03