

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA LA SIMULACIÓN
DEL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DEL MAÍZ DURO EN LA REGIÓN
COSTA DEL ECUADOR**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL,
MENCIÓN HIDRÁULICA**

ANDREA LUCÍA ABARCA JARAMILLO
abarcajaramillo93@gmail.com

DIRECTORA: ING. CARLA PAOLA MANCIATI JARAMILLO, PhD.
carla.manciati@epn.edu.ec

Quito, marzo 2019

DECLARACIÓN

Yo, ANDREA LUCÍA ABARCA JARAMILLO, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

ANDREA LUCÍA ABARCA JARAMILLO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por ANDREA LUCÍA ABARCA JARAMILLO, bajo mi supervisión.

ING. CARLA MANCIATI JARAMILLO, Ph. D.
DIRECTORA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todo.

A mis Padres, Luis Edmundo y Margot Lucía, por su amor y dedicación cada día.

A mi hermano, Luis Felipe, por su ejemplo de excelencia y cariño incondicional.

Al Dr. Marcos Villacís Erazo, por toda su predisposición a prestarme ayuda y guía durante la ejecución de mi proyecto de grado.

A mi Directora del Proyecto, Dr. Carla Manciatí Jaramillo, por su apoyo.

A mi Querida Universidad, la Escuela Politécnica Nacional (EPN), por concederme el honor de pertenecer a ella y por el patrocinio económico del cual fui beneficiaria mediante la Oficina de Programas y Servicios Internacionales - OPSI.

Al Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales – CEIGRAM – de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y en especial, a la Dra. Margarita Ruíz Ramos por el tiempo dedicado a mi proyecto y a mi persona, durante la Estancia Internacional de Investigación que realicé en España.

A todos y cada uno de mis docentes, por los conocimientos impartidos y las experiencias compartidas en las aulas, a lo largo de la carrera universitaria.

A mis compañeros y amigos, por haber hecho agradable cada semestre de estudios en la EPN.

Gracias a todos por tanto ♥

DEDICATORIA

A mis Padres.
Lo logré gracias a Ustedes.

Siempre,
Andrea

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.5 GUÍA DEL DOCUMENTO	4
CAPÍTULO 2.....	5
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	5
2.1 RESPUESTA DEL RENDIMIENTO AL AGUA.....	5
2.1.1 DESCRIPCIÓN	5

2.1.2	FACTOR DE RESPUESTA AL RENDIMIENTO (K_y).....	6
2.1.3	RENDIMIENTO MÁXIMO (Y_x).....	7
2.1.4	EVAPOTRANSPIRACIÓN MÁXIMA DEL CULTIVO (ET_x).....	8
2.1.5	EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DEL CULTIVO (ET_a).....	11
2.1.6	RENDIMIENTO REAL (Y_a) Y REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO	12
2.2	RESPUESTA DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS HERBÁCEOS AL AGUA.....	12
2.2.1	MODELO DE SIMULACIÓN AQUACROP	12
2.3	ESTADO DEL ARTE	41
2.3.1	REVISIÓN DE INVESTIGACIONES.....	42
CAPÍTULO 3	48
METODOLOGÍA	48
3.1	CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP	48
3.1.1	DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS PARA LA CALIBRACIÓN.....	48
3.1.2	CULTIVO: MAÍZ DURO.....	55
3.1.3	CICLOS DE SIEMBRA.....	66
3.2	VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP	69
3.2.1	CICLO SECO	69
3.2.2	CICLO HÚMEDO	69
3.3	APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP	70
CAPÍTULO 4	72
RESULTADOS Y ANÁLISIS	72
4.1	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	72
4.1.1	CICLO SECO	72

4.1.2	CICLO HÚMEDO	74
4.2	VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP	75
4.2.1	CICLO SECO	76
4.2.2	CICLO HÚMEDO	87
4.3	APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP	97
4.3.1	CICLO SECO	97
4.3.2	CICLO HÚMEDO	101
4.3.3	COMPARACIÓN ENTRE RENDIMIENTO SIMULADO Y RENDIMIENTO HISTÓRICO	105
4.3.4	EVENTOS EXTREMOS	110
CAPÍTULO 5.....		116
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		116
5.1	CONCLUSIONES.....	116
5.2	TRABAJOS FUTUROS	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		120
ANEXOS.....		¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Funciones lineales de producción del agua para el maíz	7
FIGURA 2.2 Curva generalizada del coeficiente de cultivo (K_c)	11
FIGURA 2.3 Evolución de AquaCROP	15
FIGURA 2.4 Ejemplo del crecimiento del dosel del cultivo de algodón.....	18
FIGURA 2.5 Evolución de la cobertura del dosel en condiciones sin estrés.....	18
FIGURA 2.6 Profundidad de las raíces en función del tiempo.....	19
FIGURA 2.7 Aumento del índice de cosecha a partir de la floración hasta la maduración	22
FIGURA 2.8 Perfil de suelo con 12 compartimentos	23
FIGURA 2.9 Componentes principales y parámetros del continuo suelo- planta-atmósfera	24
FIGURA 2.10 Curva del coeficiente de estrés K_s hídrico en función de varios agotamientos relativos.....	26
FIGURA 2.11 Curva del coeficiente de estrés vs agotamiento del agua en el suelo, exp: expansión del dosel, sto: conductancia estomática y sen: senescencia del dosel.....	27
FIGURA 2.12 Esquema representativo de la respuesta del cultivo ante el estrés hídrico en AquaCROP	28
FIGURA 3.1 Ubicación de la Provincia de Los Ríos	49
FIGURA 3.2 Ubicación de la Provincia del Guayas	52

FIGURA 3.3 Área cosechada a nivel global y rendimiento promedio hasta el 2009	56
FIGURA 3.4 Inflorescencia masculina y femenina del maíz	58
FIGURA 4.1 Ambiente para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos	77
FIGURA 4.2 Simulación para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos.....	78
FIGURA 4.3 Balance de agua en el suelo y clima para ciclo seco de Los Ríos	79
FIGURA 4.4 Irrigación para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos	80
FIGURA 4.5 Producción para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos	81
FIGURA 4.6 Ambiente para ciclo seco de la Provincia del Guayas	82
FIGURA 4.7 Rendimiento del cultivo para ciclo seco de la Provincia del Guayas	83
FIGURA 4.8 Resultados de Clima para ciclo seco de la Provincia del Guayas	84
FIGURA 4.9 Irrigación para ciclo seco de la Provincia del Guayas	85
FIGURA 4.10 Producción para ciclo seco de la Provincia del Guayas	86
FIGURA 4.11 Ambiente para ciclo húmedo de la Provincia del Guayas.....	88
FIGURA 4.12 Simulación para ciclo húmedo de la Provincia del Guayas	89
FIGURA 4.13 Balance de agua en el suelo y clima para ciclo húmedo del Guayas	90
FIGURA 4.14 Producción para ciclo húmedo de la Provincia del Guayas	91

FIGURA 4.15 Ambiente para ciclo húmedo de la Provincia de Los Ríos.....	93
FIGURA 4.16 Rendimiento del cultivo para ciclo húmedo de Los Ríos	94
FIGURA 4.17 Resultados de Clima para ciclo húmedo de la Provincia de Los Ríos.....	95
FIGURA 4.18 Producción para ciclo húmedo de la Provincia de Los Ríos	96
FIGURA 4.19 Rendimiento de cultivo para ciclo seco Los Ríos	99
FIGURA 4.20 Rendimiento de cultivo para ciclo seco Guayas	100
FIGURA 4.21 Rendimiento de cultivo para ciclo húmedo Guayas.....	103
FIGURA 4.22 Rendimiento de cultivo para ciclo húmedo Los Ríos	104
FIGURA 4.23 Comparación de los rendimientos promedio simulado e histórico anual para la provincia de Los Ríos	107
FIGURA 4.24 Comparación de los rendimientos promedio simulado e histórico anual para la provincia del Guayas	109
FIGURA 4.25 Rendimiento para ciclo seco en eventos extremos Los Ríos.....	111
FIGURA 4.26 Rendimiento para ciclo húmedo en eventos extremos Los Ríos.....	111
FIGURA 4.27 Rendimiento para ciclo seco en eventos extremos Guayas	112
FIGURA 4.28 Rendimiento para ciclo húmedo en eventos extremos Guayas	112

FIGURA 4.29 Comparación de rendimiento para ciclo seco durante extremo El Niño..	113
FIGURA 4.30 Comparación de rendimiento para ciclo húmedo durante extremo El Niño..	114

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 Datos de entrada para la simulación del desarrollo del cultivo	31
TABLA 2.2 Presentación de resultados diarios de cada archivo	33
TABLA 2.3 Resumen de varias aplicaciones en AquaCROP	34
TABLA 2.4 Resumen de la información necesaria para la simulación del cultivo en AquaCROP	35
TABLA 2.5 Resumen de la información necesaria para la validación y parametrización de AquaCROP	37
TABLA 2.6 Descripción de la información revisada en revistas y tesis	42
TABLA 2.7 Resumen y resultados de cada investigación revisada	44
TABLA 3.1 Etapas Vegetativa y Reproductiva del cultivo de maíz	60
TABLA 3.2 Requisitos agroecológicos del maíz duro en el Ecuador Continental.....	63
TABLA 3.3 Rendimientos del maíz duro seco para los años 2013 y 2014.....	70
TABLA 3.4 Registro de eventos extremos históricos.....	71
TABLA 4.1 Calibración para el ciclo seco o de verano	73
TABLA 4.2 Calibración para el ciclo húmedo	75
TABLA 4.3 Resumen de valores obtenido en validación del modelo AquaCROP: Provincia de Los Ríos.....	87

TABLA 4.4	Resumen de valores obtenido en validación del modelo AquaCROP: Provincia del Guayas	97
TABLA 4.5	Resultados obtenidos para ciclo seco Los Ríos	98
TABLA 4.6	Resultados obtenidos para ciclo seco Guayas	100
TABLA 4.7	Resultados obtenidos para ciclo húmedo Guayas.....	102
TABLA 4.8	Resultados obtenidos para ciclo húmedo Los Ríos.....	104
TABLA 4.9	Rendimiento promedio vs histórico para Los Ríos	106
TABLA 4.10	Rendimiento promedio vs histórico para Guayas	108

RESUMEN

En el Ecuador, el maíz duro se ha convertido en un importante cultivo para obtener materia base para la subsiguiente elaboración de alimentos balanceados destinadas principalmente a las aves de engorde. Estas, son la principal fuente proteica en el país puesto que su consumo mensual es de unos 30 Kg por persona. Debido a que se busca satisfacer la demanda que presenta este cultivo, es necesario mantener un rendimiento agrícola eficiente. Las variaciones climáticas afectan la producción del maíz duro. Por lo tanto, se busca la manera más confiable de saber cuál es el impacto de estas variaciones sobre el rendimiento. Para esto se utilizan los modelos de simulación de cultivo.

El presente trabajo tiene como objeto la aplicación del modelo AquaCROP para la simulación de rendimiento agrícola de maíz duro en las provincias de Guayas y Los Ríos, pertenecientes a la región Costa del Ecuador. El período de estudio está comprendido entre 1981 y 2005 y se analiza cómo el clima afectó la producción agrícola de este cultivo. La semilla considerada para este análisis es la INIAP DK-7088. Se obtuvieron dos cultivars a partir de la calibración del modelo para cada uno de los ciclos de siembra (seco y húmedo) en base a dos ensayos experimentales. Además, se validaron los cultivars obtenidos en la calibración. La aplicación del modelo se la realizó en los veinticinco años del periodo de estudio. También, se analizaron los resultados simulados de rendimiento durante eventos extremos de lluvia (El Niño).

Se obtuvo que para el ciclo de siembra seco, el índice de cosecha de referencia (Hlo) es del 50% y para el ciclo de siembra húmedo es del 35%. El rendimiento del cultivo se ve afectado por la concentración de CO₂ y por la temperatura atmosférica. Se observó que la temperatura desempeñó un papel esencial para el correcto desarrollo de la planta a lo largo de sus etapas, vegetativa y reproductiva. En el caso del ciclo seco, la tendencia durante eventos de El Niño, es de incremento de producción y para el ciclo húmedo, este presentó decrecimiento.

Palabras clave: AquaCROP, Rendimiento, Cultivo, Maíz, Ecuador, Guayas, Los Ríos

ABSTRACT

In Ecuador, hard corn has become an important crop to obtain base material for the subsequent elaboration of balanced feed destined mainly for fattening birds. These are the main protein source in the country since their monthly consumption is about 30 Kg per person. Because it seeks to satisfy the demand presented by this crop, it is necessary to maintain an efficient agricultural yield. The climatic variations affect the production of hard corn. Therefore, we look for the most reliable way to know what the impact of these variations on performance is. For this, crop simulation models are used.

The present work has as object the application of the AquaCROP model for the simulation of agricultural yield of hard corn in the provinces of Guayas and Los Ríos, belonging to the Costa region of Ecuador. The period of study is comprised between 1981 and 2005 and it is analyzed how the climate affected the agricultural production of this crop. The seed considered for this analysis is the INIAP DK-7088. Two cultivars were obtained from the calibration of the model for each of the sowing cycles (dry and wet) based on two experimental tests. In addition, the cultivars obtained in the calibration were validated. The application of the model was made in the twenty-five years of the study period. Also, simulated performance results during extreme rain events (El Niño) were analyzed.

It was obtained that for the dry sowing cycle, the reference harvest index (H_{lo}) is 50% and for the wet sowing cycle it is 35%. The yield of the crop is affected by the concentration of CO₂ and by the atmospheric temperature. It was observed that the temperature played an essential role for the correct development of the plant throughout its vegetative and reproductive stage. In the case of the dry cycle, the trend during El Niño events is of increased production and for the wet cycle, this decreased.

Key words: AquaCROP, Yield, Crop, Maize, Ecuador, Guayas, Los Ríos

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La incertidumbre en cuanto a fuentes de agua disponibles para riego se ha intensificado debido al cambio climático y esto se refleja en la producción agrícola. Los modelos de simulación fenológica, previamente calibrados y validados, son herramientas modernas que permiten evaluar el comportamiento del cultivo bajo condiciones cambiantes relacionadas al clima y manejo (riego de cualquier tipo y fertilización) con las que se hace frente a dicha incertidumbre (Flores-Gallardo *et al.*, 2013).

El adelanto tecnológico proporcionó al mundo científico la posibilidad de guardar grandes cantidades de datos en computadoras y, que de este modo se puedan ejecutar cálculos numéricos de carácter complejo e iterativo. Esto permitió desarrollar sistemas automáticos de análisis del comportamiento y respuesta biológica de los rendimientos de producción agraria bajo diferentes escenarios y condiciones climáticas adversas. Una probable intensificación en el ciclo hidrológico con cambios en el patrón climático actual, resultado inmediato del cambio climático, requiere del uso reiterado de dichas herramientas de forma que se obtenga una aproximación muy confiable en cuanto a la respuesta del cultivo en condiciones atmosféricas variables (Flores-Gallardo *et al.*, 2013).

Para examinar nuevas opciones con las que se aumente la productividad en la utilización del recurso hídrico, es indispensable comprender cuál es la respuesta del rendimiento del cultivo a cambios en la disponibilidad de agua. Dicha relación entre el rendimiento de cultivo y la productividad del uso de agua es bastante compleja. Los intentos para simplificarla, pero al mismo tiempo hacerla comprensible y que recopile las propiedades básicas de esta relación, son múltiples (Steduto *et al.*, 2012). En el *Estudio de Riego y Drenaje No. 33*, la Organización de

las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1979), abordó el estudio de dicha relación en 1979. En éste se propuso una ecuación simple en la que se vincula a la pérdida relativa del rendimiento de un cultivo cualquiera con la evapotranspiración, tomando en cuenta la influencia que tiene el concepto que describe al factor de respuesta al rendimiento. Dicho factor, refleja el efecto del descenso en la evapotranspiración sobre la disminución del rendimiento. Este factor engloba la complejidad de la relación entre la producción y el uso del agua (Doorenbos & Kassam, 1979; Kaboosi & Kaveh, 2012).

Treinta y cinco años después del planteamiento del modelo de rendimiento de baja complejidad presentado a manera de ecuación propuesta por Doorenbos y Kassam, se han realizado más descubrimientos con respecto a esta interesante relación. Del mismo modo, en lo referente a la planificación y gestión de los recursos hídricos destinados a la agricultura, han surgido nuevas exigencias procedentes del cambio climático.

La FAO en su afán de contar con una herramienta que permita simular rendimientos de cultivo en respuesta al agua desarrolló AquaCROP. Este software, tiene varias aplicaciones en manejo de riego a escala de campo y finca, manejo de campo (fertilización, acolchado de suelo, entre otras), análisis de las propiedades del suelo sobre el rendimiento y el uso del agua; la aplicación más importante es la que tiene relación a la identificación de los efectos meteorológicos y climáticos sobre la producción agrícola y el uso del agua (Steduto *et al.*, 2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la influencia del clima sobre el rendimiento agrícola del maíz duro en la Región Costa del Ecuador aplicando el modelo AquaCROP.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibrar el modelo AquaCROP a partir de los datos de campo disponibles (clima, suelo, cultivo y manejo) de los años 2013 y 2014, en las localidades de mayor producción agrícola del maíz duro en el Ecuador como lo son Guayas y Los Ríos, a fin de que se obtengan los cultivars (variedades

ajustadas a las características obtenidas del campo) para los ciclos de siembra, seco y húmedo.

- Analizar el resultado de las simulaciones del rendimiento agrícola del maíz duro en zonas representativas de la Costa ecuatoriana, de las cuales se logre hallar información suficiente, utilizando los cultivars calibrados para los dos ciclos de siembra, con eventos climáticos del pasado (1981 a 2005), incluyendo los eventos extremos.

1.3 ALCANCE

El presente análisis evalúa la influencia de la variación climática en el período 1981-2005, sobre el rendimiento agrícola de la semilla híbrida INIAP DK-7088 de maíz duro, en las provincias de Guayas y Los Ríos, utilizando el modelo de simulación de cultivo AquaCROP. Se consideraron los dos ciclos de siembra, el seco o de verano y el húmedo o de invierno. Se analizan además los resultados de rendimiento obtenidos para los eventos considerados como extremos dentro del período de estudio.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo tiene base en el Proyecto de Investigación Semilla PIS-16-11 de la Escuela Politécnica Nacional. El objetivo de dicho proyecto es cuantificar los efectos de las variaciones del clima en la producción de maíz en Ecuador. Para cumplir tal objetivo, se deben utilizar series temporales de variables atmosféricas de interés como, por ejemplo, la temperatura máxima y la precipitación diaria, entre otras. Estas series, son también la base para llevar a cabo las simulaciones de rendimiento en AquaCROP. Con los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo, se logrará observar, cuantificar y analizar como incide la variabilidad climática sobre la producción agrícola del maíz duro en las zonas de estudio elegidas. Hay que destacar que con AquaCROP se puede aislar el efecto de la variabilidad climática sobre el rendimiento del cultivo.

1.5 GUÍA DEL DOCUMENTO

En el Capítulo 1, se presentan los antecedentes, objetivos, alcance y justificación para el análisis de influencia del clima sobre el rendimiento de maíz duro, utilizando AquaCROP.

El Capítulo 2 contiene la base teórica sobre la cual FAO desarrolló AquaCROP, programa utilizado para realizar el presente análisis. Del mismo modo, se presenta todo lo referente al estado del arte respecto al tema sobre el cual se investigó.

La metodología que se utilizó, tanto para la calibración como para la validación y para las simulaciones del modelo AquaCROP llevadas a cabo en este trabajo de titulación, se encuentra estipulada en el Capítulo 3.

En cuanto a la presentación de los resultados del análisis realizado, se diseñó el Capítulo 4. En este constan los cultivars calibrados y respectivamente validados, para los dos ciclos de siembra y del mismo modo, se tienen los valores de rendimiento de cultivo utilizando los 25 años de las series de datos climáticos (incluyendo también los eventos ENSO).

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones a partir de la aplicación del modelo AquaCROP y los trabajos futuros que pueden ser llevados a cabo a partir de este trabajo.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 RESPUESTA DEL RENDIMIENTO AL AGUA

2.1.1 DESCRIPCIÓN

Para estudiar la relación que existe entre el rendimiento del cultivo y el uso del agua, se planteó una expresión que describe la relación de la disminución relativa del rendimiento con la disminución relativa de la evapotranspiración (ET) (Steduto *et al.*, 2009). Es decir, el enfoque central de lo antes mencionado se basa en la siguiente ecuación (Doorenbos & Kassam, 1979):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \cdot \left(\frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad (2.1)$$

Donde:

Y_x = Rendimiento máximo, en [ton/ha] ó en [kg/ha]

Y_a = Rendimiento real, en [ton/ha] ó en [kg/ha]

ET_x = Evapotranspiración máxima, en [mm/día]

ET_a = Evapotranspiración real, en [mm/día]

K_y = Factor de respuesta del rendimiento, adimensional

La ecuación (2.1) permite observar y calcular la disminución relativa del rendimiento en base a la disminución relativa de la evapotranspiración, es decir es una función de productividad, aplicable a la mayoría de cultivos agrícolas, como son: herbáceos, arbóreos y vides (cultivos leñosos como olivos, almendros y frutales) (Steduto *et al.*, 2012).

2.1.2 FACTOR DE RESPUESTA AL RENDIMIENTO (K_y)

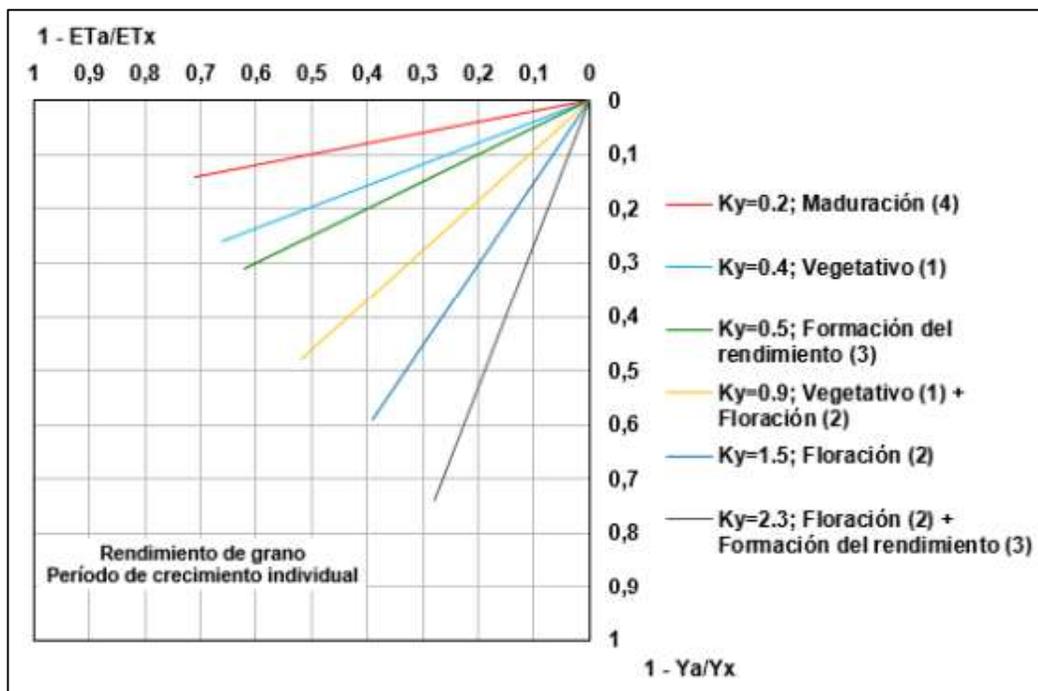
Es un factor que constituye la respuesta al efecto producido debido a la disminución de la evapotranspiración sobre el rendimiento y sus pérdidas (Toro-Trujillo *et al.*, 2016). Además, la parte fundamental de este factor va dirigido a permitir el estudio de relaciones complejas que se dan entre dos aspectos, que son: la producción del cultivo y el uso del agua (Kaboosi & Kaveh, 2012) durante los diferentes procesos químicos, físicos y biológicos. Cabe destacar que la relación del factor de respuesta al rendimiento (K_y), se ha convertido en un descubrimiento válido para lograr cuantificar los efectos debido a la falta de suministro de agua que afectan directamente al rendimiento (Steduto *et al.*, 2012).

De acuerdo con Steduto *et al.* (2012) se presentan distintos valores de K_y ya definidos para cada tipo de cultivo, la diferencia radica principalmente según los períodos y etapas de crecimiento que provocan diversas respuestas del cultivo, como se indica a continuación:

- $K_y > 1$: Altamente sensible al déficit hídrico, mayor disminución del rendimiento que la disminución del suministro del agua como consecuencia del estrés.
- $K_y < 1$: Más pasividad al déficit hídrico y recuperación parcial del estrés.
- $K_y = 1$: Disminución del rendimiento es directamente proporcional a la disminución del uso del agua.

En varias investigaciones en las cuales se aborda el problema del déficit de agua en el riego, fue posible obtener funciones de respuesta para la mayor parte de los cultivos cuando la falta de agua tiene relevancia. En el caso del maíz (Ver FIGURA 2.1), su rendimiento dependerá de la etapa en la cual se originará el estrés hídrico. Por ejemplo, las etapas de floración y formación son sensibles al estrés, mientras que, las fases de la maduración y de vegetación no tienen mucha afectación ante el estrés; la importancia se afianza más en la recuperación del cultivo en las etapas siguientes (Steduto *et al.*, 2012).

FIGURA 2.1 Funciones lineales de producción del agua para el maíz



FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

2.1.3 RENDIMIENTO MÁXIMO (Y_x)

Estimar el rendimiento máximo es muy importante ya que servirá para determinar el potencial de producción de los cultivos tomando en cuenta problemas ambientales o de manejo que puedan suscitarse (Ortiz Solorio *et al.*, 2005). Para los principales mecanismos de evaluación del presente rendimiento, se requieren datos locales de rendimientos máximos de cultivos o por medio del cálculo de la máxima biomasa con el respectivo índice de cosecha. Para poder llevar a cabo la estimación del rendimiento máximo (Y_x) se aclaran dos procedimientos de interés, que son (Steduto *et al.*, 2012):

2.1.3.1 Procedimiento de Wageningen

Este método es útil para la estimación del rendimiento máximo experimental (Y_{me}) de cuatro cultivos: Alfalfa, Maíz, Sorgo y Trigo. Fue propuesto por el IILRI (International Institute for Land Reclamation and Improvement) de Wageningen, Holanda. Se basa en la determinación de la materia seca, y ésta, corregida por el

cultivo, la temperatura y el clima de la zona durante el periodo vegetativo (Ortiz Solorio *et al.*, 2005).

2.1.3.2 Enfoque de zona ecológica

Se utiliza para estimar el rendimiento máximo potencial (Y_{mp}), para lo cual se supone que (Ortiz Solorio *et al.*, 2005):

- a) Se satisfacen las necesidades climáticas del cultivo.
- b) Este rendimiento potencial no es limitado por el agua, los nutrientes, la salinidad, las plagas ni las enfermedades.

2.1.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN MÁXIMA DEL CULTIVO (ET_x)

En base a la información que proporciona la FAO acerca de la necesidad de agua en varios cultivos se establece que para la obtención de ET_x se debe multiplicar el término de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c), como se expresa en la siguiente ecuación (Steduto *et al.*, 2012):

$$ET_x = K_c \cdot ET_o \quad (2.2)$$

Donde:

ET_x = Evapotranspiración máxima del cultivo, en [mm/día]

K_c = Coeficiente de cultivo, adimensional

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, en [mm/día]

A partir de los datos requeridos que se especifican en la ecuación anterior se presume la no existencia de limitaciones, como: estrés hídrico o salino, densidad del cultivo, enfermedades, etc., para el cálculo respectivo de la evapotranspiración (SIMARBC, 2006).

2.1.4.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

De acuerdo al estudio realizado por Allen *et al.* (2006) para poder calcular el término ET_o de la Ecuación (2.2), existe una variedad de procedimientos que se basan en la ecuación de Penman-Monteith de la FAO, la misma que ha servido como un

método para precisar el valor de la evapotranspiración del cultivo que se toma como base utilizando datos meteorológicos.

La ecuación de Penman-Monteith presenta características que se derivan de parámetros como la resistencia aerodinámica y la del cultivo (Allen *et al.*, 2006), es decir:

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (2.3)$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, en [mm/día]

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo, en [MJ/(m² · día)]

G = Flujo del calor de suelo, en [MJ/(m² · día)]

T = Temperatura media del aire a 2 [m] de altura, en [°C]

u_2 = Velocidad del viento a 2 [m] de altura, en [m/s]

e_s = Presión del vapor de saturación, en [kPa]

e_a = Presión real de vapor, en [kPa]

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor, en [kPa/°C]

γ = Constante psicrométrica, en [kPa/°C]

Sin embargo, para el presente proyecto de investigación el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se enfoca en aplicar la fórmula simplificada de Hargreaves, en el cual se requieren únicamente datos de temperatura y de radiación solar (Hargreaves & Samani, 1985). La incidencia de la radiación solar se estudia partiendo de la radiación solar extraterrestre, la misma que se identifica como aquella que alcanza la parte exterior del suelo si no existiera la atmósfera, además, esta variable se lee por medio de tablas según la latitud del sitio y del mes (Sánchez, 2001) (ver ANEXO 1). La expresión se describe de la siguiente manera:

$$ET_o = 0,0023 \cdot (t_{med} + 17,78) \cdot R_o \cdot (t_{max} - t_{min})^{0,5} \quad (2.4)$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, en [mm/día]

R_o = Radiación solar extraterrestre, en [mm/día] (tabulada)

t_{med} = Temperatura media diaria, en [°C]

t_{max} = Temperatura diaria máxima, en [°C]

t_{min} = Temperatura diaria mínima, en [°C]

2.1.4.2 Coeficiente de cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo representa un parámetro de importancia debido a las variaciones que se producen en las distintas fases o etapas fenológicas propias del cultivo, desde la siembra hasta la cosecha (SIMARBC, 2006). Sin embargo, K_c presenta muy poca variación cuando está influenciado por el clima (Allen *et al.*, 2006).

El coeficiente en tratamiento (K_c) está asociado a las particularidades que se detallan del cultivo de referencia que constituye al “*pasto*”, se supone que este cultivo presenta un aspecto uniforme y que cubre totalmente la superficie del suelo. Por esta razón, para los demás cultivos habrá divergencias en los valores de K_c porque las características de cada uno son intrínsecas, como la fase de crecimiento o la afectación que se produce en el suelo a causa de la evaporación del mismo (Allen *et al.*, 2006).

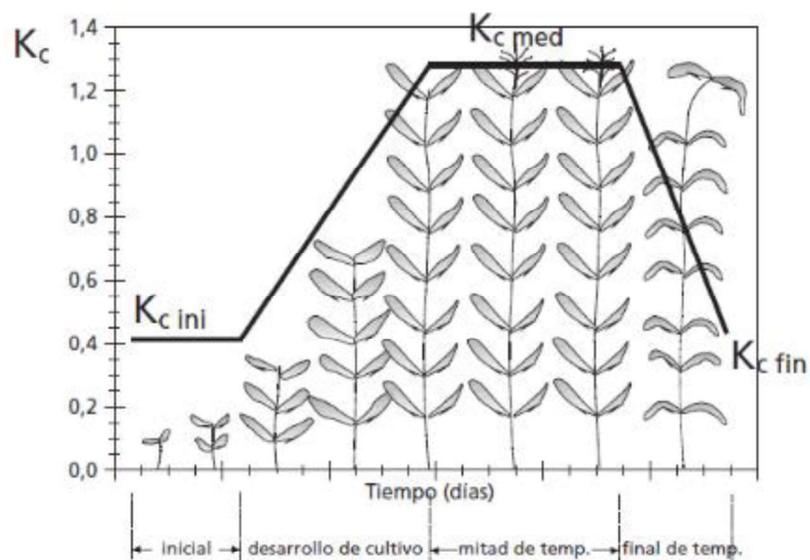
A continuación, se nombran las principales características de los cultivos que causan variación en el coeficiente de cultivo (Allen *et al.*, 2006):

- *Tipo de cultivo*: Diferencias en albedo, altura del cultivo, hojas de las plantas, propiedades aerodinámicas, etc.
- *Clima*: Condiciones climáticas que afectan a la humedad relativa y a la velocidad del viento, así como, la altura del cultivo.

- *Evaporación del suelo:* Se hace referencia a aquellos cultivos que cubren parcial o completamente el suelo ya que de ello depende que la transpiración del suelo pueda ser considerable o pequeña, según las condiciones que se presenten.
- *Etapas de crecimiento del cultivo:* Debido al área de cobertura en el suelo por las plantas, la altura del cultivo y el área foliar.

En la FIGURA 2.2 se puede observar los cambios que se generan en las distintas etapas de un cultivo que afectan directamente al coeficiente de cultivo (K_c).

FIGURA 2.2 Curva generalizada del coeficiente de cultivo (K_c)



FUENTE: Allen *et al.*, 2006

2.1.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DEL CULTIVO (ET_A)

Debido a la dificultad de estimar el valor de la evapotranspiración real del cultivo (ET_a), se establecieron tablas utilizando datos sobre tasas de evapotranspiración, la disponibilidad de agua en el suelo y la humedad (Doorenbos & Kassam, 1979). Pero surgieron nuevos métodos y más precisos para la determinación de ET_a , en donde se toma en cuenta datos diarios de balance de agua con el objetivo de definir el nivel de agua en el suelo, en base a las siguientes aclaraciones (Steduto *et al.*, 2012):

- Si el agua puede ser extraída con facilidad del suelo, entonces: $ET_a = ET_x$.
- Si el nivel de agua es crítico en el suelo, una vez que se analiza la humedad en el suelo y existe descenso de la transpiración, entonces $ET_a < ET_x$.
- Si la cantidad de humedad presente en el suelo alcanza el punto de marchitez permanente, entonces $ET_a = 0$.

En función de la información que caracteriza a cada tipo de suelo, así como, las peculiaridades del cultivo y de la tasa de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), se podrá establecer el contenido de humedad en el suelo y el punto de marchitez permanente porque de acuerdo a estos parámetros se originará un aumento o disminución de la ET_a (Steduto *et al.*, 2012).

2.1.6 RENDIMIENTO REAL (Y_a) Y REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO DEL CULTIVO

Steduto *et al.* (2012) sugiere que una vez concretados los términos de la ecuación (2.1) referentes al rendimiento máximo (Y_x), a la evapotranspiración máxima y real del cultivo (ET_x y ET_a , respectivamente), se puede despejar de dicha ecuación el término Y_a para su posterior cálculo.

En cuanto a la reducción del rendimiento del cultivo, los mismos autores antes citados recomiendan que debe expresarse en términos relativos, ya sea en fracción o de forma porcentual, a partir de la siguiente expresión:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) \text{ en } \% \quad (2.5)$$

Donde:

Y_a, Y_x = Rendimiento real y rendimiento máximo, respectivamente. Se miden en [ton/ha] ó en [kg/ha]

2.2 RESPUESTA DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS HERBÁCEOS AL AGUA

2.2.1 MODELO DE SIMULACIÓN AQUACROP

En la actualidad la evidente escasez de agua que está en continuo aumento, la baja calidad de agua, conjuntamente con el problema del cambio climático y la propuesta

de que el uso del agua se maneje de forma óptima y sea productiva, representan las principales características de gran interés para solventar la demanda de alimentos de los cultivos (Steduto *et al.*, 2012). Entonces, para poder solucionar estos problemas fue necesario desarrollar modelos de simulación de cultivos, sin embargo, las principales limitaciones de estos modelos surgieron por la cantidad de variables y datos de entrada que se requerían (Vanuytrecht *et al.*, 2014). Por consiguiente, para debilitar estos obstáculos la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) desarrolló un modelo de productividad del agua de los cultivos denominado AquaCROP (FAO, 2017) con el propósito de crear un modelo multicultivo que sea simple, preciso y seguro en los análisis, requiriendo una adecuada cantidad de datos en base a conocimientos acerca de complejos procesos biofísicos del cultivo para, así, lograr una simulación cercana a la realidad (Vanuytrecht *et al.*, 2014).

2.2.1.1 Conceptos, fundamentos y funciones

La producción de la biomasa y el suministro de agua que se consume por medio de la transpiración, son dos conceptos que están directamente relacionados cuando la radiación solar es interceptada, dando lugar a una fuerza que provoca dicha transpiración, además, de la fotosíntesis del cultivo. La disminución de la biomasa está ligado al estrés hídrico y a la reducción de la transpiración, traduciéndose a la disminución del rendimiento (Steduto *et al.*, 2012). Por esta razón, en el *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 33* (Doorenbos & Kassam, 1979), se estableció que al existir una reducción de la evapotranspiración, entonces, habrá un descenso del rendimiento pero de una manera proporcional.

AquaCROP constituye un modelo que se desarrolló a partir de lo planteado en la ecuación (2.1), donde se trata de separar la evaporación del suelo (parte no productiva) con la transpiración del cultivo (parte productiva) y evaluar la obtención de la biomasa a través de la transpiración real del cultivo que se analiza a partir de la medida de la producción del agua, principalmente (Steduto *et al.*, 2012).

El modelo AquaCROP se fundamenta en las siguientes ecuaciones que se muestran a continuación:

- *Producción de biomasa:*

$$B = WP \cdot \sum Tr \quad (2.6)$$

Donde:

B = Biomasa acumulada producida, en [ton/ha] ó en [kg/m²]

Tr = Transpiración del cultivo, en [mm] ó en [m³/m²]

WP = Parámetro de productividad del agua, en [kg/m³]

- *Rendimiento:*

$$Y = HI \cdot B \quad (2.7)$$

Donde:

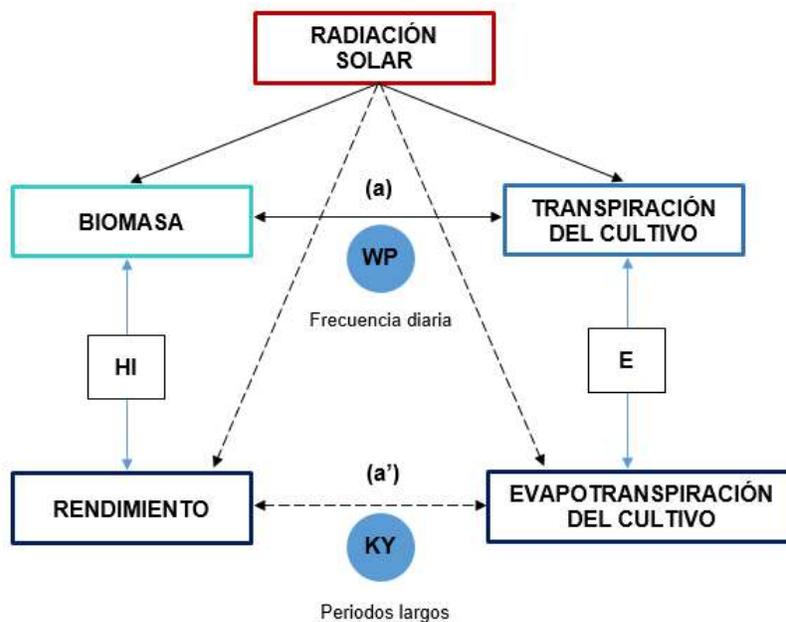
Y = Rendimiento final, en [ton/ha] ó [kg/ha]

HI = Índice de cosecha, en [%] ó en [fracción]

B = Biomasa acumulada producida, en [kg/m²]

Como se puede ver en la ecuación (2.7), el rendimiento es directamente proporcional a la biomasa, es decir, corresponde a un parámetro cosechable de la producción total de la biomasa sobre el suelo (Zwart & Bastiaanssen, 2004).

Las simulaciones a escala diaria fueron viables gracias al continuo estudio sobre las respuestas que se dan en las plantas debido al estrés hídrico en períodos de tiempo cortos (segundos u horas) y al continuo mejoramiento de los mecanismos de cálculo para medir la humedad del suelo diariamente (Steduto *et al.*, 2009).

FIGURA 2.3 Evolución de AquaCROP

FUENTE: Flores-Gallardo *et al.*, 2013

Elaborado por: Andrea Abarca

2.2.1.2 Estructura y componentes del modelo AquaCROP

AquaCROP se considera como un modelo de tipo dinámico en el cual permite la simulación del rendimiento de los diferentes cultivos herbáceos, pero siempre dependiente del suministro del agua (Steduto *et al.*, 2009). Adicionalmente, este modelo utiliza cuatro componentes que a continuación se especifican (FAO, 2017):

1. Clima
2. Cultivo
3. Características del suelo
4. Manejo

Para el presente proyecto de investigación se hará mayor relevancia a los tres primeros componentes ya que para el componente de manejo no existen muchos datos. Las simulaciones pueden ser realizadas tomando en cuenta una variedad de climas y condiciones de manejo, incluyendo el cambio climático. No obstante, el

modelo AquaCROP no se enfoca en el análisis de plagas y enfermedades (Steduto *et al.*, 2009).

2.2.1.2.1 *Clima*

La temperatura máxima (T_x) y la temperatura mínima (T_n) del aire, la precipitación y la evaporación del ambiente atmosférico (Olivera *et al.*, 2016), la misma que puede ser evaluada aplicando la ecuación (2.3), se identifican como las cuatro opciones meteorológicas diarias que se ubican dentro del análisis del clima (Allen *et al.*, 2006). Aparte de estas variables, también se necesita de la concentración media anual de CO_2 (dióxido de carbono) (Flores-Gallardo *et al.*, 2013), que dentro del modelo y a modo de simplificación, ya viene incorporado con valores preestablecidos que provienen de la estación de Mauna Loa, Hawai desde 1902 hasta el último año en que se pueda medir (Steduto *et al.*, 2009).

2.2.1.2.2 *Cultivo*

Una vez que se alcanza la etapa de emergencia del cultivo en cuestión, empieza el crecimiento y su progresivo desarrollo hasta el punto en que el dosel empieza a formarse, al igual que las raíces de la planta comienzan a profundizar (Steduto *et al.*, 2012).

Según el *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66* menciona que el componente del cultivo contiene subcomponentes, que se detallan como sigue:

Fenología: En el modelo AquaCROP se debe precisar para cada cultivo sus respectivas etapas de desarrollo y duración. Es así que, las etapas más relevantes que intervienen en el crecimiento del cultivo son: emergencia, inicio de floración, inicio de senescencia del dosel y maduración; todas estas se aplican para todos los cultivos herbáceos excepto para los cultivos forrajeros (Steduto *et al.*, 2012).

Desarrollo del dosel: En lo que concierne a la cobertura del dosel verde (CC) es que representa un subcomponente primordial dentro de la simulación, puesto que su expansión, envejecimiento, senescencia, así como la conductancia, permitirán obtener la cantidad de agua que se transpira y de esta manera la biomasa generada. Por otra parte, una de las ventajas de expresar el desarrollo del dosel en fracción o en porcentaje se debe a que se pueden utilizar valores reales, incluso si

estos valores solo son medidos visualmente (Steduto *et al.*, 2012). La curva que describe el incremento del dosel se define a partir de dos ecuaciones exponenciales que se indican a continuación y de manera gráfica se esquematiza en la La ecuación (2.9) o de descomposición, denota el decrecimiento del dosel desde el inicio de la madurez hasta la senescencia . Saber el inicio de la senescencia (cuando las hojas han empezado tornarse de color amarillo) es importante puesto que una vez iniciada esta etapa del cultivo, disminuye la transpiración y la fotosíntesis así como la acumulación de biomasa.

FIGURA 2.4. La primera ecuación se muestra a continuación:

$$CC = CC_o \cdot e^{CGC \cdot t} \quad (2.8)$$

Donde:

CC = Cobertura del dosel, en [%] ó en [fracción]

CC_o = Cobertura del dosel cuando $t = 0$, en [%] ó en [fracción]

CGC = Coeficiente de crecimiento del dosel, en [%/día] ó [fracción/día]

t = Tiempo, en [días]

La ecuación (2.8) corresponde al primer incremento del dosel en la curva de desarrollo. Con esta función, el modelo considera la densidad de plantación en el desarrollo del dosel. El concepto implícito de esta ecuación es que el desarrollo del dosel verde es proporcional al tamaño diario de éste. De esta manera, cuando la cobertura de dosel es limitada, se ve afectado el proceso de captación de radiación y de realización de fotosíntesis. Conforme la planta se va desarrollando, los procesos anteriormente citados, disminuyen debido a la sombra que se genera entre plantas. Por lo que la ecuación (2.8) deja de ser válida y es necesario otra que exprese el comportamiento del dosel (Bradford & Hsiao, 1982). Esta ecuación es:

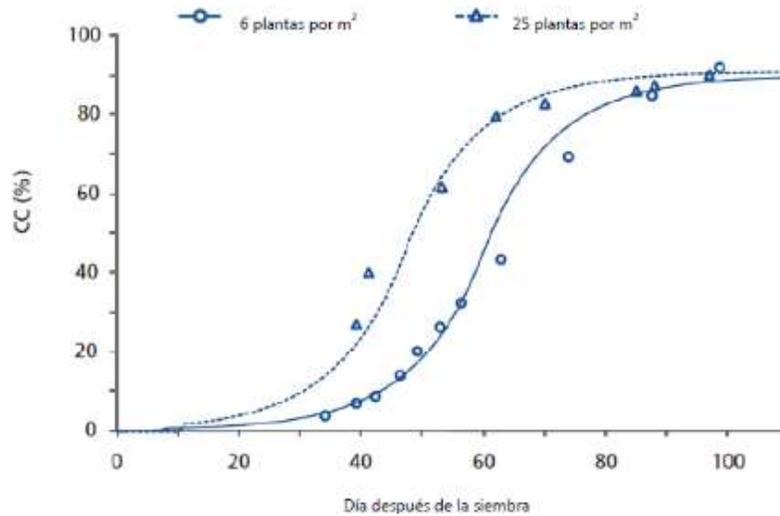
$$CC = CC_x - 0,25 \cdot (CC_x^2 / CC_o) \cdot e^{-CGC \cdot t} \quad (2.9)$$

Donde:

CC_x = Cobertura máxima del dosel, en [%] ó en [fracción]

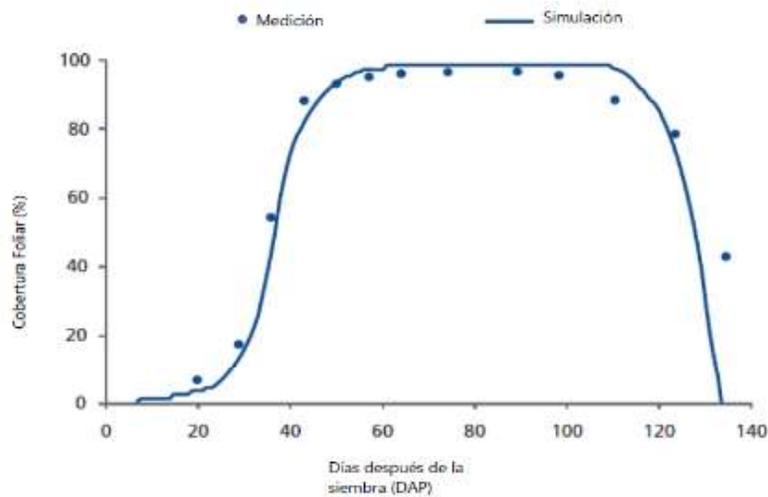
La ecuación (2.9) o de descomposición, denota el decrecimiento del dosel desde el inicio de la madurez hasta la senescencia (Bradford & Hsiao, 1982). Saber el inicio de la senescencia (cuando las hojas han empezado tornarse de color amarillo) es importante puesto que una vez iniciada esta etapa del cultivo, disminuye la transpiración y la fotosíntesis así como la acumulación de biomasa.

FIGURA 2.4 Ejemplo del crecimiento del dosel del cultivo de algodón



FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

FIGURA 2.5 Evolución de la cobertura del dosel en condiciones sin estrés

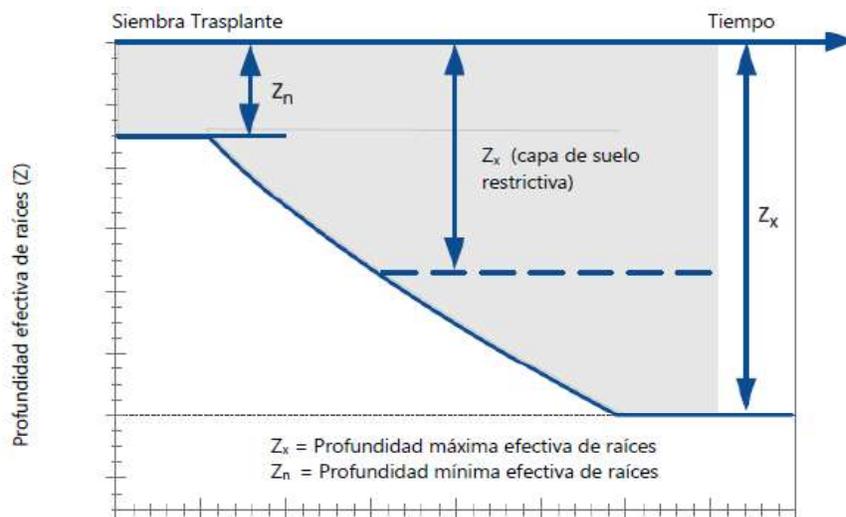


FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

En la FIGURA 2.5, en cambio, se muestra como varía la cobertura del dosel verde (CC) si se toma en cuenta un ciclo completo de un cultivo cualquiera en ambientes libres de estrés.

Profundización de las raíces: La absorción del agua puede ser simulado en el modelo computacional por medio de la profundidad efectiva de la raíz (Z_e). En AquaCROP puede usarse valores mínimos de profundidad que oscilan entre los 0.2 a 0.3 [m], pero éstos valores cambian de acuerdo a una función exponencial ya que las raíces comienzan a profundizarse en el suelo a mayor velocidad después de la siembra.

FIGURA 2.6 Profundidad de las raíces en función del tiempo



FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

Transpiración del cultivo: En el caso de que haya constancia de un ajuste de micro-advección entre hileras y que el efecto de resguardo de la cobertura sea incompleta, se puede afirmar que la transpiración (T_r) es proporcional a la cobertura del dosel (CC) (Adams *et al.*, 1976)..

En AquaCROP, el cálculo de la transpiración consiste en la aplicación de una ecuación empírica (Raes *et al.*, 2009), así:

$$Tr = K_{c,Tr} \cdot ET_o \quad (2.10)$$

Donde:

T_r = Transpiración del cultivo, en $[mm]$ ó en $[m^3/m^2]$

$K_{c,Tr}$ = Coeficiente de transpiración del cultivo, adimensional

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, en $[mm/día]$

La expresión que permite calcular el coeficiente de transpiración del cultivo causa que la transpiración sea directamente proporcional al coeficiente CC^* , según se muestra a continuación:

$$K_{c,Tr} = CC^* \cdot K_{c,Trx} \quad (2.11)$$

Donde:

$K_{c,Tr}$ = Coeficiente de transpiración del cultivo, adimensional

$K_{c,Trx}$ = Coeficiente de transpiración del cultivo cuando el dosel está casi completo aproximándose a un valor de CC cercano a 1, adimensional

CC^* = Cobertura del dosel verde (micro-advección), en $[\%]$ ó en $[fracción]$

El reto más importante para modelar en AquaCROP la transpiración del cultivo, consiste en determinar el valor de la cobertura del dosel (CC), la apertura de las estomas e inclusive qué sucede con la evaporación que se demanda de la atmósfera (Steduto *et al.*, 2009).

Evaporación del suelo: Se conoce que la evaporación se origina desde el suelo húmedo que no está protegido por el dosel, por lo tanto, AquaCROP calcula este componente mediante la separación de la evaporación del suelo (E), siempre que el suelo esté sin sombra, y la transpiración (T_r) (Steduto *et al.*, 2012).

Producción de biomasa: A partir de la ecuación (2.6) surgió la importancia de obtener la productividad de la biomasa (WP), en donde se ha demostrado que tiene un comportamiento relativamente constante a pesar de requerir demandas evaporativas disímiles (de Wit, 1958). Por otro lado, la normalización de la productividad de biomasa (WP^*) se simula en AquaCROP a través de la evaporación atmosférica (ET_o) y la concentración de CO_2 presente en el ambiente

(Steduto *et al.*, 2012). También, se logró establecer que WP^* es aproximadamente constante para cualquier cultivo, siempre y cuando, no exista limitación en la demanda de nutrientes minerales. La ecuación que facilita el cálculo de la productividad de biomasa normalizada es de la siguiente manera (Steduto *et al.*, 2009):

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \left(\frac{Tr}{ET_o} \right)} \right]_{[CO_2]} \quad (2.12)$$

Donde:

WP^* = Productividad de biomasa normalizada, en $[ton/ha]$ ó en $[kg/m^2]$

B = Biomasa acumulada producida, en $[ton/ha]$ ó en $[kg/m^2]$

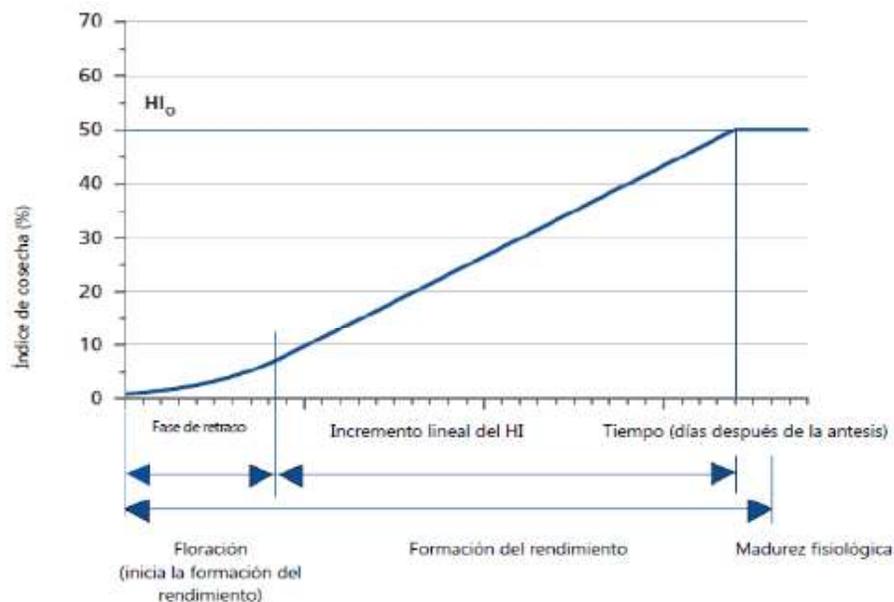
Tr = Transpiración del cultivo, en $[mm]$ ó en $[m^3/m^2]$

ET_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia, en $[mm/día]$

De acuerdo a Steduto *et al.* (2009), para “*muchas especies de cultivos la productividad de la biomasa aumenta ligeramente a medida que aumentan las concentraciones de CO_2 en el aire*” (p. 3).

Rendimiento cosechable: El rendimiento (Y) que se obtiene de una parte de la producción de la biomasa, debe ser modelado por medio del índice de cosecha (HI), índice que se presenta en la etapa de maduración. Cabe indicar que este índice se simula de tal manera que en la fase de floración debe iniciar desde cero, luego comienza un ascenso con cierto retraso hasta que alcanza cierta velocidad en función del tiempo y, finalmente, se halla en la fase de estabilización que constituye la etapa final (Steduto *et al.*, 2012).

FIGURA 2.7 Aumento del índice de cosecha a partir de la floración hasta la maduración



FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

En conclusión, el índice de cosecha se simula de manera lineal que aumenta con el tiempo, después de un leve incremento en la fase inicial hasta llegar a la etapa de maduración fisiológica (Moot *et al.*, 1996).

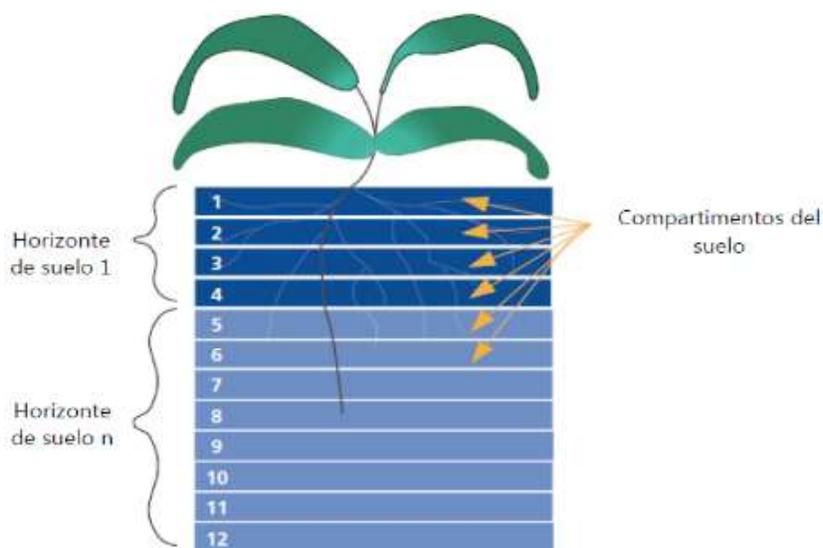
2.2.1.2.3 Suelo

El balance hídrico del suelo simboliza un aspecto crítico dentro de la modelación, debido a la relación que tiene con la producción de la biomasa y la transpiración (Vanuytrecht *et al.*, 2014). En AquaCROP, el suelo se describe como un perfil estratificado y una capa de agua freática, si fuese el caso y esta última hubiere (Steduto *et al.*, 2012). El sistema radicular tiene la función de conservar el agua proveniente de los flujos de agua entrantes (lluvia, irrigación y capilaridad) y los salientes (escurrimiento, evaporación, transpiración y percolación profunda), por lo cual, el modelo AquaCROP divide al suelo en compartimentos (Vanuytrecht *et al.*, 2014), que generalmente son cinco compartimentos con sus respectivas características físicas, para poder representar la acción del agua en el suelo (Steduto *et al.*, 2012).

Las principales características del suelo que se ajustan en el modelo AquaCROP son: contenido de humedad (TAW), capacidad de campo (FC), límite inferior de contenido de agua hasta el punto de marchitez permanente del cultivo (PWP) y conductividad hidráulica en el punto de saturación (K_{sat}) (Raes *et al.*, 2009).

En lo que respecta al programa AquaCROP, es que éste divide al suelo en doce horizontes con cierto espesor (Δz) y ejecuta fracciones de tiempo diarios, cada compartimento posee sus propias características hidráulicas (Steduto *et al.*, 2012; Vanuytrecht *et al.*, 2014), como se puede ver en la FIGURA 2.8.

FIGURA 2.8 Perfil de suelo con 12 compartimentos



FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

2.2.1.2.4 Manejo

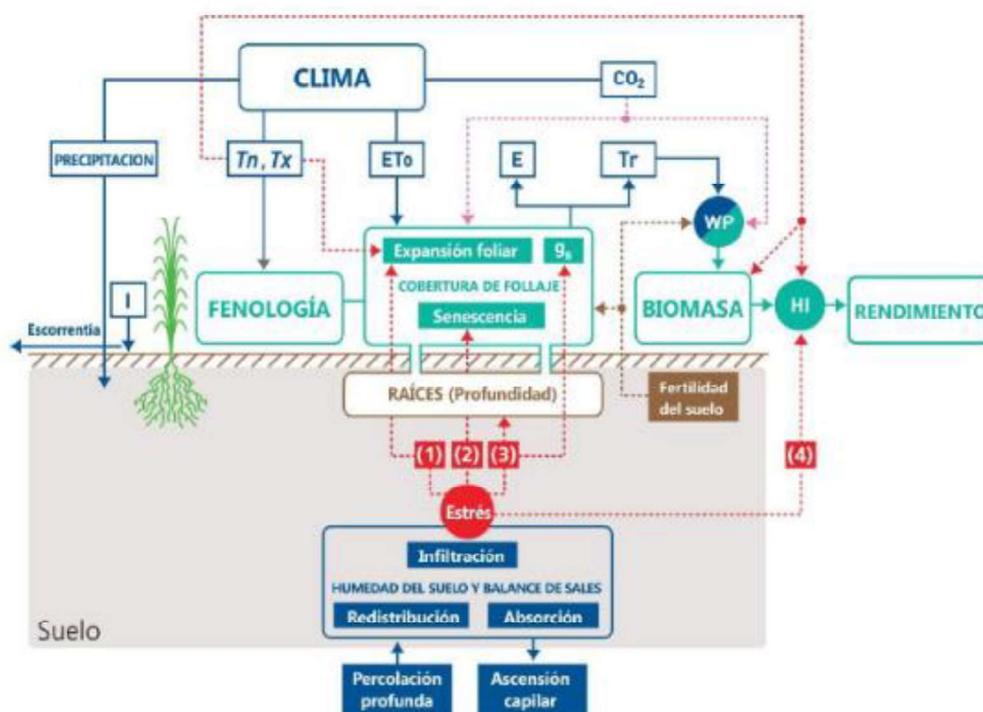
El componente de manejo que utiliza AquaCROP se divide en dos tipos, que son: el manejo de campo y el manejo de riego, sin embargo, debido a su limitada información no es relevante para su consideración en el presente proyecto.

2.2.1.3 Respuesta del cultivo frente a estrés

Los estreses abióticos ambientales pueden provocar efectos negativos en ciertos procesos como el crecimiento del dosel, la producción de biomasa y el rendimiento cosechable (Steduto *et al.*, 2012).

La ventaja que tiene el modelo computacional AquaCROP, se enfoca precisamente en configurar estos impactos permitiendo que el análisis no sea tan complejo (Steduto *et al.*, 2012). En el esquema que se muestra en la FIGURA 2.9 se puede visualizar los más esenciales elementos que usa AquaCROP con la finalidad de obtener modelos eficaces.

FIGURA 2.9 Componentes principales y parámetros del continuo suelo-planta-atmósfera



FUENTE: Steduto *et al.*, 2009

Por medio de coeficientes de estrés (Ks) resulta ser viable la simulación del efecto generado por cualquier estrés ambiental, es decir, el coeficiente Ks "es un

modificador de su parámetro en el modelo objetivo, y varía de uno (sin estrés) a cero (estrés completo)" (Vanuytrecht et al., 2014).

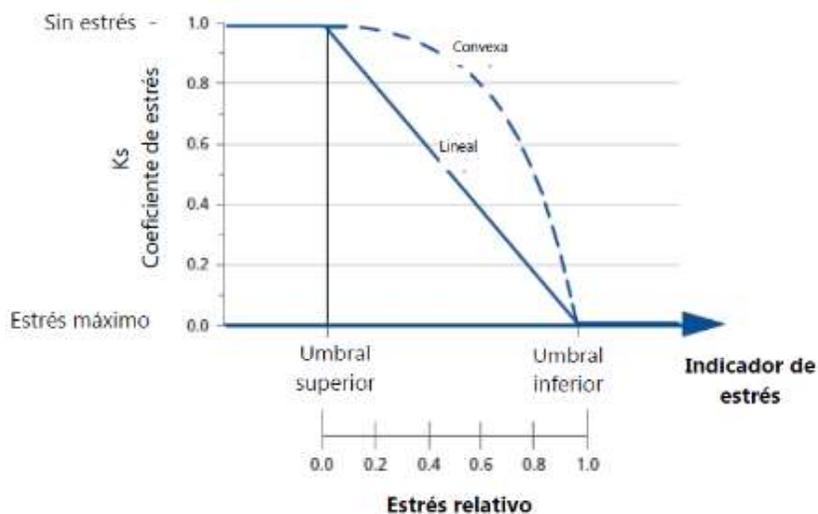
2.2.1.3.1 Estrés hídrico

El estrés hídrico consiste, básicamente, en que al existir escases de agua, así como, de irrigación y además, el agua que se encuentra reservada en las raíces, ya fue consumida, entonces, se inicia la afectación en los procesos de desarrollo del cultivo (Delgado, 2017). En consecuencia, entre los procesos por falta de suministro de agua que se ven más perjudicados son: desarrollo del dosel, conductancia estomática, senescencia del dosel, profundización del sistema radicular y el índice de cosecha (Steduto *et al.*, 2009).

El coeficiente de estrés hídrico (K_s) se puntualiza como un indicador dependiente del contenido de agua en la zona de las raíces, que se expresa como el agotamiento fraccionario (p) de la totalidad de agua aprovechable en el suelo (TAW), y sus valores comprenden un rango entre los umbrales superior e inferior del contenido de agua del suelo específico para cada planta (Steduto *et al.*, 2009).

La relación entre K_s y p se considera, generalmente, como no lineal a causa de la falta de aclimatación y adaptación al factor estrés, y debido a que el potencial de la matriz es no lineal si obedece al contenido volumétrico del agua en el suelo (Steduto *et al.*, 2009).

FIGURA 2.10 Curva del coeficiente de estrés K_s hídrico en función de varios agotamientos relativos

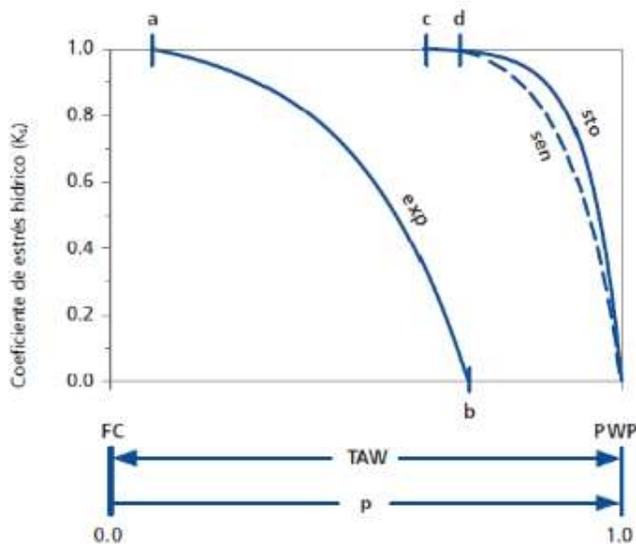


FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

En el anterior esquema (ver FIGURA 2.10) se puede observar la variación del coeficiente de estrés hídrico a medida que aumenta el agotamiento del agua en el suelo desde un umbral superior ($p = 0$) a un umbral inferior ($p = 1$).

En cuanto a la dinámica del coeficiente de estrés hídrico (K_s) en función del factor de agotamiento del agua en el suelo (p), considerando el componente referente al desarrollo del dosel, se comporta de la siguiente manera (ver FIGURA 2.11): el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) se multiplica por su respectivo K_s (cercano a 1) si existe poco agotamiento; al incrementar el agotamiento del agua en el suelo (p) y al alcanzar el punto **a** (umbral superior), entonces, K_s tiene valores menores a 1, el factor CGC se reduce y, como consecuencia, se produce un desarrollo lento del dosel; así pues, al incrementar más el agotamiento del agua en el suelo, el dosel crece con mayor lentitud porque los valores de K_s (cercano a 0) son cada vez menores hasta llegar al punto **b** (umbral inferior) (Steduto *et al.*, 2012).

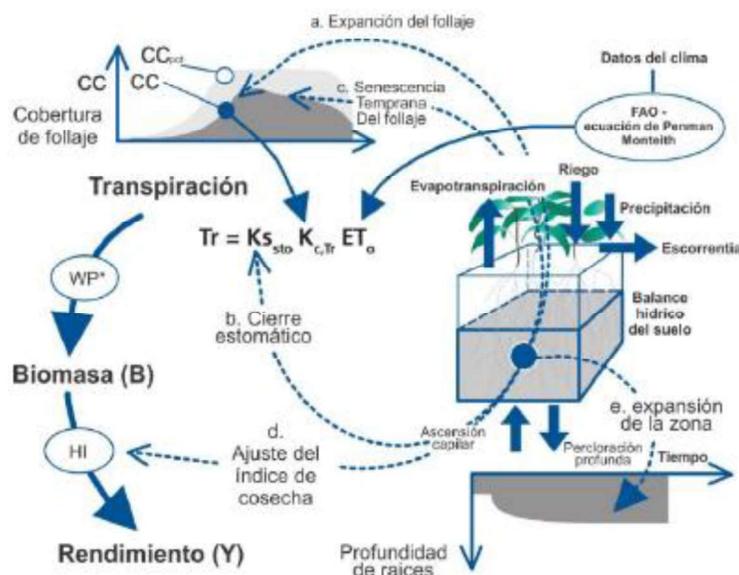
FIGURA 2.11 Curva del coeficiente de estrés vs agotamiento del agua en el suelo, exp: expansión del dosel, sto: conductancia estomática y sen: senescencia del dosel



FUENTE: Steduto *et al.*, 2009; 2012

El estrés hídrico puede afectar de manera drástica, ya sea de forma negativa o positiva, al índice de cosecha (HI) dependiendo del ciclo del cultivo que se esté presentando. Entre las características negativas se encuentran: la inhibición del estrés hídrico en la polinización y en la formación del embrión, aborto de los frutos recién formados por no asimilar la fotosíntesis y el impacto de que el estrés hídrico, propiamente dicho, no sea apto (Steduto *et al.*, 2012). La simulación de todos estos inconvenientes antes mencionados en AquaCROP, se describen de forma más detallada en el *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66*.

FIGURA 2.12 Esquema representativo de la respuesta del cultivo ante el estrés hídrico en AquaCROP



FUENTE: Raes *et al.*, 2009

2.2.1.3.2 Estrés por temperatura

El estrés por temperatura provoca consecuencias en lo que respecta a la fenología y al crecimiento del dosel, se supone, que por medio del reloj interno predeterminado que utiliza el programa AquaCROP, medido en grados día acumulados (GDD), analiza estos efectos tomando en consideración los coeficientes de estrés por temperatura, los mismos que se encuentran en un rango de 0 a 1 dependiendo de la temperatura del aire (Steduto *et al.*, 2012).

Entre otros efectos que se pueden mencionar a causa del estrés por temperatura son la polinización (por bajas y altas temperaturas) que, a su vez, afecta al índice de cosecha, y la producción de biomasa (por bajas temperaturas) (Steduto *et al.*, 2012).

2.2.1.3.3 Estrés por aireación

Para simular el estrés por aireación, AquaCROP se enfoca en tres parámetros importantes, que son: la transpiración del cultivo (T_r), la producción de biomasa (B) y la evapotranspiración (ET). De igual manera, hace uso del coeficiente de estrés

para evaluar la cantidad en metros cúbicos de poros llenos de aire que contiene el suelo en el área de las raíces (Steduto *et al.*, 2012).

2.2.1.3.4 *Estrés por nutrientes minerales*

La baja fertilidad del suelo se modela por medio de un ajuste utilizando coeficientes de estrés, en donde intervienen cuatro características básicas para poder estudiar el crecimiento del cultivo en AquaCROP y, adicionalmente, éste permite definir una calificación para cada una de ellas acorde a las condiciones de fertilidad en un rango de casi óptimo a bajo (Raes *et al.*, 2011):

- Coeficiente de crecimiento del dosel (CGC)
- Cobertura del dosel máxima (CC_x)
- Disminución del dosel
- Producción de biomasa normalizada (WP*)

2.2.1.3.5 *Estrés por salinidad del suelo*

Cuando existe salinidad en el suelo es debido al valor promedio que sugiere la conductividad eléctrica del suelo saturado en el sistema radicular; para conocer como varía el coeficiente de estrés por salinidad entre los umbrales superior e inferior y los factores que forman parte de dicha variación (Ayers & Westcot, 1985).

En lo que refiere a la modelación del estrés por salinidad del suelo, AquaCROP se enfoca en qué sucede con la producción de biomasa, es decir, obtiene una cierta disminución de esta producción y la transforma en un estrés resultante que afecta al cierre estomático y a la cobertura del dosel; la configuración de este estrés dentro del modelo es similar al modelo del estrés por baja fertilidad (Steduto *et al.*, 2012).

2.2.1.4 Datos de entrada y salida para la simulación

2.2.1.4.1 *Datos de entrada*

En la interfaz principal del programa computacional AquaCROP se pueden visualizar los módulos más esenciales para poder efectuar la simulación. En el menú principal denominado "*Environment and Crop*", se descomponen los cuatro módulos ya mencionados en el apartado 2.2.1.2 (Estructura y componentes), o sea: Clima, Cultivo, Suelo y Manejo (Alarcón, 2015).

En la TABLA 2.1 se especifican de manera resumida todos los datos de entrada requeridos en el modelo AquaCROP, a continuación se detallan de manera breve ciertos parámetros de importancia que pertenecen al módulo *Cultivo* (Alarcón, 2015):

- *Fecha de siembra*: En esta sección se debe ingresar el día y el año en el cual se siembra al cultivo.
- *Cobertura del dosel inicial (CC_o)*: Por medio de este parámetro es posible analizar la expansión del dosel durante los primeros días de siembra. Por ello, es indispensable ingresar el valor de CC_o o la densidad de la planta ya que, así, se puede obtener cuánto se ha desarrollado el dosel, especificando el tamaño del mismo.
- *Cobertura del dosel máximo (CC_x)*: Este parámetro, en cambio, permite deducir en porcentaje y en condiciones óptimas, el desarrollo del dosel.
- *Días de dosel máximo ($CC_{máx}$)*: Se debe asignar el plazo en días para obtener la cobertura total del dosel.
- *Duración del cultivo*: Se establece el tiempo en el cual se produce el desarrollo del cultivo en cuestión.
- *Índice de cosecha*: El usuario debe definir el valor del índice de cosecha, pero servirá como referencia pues puede variar debido al estrés hídrico de manera positiva o negativa, ya sea por el tiempo y la severidad del estrés.

TABLA 2.1 Datos de entrada para la simulación del desarrollo del cultivo

DATOS DE ENTRADA	DESCRIPCIÓN	
Clima 	Datos de clima recopilados en campo o de estaciones: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura máxima (T_x) y mínima del aire (T_n). • Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o). • Precipitación. • Concentraciones de CO_2 (Observatorio Mauna Loa, Hawái). 	
Cultivo 	Características calibradas y validadas del cultivo obtenidas del banco de datos: <ul style="list-style-type: none"> • Ajusta parámetros específicos de la variedad y menos conservativos. 	
Suelo 		Características del perfil del suelo: <ul style="list-style-type: none"> • Observaciones de campo. • Valores predeterminados en el banco de datos (textura del suelo). • Funciones de pedo-transferencia.
		Características de la capa freática: <ul style="list-style-type: none"> • Profundidad bajo la superficie del suelo. • Salinidad.
Manejo 		Prácticas de manejo de campo: <ul style="list-style-type: none"> • Nivel de fertilidad del suelo. • Prácticas que afectan el balance de agua del suelo.
		Prácticas de manejo de riego: <ul style="list-style-type: none"> • Método de riego. • Tiempo y profundidad de la aplicación de los eventos de riego. • Salinidad del agua de riego.

FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

Elaborado por: Andrea Abarca

2.2.1.4.2 Datos de salida

Una vez que se hayan establecido todos los datos necesarios para modelar el comportamiento del cultivo, en la sección *Simulation run* se procede a ejecutar el programa; el usuario debe estar al tanto de verificar los cambios que se realicen en

la humedad del suelo, balance de agua en el suelo, transpiración, crecimiento del dosel, producción de biomasa, especialmente, el rendimiento de cultivo (Steduto *et al.*, 2012).

La forma en que AquaCROP presenta los resultados es mediante gráficos a escala diaria, donde se puede realizar un control de los efectos dinámicos de los estreses (hídrico, temperatura, fertilidad y salinidad) que se producen en el crecimiento del cultivo, así como, la productividad y uso del recurso hídrico (Raes *et al.*, 2011).

En el mismo panel *Simulation run*, existe una pestaña muy importante denominada el conjunto *Climate-Crop-Soil water* (Clima-Cultivo-Humedad del suelo) que muestra resultados de tres aspectos relacionados con el tiempo, estos son (Steduto *et al.*, 2012):

1. Agotamiento de la humedad del suelo en la zona radicular (D_r).
2. Cobertura del dosel (CC) y la misma, pero sin estrés (éste último se presenta como una curva de color gris en la ventana auxiliar de AquaCROP).
3. La transpiración (T_r) del dosel y la transpiración potencial (ésta última se la identifica con una curva gris en la ventana auxiliar de AquaCROP).

Además, en la ventana auxiliar *Simulation run*, se presenta el valor de la biomasa y el rendimiento simulado en unidades de peso/área [ton/ha]. Una cualidad intrínseca de la ventana *Simulation run* es que el usuario puede elaborar un calendario de déficit de riego con el propósito de optimizar el uso del agua (Raes *et al.*, 2011).

Otra manera de arrojar los resultados sobre el desarrollo del cultivo (ver TABLA 2.2), trata de que al salir del menú *Simulation run*, el programa consulta al usuario si desea almacenar los datos de salida (diaria y/o por estación), dicho esto, en la siguiente tabla se muestra un ejemplo de cómo se organizan los resultados. Cabe destacar que la extensión de los archivos es *.OUT* (Steduto *et al.*, 2012).

TABLA 2.2 Presentación de resultados diarios de cada archivo

NOMBRE DEL ARCHIVO	DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE SALIDA EN CADA ARCHIVO
ProjectCrop.OUT	Procesos de cultivo, producción y datos relacionados (18).
ProjectWabal.OUT	Balance del agua del suelo y datos relacionados (16).
ProjectProf.OUT	Contenido de agua en el perfil de la zona de raíces (10).
ProjectSalt.OUT	Salinidad del suelo en el perfil de la zona de raíces (8).
ProjectCompWC.OUT	Contenido de humedad del suelo de los horizontes del modelo (12).
ProjectCompEC.OUT	Salinidad del suelo de los horizontes del modelo (12).
ProjectInet.OUT	Requerimientos de riego (en caso de ser simulados) (5)

FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

Elaborado por: Andrea Abarca

2.2.1.5 Aplicaciones

El uso de AquaCROP tiene el objetivo de modelar el desarrollo de diversos cultivos y, en consecuencia, brindar una cantidad de información valiosa que puede ser empleada por cualquier tipo de técnico, que tengan conocimiento sobre el tema, por ejemplo: agricultores, consultores de campo, ingenieros, economistas, etc., de tal manera que se puedan hacer predicciones sobre cualquier parámetro o componente que intervenga en el estudio (e. g. el rendimiento) (Steduto *et al.*, 2012). Las modelaciones de los cultivos tienen una variedad de aplicaciones, una vez más, dependerá de los objetivos del proyecto que tenga planteado el usuario y su respectiva escala temporal que esté considerando, que pueden ser de días a semanas, de semanas a meses e incluso años (Raes *et al.*, 2011). Básicamente, toda la información recolectada de las simulaciones en AquaCROP permiten realizar cualquier tipo de análisis comparativo para una adecuada toma de decisiones en lo que concierne al buen manejo del agua (Steduto *et al.*, 2012). A continuación, se describen algunas aplicaciones que están relacionadas con “*los efectos meteorológicos y climáticos en la producción agrícola y uso del agua*” (Steduto *et al.*, 2012) que son de interés para este trabajo, casos de estudio:

TABLA 2.3 Resumen de varias aplicaciones en AquaCROP

CASOS DE ESTUDIO		
N° 13. Evaluación del impacto de la variabilidad de las precipitaciones en rendimientos limitados por el agua		
Datos específicos	Enfoque	Resultado
Precipitaciones diarias y ET _o (20 a 30 años). Cultivo típico de secano. Características de suelo y Manejo.	AquaCROP simulará el cultivo que se desarrolle en una estación de lluvias para cada año con disponibilidad de datos.	Se requiere del valor de rendimiento. Generar curva de probabilidad del rendimiento en función de las precipitaciones anuales.
N° 14. Cartografía del potencial de rendimiento limitado por el agua de una región		
Datos específicos	Enfoque	Resultado
Precipitaciones y ET _o , cultivo de secano y condiciones de suelo y manejo.	Se requiere del modelo AquaCROP en conjunto con GIS para simular el rendimiento espacial.	
N° 15. Efectos del cambio climático en la producción de cultivos y el uso del agua		
Datos específicos	Enfoque	Resultado
Datos climáticos procesados para simular condiciones futuras. Cultivo típico de secano y características de suelo y manejo.	La afectación del calentamiento global sobre los rendimientos simulados y el uso del agua. Integración del calentamiento global y aumento de los gases de efecto invernadero.	
N° 16. Utilización de AquaCROP para las decisiones de asignación del agua a nivel regional o de cuenca		
Datos específicos	Enfoque	Resultado
Datos climáticos procesados, cultivo de secano y condiciones de suelo y manejo.	Modelos de optimización de asignación del agua (componentes económicos e institucionales).	

FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

Elaborado por: Andrea Abarca

2.2.1.6 Parametrización, calibración y validación de los datos del modelo

Existen dos tipos de parámetros que utiliza el modelo AquaCROP para poder analizar el comportamiento de un cultivo, tanto para distintas condiciones climáticas como de suelo. Por consiguiente, el primer tipo de parámetro se denomina

conservativos (Vanuytrecht *et al.*, 2014), mientras que, el segundo tipo son los que se ingresan específicamente por el usuario. Los parámetros conservativos son aquellos que usualmente son constantes, cualquiera que sea la condición de crecimiento y régimen hídrico, y el segundo tipo está más dirigido a casos donde hubiese datos acerca de variedades de alto rendimiento donde la fertilidad se encuentra en estado óptimo y no existe limitación en el consumo de agua (Raes *et al.*, 2011).

Si bien se mencionó que los parámetros conservativos no cambian, sí puede haber cierta variación en el caso de que existan otras especies de un mismo cultivo. Por ello, se vio la necesidad de establecer una nueva asignación: “clase de varietal”, con esta opción se permite estipular diferentes clases de cultivo con sus respectivos parámetros conservativos (Steduto *et al.*, 2012).

2.2.1.6.1 Validación y parametrización de datos de entrada

En este apartado se expone, en primer lugar, la información preliminar necesaria para iniciar con la configuración del modelo de la productividad del agua y su uso. Esta información se puede referir a la Tabla 1 de la sección 3.3 de acuerdo al *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66* y se indica de manera resumida en la TABLA 2.4. En la columna A se encuentran todos los requisitos mínimos con los cuales se obtendrían resultados básicos, en cambio, en la columna B se muestra información más amplia que permita obtener resultados más confiables (Steduto *et al.*, 2012).

TABLA 2.4 Resumen de la información necesaria para la simulación del cultivo en AquaCROP

	A. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS	B. DATOS ADICIONALES PARA UNA SIMULACIÓN FIABLE
Cultivo	Rendimiento de grano e indicación de la proporción del peso. Índice de cosecha (HI).	Biomasa aérea al momento de la cosecha. Fecha de emergencia y fecha de madurez del grano.
	Fechas de siembra y cosecha y duración del cultivo.	Densidad de plantación y profundidad de las raíces.
	Dosis de siembra y % de germinación.	Índice máximo del área foliar o coeficiente máximo de cobertura del dosel.

TABLA 2.4 Continuación

Clima y ET	Temperatura mínima y máxima, % de días soleados, viento y humedad en valores diarios. Latitud y elevación. Datos de evaporación y de ET _o . Datos de precipitación diaria.	Radiación solar u horas de luz, temperatura mínima y máxima, humedad relativa mínima y máxima, y velocidad de viento en valores medios semanales. Precipitación diaria. ET estimada mediante el balance del agua a largo plazo.
Suelo y fertilidad	Clase textural del suelo y variación con la profundidad. Pendiente del suelo y la capacidad de retención de humedad del suelo. Fertilidad natural del suelo.	Texturas de los diversos horizontes del suelo. Tipo, tasa y tiempo de fertilización.

FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

Elaborado por: Andrea Abarca

Para proceder con la validación y parametrización de la simulación es muy importante tener datos aún más precisos, de igual manera, la información es proporcionada en la Tabla 2 de la sección 3.3 por el *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66*, y que se muestra de manera resumida en la TABLA 2.5.

En la columna C solamente se indica la información mínima pero obligatoria, y en la columna D se evidencia información extra que sirve para validar el modelo y calibrar los parámetros conservativos, concretamente, para un mayor intervalo de climas, suelos y regímenes hídricos (Steduto *et al.*, 2012).

TABLA 2.5 Resumen de la información necesaria para la validación y parametrización de AquaCROP

	C. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS	D. DATOS ADICIONALES PARA UNA SIMULACIÓN FIABLE
Cultivo	<p>Mediciones de la cobertura del dosel durante la estación.</p> <p>Mediciones periódicas de la biomasa aérea durante la estación.</p> <p>Fecha en que el dosel se empieza a volver amarilla.</p> <p>Medición de la profundidad de raíces. Signos de estrés hídrico y estreses.</p>	Mismos datos de la columna C, pero obtenidos en diferentes sitios y climas, y en diferentes tipos de suelo.
Clima y ET	<p>Temperatura y humedad diaria, mínima y máxima.</p> <p>Radiación solar diaria y velocidad del viento.</p> <p>ET por balance de agua del suelo.</p>	<p>Mismos datos de la columna C, pero obtenidos en diferentes sitios y climas, y en diferentes tipos de suelo.</p> <p>Medición diaria de la ET.</p>
Suelo y fertilidad	<p>Debe tener un tratamiento con fertilidad óptima del suelo.</p> <p>Capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los horizontes del suelo.</p> <p>Tasa de infiltración o conductividad hidráulica saturada del suelo.</p>	Mismos datos de la columna C, pero obtenidos en diferentes sitios y climas, y en diferentes tipos de suelo.

FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

Elaborado por: Andrea Abarca

Se recomienda que se inicie la simulación con datos aproximados o asumidos, para luego, efectuar una comparación de los resultados con aquellos obtenidos experimentalmente, es decir, aplicar el método de ensayo y error hasta que todas las deducciones hechas sean similares (Raes *et al.*, 2011). Lo anteriormente dicho corresponde a una forma de evaluar y parametrizar los resultados de la simulación (Steduto *et al.*, 2012).

A continuación, se presentan para cada tipo de parámetros (especificados por el usuario y conservativos) los distintos sub-parámetros en los cuales se dividen cada uno y que se consideran dentro del modelo AquaCROP.

2.2.1.6.2 Parámetros específicos ingresados por el usuario

Es preciso especificar qué sub-parámetros son los que intervienen dentro de los conservativos ya que de esta manera se alcanzará un mayor entendimiento sobre el manejo adecuado del modelo. En efecto, tanto el clima como el suelo son características propias de la ubicación donde se está requiriendo el análisis, pero en cuanto respecta a lo que es la variedad y ciclo del cultivo, el consumo de agua y las prácticas agronómicas, todas éstas deben ser definidos directamente del usuario, según lo planteado por Steduto *et al.* (2012). Entre las que se pueden mencionar son:

- *Clima y evapotranspiración de referencia (ET_o):* Se requiere de la temperatura media mensual y el valor de la ET_o . Para obtener el valor de la evapotranspiración de referencia se puede utilizar el programa *ET_o Calculator* (FAO, 2009), ya que representa un dato de entrada muy sustancial para AquaCROP.
- *Grados día acumulados (GDD):* Por medio de este factor es viable analizar para varios regímenes de temperatura.
- *Humedad del suelo:* Es necesario el valor del agua retenida en el suelo (TAW) del sistema radicular, entre la capacidad de campo (FC) y el punto de marchitez permanente (PWP).
- *Contenido de humedad inicial del suelo:* Corresponde a un factor único de la localidad que sirve para establecer la profundidad máxima de la zona radicular cuando se está empezando a realizar la modelación.
- *Fenología del cultivo:* Se debe especificar la duración de las fases de crecimiento debido a la variedad de cultivos que existen (tiempo para el 90% de emergencia, tiempo para iniciar la floración y la duración, tiempo para alcanzar la máxima cobertura del dosel, entre otros).
- *Profundidad de raíces y tasa de profundización:* Es un parámetro específico de la localidad ya que la formación de las raíces depende en gran medida de aspectos físicos y químicos del suelo.

2.2.1.6.3 Parámetros conservativos

En lo que concierne a los parámetros conservativos, los sub-parámetros que intervienen son los efectos causados por los cambios de temperatura, la cobertura del dosel, la productividad del agua normalizada (WP^*) y el índice de cosecha de referencia (HI_0) (Steduto *et al.*, 2012):

- *Efectos de temperatura:* Como el modelo AquaCROP se maneja por medio de los grados días acumulados (GDD), se debe configurar la temperatura base y la temperatura superior. La temperatura base es el umbral inferior para el crecimiento del cultivo, mientras que, la temperatura superior es un indicador del límite máximo en el cual la temperatura no provocará efectos al crecimiento del cultivo. Para fines de conocimiento, los GDD se calculan aplicando el Método 2 (si la temperatura máxima o temperatura mínima es menor a la temperatura base, se asume que el valor a considerar es la temperatura base) de acuerdo a lo descrito por McMaster & Wilhelm (1997).
- *Cobertura del dosel:* Existen casos en que la transpiración no se mide en términos de cobertura del dosel sino en términos de índice de área foliar (LAI). Por este motivo, para el cultivo del maíz se determinó una conversión de LAI a cobertura del dosel, según la Ecuación (2.13), siendo factible la parametrización en AquaCROP (Hsiao *et al.*, 2009).

Otros datos de entrada que se necesitan corresponden: al tamaño del dosel por plántula (cco), el cual se calcula por medio de la relación entre la cobertura inicial del dosel (CC_0) y la densidad de la plantación; la cobertura máxima del dosel (CC_x), el coeficiente de crecimiento del dosel (CGC) y el coeficiente de disminución del dosel (CDC). La descripción de éstos parámetros antes señalados se puede referir al *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66*.

$$CC = 1,005 \cdot [1 - \exp \cdot (-0,6 \cdot LAI)]^{12} \quad (2.13)$$

Donde:

CC = Cobertura del dosel verde, en [%] ó en [fracción]

LAI = Índice de área foliar, en [m^2]

- *Productividad del agua normalizada (WP*)*: Se define como la relación entre la biomasa producida y la cantidad de agua que se transpira. Se normaliza de dos maneras, una es considerando la demanda de la evaporación y la otra es por medio de la concentración de CO₂. Las expresiones que se utilizan para efectuar dichos tipos de normalización se muestran a continuación. La Ecuación (2.14) analiza, para cada rango de tiempo, la producción de biomasa en función de la evaporación normalizada a través de la evapotranspiración de referencia promedio (Steduto *et al.*, 2007), y la Ecuación (2.15) calcula el factor de CO₂ la cual tiene que multiplicarse por el WP* debido a la demanda de la evaporación, de esta manera el programa AquaCROP simula el aumento de concentración de dióxido de carbono en el aire que se produce cada año (Steduto *et al.*, 2007).

$$ET_{normalizada} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr}{\overline{ET}_o} \right)_i \quad (2.14)$$

Donde:

$ET_{normalizada}$ = Evapotranspiración, en [mm/día]

i = Intervalo de tiempo secuencial entre dos muestras de biomasa

n = Número de la muestra de biomasa

Tr = Transpiración acumulada en el intervalo i , en [mm] ó en [m^3/m^2]

\overline{ET}_o = Evapotranspiración del cultivo de referencia promedio, en [mm] ó en [m^3/m^2]

$$f_{CO_2} = \frac{\left(\frac{C_a}{C_{a,o}} \right)}{1 + 0,000138 \cdot (C_a - C_{a,o})} \quad (2.15)$$

Donde:

f_{CO_2} = Factor de CO₂ para normalización de CO₂ atmosférico

C_a = Concentración atmosférica media actual de CO₂, en [ppm]

$C_{a,o}$ = Concentración atmosférica media actual de CO₂ para el año 2000, en [ppm]

Según el Observatorio de Mauna Loa, Hawai, el valor de $C_{a,o}$ es igual a 369.77 [μLL^{-1}] (Steduto *et al.*, 2012).

- *Índice de cosecha de referencia (HI_o)*: Se puede considerar el valor de HI_o de referencia igual a 0.5, que inclusive puede ser un valor levemente mayor para varios cultivos de grano de alto rendimiento. Además, se recomienda tener mucho cuidado en elegir el valor a utilizar de HI_o , ya que servirá para esclarecer o identificar si existe pérdida de la producción de biomasa como, por ejemplo, hojas muertas antes del proceso de cosecha (Steduto *et al.*, 2012).

2.2.1.6.4 Calibración de datos

Para todos los modelos de simulación de rendimiento de cultivo, se requiere de una calibración a partir de datos reales y, AquaCROP no es la excepción. Esta calibración radica en obtener los cultivars (ficheros) que tienen características específicas de cada variedad del cultivo, donde se incluyen variables que alteran considerablemente los resultados, como: la fenología, cobertura de dosel, profundidad de las raíces y el índice de cosecha de referencia. Lo fundamental en la calibración de los cultivars es tomar en cuenta las temperaturas base (mínima) y umbral (máxima), que para el maíz duro son 8 y 36 [$^{\circ}\text{C}$], respectivamente. El software contiene un cultivar de maíz por defecto que considera éstas temperaturas, de manera que se van ajustando parámetros característicos de la variedad del cultivo en estudio, de acuerdo a los datos de campo disponibles (Martínez, 2015).

2.3 ESTADO DEL ARTE

El estudio del rendimiento agrícola del maíz, así como de otros cultivos, ha sido un gran interés por parte de varios investigadores, las diferentes indagaciones se han enfocado en obtener parámetros en donde las condiciones climáticas, las de suelo y la productividad del agua son los principales factores de calibración y parametrización de modelos obtenidos mediante experimentación o aplicando métodos computacionales, como es el caso de AquaCROP. Entre los objetivos más relevantes se basan en el buen uso del agua para que la producción agrícola pueda

desarrollar métodos más eficaces y, consecuentemente, se establezcan los requerimientos más apropiados para que los cultivos sean aprovechados de manera óptima. Se menciona que mediante la modelación y calibración biológica (Flores-Gallardo *et al.*, 2013) es permitido realizar estudios sobre el comportamiento de los diversos cultivos obedeciendo a los factores climáticos de la región y de manejo agronómico.

2.3.1 REVISIÓN DE INVESTIGACIONES

En la TABLA 2.6 se exponen las diferentes investigaciones proporcionadas en revistas científicas o en proyectos de investigación de manera cronológica, que guardan relación con los conocimientos sobre el desarrollo y crecimiento de los cultivos y todos los parámetros que intervienen para su análisis.

TABLA 2.6 Descripción de la información revisada en revistas y tesis

REVISTAS Y TESIS			
Autor (es)	País	Título	Nombre de la Revista o Institución
de Wit, C. T. (1958)	Holanda	Transpiration and crop yields	<i>Institute of Biological Chemistry Research On Field Crops and Herbage</i>
Adams, J. E., Arkin, G. F. & Ritchie, J. T. (1976)	Estados Unidos	Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying	<i>Soil Science Society of America Journal</i>
Moot, D. J., Jamieson, P. D., Henderson, A. L. & Ford, M. A. (1996)	Canadá	Rate of change in harvest index during grain-filling of wheat	<i>The Journal of Agricultural Science</i>
Zwart, S. J. & Bastiaanssen, W. G. M. (2004)	Holanda	Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize.	<i>Agricultural Water Management</i>
Kaboosi, K. & Kaveh, F. (2012)	Irán	Sensitivity analysis of FAO 33 crop water production function	<i>Irrigation Science</i>
de la Casa, A. C. (2011)	Argentina	Monitoreo de cultivos de maíz y estimación de rendimiento a nivel de lote con datos de AQUA-MODIS en Córdoba, Argentina	<i>Universidad Nacional de Córdoba</i>
Zamora, S., Ruíz, H., Beltrán, F., Fenech, L., Murillo, B., Loya, J. & Troyo, E. (2011)	México	Régimen hídrico del maíz en una zona árida, determinado en porcentajes de evaporación	<i>Tropical and Subtropical Agroecosystems</i>
Morla, F. D. & Giayetto, O. (2012)	Argentina	Calibración y validación del modelo AquaCROP de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba	<i>XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo</i>

TABLA 2.6 Continuación

Capa Morocho, M., Rodríguez Fonseca, B. & Ruiz Ramos, M. (2012)	España	Impactos de la variabilidad climática en los cultivos de verano en regadío mediterráneos	<i>Publicaciones de la Asociación Española de Climatología</i>
Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E. & Mejía-Sáenz, E. (2013)	México	Simulación del rendimiento de maíz (<i>Zea mays L.</i>) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCROP	<i>Agrociencia</i>
Montoya, F. (2013)	España	Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (<i>Solanum tuberosum L.</i>) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas	<i>Universidad de Castilla "La Mancha"</i>
Lorite, I. J., García-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M. & Fereres, E. (2013)	Holanda	AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCROP	<i>Computers and electronics in agriculture</i>
Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., García Vila, M. & Mejias, P. (2014)	Bélgica	AquaCROP: FAO's crop water productivity and yield response model	<i>Environmental Modelling & Software</i>
Mendoza Alcivar, M. F. & Valdez Rodríguez, M. G. (2015)	Ecuador	Labranza mecanizada en la productividad del cultivo de maíz h. trueno	<i>Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López"</i>
Ion, V., Dicu, G., Dumbrava, M., Temocico, G., Alecu, I. N., Basa, A. G. & State, D. (2015)	Rumania	Harvest index at maize in different growing conditions	<i>Romanian Biotechnological Letters</i>
Olivera, N. T., Manrique, O. B., Masjuan, Y. G. & Alega, A. M. G. (2016)	Cuba	Evaluation of AquaCROP model in crop dry bean growth simulation	<i>Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias</i>
Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A. & Ibáñez-Castillo, L. A. (2016)	México	Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá antioqueño, Colombia	<i>Tecnología y Ciencias del Agua</i>
Marcos, B., Martínez, A., López, G., López, C. & Arteaga, T. (2016)	México	La biomasa de los sistemas productivos de maíz nativo (<i>Zea mays</i>) como alternativa a la captura de carbono	<i>Revista Internacional de Contaminación Ambiental</i>

TABLA 2.6 Continuación

Espadafor, M., Couto, L., Resende, M., Henderson, D. W., García-Vila, M. & Fereres, E. (2017)	Estados Unidos	Simulation of the responses of dry beans (<i>phaseolus vulgaris</i> L.) to irrigation	<i>Transactions of the ASABE</i>
González-Robaina, F., Delgado-Acosta, R., Díaz-Pérez, Y., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., Cid-Lazo, G. (2018)	Cuba	Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en el suelo Ferralítico Rojo	<i>Revista Ingeniería Agrícola</i>

Elaborado por: Andrea Abarca

En la TABLA 2.7 se presenta el resumen, los resultados y/o conclusiones de cada caso de estudio, de tal manera que permita una visualización general de lo que se ha considerado hasta el momento.

TABLA 2.7 Resumen y resultados de cada investigación revisada

REVISTAS Y TESIS		
Autor (es)	Resumen	Resultados / Conclusiones
de Wit, C. T (1958)	En este artículo se expone que la relación que existe entre la transpiración y la producción de material seco proveniente de las plantas en contenedores no se diferencia en gran medida de las plantas de campo, considerando para éste último caso la limitación del agua.	Entre las observaciones que más se destacan es que en condiciones de sequía, la relación de la evapotranspiración y la producción total de materia seca no se ve afectada, pero si se ven afectadas la cantidad de cultivos comercializables y la cantidad de agua transpirada.
Adams, J. E., Arkin, G. F. & Ritchie, J. T. (1976)	Se realizó una experimentación para evaluar cuál es la influencia del ancho entre las hileras en la evaporación durante la primera fase de secado en el cultivo de sorgo (cultivo similar al maíz) (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench) entre los años 1972 y 1973.	Se determinó que sí existe afectación en la evaporación durante la primera fase de secado, a causa del ancho entre hileras, por el índice de área foliar (LAI) y el sombreado en el suelo. Se observó que con un ancho menor entre hileras, se produce una reducción de la penetración de la energía solar en el suelo que el espaciado estándar de hileras de 100 [cm].
Moot, D. J., Jamieson, P. D., Henderson, A. L. & Ford, M. A. (1996)	En este artículo se enfoca qué sucede con la tasa constante de cambio en el índice de cosecha de manera que sea posible el cálculo del rendimiento final del cultivo en función de la biomasa producida y el tiempo de desarrollo del grano.	En cuanto a las observaciones obtenidas se dedujo que la tasa constante de cambio en el índice de cosecha tendría la facultad de brindar una relación semi-empírica para determinar el rendimiento del cultivo en simulaciones.
Zwart, S. J. & Bastiaanssen, W. G. M. (2004)	Este artículo se enfoca en analizar la importancia de producir más comida con menos agua dentro del ámbito de la agricultura. Por lo tanto, la dirección más viable para lograr este reto es por medio del incremento de la Productividad del Agua de Cultivo (CWP).	El rango de la Productividad del Agua de los diferentes cultivos (trigo, arroz, algodón y maíz) son bastante amplios, entre 0.6-1.5 [kg/m ³] en promedio. En consecuencia, se determina que es posible mantener o aumentar la producción agrícola con un 20% a 40% menos de recursos hídricos.

TABLA 2.7 Continuación

Kaboosi, K. & Kaveh, F. (2011)	La investigación está dirigida en estudiar la sensibilidad de la ecuación propuesta por Doorenbos y Kassam (1979), y las modificaciones hechas a la misma por Rao <i>et al</i> (1988).	Los resultados arrojaron que al existir un error positivo en la obtención de la evapotranspiración máxima (PET) y el factor de respuesta al rendimiento (Ky) y un error negativo en la evapotranspiración actual (SET), entonces provoca un predicción excesiva del rendimiento relativo.
de la Casa, A. C. (2011)	El estudio consistió en monitorear particiones de maíz en la región central de Córdoba y utilizar datos radiométricos de AQUA-MODIS para así conseguir cuál es el estado de los cultivos.	La relación lineal entre la cobertura del cultivo y el NDVI que se determina directamente de AQUA-MODIS, fue uno de los resultados alcanzados más exactos.
Zamora, S., Ruíz, H., Beltrán, F., Fenech, L., Murillo, B., Loya, J. & Troyo, E. (2011)	Los investigadores se plantearon el objetivo de definir el porcentaje de la evaporación para realizar el respectivo cálculo del uso del agua para el maíz.	Los datos resultantes fueron una evaporación de 712 [mm] durante todo el periodo del maíz. Cuando la evaporación era aún del 100% se alcanzó el mayor rendimiento con un valor de 9.271 [ton/ha] y con una evaporación del 85% se logró la mayor productividad del agua.
Morla, F. D. & Giayetto, O. (2012)	El estudio se fundamentó en calibrar y validar el modelo en AquaCROP considerando cultivos: trigo, maíz y soja para la región Río Cuarto. Los datos se obtuvieron de las observaciones que se realizaron en base a experimentación en la UNRC.	Los resultados indicaron que la simulación por medio de AquaCROP muestra un ajuste considerablemente conveniente, con porcentajes de error de 5%, 13% y 11% para el maíz, trigo y soja, respectivamente.
Capa Morocho, M., Rodríguez Fonseca, B. & Ruiz Ramos, M. (2012)	La variabilidad climática es un aspecto importante dentro del propósito de esta investigación, ya que con los diferentes patrones de esta variabilidad es factible definir cuál es la afectación en los cultivos de verano en el Península Ibérica.	Existe predominio del fenómeno de El Niño sobre el cultivo de maíz en varios lugares especiales de la Península Ibérica. Esta afirmación fue posible gracias a la aplicación y calibración en los modelos de plantas.
Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E. & Mejía-Sáenz, E. (2013)	Se efectuó una investigación acerca de la validación y posterior calibración en el modelo AquaCROP para la simulación del desarrollo del cultivo del maíz en el norte de Sinaloa, México, asumiendo tres escenarios de disponibilidad hídrica, que son: riego total, riego deficitario al 80% y riego deficitario al 60% en relación al riego total.	En cuanto a los resultados obtenidos, se predice que el rendimiento del grano de la modelación fue coherente con un valor de 0.79 [ton/ha] para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) y un índice de Willmott (d) de 0.85. Es decir, representan valores altos que concuerdan con los datos obtenidos en campo.
Montoya, F. (2013)	Se utilizaron tres modelos, como son: AquaCROP, CropSyst y SUBSTOR-Potato, para calibrar y validar los datos con los obtenidos por medio de la experimentación del cultivo de papa usando el sistema de riego pívot (2011-2012). Se aplicaron varios porcentajes del rendimiento hídrico en base a la metodología planteada por la FAO.	La conclusión que se atribuye es que los tres modelos empleados pueden ser calibrados y validados si las condiciones climáticas de Albacete son semiáridas. SUBSTOR-Potato fue el modelo con el que no fue necesario ingresar gran cantidad de datos para llevar a cabo la simulación de la papa.
Lorite, I. J., García-Vila, M., Santos, C., Ruiz-Ramos, M. & Fereres, E. (2013)	En este trabajo se trata de presentar las herramientas necesarias que permitan realizar simulaciones que abarquen grandes áreas o aplicaciones.	AquaData y AquaGIS son las herramientas que se encargan de los datos de entrada y salida en AquaCROP y que permiten que el tiempo de simulación no sea demasiado.

TABLA 2.7 Continuación

<p>Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., García Vila, M. & Mejias, P. (2014)</p>	<p>El artículo hace énfasis en las cualidades que presenta AquaCROP para simular el rendimiento del cultivo mediante pocos parámetros y específicamente siguiendo cuatro pasos fundamentales, como son: desarrollo de la cobertura de dosel, la transpiración del cultivo, la producción de biomasa y el rendimiento final del cultivo.</p>	<p>Se realiza una descripción de las principales aplicaciones y la forma de parametrizar los cultivos que se consideren en el análisis, así como, las respuestas de los cultivos ante concentraciones altas de CO₂, fertilidad y salinidad en el suelo, entre otros.</p>
<p>Mendoza Alcívar, M. F. & Valdez Rodríguez, M. G. (2015)</p>	<p>En esta investigación se manifiesta que el principal objetivo apunta a la validación de sistemas de labranza que afectan a los procesos físicos, químicos y biológicos de suelo y la atribución en la productividad del maíz h. trueno. Las observaciones se llevaron a cabo en El Bejucal, Manabí.</p>	<p>Entre las particularidades del suelo que se obtuvieron, se concluye que no hay una vasta diferencia entre tratamientos aplicados en lo que concierne a los parámetros físicos, éstos se mantienen con el mismo nivel que presentan antes de la siembra.</p>
<p>Ion, V., Dicu, G., Dumbrava, M., Temocico, G., Alecu, I. N., Basa, A. G. & State, D. (2015)</p>	<p>En este estudio se resalta la importancia de entender cómo el índice de cosecha está influenciado por los distintos aspectos ambientales y prácticas de manejo para averiguar el alto potencial del cultivo del maíz. Por ello, el objetivo es presentar resultados de índice de cosecha para diferentes híbridos de maíz al sur de Rumania en el período 2012-2014.</p>	<p>La experimentación ha dado como resultados promedio de índice de cosecha en un intervalo de 0.20 a 0.56, más frecuentemente entre 0.3 y 0.5. Cuando las condiciones climáticas son favorables entonces los valores de índice de cosecha son más altos que en condiciones desfavorables.</p>
<p>Olivera, N. T., Manrique, O. B., Masjuan, Y. G. & Alega, A. M. G. (2016)</p>	<p>El propósito del análisis se fundamentó en realizar la simulación en AquaCROP de la cobertura foliar (CF), la biomasa seca aérea (BSA) y el balance hídrico en el suelo (CHS) en el cultivo del frijol. El área donde se efectuó la investigación consistió en una parcela conformada por 9 surcos de 0.8 [m] de ancho por 100 [m] de largo.</p>	<p>Las variables estudiadas mediante AquaCROP referentes a CF, BSA y CHS tuvieron similitud a los valores observados, ya sea de forma tendencial o en términos absolutos. Se concluyó que existe confiabilidad entre los resultados modelados con los observados.</p>
<p>Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A. & Ibáñez-Castillo, L. A. (2016)</p>	<p>En este estudio se empleó el modelo CROPWAT con el fin de simular las necesidades de riego y el descenso del rendimiento del banano, pero especificando la falta de riego por medio de tres casos de precipitación: húmedo (20%), normal (50%) y seco (80%).</p>	<p>De acuerdo a los resultados que se obtuvieron, la evapotranspiración se demanda en los meses de marzo-agosto para la estación seca, mientras que, para la estación húmeda se requiere en los meses de julio-agosto. La disminución del rendimiento del cultivo en estación seca fue de 0.9% en húmedo, 5 a 15% para normal y 25 a 30% para seco; en tanto que, para la estación húmeda se obtuvo 2% en húmedo, 1 a 3% para normal y 5 a 10% para seco.</p>
<p>Marcos, B., Martínez, A., López, G., López, C. & Arteaga, T. (2016)</p>	<p>Este artículo se fundamenta en la importancia de adquirir información de carácter cuantitativo sobre la fijación de carbono en tres especies nativas del maíz: negro, amarillo, blanco y cacahuacintle, para tres tipos de ambientes: montaña, valle y planicie.</p>	<p>Por medio de cálculos estadísticos se determinó que la concentración de carbono entre las distintas especies es diferente, para el caso del maíz amarillo se registró el valor más alto, mientras que para el negro y el cacahuacintle se obtuvieron valores bajos.</p>

TABLA 2.7 Continuación

Espadafor, M., Couto, L., Resende, M., Henderson, D. W., García-Vila, M. & Fereres, E. (2017)	La calibración y la validación del modelo sobre el cultivo de frijoles secos fueron importantes para el presente estudio, se recurrió a datos experimentales realizados hace 40 años en Davis, California.	Los resultados arrojaron rangos de rendimientos del frijol seco, comprendidos entre 1 a 3.5 [ton/ha] e inclusive valores menores a 1, es decir, las predicciones de estos rendimientos fueron satisfactorias. Se obtuvo un RMSE de 0.16 [ton/ha] y el índice de Willmott (d) de 0.978.
González-Robaina, F., Delgado-Acosta, R., Díaz-Pérez, Y., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., Cid-Lazo, G. (2018)	La investigación se basó en calibrar y validar el modelo de sorgo a través de AquaCROP tomando en cuenta como tipo de suelo el ferralítico rojo. Los datos se obtuvieron de las observaciones que se realizaron en base a experimentación.	Las deducciones del rendimiento del cultivo de sorgo fueron alentadoras ya que el valor resultante es de 0.5 [ton/ha] para la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), un índice de Willmott (d) de 0.95 y la eficiencia del modelo correspondiente a un 0.80.

Elaborado por: Andrea Abarca

En síntesis, y de acuerdo al estudio realizado por los autores Morla y Giayetto (2012) en Argentina; Capa-Morocho, Rodríguez-Fonseca y Ruíz-Ramos (2012) en España; Flores-Gallardo, Ojeda-Bustamante, Flores-Magdaleno, Sifuentes-Ibarra, Mejía-Sáenz (2013) en México; y, Vanuytrecht, Raes, Steduto, Hsiao, Fereres, Heng, García-Vila, Mejias (2014) en Bélgica, es posible afirmar que estas 4 investigaciones son las que mayor relación guardan en cuanto a la temática que se va a desarrollar en el presente documento, como lo es la aplicación del modelo AquaCROP en las provincias de Guayas y Los Ríos, y el respectivo análisis del rendimiento del cultivo de maíz duro seco.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP

3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS PARA LA CALIBRACIÓN

3.1.1.1 Los Ríos

La Provincia de Los Ríos se encuentra en la región costa de la República del Ecuador, específicamente en el centro del país. La capital administrativa definitiva de la provincia mediante decreto se instauró en la ciudad de Babahoyo, sin embargo, la ciudad de Quevedo constituye la urbe con mayor población y área de la provincia. Los límites provinciales son: al Norte con la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, al Sur y Oeste con la provincia del Guayas, al Este con las provincias de Cotopaxi y Bolívar, y al Noroeste con la provincia de Manabí. Entre las actividades más importantes de Los Ríos se encuentra la ganadería, industria y agricultura. Esto, implica que esta provincia se convierta dentro de pocos años en uno de los centros administrativos, económico-financieros y comerciales más importantes de la región y del país (GADP Los Ríos, 2012).

3.1.1.1.1 Geología y Geomorfología

La geología que presenta la Provincia de Los Ríos está conformada de dos maneras, por un lado, está el sector litoral ubicado en la cuenca del río Guayas donde la presencia de depósitos aluviales y rocas intrusivas (en su mayoría del cuaternario) son importantes, y por otro se tienen las estribaciones de la cordillera de Los Andes con formaciones de rocas intrusivas. Debido a las vertientes erosivas que provienen de Los Andes y las condiciones climáticas a lo largo del tiempo en el lugar, se ha producido un modelamiento de la superficie del suelo provocando el origen de valles, relieve mediano y montañoso, planicies, cañones. Además de

bancos y diques aluviales, cauces abandonados, colinas altas (GADP Los Ríos, 2012).

3.1.1.1.2 Hidrografía

La superficie total de la Provincia de Los Ríos se ubica en la parte central de la cuenca del río Guayas, abarcando un área de aproximadamente 7205.3 [km²], representando un 22.4% con respecto a la superficie total de la cuenca. Entre las subcuencas que se derivan de la del río Guayas se tienen a la subcuenca del río Daule, la subcuenca del río Vinces, la subcuenca del río Babahoyo, la subcuenca del río Macúl y la subcuenca del río Juján; por esta razón, se considera un territorio privilegiado en cuanto a recursos hídricos (GADP Los Ríos, 2012).

FIGURA 3.1 Ubicación de la Provincia de Los Ríos



FUENTE: Fernandes, 2017

3.1.1.1.3 *Altitud y Clima*

La altitud se divide en tres categorías: media, máxima y mínima, en el caso de la Provincia de Los Ríos presenta altitudes de 30 msnm, 500 msnm y 6 msnm, respectivamente (GADP Los Ríos, 2012). El clima de la provincia es bastante homogéneo, sin embargo, únicamente existen variaciones en el extremo Noreste, en el cantón Valencia. Este último, tiene clima *tropical megatérmico húmedo*, en el cual se ha determinado que se produce un máximo lluvioso y una estación seca muy clara. En el extremo sureste, cantón Urdaneta, se tiene clima *tropical megatérmico semi-húmedo* donde existe un evento máximo lluvioso y un evento seco marcado. Cabe destacar también la presencia de clima *ecuatorial mesotérmico semi-húmedo* en las zonas altas de la provincia, el cual presenta únicamente dos eventos lluviosos entre los meses de febrero a marzo y de octubre a noviembre, especialmente en los cantones Rocafuerte y Montalvo. (GADP Los Ríos, 2012).

3.1.1.1.4 *Temperatura y Precipitación*

La temperatura anual de la provincia varía en las zonas cercanas a las estribaciones de la cordillera de Los Andes, que corresponden a las estaciones frías con valores de temperatura que se encuentran entre los 16 y 18 [°C], mientras que, en la mayor parte de la provincia las temperaturas anuales que se presentan son superiores y varían entre los 24 a 26 [°C] (GADP Los Ríos, 2012). La precipitación anual que se produce en Los Ríos, fluctúa en el rango de 1250 [mm] hasta los 3000 [mm]. En tal efecto, se han registrado precipitaciones anuales medias, bajas y altas por toda el área. Las precipitaciones medias anuales se encuentran entre los 1750 [mm] y los 2500 [mm], mientras que las precipitaciones anuales bajas varían entre los 1250 [mm] a 1750 [mm] y, las precipitaciones altas oscilan entre los 2500 [mm] hasta los 3000 [mm], de acuerdo a lo estipulado en el *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Los Ríos* (GADP Los Ríos, 2012).

3.1.1.1.5 *Suelo*

Existe una diversidad de suelos en la Provincia de Los Ríos, cada uno de los cuales se diferencian por las características taxonómicas propias de cada uno. La

formación de los mismos se atribuye a los cauces de los ríos presentes en la zona provocando que la mayoría de los suelos sean fértiles debido a la presencia de materiales minerales y orgánicos. De manera general, el 0.1% de los suelos pertenecen al grupo taxonómico *Dystropepts* de la orden *Inceptisoles*, éstos tienen la particularidad de poseer toxicidad aluminica pero además son de pH ligeramente ácido a neutro, suaves y permeables con texturas limosas y franco-limosas; el 13% de los suelos corresponden al grupo taxonómico *Haplustolls* de la orden *Mollisoles*, este tipo de suelo se lo prefiere para las actividades agrícolas por ser moderadamente profundos, más o menos bien drenados, de color marrón y su textura arcillosa. El 86.9% de los suelos presentes a lo largo de la provincia es de 3 ordenes: *Vetisoles*, *Alfisoles* y *Entisoles*. Los *Vetisoles* son suelos de color oscuro y de textura arcillosa, son de difícil laboreo, se hallan en áreas secas y presentan grietas si no se encuentran bajo regadío de cualquier tipo. Tienen pH neutro a ligeramente alcalinos. Los *Alfisoles* son de pH neutro, textura arcillosa, coloración pardo a rojizo y se agrietan con facilidad si no se encuentran debidamente regados. Finalmente, los *Entisoles* son de pH neutro a ligeramente alcalino, textura arenosa y fácil erosión eólica sin no se encuentran humedecidos. Aunque sus características son diferentes a las de los *Inceptisoles* y *Mollisoles*, son igual utilizados para agricultura (GADP Los Ríos, 2012).

3.1.1.1.6 Amenazas

Las principales amenazas de origen natural que se distinguen en la provincia en cuestión son: Las inundaciones, los movimientos de masas o deslizamientos y las sequías (GADP Los Ríos, 2012).

3.1.1.2 Guayas

La Provincia del Guayas tiene su ubicación en la zona suroeste de la República del Ecuador. Corresponde a una de provincias más importantes de la región costa del país. La ciudad de Guayaquil es la capital administrativa de la provincia y es el principal centro económico-comercial e industrial del Guayas. La provincia posee territorio continental e insular. Limita al Norte con las provincias de Manabí, Santo Domingo de los Tsáchilas y Los Ríos; al Sur con las provincias de El Oro, Azuay y el Golfo de Guayaquil; al Este con las provincias de Los Ríos, Bolívar, Chimborazo,

Cañar y Azuay; y al Oeste con las provincias de Manabí, Santa Elena y con el Océano Pacífico (GADP Guayas, 2016).

La industria constituye una de las actividades económicas de mayor interés en la provincia debido al puerto principal de Guayaquil. Además, en el Plan de Ordenamiento Territorial de la provincia del Guayas, se expresa que la provincia genera movimiento económico a través del turismo, la ganadería, la agricultura, la silvicultura y la pesca (GADP Guayas, 2016).

FIGURA 3.2 Ubicación de la Provincia del Guayas



FUENTE: Fernandes, 2017

3.1.1.2.1 *Geología y Geomorfología*

La geología de la provincia se ve afectada por la cordillera de Los Andes en la parte occidental, y por los depósitos aluviales cuaternarios que se presentan en la parte baja de la zona. En lo que refiere a las formaciones montañosas en el oriente de la provincia se evidencian depósitos volcánicos y sedimentos provenientes del cretácico superior (Espinoza, 2014). Otros tipos de formaciones que tiene la provincia son los valles y llanuras con presencia de materiales aluviales (GADP Guayas, 2016).

Las unidades geomorfológicas más representativas de la provincia del Guayas son las siguientes (GADP Guayas, 2016):

- Cordillera occidental de Los Andes
- Cordillera costanera (Chongón - Colonche)
- Relieves sedimentarios
- Piedemonte
- Relieves costeros
- Llanuras aluviales
- Llanuras fluvio-marinas

3.1.1.2.2 *Hidrografía*

El río Guayas es la principal fuente de recurso hídrico de toda la provincia. Este río aporta el 90% de la superficie total de la cuenca del Guayas, el 10% restante lo conforma una parte de la cuenca del río Jubones. Según la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA, 2016), existen cinco importantes sistemas hídricos con los que cuenta la provincia y que se mencionan a continuación:

- Sistema hídrico Zapotal (Subcuencas: Zapotal, Estero El Morro, Daular y Chongón)
- Sistema hídrico Guayas (Subcuencas: Daule, Macúl, Vincés, Babahoyo, Juján, Yaguachi)
- Sistema hídrico Taura (Subcuencas: Taura, Churute y Cañar)
- Sistema hídrico Naranjal-Pagua (Subcuencas: Naranjal, San Pablo, Jagua, Balao, Gala, Tenguel y Siete)

- Sistema hídrico Puná (Subcuenca: Isla Puná)

3.1.1.2.3 *Altitud y Clima*

La Provincia del Guayas presenta una altitud media que varía de 4 a 6 msnm en todo el territorio (GADP Guayas, 2016). Sus cotas extremas superior e inferior son 115 msnm y 64 msnm, respectivamente (IGM, 1988).

Las corrientes marinas y, en consecuencia, las masas de agua oceánicas como lo son la corriente fría de Humboldt (desde el Sur hacia el Norte de Sudamérica) y la corriente cálida de Panamá (desde el Norte hacia el Sur de Sudamérica, misma que desde su ingreso a la costa de Colombia, desde el golfo de Panamá, cambia su nombre a corriente cálida de El Niño), son las responsables del clima en la Provincia del Guayas y el litoral ecuatoriano. Se presentan dos estaciones: La lluviosa (invierno) y la seca (verano), entre los meses de diciembre a mayo y de junio a noviembre, respectivamente. Los tipos de clima más significativos de la provincia son: *Tropical megatérmico semi-húmedo* (52.6%), *tropical megatérmico seco* (37.2%), *tropical megatérmico semi-árido* (7.5%), *tropical megatérmico húmedo* (1.6%) y el *ecuatorial mesotérmico semi-húmedo* (1.1%) (GADP Guayas, 2016).

3.1.1.2.4 *Temperatura y Precipitación*

Las temperaturas anuales registradas en la provincia muestran cierta homogeneidad. No obstante, se alcanzan valores medios anuales iguales a 26.3 [°C] y 26.7 [°C], siendo las temperaturas anuales más altas del litoral. Por otro lado, se evidencian temperaturas mínimas anuales las cuales varían en el intervalo de 23.9 [°C] y 24.6 [°C] (GADP Guayas, 2016).

En cuanto a precipitación, se registra un valor medio anual de 223.7 [mm] de lluvia por año. En época de transición de eventos secos a lluviosos, se cuantifican precipitaciones medias anuales de alrededor de 35 [mm]. Por último, en períodos secos, los valores de precipitación anual media es cercano 5 [mm] de lluvia (GADP Guayas, 2016).

3.1.1.2.5 Suelo

El suelo sedimentario más reciente se debe a la influencia que tiene el río Daule sobre las estribaciones al Este de la cordillera de Los Andes, mientras que, en el Oeste se localizan suelos sedimentarios más antiguos. En la zona Norte y Sur del Guayas existen suelos de tipo volcánico, la diferencia radica que en el Norte los suelos provenientes de ceniza volcánica son más recientes que en la zona Sur de la provincia.

Los suelos compuestos de material aluvial son característicos de los valles y llanuras, precisamente, por la presencia de dos afluentes del río Guayas, que son: Río Daule y Río Babahoyo. También hay evidencia, en las llanuras del valle aluvial, de suelos arcillosos, expansivos, profundos, con grietas y con hidroformismo, que se los identifica comúnmente en la época de verano. Los suelos con mayor porcentaje que se identifican en el sector pertenecen a la orden *Inceptisoles* con un 37.8%, los mismos que tienen origen volcánico; después le siguen los suelos de la orden *Entisoles* con un 13%, éstos no presentan perfiles de suelo bien determinados (los estratos que conforman el perfil, no son visibles); finalmente, con un 12% se encuentran a los suelos de la orden *Alfisolos*, este grupo taxonómico entra en la clase de suelos con horizontes de iluviación de arcillas con gran capacidad de saturación (GADP Guayas, 2016).

3.1.1.2.6 Amenazas

Las principales amenazas de origen natural que se distinguen en la provincia en cuestión son: las inundaciones por efecto del Fenómeno del Niño y las sequías (GADP Guayas, 2016).

3.1.2 CULTIVO: MAÍZ DURO

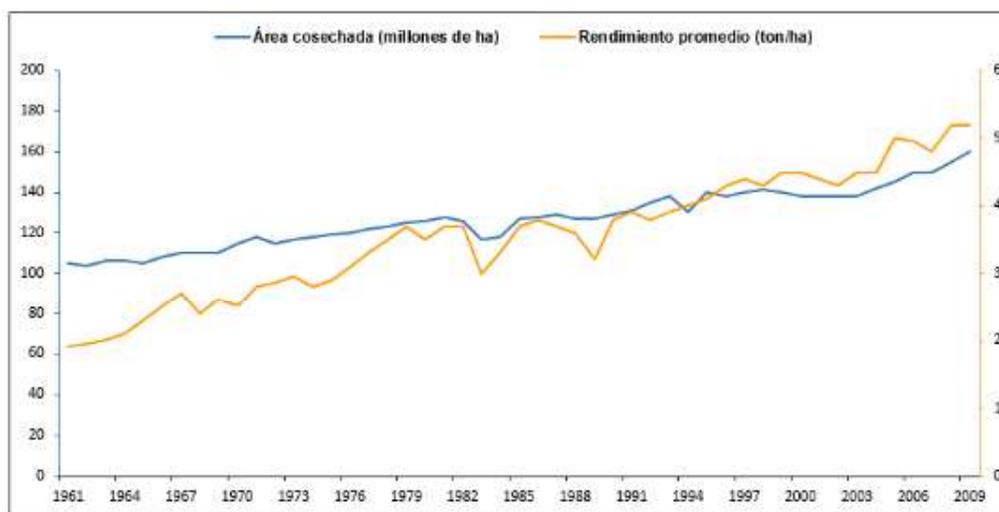
3.1.2.1 Generalidades

El maíz, cuyo nombre científico es *Zea mays L.*, representa uno de los cultivos de mayor producción a nivel mundial, ya sea por su área foliar o por la modificación de la ruta fotosintética que presenta (Arias, 2016). En lo que refiere a la modificación de la ruta fotosintética o también denominado *síndrome C₄*, es que se define como un mecanismo bastante eficiente para dar origen al intercambio de agua en forma

de vapor por el dióxido de carbono (CO₂) del aire. En tal virtud, las especies que poseen este síndrome presentan una mayor capacidad de producir mucha más materia seca por cada unidad de agua que se transpira desde la planta, lo que no sucede con aquellas especies que muestran una ruta fotosintética convencional (donde no existe intercambio) (Arias, 2016). Una ventaja del cultivo del maíz es que no importa si el producto final o mazorcas no están procesadas, de igual manera éstas pueden ser consumidas por los seres vivos.

Entre los principales derivados que se producen de la semilla del maíz, se encuentran: Aceites vegetales, jarabe de azúcar, biocombustible que se extrae del alcohol y materia prima para la elaboración de plásticos (Steduto *et al.*, 2012). Es importante hacer énfasis en que el área de cosecha que se ha consignado específicamente para el maíz y el rendimiento por cada hectárea sembrada ha ido en continuo aumento, así como se indica en la FIGURA 3.3, donde se determinó, por ejemplo, que para el año 2009 la productividad total del maíz tuvo un equivalente de 819 millones de toneladas (FAO, 2011).

FIGURA 3.3 Área cosechada a nivel global y rendimiento promedio hasta el 2009



FUENTE: Steduto *et al.*, 2012

Otra característica que tiene el cultivo en estudio, está dirigida en al uso de híbridos en la variedad de maíces que existen, pues estos híbridos son de alto rendimiento que progresivamente han ido en aumento desde el año 1930 (Steduto *et al.*, 2012).

Este cultivo ha sido predominante en toda América Central, en donde la siembra se realiza generalmente en colinas, pero en países como México o en lugares que se sitúan en ambientes tropicales de África y América, el proceso de siembra cambia. En estas últimas zonas, la siembra se realiza de manera intercalada con los frijoles o judías (Steduto *et al.*, 2012). Algunas zonas del mundo, la siembra se caracteriza por rotar cultivos. Esto consiste en sembrar maíz, y luego otro cultivo, ya sea este soya, trigo de invierno (en planicies), otros cereales como avena, cebada y arroz (Steduto *et al.*, 2012). En la actualidad, el maíz ocupa el tercer puesto en cuanto a producción mundial se refiere. Los cultivos que le anteceden son el trigo y el arroz, en primer y segundo puesto, respectivamente (Alaniz, 2016).

Por otra parte, el maíz duro constituye uno de los cultivos más importantes en el Ecuador. El fin de cultivar maíz duro es sostener las necesidades alimentarias de la población en general. Se utiliza el cultivo en estudio especialmente en granjas destinadas a crianza de animales para carne de consumo humano. Es importante mencionar que este cultivo aporta con el 2% del PIB agrícola a nivel nacional. De tal manera que alrededor de cien mil familias se ven beneficiadas con la actividad productiva (CGSIN, 2014). Además, en la región costa del país es donde existe la mayor cantidad de sembríos de maíz duro, pero en forma de monocultivo. Entre las principales provincias en donde se encuentra gran concentración del cultivo cosechado son: Los Ríos con 139.156,00 [ha], Manabí con 56.009,00 [ha], Guayas con 44.817,00 [ha] y Loja con 25.733,00 [ha] (CGSIN, 2014).

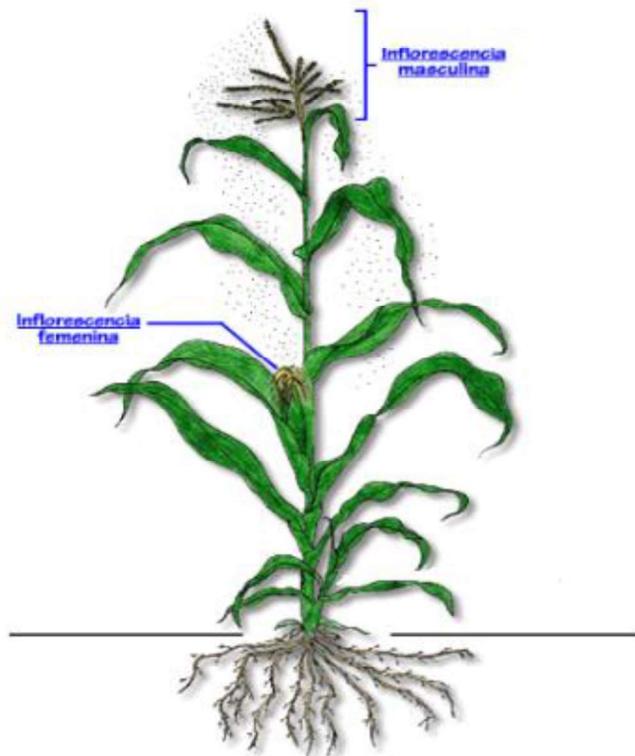
3.1.2.2 Botánica y genética

El maíz se describe como una planta de aspecto robusto donde su tallo tiene la particularidad de ser simple y firme, el mismo que puede alcanzar longitudes relativamente altas entre los 2 y 6 [m], presenta pocas ramificaciones, nudos, entrenudos y su médula es esponjosa. En cuanto a las hojas del maíz, se puede decir que crecen en los nudos a lo largo del tallo y de forma alterna; también se las identifica porque abrazan al tallo por medio de una vaina que rodea al entrenudo y protege la yema floral. La planta también presenta raíces primarias fibrosas y raíces adventicias o de anclaje, cuyas funciones están destinadas a conservar a la planta

erecta, además, estas raíces empiezan a nacer en los primeros nudos que se ubican por encima del terreno (Alaniz, 2016).

Otra característica propia del maíz, se trata de que es un cultivo monoico que presenta flores femeninas y masculinas, es decir, son unisexuales. La inflorescencia masculina, conocida también como panícula o espiga, se ubica en la parte superior de la planta, contiene un eje central que se ramifica a los lados (ramas laterales). Por otro lado, la inflorescencia femenina o mazorcas se las puede ver por las yemas axilares de las hojas, fundamentalmente son espigas cilíndricas que constan de un eje central donde van insertadas las espiguillas de par en par, una espiguilla es fértil, mientras que la otra es abortiva. Esta última inflorescencia puede producir en promedio un aproximado de 400 a 1000 granos en 8 a 24 hileras por cada mazorca (Alaniz, 2016).

FIGURA 3.4 Inflorescencia masculina y femenina del maíz



FUENTE: Medina, 2014

La clasificación botánica del maíz, según la National Center for Biotechnology Information (NCBI, 2015), se define de la siguiente manera:

- *Super Reino:* Eucaryota
- *Reino:* Viridiplantae
- *División:* Streptophyta
- *Clase:* Liliopsida
- *Subclase:* Commelinids
- *Orden:* Poales
- *Familia:* Poaceae
- *Subfamilia:* Panicoideae
- *Tribu:* Andropogoneae
- *Subtribu:* Tripsacinae
- *Género:* Zea
- *Especie:* Zea Mays L.

La genética del cultivo de maíz se ha visto influenciado mayormente por la hibridación. Por consiguiente, ha sido un aporte en investigaciones científicas donde se ha dado lugar al estudio del genotipo. Debido a que el maíz se caracteriza por ser una planta monoica (presenta una parte femenina y otra masculina), es posible realizar cruces para así introducir nuevos híbridos en el mercado. La razón por la cual se busca la hibridación se debe primordialmente a que se busca obtener rendimientos más altos dentro de la productividad. El estudio para generar especies híbridas, se basa en elegir una masa de plantas que sean capaces de soportar cambios en el clima, enfermedades o plagas, para mejorar propiedades y al cruzarlas con otras especies del mismo cultivo, se pueda aumentar aún más la eficiencia del cultivo inicial (Arias, 2016).

3.1.2.3 Crecimiento y desarrollo

El desarrollo del maíz radica en una serie de etapas con un orden específico irreversible que afectan a la generación de nuevos órganos, precisamente. El proceso de desarrollo empieza desde la etapa de germinación de la semilla hasta

la formación total del fruto y la consecuente floración. El ciclo de desarrollo se divide en dos grandes grupos (Fassio *et al.*, 1998), que son:

- Desarrollo Vegetativo (V)
- Desarrollo Reproductivo (R)

Según Arias (2016), las etapas antes mencionadas pueden agruparse en cuatro subetapas:

- Crecimiento de las plántulas (V_E y V_1)
- Crecimiento vegetativo (V_2, V_3, \dots, V_n ; donde n = número final de hojas que tiene la planta)
- Floración y la fecundación (V_T, R_0 y R_1)
- Llenado del grano y maduración (R_2 hasta R_6)

Las etapas fenológicas del cultivo del maíz, de acuerdo a la escala de Ritchie & Hanway (1982), se muestran de la siguiente manera:

TABLA 3.1 Etapas Vegetativa y Reproductiva del cultivo de maíz

ETAPAS	DESCRIPCIÓN
V_E	Se produce la absorción de agua por parte de la semilla. Emerge la radícula hasta que el coleoptilo realice su aparición en la superficie del suelo.
V_1	Se visualiza el cuello de la primera hoja.
V_2	Se visualiza el cuello de la segunda hoja.
V_3	Se presenta la tercera hoja, el ápice del tallo todavía está debajo del suelo, podrían formarse todas las hojas y espigas (depende de la planta).
V_n	La hoja <i>n-ésima</i> es visible, hasta este momento la planta puede tener aproximadamente entre 16, 18 a 22 hojas. Las barbas de los óvulos basales se desarrollan antes que las superiores y los órganos reproductivos se demoran en formarse durante 8 a 9 días.
V_T	Se conoce también como la etapa de panojamiento donde la última rama de la panícula se hace notable completamente. La planta ya ha alcanzado su altura definitiva.
R_0	Se produce la antesis o la floración masculina y existe evidencia de liberación del polen.
R_1	Ciertas barbas pueden observarse en el exterior de las vainas, suministran agua al polen para provocar su crecimiento y se produce la fertilización del óvulo. Los estigmas se hacen visibles.
R_2	Corresponde a la etapa de ampolla, el embrión aún se encuentra desarrollándose, pero la radícula, el coleóptero y la primera hoja embrionaria ya están formados. Los granos se proveen de cierta humedad de tal manera que el embrión puede ser visto. Ocurre a 10 o 20 días luego de la floración.

R₃	Corresponde a la etapa lechosa, es decir, los granos se proveen de un líquido lechoso de color blanco a causa del almidón. Las divisiones celulares del endosperma están prácticamente culminadas.
R₄	Corresponde a la etapa masosa o pastoso, los granos se alimentan de una pasta blanca producida por la acumulación de almidón en el endosperma. El embrión presenta un ancho similar al del grano.
R₅	Corresponde a la etapa dentada, aquí los granos tienden a secarse desde la parte superior, lugar en el cual se forma una capa blanca de almidón. Debido a que el genotipo obtiene una forma dentada, también lo hacen los granos.
R₆	Finalmente se alcanza la etapa de la madurez fisiológica, donde todos los granos de la espiga tienen la máxima acumulación de materia seca y se crea una capa negra en la zona donde el grano se inserta en la mazorca.

FUENTE: Fassio *et al.*, 1998; Arias, 2016

Elaborado por: Andrea Abarca

El peso de la semilla del maíz se considera relativamente grande, entre 0.2 a 0.3 [g] cada semilla, esto permite que se convierta en una importante reserva. De tal manera que las plántulas puedan emerger de forma temprana provocando un área foliar extensa. En el caso de variedades de maíz modernas, estas no suelen retoñar cuando se siembran con alta densidad, pero sí lo hacen aquellas que tienen una menor densidad y así adquieren alta productividad (Steduto *et al.*, 2012).

Se enfatiza que el desarrollo de las hojas depende en gran medida de la posición de los nudos a lo largo del tallo, además, la cantidad de nudos guarda relación con el número de hojas que se formen, para especies de alto rendimiento se ha establecido que la cantidad más común oscila entre 18 a 22 hojas (Rhoads & Bennett, 1990). Para cultivos que mantienen altos rendimientos presentan densidades mínimas iguales a 70.000 [plantas/ha], pero en el caso de las demás especies las densidades que indican se encuentran en un rango de 40.000 a 110.000 [plantas/ha]. En todo el tiempo en el cual se está produciendo el desarrollo del dosel, se estima que la tasa de crecimiento del mismo sea del 16% si las condiciones son favorables, sin embargo, para los demás cultivos, tanto la expansión de las hojas como el crecimiento del dosel son afectados por el estrés hídrico (Steduto *et al.*, 2012).

La profundización radicular diaria de la planta puede llegar a ser de 2.5 [m] en promedio si el suelo es bueno, para estas condiciones también se puede producir

un enraizamiento efectivo de 2.8 [m] de profundidad cerca de la etapa de maduración (Hsiao *et al.*, 1976). En zonas de clima frío, la profundidad de las raíces suele estar entre 1.5 a 2 [m] con una tasa de profundización bastante baja, ya sea por aspectos físicos (coloración, textura, humedad, penetrabilidad, porosidad, o químicos (capacidad de intercambio catiónico, pH o medida de acidez, conductividad eléctrica o salinidad) (Steduto *et al.*, 2012).

Finalmente, cabe indicar que el ciclo biológico de la mayor parte de especies modernas tarda entre 120 a 135 días en producirse, una vez más, si las condiciones son apropiadas. La duración desde la fase de emergencia hasta la floración se establece en un período de 65 a 70 días y el inicio de la senescencia del dosel se da a los 105 días (Steduto *et al.*, 2012).

3.1.2.4 Suelo

La adaptación del maíz sobre una variedad de suelos se considera bastante amplia, pues será viable obtener excelentes cosechas dependiendo de los cultivares que se utilicen y de las técnicas de cultivo que se practiquen, siendo favorables para la productividad del maíz (Deras, 2010). Este cultivo tiene la característica de ser una planta que obedece a un gran desarrollo de su sistema radicular, por este motivo, los suelos más eficaces para tener excelentes rendimientos son aquellos que presenten texturas medias (textura franca o franco-arcillosa), fertilidad alta, buen drenaje, sean planos o ligeramente quebrados y profundos, y capacidad de retener agua y absorber nutrientes (Lagos, 1982).

En suelos arcillosos, el rendimiento del maizal puede tener consecuencias negativas, esto se debe porque al ser un suelo pesado tiene gran capacidad de retención del agua por mucho tiempo que incluso puede llegar a inundarse. Para suelos arenosos, el problema se fundamenta en que son propensos a secarse o a retener poca humedad (Lagos, 1982). Acorde a la investigación realizada por la CGSIN (2014), se identificó y estableció las zonas más aptas, moderadas, marginales y no aptas para exponer los requerimientos del cultivo de maíz duro, así como se observa a continuación en la TABLA 3.2:

TABLA 3.2 Requisitos agroecológicos del maíz duro en el Ecuador Continental

FACTOR	VARIABLES	CLASES DE APTITUD AGROECOLÓGICA			
		ÓPTIMA	MODERADA	MARGINAL	NO APTA
Suelo	Pendiente	0 a 25%	25 a 50%	70%	> 70%
	Textura	Franco arcilloso, franco limoso, franco arcillo-arenoso, franco arcillo-limoso	Arcillo limoso, franco arcillo arenoso, franco limoso, franco arcilloso, arcilloso, arcillo arenoso	Arenoso franco	Arenosa media, arcilloso
	Profundidad	Profundo	Moderadamente profundo	Poco profundo	Superficial
	Pedregosidad	Ninguna	Pocas	Frecuentes	Abundantes
	Drenaje	Bueno	Moderado	-	Mal drenaje
	Nivel freático	Profundo	Moderadamente profundo	Poco profundo	Superficial
	pH	Ligeramente ácido-neutro	Ácido/ Moderadamente alcalino	Muy ácido	Alcalino
	Toxicidad	Ninguna	Ligera	Media	Alta
	M/O	Muy alto/Alto/Medio	Bajo	Muy bajo	-
	Salinidad	Ninguna/Ligera	Media	Alta	Muy alta
	Fertilidad	Alta	Mediana	Baja/Muy baja	-

FUENTE: CGSIN, 2014

Elaborado por: Andrea Abarca

3.1.2.5 Uso del agua

El uso eficiente del agua del maíz depende en gran medida de las condiciones climáticas de la estación (invierno o verano) que estén ocurriendo en el momento de la siembra, pues la demanda de evaporación que se produzca de la atmósfera representa una función importante para evaluar el suministro del recurso hídrico. Otras condiciones que determinan el uso del agua implican el tiempo del ciclo biológico del cultivo (etapas fenológicas propias de cada variedad cultivada) y el agua disponible en la localidad donde se encuentre el cultivo. El *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66* manifiesta que en circunstancias donde la distribución de agua es apropiada, entonces, la evapotranspiración estacional entra en un rango de 500 a 800 [mm], inclusive valores superiores a éste último. Por otro lado, la evapotranspiración estacional típica de un cultivo de ciclo medio de clima templado se aproxima a los 650 [mm] (Steduto *et al.*, 2012).

La posibilidad de que el adecuado uso del agua en el presente cultivo sea alto se debe principalmente porque tiene el síndrome C₄ (de Wit, 1958), es decir, a pesar de que se da una aportación mínima de la transpiración, la tasa de producción de la fotosíntesis es considerablemente elevada (Steduto *et al.*, 2012). En lo que respecta al aumento del dióxido de carbono atmosférico (hasta un valor de 520 [ppm CO₂]) y si las condiciones son las óptimas, el maíz tendrá una respuesta positiva, esto se evidencia a través del incremento del área foliar y de la producción de biomasa (Hsiao & Jackson, 1999).

3.1.2.6 Respuesta al estrés hídrico

El estrés hídrico se origina en circunstancias en las cuales se da por la falta, ya sea, de lluvia, de riego o por el agotamiento del agua almacenada en la zona del sistema radicular de la planta. En consecuencia, el proceso del maíz que se ve más afectado corresponde al crecimiento y expansión de las hojas que inclusive es el más sensitivo al hablar de los demás tipos de estrés (Bradford & Hsiao, 1982).

En el caso de un estrés hídrico leve que perdure por un largo transcurso de tiempo puede causar, en la fase vegetativa, una cobertura del dosel mínima. La situación se agrava aún más cuando el estrés comienza a ser fuerte, en vista de que la conductancia estomática disminuye y se produce una rápida aceleración de la senescencia de las hojas viejas. Con todas estas variantes, se presentaría una reducción de la transpiración y de la fotosíntesis del maíz duro, debido a la disminución del dosel o por el aumento de la senescencia y por el descenso de la conductancia estomática, afectando de manera directa a la reducción del rendimiento de la semilla ya que la tasa de producción de la biomasa también se vería perjudicada por todos los problemas que se suscitan en caso de estrés hídrico (Steduto *et al.*, 2012).

Adicionalmente, cabe denotar que otros agravantes que se originan por el aumento de la senescencia del dosel, se refiere a que la duración del mismo no sería normal causando, a su vez, que la duración del llenado del grano también se vea alterado, en otras palabras, habría una reducción de este llenado. De esta manera, el tiempo para alcanzar un índice de cosecha estaría limitado, impidiendo que llegue a su nivel máximo (Steduto *et al.*, 2012).

El estrés hídrico también muestra una importante desventaja en la reproducción de la planta del maíz, ya que como se sabe, ésta es monoica. El daño recae también sobre el crecimiento de los tallos, de las sedas y la fase de panojamiento, principalmente, porque el período de crecimiento se hace más lento, por ejemplo, se demora la emergencia de las sedas que crecen desde las hojas que recubren la mazorca y en el caso de la emergencia de la panoja se retrasa, pero no tanto como las sedas. Por causa de esta diferenciación en la manera en que se retrasa cada proceso de crecimiento de las sedas y de la panoja, implica un frenado de la polinización del cultivo con la consecuente reducción del rendimiento y la no formación de granos maduros (Duncan, 1975).

De manera general, se establece que el maíz duro es el cultivo más sensible bajo estrés hídrico en comparación con otros cultivos. Se ha llegado a la conclusión de que con un ajuste osmótico no es suficiente para prevenir la falta de agua en el maíz, pero si funciona en el algodón, el sorgo o el trigo. Además, una vez que se supera el estrés hídrico se hace más complicado suplir la pérdida en la productividad del maíz (Steduto *et al.*, 2012).

3.1.2.7 Rendimiento promedio

El continuo crecimiento de la población ha provocado que la demanda de varios productos agrícolas sea uno de los temas de mayor interés a nivel mundial, incluyendo las nuevas formas de alimentarse por parte de las personas y la necesidad de producir biocombustibles y biomateriales (Esposito *et al.*, 2015). Por este motivo, se prevé que para el año 2050 la tasa de aumento en el rendimiento del cultivo contribuya con el 80% del aumento estimado en la producción agrícola (Bruinsma, 2009).

En lo que consta del maíz duro, apunta a que su rendimiento ha ido en continuo crecimiento durante las décadas pasadas, esto se debe precisamente por el mejoramiento de la fertilidad, por considerar una densidad de siembra más alta, por obtener un desarrollo del dosel más óptimo y lograr que los ciclos biológicos de variedades que presentan maduración tardía sean de más larga duración. Los rendimientos promedios que se han obtenido en muchos países industrializados se encuentran en un rango de 3 a 10 [ton/ha], correspondiendo a Brasil y Estados

Unidos, respectivamente. En cambio, en países menos industrializados los rendimientos se hallan entre 1 a 2 [ton/ha]. Pero lo que se debe rescatar es la tendencia a elevar dichos valores conforme sigue el tiempo (Steduto *et al.*, 2012).

En el Ecuador se han hecho estudios sobre el rendimiento del maíz duro para la época de invierno y de verano durante los meses de julio a diciembre del año 2017. Los resultados muestran que, para la época de invierno, el rendimiento promedio a nivel nacional del maíz, tomando en cuenta 13% de humedad y 1% de impureza, fue de 5.51 [ton/ha], donde la Provincia de El Oro fue la que superó tal rendimiento con un valor de 7.63 [ton/ha], mientras que, la provincia que arrojó un valor más bajo fue Guayas con 4.50 [ton/ha] (Castro, 2017).

En cuanto a los resultados obtenidos en la época de verano, sugieren que el rendimiento promedio nacional, suponiendo 13% de humedad y 1% de impurezas, fue de 6.28 [ton/ha], en el cual la Provincia de Manabí logró el más alto rendimiento con un valor equivalente a 8.74 [ton/ha] y la Provincia del Guayas mostró el menor rendimiento igual a 4.43 [ton/ha] (MAG, 2018).

3.1.3 CICLOS DE SIEMBRA

En la Guía de *Buenas Prácticas Agrícolas para Maíz Duro* (Resolución DAJ-2014148-0201.0057), emitida el 28 de marzo de 2014 por la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD, 2014), del Ministerio de Agricultura - MAG, se estipula en el Capítulo V, del manejo agronómico del cultivo, Artículo 15., de las épocas de siembra, literal b:

“Se recomienda que el primer ciclo de siembra empiece con el inicio de la temporada de lluvias y el siguiente ciclo al final de la temporada lluviosa con el fin de aprovechar la humedad remanente en el suelo; condición que puede considerarse cuando la cantidad total de lluvia es mayor a la evapotranspiración, puesto que se puede aprovechar este excedente de agua.”

De este modo se tienen dos ciclos de siembra, uno para invierno y uno para verano. En el caso de la región costera del Ecuador, el invierno se considera desde el mes de diciembre hasta el mes de mayo. En tanto que el verano va desde el mes de junio hasta el mes de noviembre.

3.1.3.1 Cultivars

Como en todos los modelos de simulación de cultivo como DSSAT, CROPWAT, AquaCROP, entre otros, se requiere de una calibración a partir de datos reales de campo, el proceso de calibración consiste en obtener los cultivars o ficheros que poseen características particulares de cada variedad estudiada de un cultivo, donde se incluyen variables propias y que influyen considerablemente en los resultados finales de rendimiento cosechable y biomasa, como fecha de siembra, fecha de floración, fecha de madurez, fecha de senescencia, fenología de desarrollo, cobertura de dosel verde inicial, número de plantas por área cultivada, profundidad de la zona radicular y el índice de cosecha de referencia (Martínez, 2015).

Debido a que el maíz duro en la costa ecuatoriana, se siembra en dos ciclos, climáticamente opuestos, la calibración del modelo fue realizada para cada uno de estos. De modo, que se tiene un cultivar calibrado para ciclo de siembra húmedo (invierno) y un cultivar calibrado para ciclo de siembra seco (verano).

Lo fundamental en la calibración de los cultivars es tomar en cuenta las temperaturas base (mínima) y umbral (máxima), que para el caso del maíz duro son 8 y 36 [°C], respectivamente. El modelo de simulación de cultivo AquaCROP, incluye un cultivar de maíz por defecto que considera las temperaturas arriba mencionadas, y es a partir de este, que se van ajustando parámetros característicos de la variedad del cultivo en estudio (Martínez, 2015), de acuerdo a los datos de campo que proporcionó en este caso el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias - INIAP.

Los datos de campo referentes a cultivo y a tipos de suelo en las localidades costeras de San Carlos (Provincia de Los Ríos) y Balzar (Provincia de Guayas), con los que se llevó a cabo la calibración del modelo AquaCROP para maíz duro, fueron proporcionados por parte del INIAP.

En cuanto a los datos diarios de clima como radiación [MJ/m²], precipitación [mm], temperatura máxima [°C] y temperatura mínima [°C], se obtuvieron a partir de las mediciones realizadas en las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI, ubicadas en las zonas más cercanas a las

tierras cultivadas. Los datos correspondientes a Radiación solar se obtuvieron de la modelación meteorológica WRF.

El modelo AquaCROP sugiere que se calcule la evapotranspiración de referencia, ET_0 [mm/día], con el método de Penman-Monteith (Steduto *et al.*, 2012). En vista de que no se tenían disponibles los datos de velocidad del viento y de humedad relativa en las estaciones del INAMHI, la ET_0 se calculó por el método de Hargreaves. En cuanto a los datos de concentración anual de CO_2 , se consideraron los de la base de datos por defecto de AquaCROP, de la estación de Mauna Loa, Hawaii.

Se calibró en días calendario, aunque el programa también permitía hacerlo en grados día acumulados (GDD), esto era considerando tiempos térmicos. Se escogieron los años 2013 y 2014, mismos en los que se tenían disponibles datos de campo completos en cuanto a cultivo, suelos y meteorológicos.

La densidad de plantación para el cultivo de maíz duro en las localidades de San Carlos y Balzar fue de 6.2 [plantas/m²] o lo que es igual a 62000 [plantas/ha], generando de este modo un valor de 0.4% de cobertura de dosel inicial (CC_0).

Para San Carlos se tuvieron dos muestras de suelo, la INIAP SC203 e INIAP SC101 y para Balzar se tiene una sola muestra de suelo, la INIAP BZ105. En ambas localidades, se consideró que la profundización de las raíces alcanza los 1.2 [m] y esta se consigue justo cuando el cultivo ha alcanzado la máxima cobertura de dosel (CC_x), cuyo valor en porcentaje se consideró del 90% de acuerdo a las sugerencias realizadas en el *Estudio de la FAO: Riego y Drenaje N° 66* (Steduto *et al.*, 2012).

En el proceso de calibración de un modelo de simulación de cultivo hay que tomar en cuenta que la condición de desarrollo de las plantas es preferiblemente hacerla en seco, de acuerdo a la opinión de los expertos.

AquaCROP, permite elegir si la simulación se realizará en seco o calculando un valor de irrigación, ya sea ésta neta o de acuerdo a un calendario de riego conocido (dato de campo) o ajustado (de acuerdo a sugerencia en guías de cultivo).

Para el caso de la calibración llevada a cabo en la localidad de San Carlos, Provincia de Los Ríos, para el ciclo seco, el modelo simulará en secano, al igual que para ciclo húmedo en la localidad de Balzar, Provincia del Guayas.

3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP

La validación del modelo AquaCROP se realizó con datos climáticos procedentes de otras estaciones meteorológicas (Milagro, Guayas y Pichilingue, Los Ríos), otros perfiles edáficos (Balzar, Guayas y Quevedo, Los Ríos) de zonas independientes de aquellas utilizadas anteriormente en la calibración, ubicadas en las mismas provincias en las cuales se efectuó el modelo (Guayas y Los Ríos) pero con los cultivars tanto para el ciclo seco como húmedo. El grado de ajuste entre los resultados de las simulaciones y los valores observados en estudios realizados por el MAG, fue caracterizado básicamente mediante una comparación de los resultados obtenidos sobre rendimientos para el ciclo de verano y de invierno en ambas provincias, es decir, en las simulaciones del presente trabajo se utilizaron distintos tipos de suelo con distintas condiciones climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación) proporcionados por varias estaciones meteorológicas de tal manera que al verificar la similitud de los rendimientos calculados con los observados, entonces, los criterios asumidos son válidos y por ende la modelación en AquaCROP.

3.2.1 CICLO SECO

Para el caso del ciclo seco, el valor de rendimiento de acuerdo a la información obtenida del Sistema Nacional de Información del MAGAP, es de 6.26 [ton/ha] en el año 2013 para la Provincia de Los Ríos. Además, de acuerdo a la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) del 2013, se sabe que fue el año de mayor producción de maíz duro seco a nivel nacional. Y es con este valor que se procederá realizar la validación del modelo AquaCROP (CGSIN, 2014).

3.2.2 CICLO HÚMEDO

En lo que concierne a la validación del modelo para el ciclo húmedo se tomó como premisa la investigación referida al “Operativo de Maíz Duro Seco Invierno 2014”, en el cual el Sistema Nacional de Información del MAGAP, determinó que el

rendimiento correspondiente al ciclo húmedo del año 2014 y para la Provincia del Guayas, es un valor equivalente a 5.99 [ton/ha] (Monteros & Salvador, 2014). De igual manera, este valor servirá como referencia para poder corroborar la validación del modelo en el programa AquaCROP.

Se puede ver en la TABLA 3.3, un resumen de los rendimientos obtenidos por el MAGAP tanto a nivel nacional como a nivel de provincia para los ciclos de invierno y de verano.

TABLA 3.3 Rendimientos del maíz duro seco para los años 2013 y 2014

RENDIMIENTO MAÍZ DURO SECO [ton/ha]						
Año	2013			2014		
Institución	INEC	MAGAP		INEC	MAGAP	
Nivel	Rendimiento anual	Rendimiento Invierno	Rendimiento Verano	Rendimiento anual	Rendimiento Invierno	Rendimiento Verano
Nacional	3,23	5,12	5,64	4,05	4,97	5,13
Los Ríos	4,00	5,9	6,26	4,86	6,1	5,18
Guayas	3,78	5,17	5,81	4,77	5,99	5,15
Manabí	2,62	3,97	4,88	2,98	3,59	3,87
Loja	2,26	5,44	6,16	3,66	3,76	6,66

FUENTE: Monteros & Salvador, 2014; MAGAP-CGSIN, 2014

Elaborado por: Andrea Abarca

3.3 APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP

Una vez que el modelo AquaCROP, ha sido calibrado y validado para el cultivo de maíz duro para los dos ciclos de siembra, se realizaron las simulaciones de aplicación del mismo. Para esto se seleccionó un período de estudio de 25 años, comprendido entre 1981 y 2005. Se simuló en cada año, para cada ciclo de siembra, el rendimiento cosechable y la biomasa producida, sin ningún tipo de limitación salvo la relacionada a la genética vegetal de la variedad en estudio, las condiciones climáticas (lluvia, radiación y temperaturas: máxima y mínima), y edáficas de acuerdo a cada zona por provincia de la región costera ecuatoriana. Luego, se simuló el rendimiento en los años donde ocurrieron históricamente anomalías climáticas (Morla & Giayetto, 2012). En este período de estudio, se encuentran además de años secos, normales y húmedos, años en los cuales se

han presentado fenómenos ENSO (Oscilación del Sur El Niño). Los eventos ENSO son un fenómeno climático donde la zona oriental ecuatorial del océano Pacífico, se calienta. De acuerdo a la Información Proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador y Changnon (2000), los eventos de El Niño más importantes de acuerdo al período de estudio del presente análisis son:

TABLA 3.4 Registro de eventos extremos históricos

AÑO	EVENTO	INTENSIDAD
1982-1983	El Niño	Muy Fuerte
1986-1988	El Niño	Moderado
1990-1993	El Niño	Fuerte
1994-1995	El Niño	Fuerte
1997-1998	El Niño	Muy Fuerte

FUENTE: Changnon, 2000

Elaborado por: Andrea Abarca

Los fenómenos correspondientes a los años 1982-1983 y 1997-1998 son denominados Mega-Niño. Esto, debido a la intensidad con la que se presentaron en la zona costera del Ecuador, Perú y Colombia. En cuanto a eventos de La Niña de intensidad fuerte, que tuvieron ocurrencia en el presente período de estudio, se tiene que de acuerdo al INAMHI y a Changnon (2000), fueron en los años 1988-1989 y 1998-1999. Para este estudio, se considera únicamente la influencia de El Niño.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO

4.1.1 CICLO SECO

En el caso del ciclo de siembra seco (verano), se considera que éste inicia en el mes de junio hasta el mes de noviembre. Se tiene que, a partir de los datos reales de campo, la fecha de siembra fue el 25 de junio de 2013, en San Carlos, Provincia de Los Ríos.

La cantidad de precipitación desde el inicio del ciclo hasta el final del mismo fue de 8.9 [mm]. Lógicamente, este valor no lograría satisfacer el requerimiento de agua para que se dé el respectivo llenado del grano y lograr el dato de producción registrado en el experimento de campo del INIAP.

Mas, al tratarse de la semilla híbrida de alto rendimiento DK-7088, se sabe que ésta presenta en su genética la capacidad de adaptabilidad, alto potencial, entre otras propiedades. Parte de esta primera característica es que, en el caso de escasez de agua, su nivel de producción no se ve afectado. Se trata de una variedad cuyo rendimiento está determinado principalmente por la receptividad de radiación y alta temperatura. El relleno del grano bajo condiciones de sequía se realiza por el proceso de captación de CO₂ y luz solar, mediante las hojas de la planta. La forma de las hojas en esta variedad tiene la particularidad de ser más ancha con relación a otras variedades y su crecimiento se da en forma casi perpendicular (alrededor de 5° con respecto a la superficie) al tallo.

Para el cultivar del maíz duro en estudio (INIAP DK-7088) en este ciclo de siembra, se observó que el Índice de cosecha de referencia (HI_o) es del 50%. Luego de simular, el Índice de cosecha ajustado (HI_{adj}) fue de 50.5%. (Ver TABLA 4.1.)

TABLA 4.1 Calibración para el ciclo seco o de verano

CULTIVAR OBTENIDO	CALIB6A
ENSAYO	Único
LOCALIDAD	SAN CARLOS
MUESTRA DE SUELO	INIAP 203
SIMULACIÓN	AQUACROP
FECHA DE SIEMBRA	25/6/2013
DÍAS PARA LA EMERGENCIA	6
FECHA DE EMERGENCIA	1/7/2013
DÍAS PARA MAX CANOPY	62
FECHA DE MAX CANOPY	26/8/2013
DÍAS PARA LA SENESCENCIA	74
FECHA DE SENESCENCIA	7/9/2013
DÍAS DE SIEMBRA A MADUREZ	93
FECHA DE MADUREZ	26/9/2013
DÍAS DE SIEMBRA A FLORACIÓN	57
FECHA DE FLORACIÓN	21/8/2013
DURACIÓN DE FLORACIÓN [días]	10
RAÍCES [m]	1,2
DÍAS PARA MAX PROF RAÍCES	62
RENDIMIENTO REAL OBSERVADO [ton/ha]	3,96
BIOMASA OBSERVADA AL FINAL [ton/ha]	5,667
RENDIMIENTO SIMULADO [ton/ha]	3,957
BIOMASA SIMULADA [ton/ha]	7,836
ÍNDICE DE COSECHA AJUSTADO	50,5%
ÍNDICE DE COSECHA DE REFERENCIA	50%
CONDICIÓN INICIAL SUELO	49% TAW
COBERTURA DE DOSEL MÁXIMA	90%

Elaborado por: Andrea Abarca

En cuanto a la condición inicial de agua disponible en el suelo, se consideró que el TAW (total available water o agua total disponible, por sus siglas en inglés) estaba en un 49%, de acuerdo a las pruebas de ensayo y error realizadas para el ciclo seco. Se consideró como válido el cultivar CALIB6A puesto que, el valor de rendimiento simulado (3.957 [ton/ha]) fue muy próximo en relación con el valor del dato de rendimiento proporcionado por el INIAP (3.96 [ton/ha]), para el suelo INIAP SC203. La similitud de valores es del 99.92%.

Si se compara el valor de la biomasa producida en la simulación con el valor de la biomasa final registrada, este último es menor al primero en 2.169 [ton/ha], utilizando el suelo INIAP SC203. Para el caso del suelo INIAP SC101, la diferencia fue de 2.075 [ton/ha]. En este caso, el resultado obtenido a partir de la simulación en AquaCROP, se tiene un valor de biomasa sin pérdidas, es decir, este valor es total por lo que es mayor al dato real, el cual solo representa la biomasa al final del

experimento de campo (aquí, no se considera la pérdida a lo largo de la vida de cada planta y lo que cayó o no se tomó en cuenta al momento de la toma de datos).

4.1.2 CICLO HÚMEDO

El ciclo de siembra húmedo o de invierno, se considera desde el mes de diciembre hasta el mes de mayo. De acuerdo a los datos reales de campo, se sabe que la fecha de siembra fue el 13 de enero de 2014, para la localidad de Balzar, Provincia del Guayas.

A diferencia del ciclo de verano, el cultivar del ciclo de invierno del maíz duro en estudio (INIAP DK-7088) se comporta de manera diferente y esto se refleja en que el Índice de cosecha de referencia (HI_o) es del 35%. Luego de simular, el Índice de cosecha ajustado (HI_{adj}) generó un valor igual a la del HI_o .

Para la condición inicial de agua disponible en el suelo, se consideró que este se encontraba saturado de acuerdo a la estación invernal. De este modo y con la muestra de suelo disponible para la localidad donde se calibró en este ciclo, se obtuvo un único cultivar, el CALIB 9A. Con este cultivar y utilizando la muestra de suelo INIAP BZ105, el rendimiento simulado fue de 5.608 [ton/ha] y el rendimiento real de campo fue de 5.705 [ton/ha]. Los valores son equiparables un 98.3% entre sí. En este ciclo, el dato de campo de la biomasa no se registró por lo que únicamente se pudieron comparar rendimientos.

Pero, se puede apreciar que el valor simulado de la biomasa es de 16.023 [ton/ha]. Si, el valor de biomasa hubiera sido registrado, hubiese sido mucho menor al valor simulado al igual que sucedió en el ciclo de verano.

En la TABLA 4.2., se puede apreciar la información respecto al cultivar para el ciclo de siembra húmedo:

TABLA 4.2 Calibración para el ciclo húmedo

CULTIVAR OBTENIDO	CALIB9A
ENSAYO	1
LOCALIDAD	BALZAR
SUELO	INIAP 105
SIMULACIÓN	AQUACROP
FECHA DE SIEMBRA	13/1/2014
DÍAS PARA LA EMERGENCIA	6
FECHA DE EMERGENCIA	19/1/2014
DÍAS PARA MAX CANOPY	65
FECHA DE MAX CANOPY	19/3/2014
DÍAS PARA LA SENESCENCIA	77
FECHA DE SENESCENCIA	31/3/2014
DÍAS DE SIEMBRA A MADUREZ	90
FECHA DE MADUREZ	13/4/2014
DÍAS DE SIEMBRA A FLORACIÓN	60
FECHA DE FLORACIÓN	14/3/2014
DURACIÓN DE FLORACIÓN [días]	10
RAÍCES [m]	1,2
DÍAS PARA MAX PROF RAÍCES	65
RENDIMIENTO REAL OBSERVADO [ton/ha]	5,705
BIOMASA OBSERVADA AL FINAL [ton/ha]	-
RENDIMIENTO SIMULADO [ton/ha]	5,608
BIOMASA SIMULADA [ton/ha]	16,023
ÍNDICE DE COSECHA AJUSTADO	35%
ÍNDICE DE COSECHA DE REFERENCIA	35%
CONDICIÓN INICIAL SUELO	SATURADO
COBERTURA DE DOSEL MÁXIMA	90%

Elaborado por: Andrea Abarca

4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP

El proceso de validación del modelo consistió en observar el comportamiento de los cultivares de maíz duro seco calibrados y previamente obtenidos, pero en otras condiciones climáticas y edáficas. Hay que destacar que las condiciones iniciales para la validación fueron las mismas que para la calibración en los dos ciclos de siembra. Se realizó además una prueba adicional para comprobar que los cultivares tanto de invierno como de verano obtenidos, generan resultados de rendimiento similares a los obtenidos en el datos procedentes del levantamiento de información agrícola realizado por el MAG.

4.2.1 CICLO SECO

4.2.1.1 Consideraciones

Los datos climáticos tales como Precipitación [mm], Temperatura máxima [°C] y Temperatura mínima [°C] para la simulación en el proceso de validación provienen de la estación Pichilingue (M0006), Provincia de Los Ríos, en el año 2013.

El perfil edáfico utilizado, de 1.20 [m] de profundidad, fue de la localidad Cañalito, cantón Quevedo de la Provincia de Los Ríos. En este, de acuerdo a la información levantada por el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), se cultivaba maíz y cacao. La Clase Textural en todos los horizontes del suelo fue franco sin gravas.

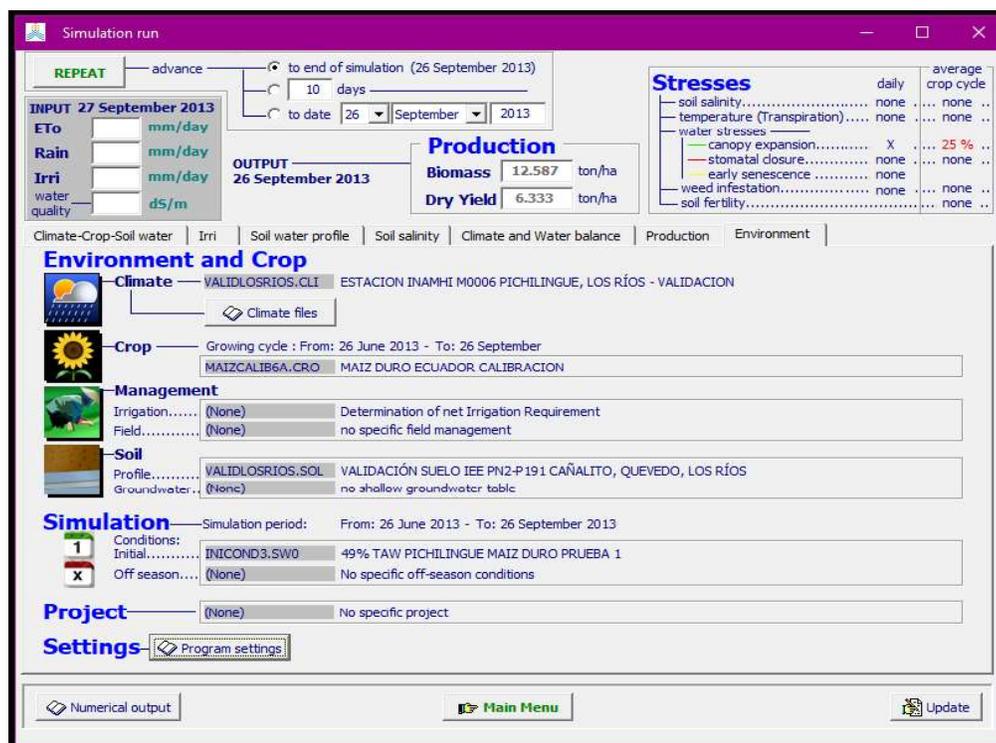
Las condiciones iniciales que se consideraron para este ciclo tanto en la calibración como en la validación es que por tratarse del ciclo de siembra de verano (junio-noviembre) el suelo se encuentra con apenas un 49% del TAW (total available water o agua total disponible, por sus siglas en inglés).

De acuerdo a la información de rendimiento por ciclo proporcionada por el MAG (TABLA 3.3), el valor para verano del 2013 para la provincia de Los Ríos fue de 6.26 [ton/ha].

4.2.1.2 Resultados

En la ventana auxiliar que se muestra en la FIGURA 4.1, correspondiente a Ambiente (*Environment*) del vínculo de Simulación en ejecución (*Simulation run*), se presenta el resumen de archivos con los cuales se realizó el proceso de validación para este ciclo:

FIGURA 4.1 Ambiente para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos



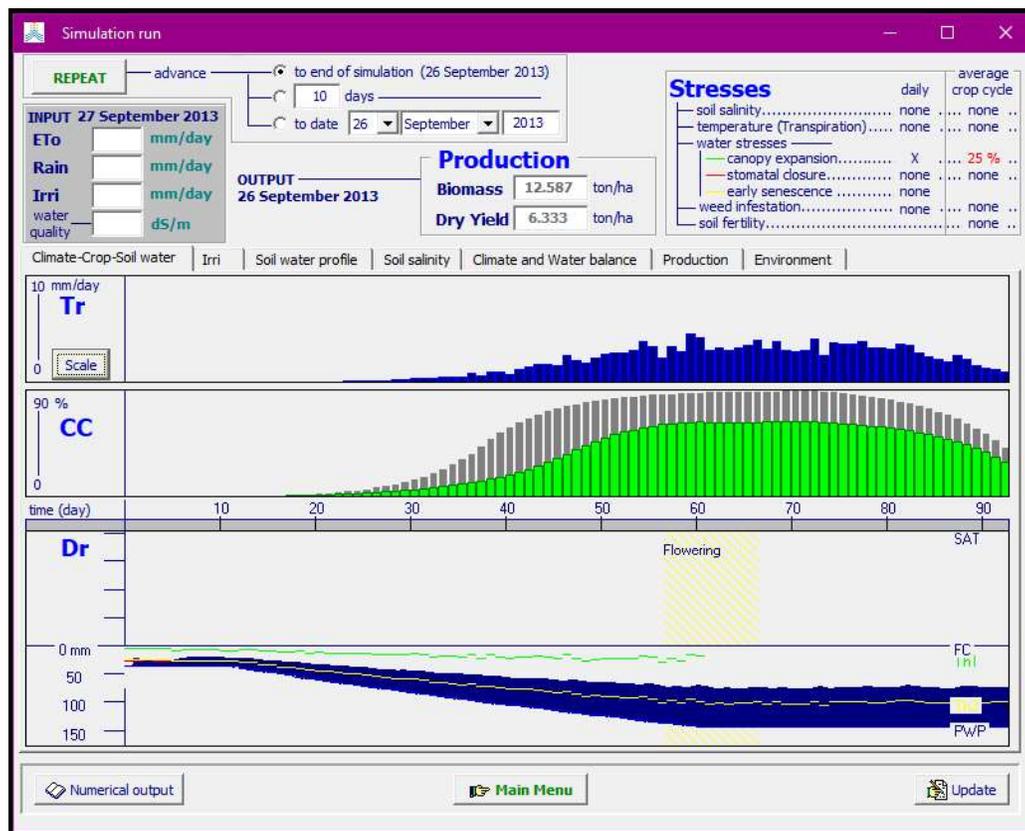
FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

En la parte aislada de Producción (*Production*) se presentan los resultados correspondientes a Biomasa (*Biomass*) y Rendimiento Seco (*Dry Yield*), dados en [ton/ha]. Para la variable de salida de interés de la simulación, el rendimiento, el valor obtenido fue de 6.333 [ton/ha] (ver FIGURA 4.2).

La ventana auxiliar correspondiente a Clima-Cultivo-Agua del suelo (*Climate-Crop-Soil Water*) de la FIGURA 4.2, presenta tres gráficas: Transpiración (T_r), Cobertura de dosel verde (CC) y Agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular (D_r). AquaCROP, determinó la cantidad de irrigación necesaria para que se obtenga dicho valor de rendimiento. Este se muestra en la ventana auxiliar de Balance de Clima y Agua (*Climate and Water Balance*) de la misma FIGURA 4.2.

FIGURA 4.2 Simulación para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos



FUENTE: FAO, 2017

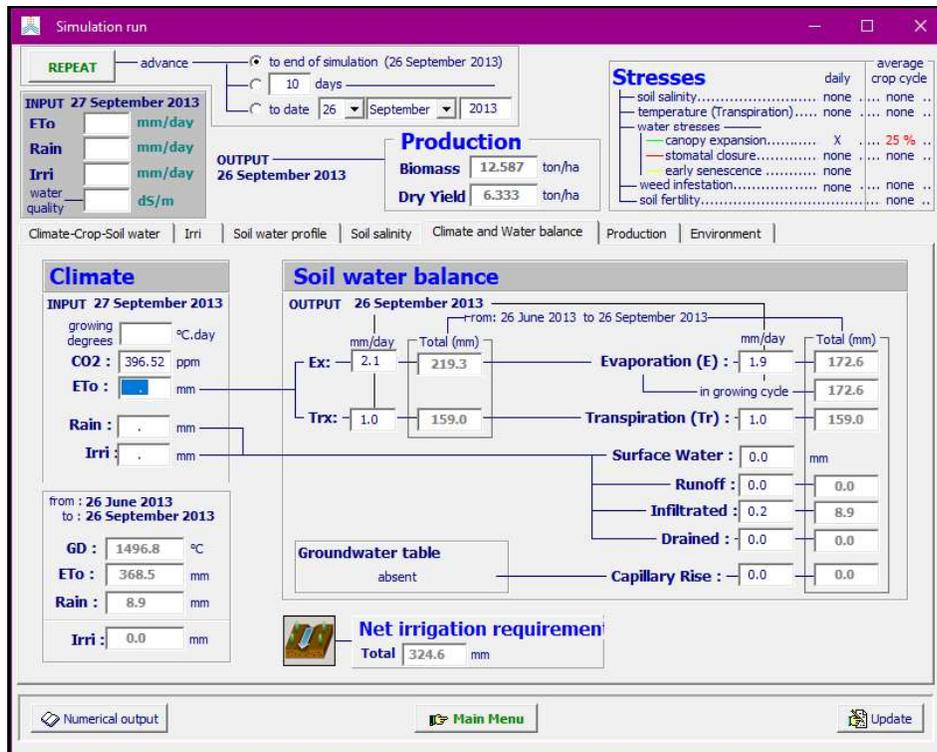
Elaborado por: Andrea Abarca

En cuanto al balance de agua en el suelo (*Soil water balance*) (ver FIGURA 4.3) se puede observar que la Evaporación (E) diaria fue de 1.9 [mm] a lo largo del ciclo y la Evaporación máxima total (E_x) fue de 291.2 [mm]. La Transpiración (T_r) diaria fue de 1 [mm] a lo largo del ciclo y Transpiración máxima total (T_{rx}) fue de 159 [mm]. Además, por día, se infiltraron 0.2 [mm] durante el ciclo.

En este balance, se puede observar (ver FIGURA 4.3) en la parte de clima (*Climate*), la concentración de CO_2 , misma que tiene un valor de 396.52 [ppm]. La cantidad de temperatura acumulada (GD) durante el ciclo es de 1496.8 [°C], la Evapotranspiración de referencia (ET_o) total fue de 368.5 [mm] y la Precipitación (*Rain*) en el ciclo sumó 8.9 [mm].

Como se dijo anteriormente, el valor calculado de agua para irrigación neta es de 324.6 [mm]. En la ventana auxiliar de Irrigación (*Irr*) se puede ver la gráfica correspondiente de la distribución de este valor a lo largo del ciclo, tal y como se indica en la FIGURA 4.4.

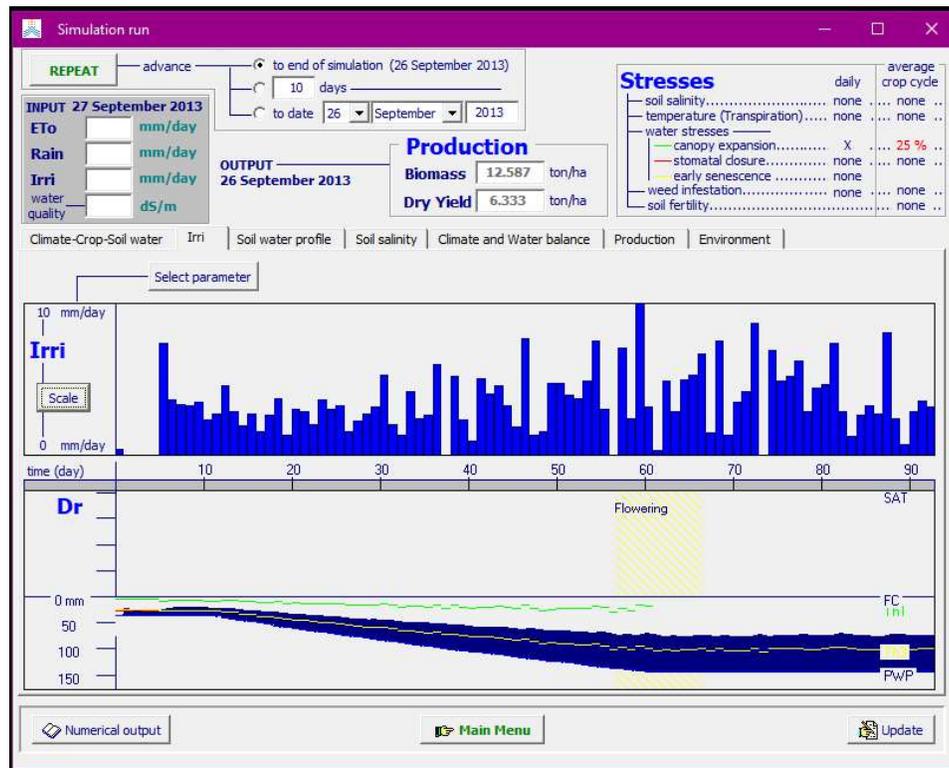
FIGURA 4.3 Balance de agua en el suelo y clima para ciclo seco de Los Ríos



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.4 Irrigación para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos

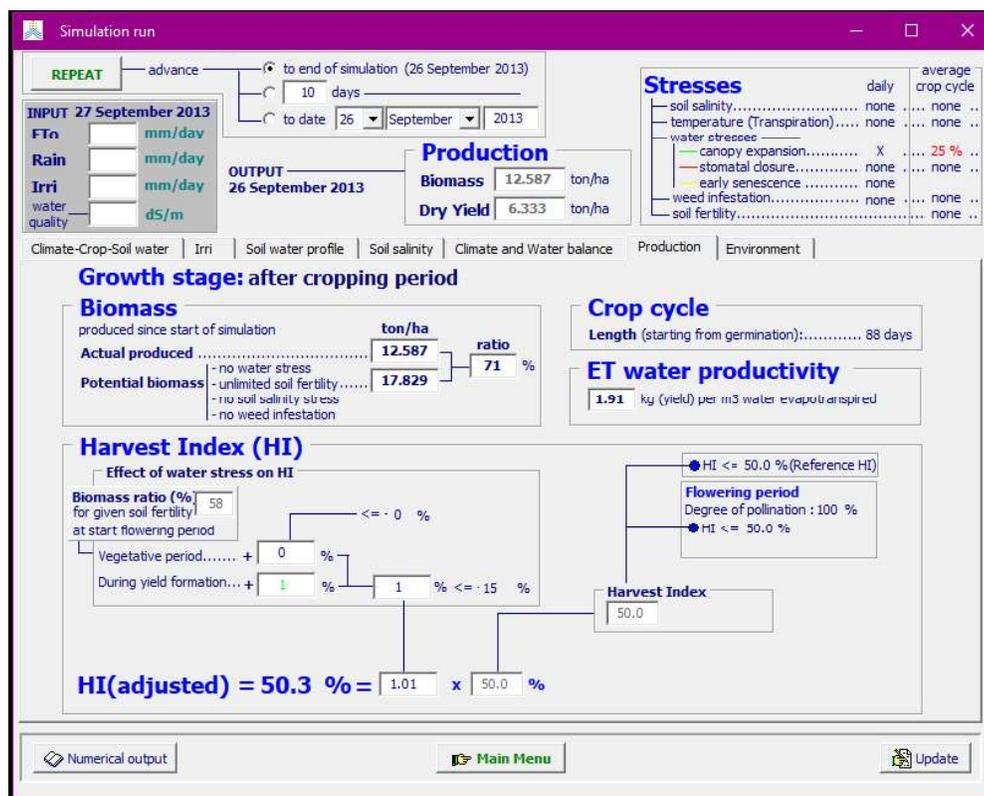


FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

En la ventana auxiliar correspondiente a Producción (*Production*), se pueden observar los ajustes que AquaCROP realizó para la obtención del Índice de Cosecha (*Harvest Index*). En este caso, se ajustó a un valor de $HI_{adj} = 50.3\%$.

FIGURA 4.5 Producción para ciclo seco de la Provincia de Los Ríos



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

Del mismo modo y la información que se obtuvo de la parte correspondiente a la cantidad de agua que se produce, se sabe que, de acuerdo a las condiciones climáticas y edáficas, se produjeron 1.91 [kg] de rendimiento por cada metro cúbico de agua evapotranspirada.

4.2.1.3 Análisis

El valor del rendimiento simulado (6.33 [ton/ha]) es ligeramente superior al valor de rendimiento real proporcionado por el MAG (6.26 [ton/ha]), es decir, existe una diferencia del 1.11% (0.07 [ton/ha]).

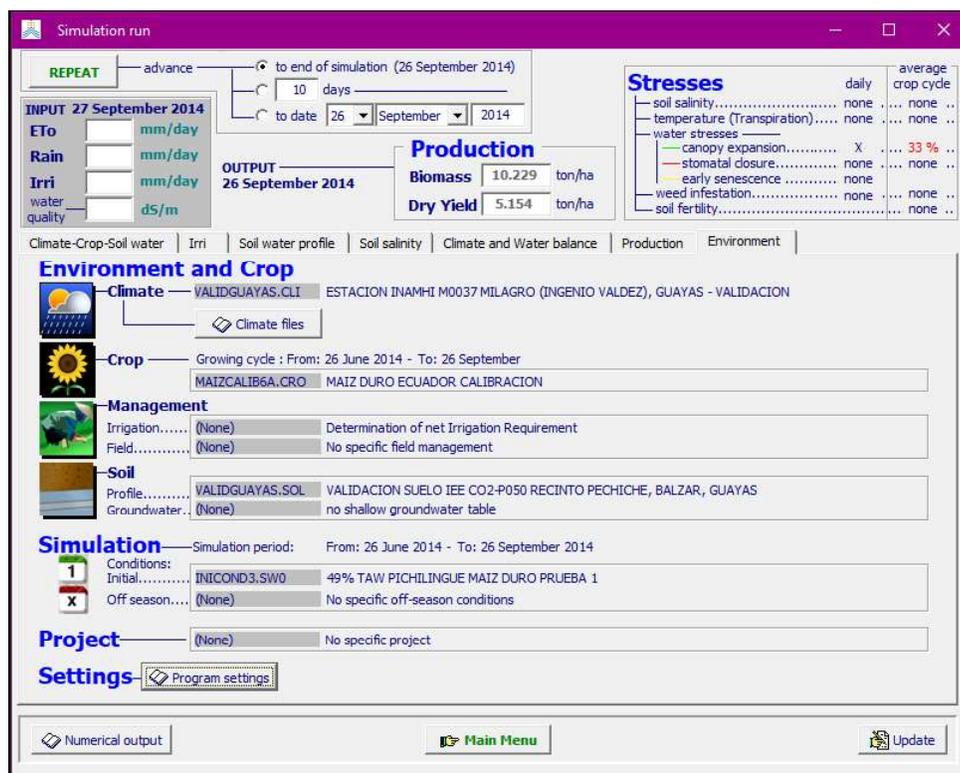
Hay que tomar en cuenta que, en este caso, la lluvia únicamente suma 8.9 [mm] y todo este valor se infiltró en el suelo. Por este motivo, se requiere de una dosis de riego que asciende a 324.6 [mm] para obtener esas 6.33 [ton/ha].

4.2.1.4 Prueba adicional

Corresponde a una simulación extra que se realizó bajo el escenario climático y edáfico de la Provincia del Guayas. En este caso, la estación meteorológica es la M0037, Milagro (Ingenio Valdez) y el perfil edáfico fue el de Recinto Pechiche, cantón Balzar. Las condiciones iniciales fueron iguales a las consideradas en la calibración como validación en Los Ríos (49% TAW en el suelo). El MAG registró para Guayas en el ciclo de siembra seco del 2014, un valor de 5.15 [ton/ha].

Se puede observar por medio de la FIGURA 4.6, el ambiente de simulación de la prueba adicional para el ciclo seco realizada en la Provincia del Guayas.

FIGURA 4.6 Ambiente para ciclo seco de la Provincia del Guayas



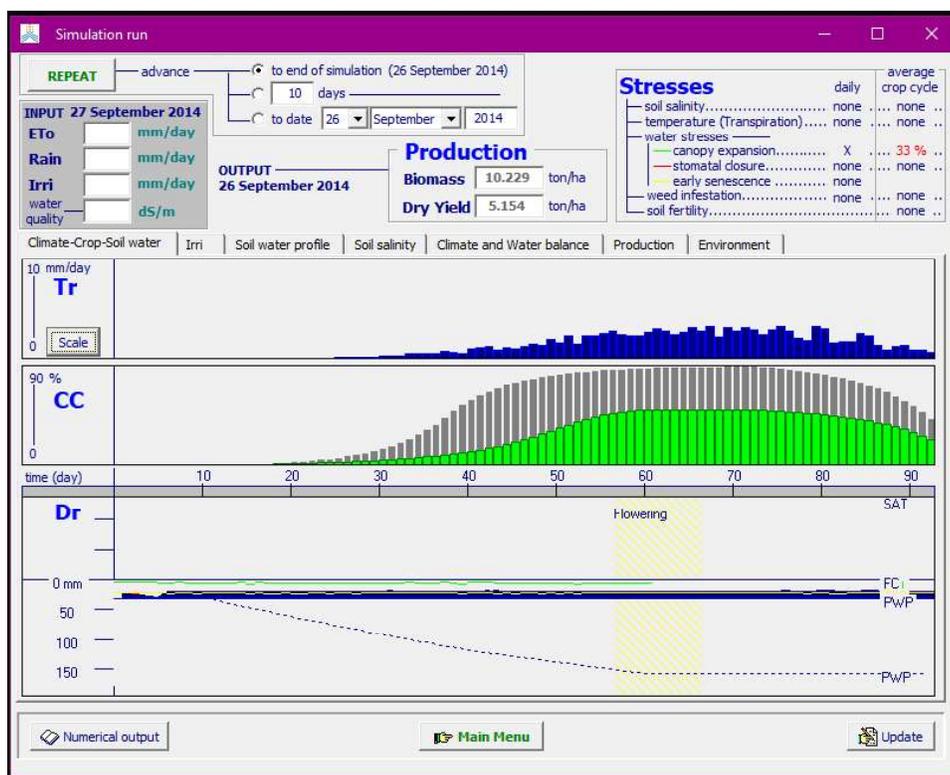
FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

Luego de la simulación realizada, se obtuvo un rendimiento de 5.154 [ton/ha] para el ciclo seco de 2014 en Guayas, como se puede ver en la FIGURA 4.7.

En este caso y de acuerdo a la FIGURA 4.8, la concentración de CO₂ en el ciclo respectivo, fue de 398.65 [ppm]. La cantidad de calor acumulada fue de 1604.8 [°C], la Evapotranspiración de referencia (ET_o) total fue de 366.2 [mm] y la Precipitación en el ciclo fue de 7.1 [mm]. Por este último valor y para obtener el rendimiento de 5.154 [ton/ha] es necesaria una dosis neta de riego de 340.3 [mm].

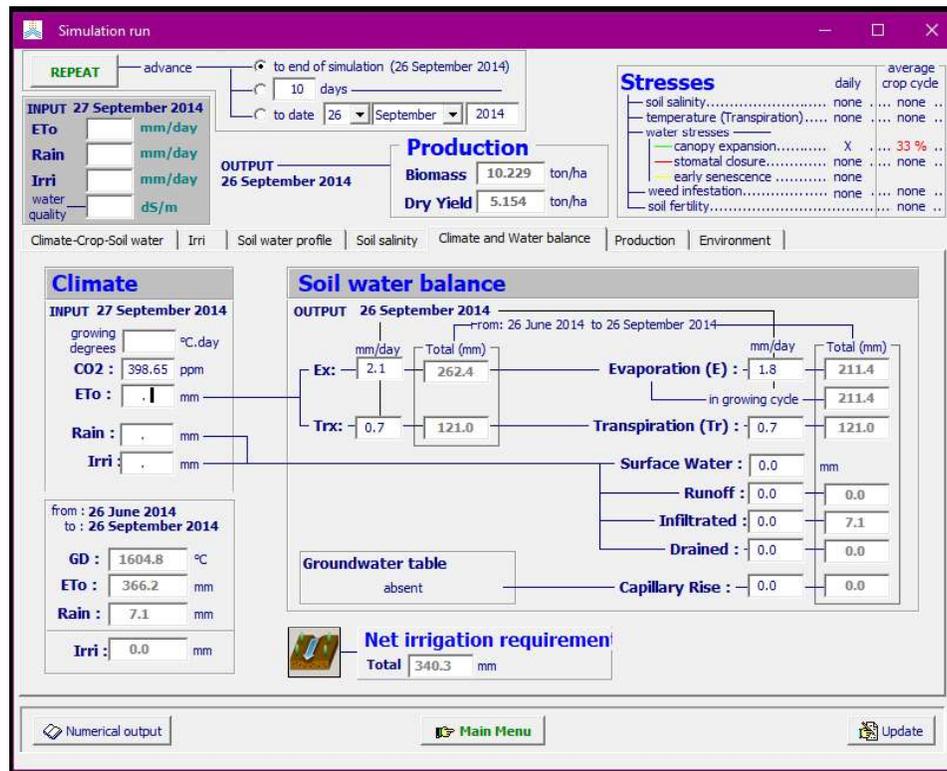
FIGURA 4.7 Rendimiento del cultivo para ciclo seco de la Provincia del Guayas



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.8 Resultados de Clima para ciclo seco de la Provincia del Guayas

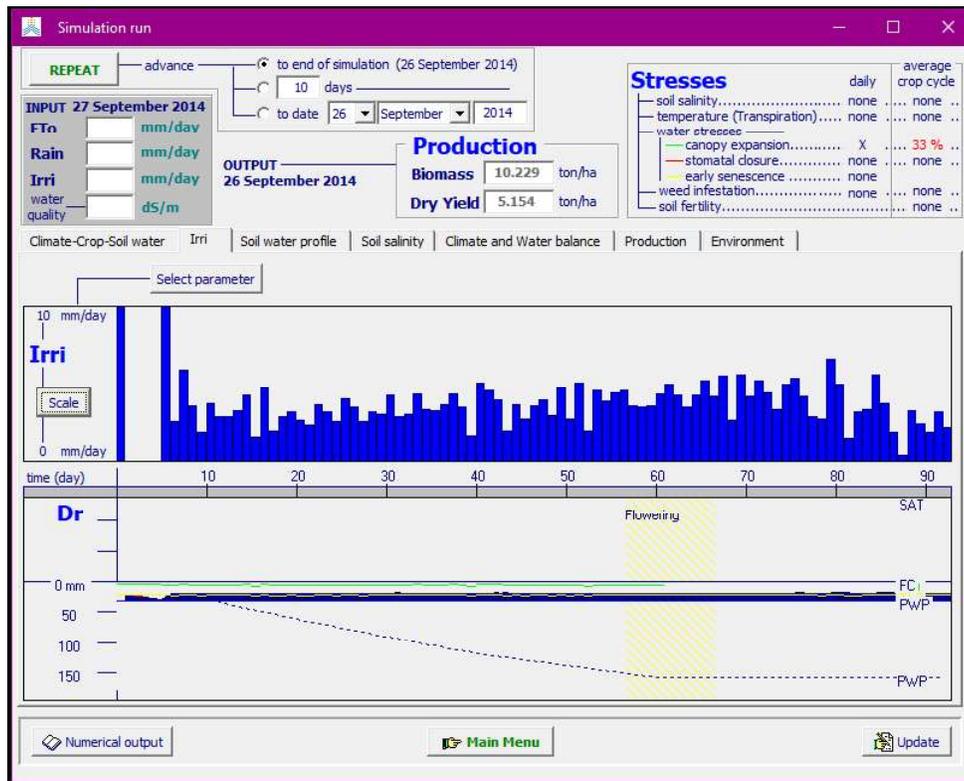


FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

La distribución de la irrigación se observa en la ventana correspondiente a Irrigación (*Irri*) de AquaCROP, como se puede visualizar en la FIGURA 4.9.

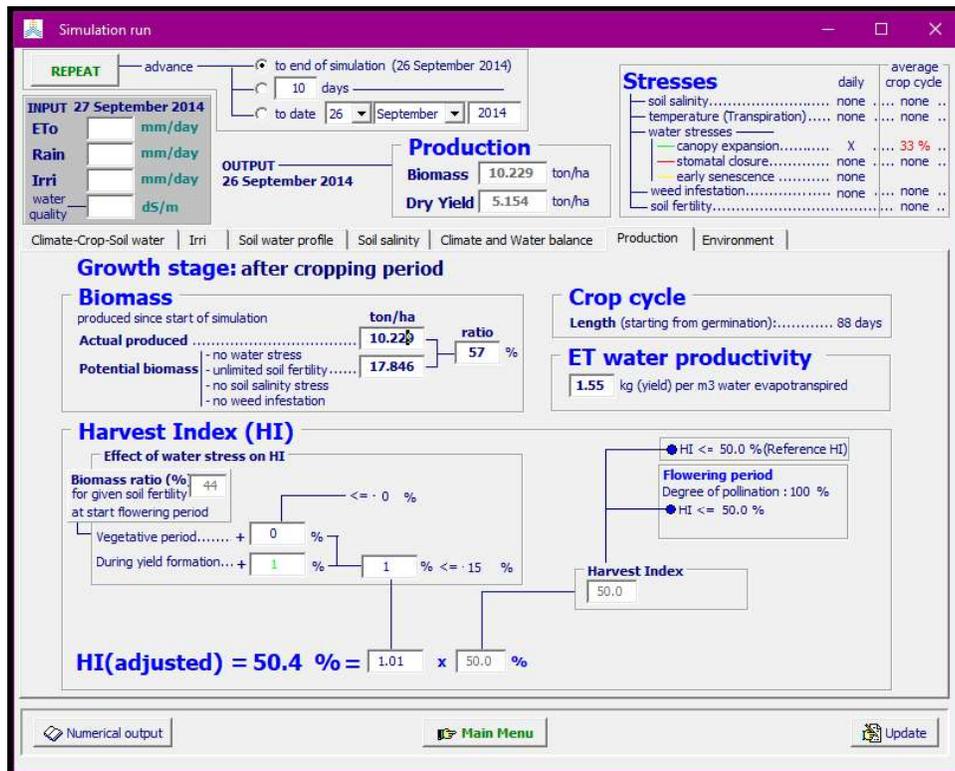
FIGURA 4.9 Irrigación para ciclo seco de la Provincia del Guayas



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.10 Producción para ciclo seco de la Provincia del Guayas



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

Finalmente, se tiene la ventana de Producción (*Production*) de la FIGURA 4.10, en la que se puede observar que en esta prueba el Índice de cosecha ajustado, HI_{adj} es igual a 50.4% y que la cantidad de rendimiento obtenida por metro cúbico de agua evapotranspirada fue de 1.55 [kg].

De este modo, se cuenta con 2 pruebas eficientes para validar el cultivar calibrado, bajo diferentes condiciones climáticas y edáficas. El resumen de la validación se presenta en la TABLA 4.3.

TABLA 4.3 Resumen de valores obtenido en validación del modelo AquaCROP:
Provincia de Los Ríos

VALIDACIÓN DEL MODELO AquaCROP														
PROVINCIA: Los Ríos														
ESTACIÓN: Pichilingue														
PERFIL DE SUELO: Cañalito														
VERANO														
Siembra:			25 de junio											
AÑO	Rendimiento INEC	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO ₂	GD	ET _o	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2013	6,26	6,333	12,587	50,30	396,58	1496,80	368,50	8,90	219,30	159,00	0,00	8,90	0,00	324,60
PRUEBA ADICIONAL: INVIERNO														
Siembra:			13 de enero											
AÑO	Rendimiento INEC	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO ₂	GD	ET _o	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2013	5,90	5,959	17,026	35	396,52	1629,40	374,90	1492,60	178,10	214,20	496,30	996,30	811,30	0,00

Elaborado por: Andrea Abarca

4.2.2 CICLO HÚMEDO

4.2.2.1 Consideraciones

Los datos climáticos tales como Precipitación [mm], Temperatura máxima [°C] y Temperatura mínima [°C] para la simulación en el proceso de validación provienen de la estación Milagro - Ingenio Valdez - (M0037), Provincia del Guayas, en el año 2014.

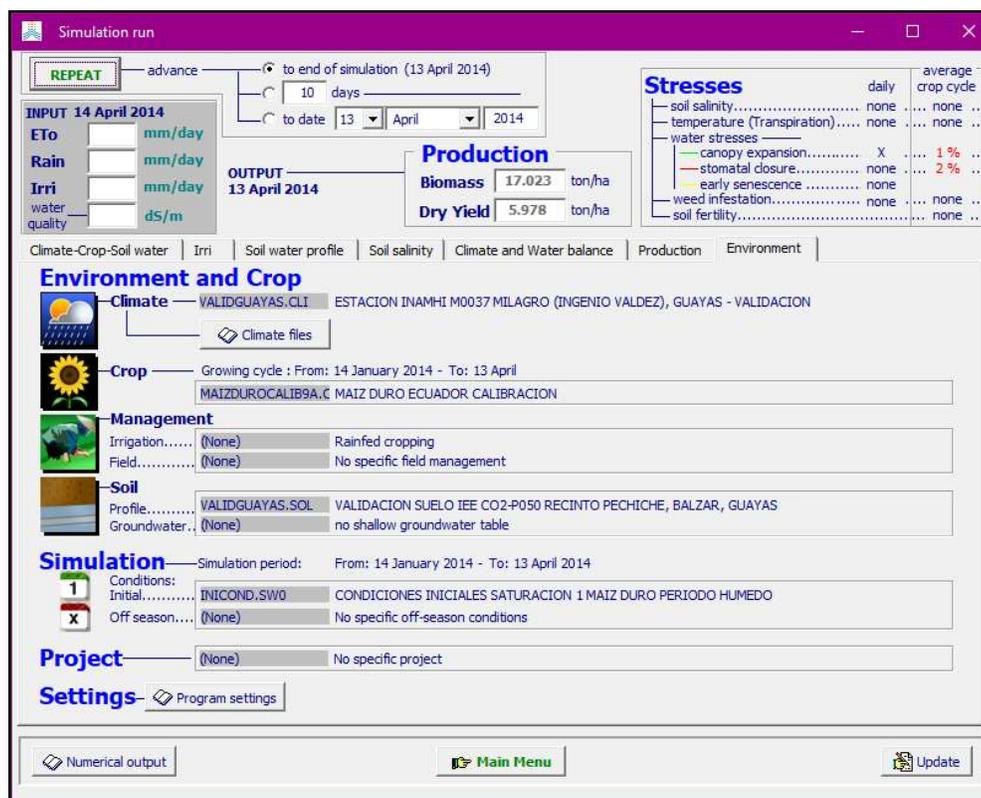
El perfil edáfico utilizado, de 1.20 [m] de profundidad, fue de la localidad Recinto Pechiche, cantón Balzar de la Provincia del Guayas. En este, de acuerdo a la información levantada por el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), se cultivaba maíz. La Clase Textural en el primer horizonte (0.22 [m]) fue franco sin gravas, el segundo y tercer horizonte (0.68 [m]) fue suelo franco arcilloso y en adelante, arcilla arenosa. Las condiciones iniciales que se consideraron para este ciclo tanto en la calibración como en la validación es que por tratarse del ciclo de siembra de invierno (diciembre-mayo) el suelo se encuentra SATURADO.

De acuerdo a la información de rendimiento por ciclo proporcionada por el MAG, el valor para invierno del 2014 fue de 5.99 [ton/ha].

4.2.2.2 Resultados

En la ventana auxiliar correspondiente a Ambiente (*Environment*) del vínculo de Simulación en ejecución (*Simulation run*), se presenta el resumen de archivos con los cuales se realizó el proceso de validación para este ciclo, así como se puede observar en la FIGURA 4.11:

FIGURA 4.11 Ambiente para ciclo húmedo de la Provincia del Guayas



FUENTE: FAO, 2017

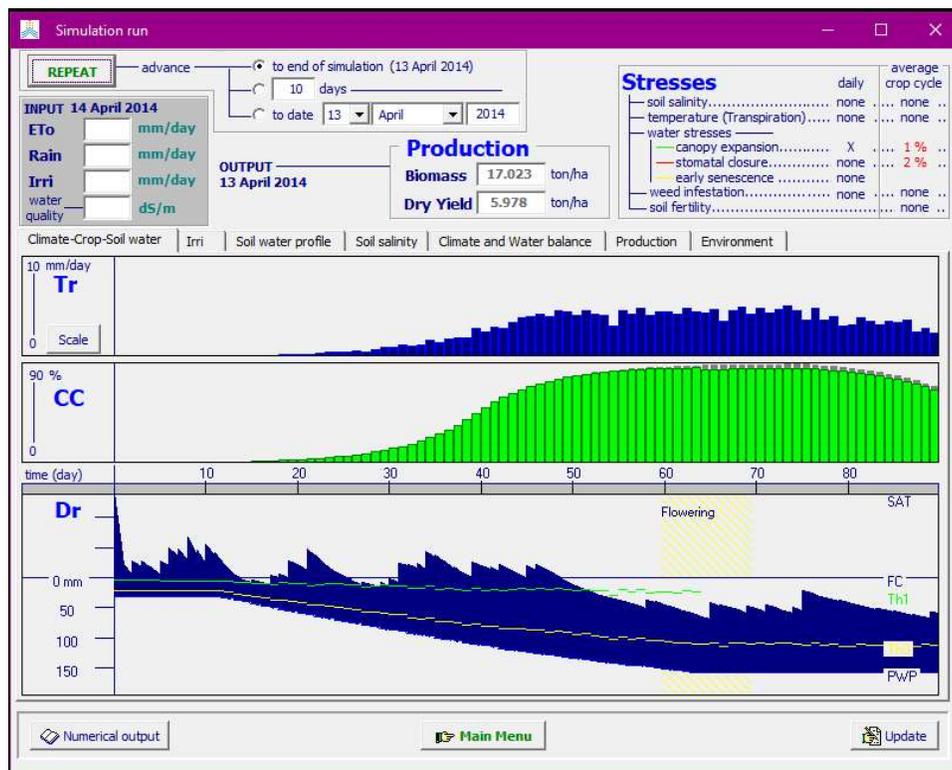
Elaborado por: Andrea Abarca

En la parte aislada de Producción (*Production*) se presentan los resultados correspondientes a Biomasa (*Biomass*) y Rendimiento Seco (*Dry Yield*), dados en [ton/ha]. Para la variable de salida de interés de la simulación, el rendimiento, el valor obtenido fue de 5.978 [ton/ha], según lo indica la FIGURA 4.12.

La ventana auxiliar correspondiente a Clima-Cultivo-Agua del suelo (*Climate-Crop-Soil Water*), presenta tres gráficas: Transpiración (T_r), Cobertura de dosel verde (CC) y Agotamiento de humedad del suelo en la zona radicular (D_r) (ver FIGURA 4.12).

AquaCROP, determinó la cantidad de irrigación necesaria para que se obtenga dicho valor de rendimiento. Este se muestra en la ventana auxiliar de Balance de Clima y Agua (*Climate and Water Balance*) (ver FIGURA 4.12).

FIGURA 4.12 Simulación para ciclo húmedo de la Provincia del Guayas



FUENTE: FAO, 2017

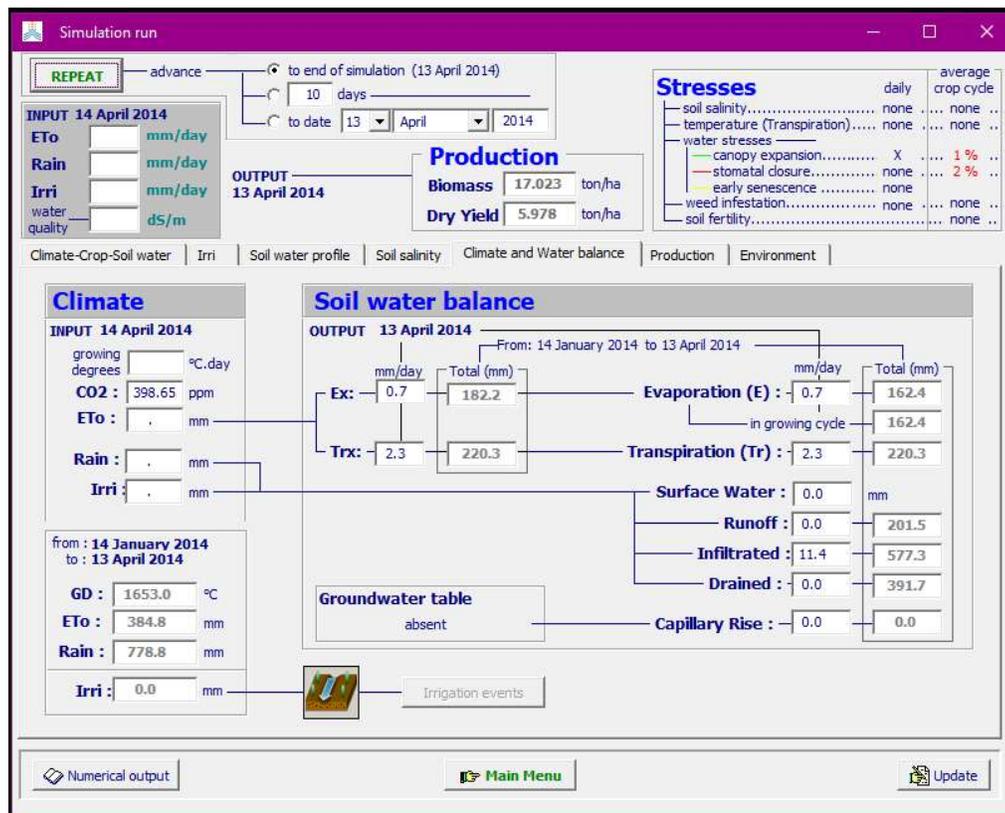
Elaborado por: Andrea Abarca

En cuanto al balance de agua en el suelo (*Soil water balance*) se puede observar, de acuerdo a la FIGURA 4.13, que la Evaporación (E) diaria fue de 0.7 [mm] a lo largo del ciclo y la Evaporación máxima total (E_x) fue de 182.2 [mm]. La Transpiración (T_r) diaria fue de 2.3 [mm] a lo largo del ciclo y Transpiración máxima total (T_{rx}) fue de 159 [mm]. Además, por día, se infiltraron 11.4 [mm] y el valor total fue de 577.3 [mm]. El valor de escorrentía superficial fue de 201.5 [mm] y drenaron 391.7 [mm].

En este balance, se puede observar en la parte de clima (*Climate*), la concentración de CO_2 , misma que tiene un valor de 398.65 [ppm]. La cantidad de temperatura acumulada (GD) durante el ciclo es de 1653 [°C], la Evapotranspiración de referencia (ET_o) total fue de 368.5 [mm] y la Precipitación (*Rain*) en el ciclo sumo 778.8 [mm], así como se encuentra establecido en la FIGURA 4.13.

En este caso, no fue necesario que AquaCROP calcule una dosis neta de riego porque la cantidad de lluvia es suficiente para producir las 5.978 [ton/ha].

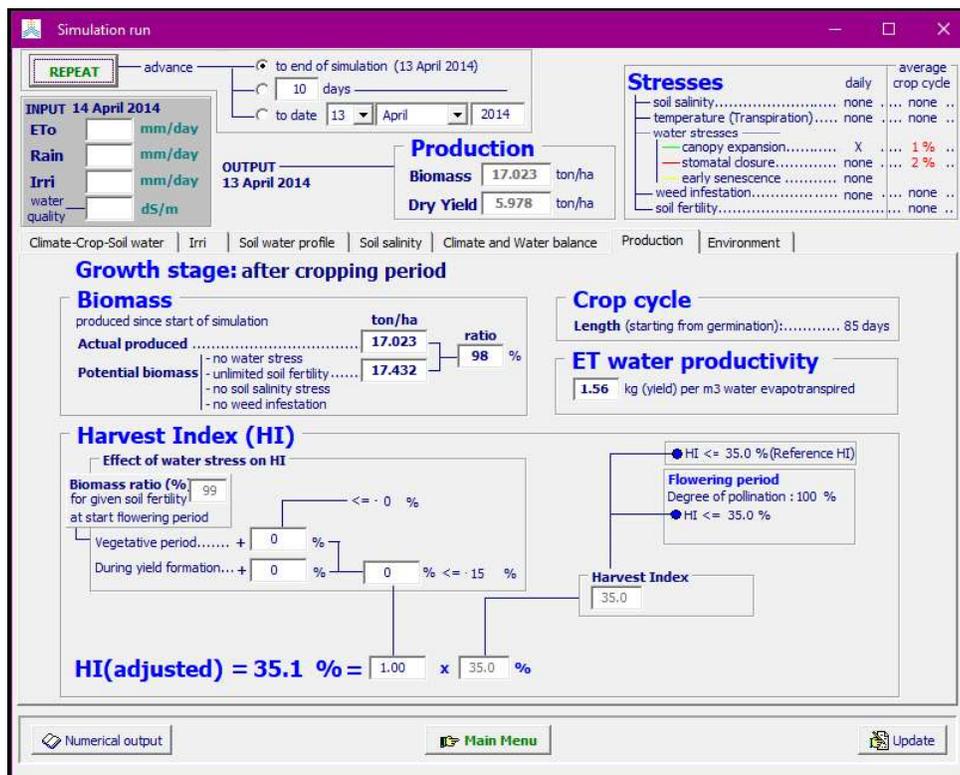
FIGURA 4.13 Balance de agua en el suelo y clima para ciclo húmedo del Guayas



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.14 Producción para ciclo húmedo de la Provincia del Guayas



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

En la ventana auxiliar correspondiente a Producción (*Production*) de la FIGURA 4.14, se pueden observar los ajustes que AquaCROP realizó para la obtención del Índice de Cosecha (*Harvest Index*). En este caso, se ajustó a un valor de $HI_{\text{adj}} = 35.1\%$.

Del mismo modo y la información que se obtuvo de la parte correspondiente a la cantidad de agua que produce, se sabe que, de acuerdo a las condiciones climáticas y edáficas, se produjeron 1.56 [kg] de rendimiento por cada metro cúbico de agua evapotranspirada.

4.2.2.3 Análisis

El valor del rendimiento simulado (5.978 [ton/ha]) es menor al valor de rendimiento real proporcionado por el MAG (5.99 [ton/ha]), existiendo una diferencia del 0.2% (0.012 [ton/ha]).

Hay que tomar en cuenta que, en este caso, la lluvia sumó un total de 778.8 [mm] y fue suficiente para producir el rendimiento obtenido. No se calculó dato de irrigación neta.

4.2.2.4 Prueba adicional

Corresponde a una simulación extra que se realizó bajo el escenario climático y edáfico de la Provincia de Los Ríos.

En este caso, la estación meteorológica es la M0006, Pichilingue y el perfil edáfico fue el Cañalito, cantón Quevedo. Las condiciones iniciales fueron iguales a las consideradas en la calibración como validación en Los Ríos (saturado).

El MAG registró para Los Ríos en el ciclo de siembra húmedo del 2013, un valor de 5.9 [ton/ha].

Se puede observar el ambiente de simulación de la prueba adicional para el ciclo húmedo realizada en la Provincia de Los Ríos, según se muestra en la FIGURA 4.15.

Luego de la simulación realizada, se obtuvo un rendimiento de 5.959 [ton/ha] para el ciclo húmedo de 2013 en Los Ríos, valor que se puede ver en la ventana auxiliar de Producción (*Production*) de la FIGURA 4.16.

FIGURA 4.15 Ambiente para ciclo húmedo de la Provincia de Los Ríos

The screenshot displays the 'Simulation run' window with the following sections:

- REPEAT**: advance to end of simulation (13 April 2013), 10 days, to date 13 April 2013.
- INPUT 14 April 2013**: ETo (mm/day), Rain (mm/day), Irri (mm/day), water quality (ds/m).
- OUTPUT 13 April 2013**: Biomass (17.026 ton/ha), Dry Yield (5.959 ton/ha).
- Stresses** table:

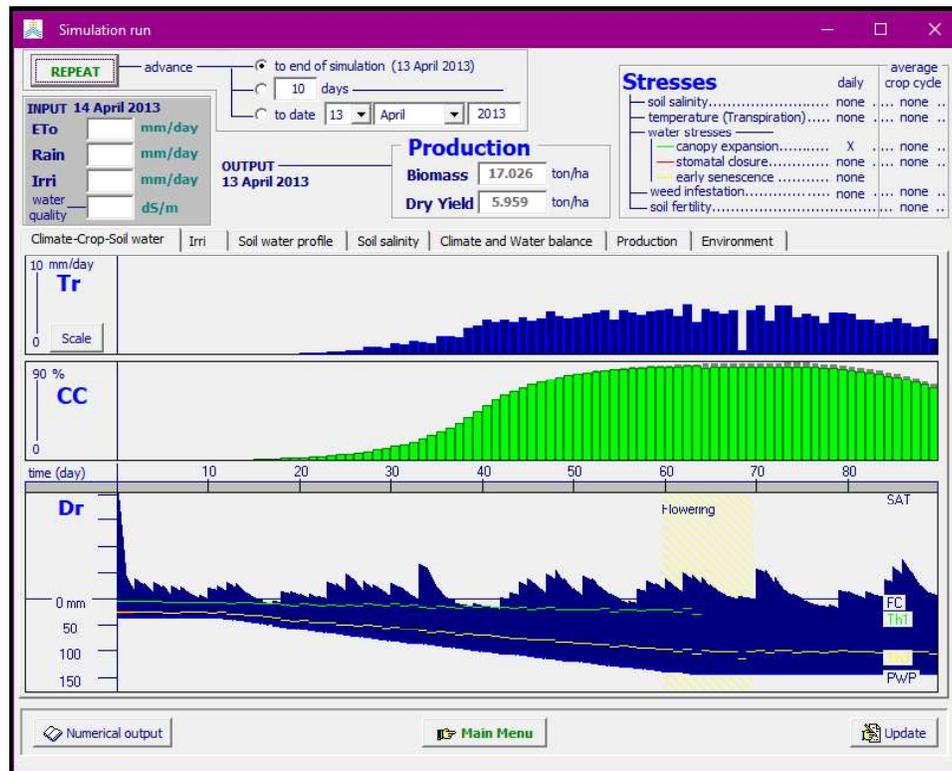
Stress	daily	average crop cycle
soil salinity	none	none
temperature (Transpiration)	none	none
water stresses		
canopy expansion	X	none
stomatal closure	none	none
early senescence	none	none
weed infestation	none	none
soil fertility	none	none
- Environment and Crop**:
 - Climate**: VALIDLOSRIOS.CLI, ESTACION INAMHI M0006 PICHILINGUE, LOS RÍOS - VALIDACION
 - Crop**: Growing cycle: From: 14 January 2013 - To: 13 April; MAIZDUROCALIB9A.C MAIZ DURO ECUADOR CALIBRACION
 - Management**: Irrigation: (None) Rainfed cropping; Field: (None) No specific field management
 - Soil**: Profile: VALIDLOSRIOS.SOL VALIDACIÓN SUELO IEE PN2-P191 CAÑALITO, QUEVEDO, LOS RÍOS; Groundwater: (None) no shallow groundwater table
- Simulation**: Simulation period: From: 14 January 2013 - To: 13 April 2013; Conditions: Initial: INICOND.SW0 CONDICIONES INICIALES SATURACION 1 MAIZ DURO PERIODO HUMEDO; Off season: (None) No specific off-season conditions
- Project**: (None) No specific project
- Settings**: Program settings

Buttons at the bottom: Numerical output, Main Menu, Update.

FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.16 Rendimiento del cultivo para ciclo húmedo de Los Ríos

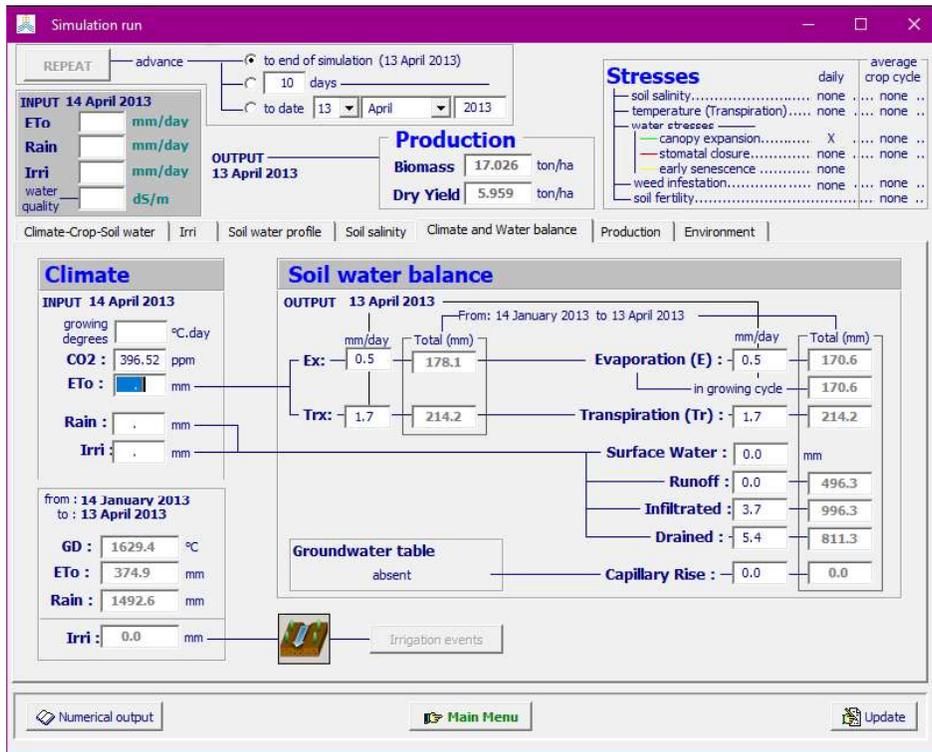


FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

Acorde a la FIGURA 4.17, la concentración de CO₂ en el ciclo fue de 396.52 [ppm]. La cantidad de calor acumulada fue de 1629.4 [°C], la Evapotranspiración de referencia (ET_o) total fue de 374.9 [mm] y la Precipitación en el ciclo fue de 1492.6 [mm]. Por este último valor, no fue necesario calcular una dosis de riego ya que son suficientes para obtener el rendimiento de 5.959 [ton/ha].

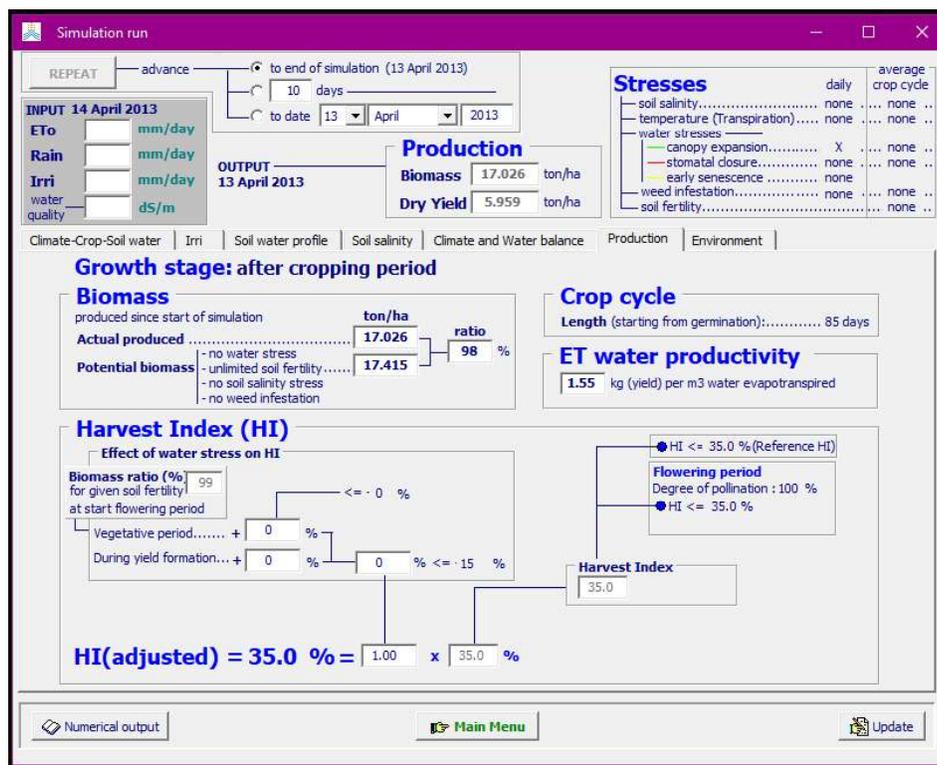
FIGURA 4.17 Resultados de Clima para ciclo húmedo de la Provincia de Los Ríos



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.18 Producción para ciclo húmedo de la Provincia de Los Ríos



FUENTE: FAO, 2017

Elaborado por: Andrea Abarca

Finalmente, se tiene la ventana de Producción (*Production*) (ver FIGURA 4.18) en la que se puede observar que en esta prueba el Índice de cosecha ajustado, HI_{adj} es 35.0% y que la cantidad de rendimiento obtenida por metro cúbico de agua evapotranspirada fue de 1.55 [kg].

De este modo, se cuenta con 2 pruebas eficientes para validar el cultivar calibrado, bajo diferentes condiciones climáticas y edáficas. El resumen de la validación se presenta en la TABLA 4.4.

TABLA 4.4 Resumen de valores obtenido en validación del modelo AquaCROP:
Provincia del Guayas

VALIDACIÓN DEL MODELO AquaCROP														
PROVINCIA: Guayas														
ESTACIÓN: Milagro														
PERFIL DE SUELO: Recinto Pechiche														
INVIERNO														
Siembra:			13 de enero											
AÑO	Rendimiento INEC	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO2	GD	ETo	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2014	5,99	5,978	17,023	35,1	398,65	1653,00	384,80	778,80	182,20	220,30	201,50	577,30	391,70	0,00
PRUEBA ADICIONAL: VERANO														
Siembra:			25 de junio											
AÑO	Rendimiento INEC	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO2	GD	ETo	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2014	5,15	5,154	10,229	50,4	398,65	1604,80	366,20	7,10	262,40	121,00	0,00	7,10	0,00	340,30

Elaborado por: Andrea Abarca

4.3 APLICACIÓN DEL MODELO AQUACROP

La aplicación del modelo de simulación de cultivo AquaCROP se la realizó en las provincias donde el cultivo de maíz duro seco, semilla híbrida de alto rendimiento INIAP DK-7088, fue previamente calibrado y validado para los dos ciclos de siembra.

4.3.1 CICLO SECO

4.3.1.1 Consideraciones

Los datos climáticos para la aplicación del modelo AquaCROP para el ciclo de siembra seco, se obtuvieron de la estación Pichilingue (M0006). El período para la aplicación fue de 25 años (1981-2005).

El suelo con el que se aplicó el modelo en la Provincia de Los Ríos, fue de la localidad de Guarumal, cantón Mocache (PM3-P053). La profundidad de este perfil fue de 1.20 [m]. En este sitio, de acuerdo a la información proporcionada por el IEE, se cultiva maíz y la textura de esta muestra presenta suelo franco limoso, franco, arcilloso y arcilla pesada.

Las condiciones iniciales que se supusieron tanto en la calibración como en la validación, fueron las que se consideraron para la aplicación, es 49% del TAW (total available water o agua total disponible, por sus siglas en ingles) en el suelo por tratarse del ciclo de siembra de verano (junio-noviembre).

4.3.1.2 Resultados

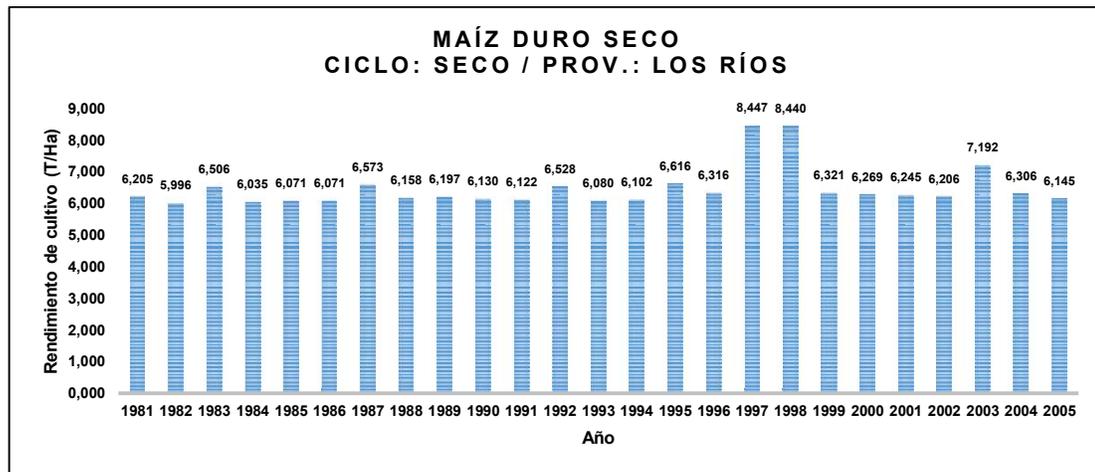
Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo AquaCROP para el ciclo seco en Los Ríos fueron los que se presentan en la siguiente TABLA 4.5:

TABLA 4.5 Resultados obtenidos para ciclo seco Los Ríos

APLICACIÓN DEL MODELO AquaCROP													
PROVINCIA: Los Ríos													
ESTACIÓN: Pichilingue													
PERFIL DE SUELO: Mocache													
VERANO													
Siembra: 25 de junio													
AÑO	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO2	GD	ETo	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1981	6,205	12,337	50,30	340,11	1498,70	384,30	25,10	236,70	161,00	0,00	25,10	0,00	253,80
1982	5,996	11,918	50,30	341,45	1543,40	413,60	14,50	249,70	178,40	0,00	14,50	0,00	285,00
1983	6,506	13,003	50,00	343,05	1663,20	418,20	889,90	197,10	232,00	282,70	607,20	201,90	0,00
1984	6,035	11,998	50,30	344,65	1503,40	390,30	20,00	243,40	162,20	0,00	20,00	0,00	260,30
1985	6,071	12,069	50,30	346,12	1477,30	387,80	44,80	238,10	163,10	4,70	40,10	0,00	248,60
1986	6,071	12,068	50,30	347,42	1483,40	400,70	6,70	246,40	168,10	0,00	6,70	0,00	280,00
1987	6,573	13,065	50,30	349,19	1561,30	394,20	69,60	232,30	174,50	7,30	62,30	0,00	226,50
1988	6,158	12,243	50,30	351,57	1496,70	379,20	29,70	235,80	156,50	0,00	29,70	0,00	248,80
1989	6,197	12,319	50,30	352,12	1450,30	367,80	20,00	222,80	157,90	0,00	20,00	0,00	249,60
1990	6,130	12,184	50,30	354,39	1533,50	405,20	8,70	250,10	170,10	0,00	8,70	0,00	277,40
1991	6,122	12,169	50,30	355,61	1512,20	375,70	7,80	232,70	156,80	0,00	7,80	0,00	257,40
1992	6,528	12,975	50,30	356,45	1525,50	370,10	32,40	220,80	162,40	0,10	32,30	0,00	240,70
1993	6,080	12,088	50,30	356,10	1547,30	392,00	12,60	248,90	157,10	0,00	12,60	0,00	264,50
1994	6,102	12,129	50,30	358,83	1471,30	386,40	2,00	237,10	161,40	0,00	2,00	0,00	271,30
1995	6,616	13,152	50,30	360,82	1532,00	363,90	32,10	209,70	165,30	0,00	32,10	0,00	241,90
1996	6,316	12,554	50,30	362,61	1471,90	396,40	21,60	238,70	170,50	0,00	21,60	0,00	268,60
1997	8,447	16,894	50,00	363,73	1683,80	381,10	889,60	175,60	214,40	209,30	680,30	167,10	0,00
1998	8,440	16,782	50,30	366,70	1597,40	352,10	178,10	166,90	193,60	16,80	161,30	0,00	143,20
1999	6,321	12,566	50,30	368,38	1465,60	347,80	106,70	210,10	150,60	21,70	85,00	0,00	228,50
2000	6,269	12,463	50,30	369,55	1449,80	353,40	10,30	213,40	151,40	0,00	10,30	0,00	240,50
2001	6,245	12,415	50,30	371,14	1465,10	369,50	3,60	227,00	154,80	0,00	3,60	0,00	258,00
2002	6,206	12,337	50,30	373,28	1527,40	378,70	4,80	234,00	158,10	0,00	4,80	0,00	258,70
2003	7,192	14,299	50,30	375,80	1505,60	361,70	44,50	199,30	172,00	3,00	41,50	0,00	217,50
2004	6,306	12,534	50,30	377,52	1498,40	368,20	25,20	222,80	157,50	0,00	25,20	0,00	242,50
2005	6,145	12,218	50,30	379,80	1517,90	395,90	6,70	247,80	162,10	0,00	6,70	0,00	270,70

Elaborado por: Andrea Abarca

En la gráfica a continuación, se muestran los valores de rendimiento a lo largo del período de estudio de 25 años para el ciclo de siembra de verano:

FIGURA 4.19 Rendimiento de cultivo para ciclo seco Los Ríos

Elaborado por: Andrea Abarca

4.3.1.2.1 Aplicación adicional

Se la realizó en la Provincia del Guayas, utilizando los datos climáticos de la estación Milagro - Ingenio Valdez (M0037). El perfil edáfico fue de la localidad Balsamito - Hacienda La Alegría, cantón Guayaquil.

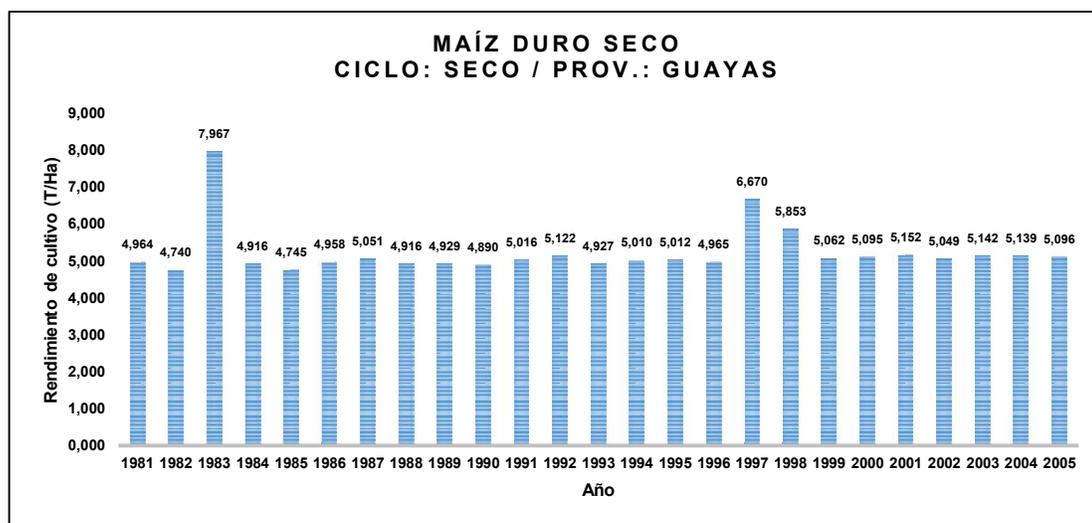
La aplicación para ciclo seco en Guayas en los 25 años de estudio se muestra en la TABLA 4.6 a continuación:

TABLA 4.6 Resultados obtenidos para ciclo seco Guayas

APLICACIÓN DEL MODELO AquaCROP													
PROVINCIA: Guayas													
ESTACIÓN: Milagro (Ingenio Valdez)													
PERFIL DE SUELO: Guayaquil													
VERANO													
Siembra: 25 de junio													
AÑO	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO ₂	GD	ET _o	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1981	4,964	9,852	50,40	340,11	1481,90	378,40	6,90	269,30	126,70	0,00	6,90	0,00	244,00
1982	4,740	9,404	50,40	341,45	1522,60	416,60	2,70	296,10	140,50	0,00	2,70	0,00	275,70
1983	7,967	15,841	50,30	343,05	1570,20	426,30	578,10	204,90	231,90	239,20	338,90	3,80	0,00
1984	4,916	9,752	50,40	344,65	1527,90	410,40	10,40	298,90	133,20	0,00	10,40	0,00	264,00
1985	4,745	9,415	50,40	346,12	1400,80	415,30	0,60	301,40	133,40	0,00	0,60	0,00	273,90
1986	4,958	9,840	50,40	347,42	1466,60	379,40	2,10	264,90	131,30	0,00	2,10	0,00	252,50
1987	5,051	10,023	50,40	349,19	1565,10	372,50	7,00	261,70	128,40	0,00	7,00	0,00	241,00
1988	4,916	9,756	50,40	351,57	1516,60	377,10	1,10	268,50	126,20	0,00	1,10	0,00	250,10
1989	4,929	9,783	50,40	352,12	1450,10	357,50	3,50	255,10	119,30	0,00	3,50	0,00	232,40
1990	4,890	9,705	50,40	354,39	1513,60	375,50	0,30	269,10	125,00	0,00	0,30	0,00	245,70
1991	5,016	9,955	50,40	355,61	1505,50	349,70	3,10	250,60	115,80	0,00	3,10	0,00	223,80
1992	5,122	10,164	50,40	356,45	1523,90	355,10	6,20	252,50	119,80	0,00	6,20	0,00	225,40
1993	4,927	9,780	50,40	356,10	1546,70	366,30	1,60	263,80	120,20	0,00	1,60	0,00	238,60
1994	5,010	9,943	50,40	358,83	1462,80	366,20	0,20	257,20	124,70	0,00	0,20	0,00	242,90
1995	5,012	9,945	50,40	360,82	1584,10	381,60	4,60	272,40	127,70	0,00	4,60	0,00	244,70
1996	4,965	9,854	50,40	362,61	1493,90	372,30	0,60	265,80	124,20	0,00	0,60	0,00	247,70
1997	6,670	13,235	50,40	363,73	1719,00	378,10	272,00	224,70	166,50	89,90	182,10	0,00	147,60
1998	5,853	11,615	50,40	366,70	1599,70	356,40	37,00	233,90	137,30	4,00	33,00	0,00	201,50
1999	5,062	10,049	50,40	368,38	1441,40	348,30	2,90	245,00	119,70	0,00	2,90	0,00	223,70
2000	5,095	10,111	50,40	369,55	1446,70	350,70	3,50	244,90	121,40	0,00	3,50	0,00	227,30
2001	5,152	10,226	50,40	371,14	1444,90	335,60	0,50	235,40	115,00	0,00	0,50	0,00	219,00
2002	5,049	10,020	50,40	373,28	1546,50	358,80	0,00	255,30	120,90	0,00	0,00	0,00	231,30
2003	5,142	10,209	50,40	375,80	1530,70	348,30	0,40	245,50	117,50	0,00	0,30	0,00	226,80
2004	5,139	10,199	50,40	377,52	1512,80	349,80	5,80	243,10	122,00	0,00	5,80	0,00	227,00
2005	5,096	10,120	50,40	379,80	1517,40	359,30	0,10	253,60	122,60	0,00	0,10	0,00	229,10

Elaborado por: Andrea Abarca

En la siguiente figura se muestran los valores de rendimiento a lo largo del período de estudio de 25 años para el ciclo de siembra de verano:

FIGURA 4.20 Rendimiento de cultivo para ciclo seco Guayas

Elaborado por: Andrea Abarca

4.3.1.3 Análisis

De acuerdo a los resultados obtenidos para el ciclo de siembra seco en la Provincia de Los Ríos, el rendimiento promedio es de 6.45 [ton/ha] con un Índice de Cosecha ajustado promedio (HI_{adj}) de 50.28% y un valor promedio de irrigación de 229.36 [mm].

Para la misma provincia, el año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 1997 con un valor de 8.447 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 1982 con 5.996 [ton/ha].

En cuanto a la prueba adicional realizada en el Guayas, se obtuvo para este ciclo, un rendimiento promedio de 5.22 [ton/ha] con un Índice de Cosecha ajustado promedio (HI_{adj}) de 50.40% y un valor promedio de irrigación de 225.43 [mm].

El año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 1983 con un valor de 7.967 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 1982 con 4.74 [ton/ha].

4.3.2 CICLO HÚMEDO

4.3.2.1 Consideraciones

Los datos climáticos para la aplicación del modelo AquaCROP para el ciclo de siembra húmedo, se obtuvieron de la estación Milagro - Ingenio Valdez (M0037). El período para la aplicación fue de 25 años (1981-2005).

El suelo con el que se aplicó el modelo en la Provincia del Guayas, fue de la localidad Balsamito - Hacienda La Alegría, cantón Guayaquil (CG2-P211). La profundidad de este perfil fue de 1.20 [m]. En este sitio, de acuerdo a la información proporcionada por el IEE, se cultiva maíz y la textura de esta muestra presenta suelo arcilloso.

Las condiciones iniciales que se consideraron tanto en la calibración como en la validación, fueron las que se consideraron para la aplicación, es SATURACIÓN en el suelo por tratarse del ciclo de siembra de invierno (diciembre-mayo).

4.3.2.2 Resultados

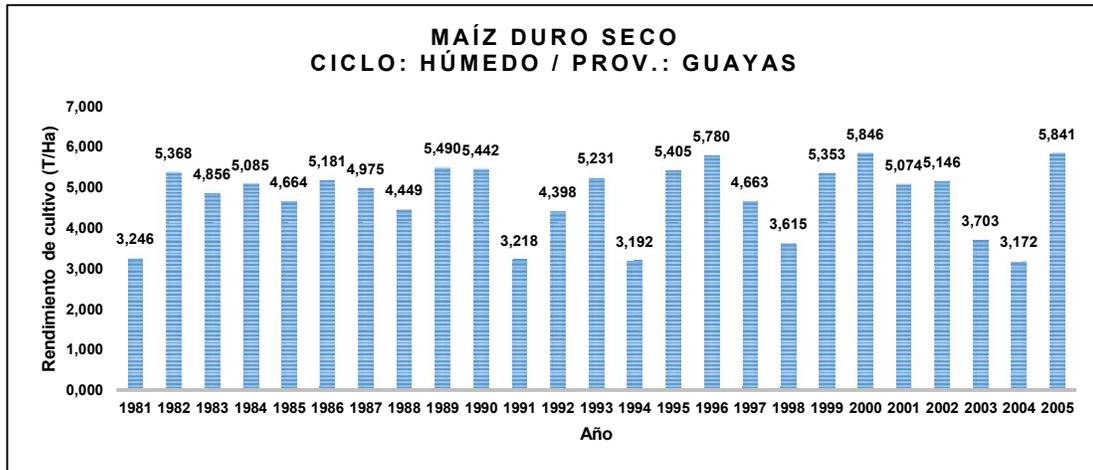
Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo AquaCROP para el ciclo húmedo en Guayas fueron los que se presentan en la siguiente TABLA 4.7:

TABLA 4.7 Resultados obtenidos para ciclo húmedo Guayas

APLICACIÓN DEL MODELO AquaCROP													
PROVINCIA: Guayas													
ESTACIÓN: Milagro (Ingenio Valdez)													
PERFIL DE SUELO: Guayaquil													
INVIERNO													
Siembra: 13 de enero													
AÑO	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO ₂	GD	ET _o	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1981	3,246	9,273	35,00	340,11	1608,20	416,50	866,60	206,30	231,70	301,00	565,60	281,70	0,00
1982	5,368	15,201	35,30	341,45	1622,50	425,30	305,00	213,80	233,40	68,00	237,00	101,50	0,00
1983	4,856	13,875	35,00	343,05	1657,80	439,40	1642,90	209,80	251,70	802,30	840,60	427,90	0,00
1984	5,085	14,529	35,00	344,65	1582,20	439,50	1043,70	229,20	233,60	434,60	609,10	246,90	0,00
1985	4,664	13,325	35,00	346,12	1569,10	437,70	318,60	229,40	231,20	78,20	240,40	70,40	0,00
1986	5,181	14,787	35,00	347,42	1605,70	404,10	771,00	192,80	232,00	321,50	449,50	202,80	0,00
1987	4,975	14,214	35,00	349,19	1682,70	404,10	1717,50	197,50	227,70	914,50	803,00	436,50	0,00
1988	4,449	12,701	35,00	351,57	1646,90	407,60	867,30	194,90	233,10	359,80	507,50	263,10	0,00
1989	5,490	15,685	35,00	352,12	1622,30	402,90	1358,20	196,50	226,70	624,20	734,00	376,40	0,00
1990	5,442	15,530	35,00	354,39	1649,10	414,80	554,70	204,10	232,40	176,10	378,60	115,40	0,00
1991	3,218	9,194	35,00	355,61	1655,00	422,70	720,80	213,60	231,30	287,70	433,10	246,90	0,00
1992	4,398	12,564	35,00	356,45	1680,30	398,70	1656,90	198,00	221,60	878,40	778,50	438,30	0,00
1993	5,231	14,946	35,00	356,10	1641,00	397,60	1297,10	193,60	224,40	594,20	702,90	347,20	0,00
1994	3,192	9,120	35,00	358,83	1630,20	383,20	873,30	189,40	213,50	364,10	509,20	239,20	0,00
1995	5,405	15,431	35,00	360,82	1650,70	409,00	579,80	193,40	236,30	159,40	420,40	109,70	0,00
1996	5,780	16,513	35,00	362,61	1629,70	390,40	784,90	193,40	217,40	309,20	475,70	162,00	0,00
1997	4,663	13,324	35,00	363,73	1639,70	387,60	1428,30	191,90	215,90	709,60	718,70	394,90	0,00
1998	3,615	10,327	35,00	366,70	1713,90	404,90	2745,00	196,10	229,50	1696,80	1048,20	731,50	0,00
1999	5,353	15,295	35,00	368,38	1614,90	392,10	920,60	194,20	218,20	329,40	591,20	269,40	0,00
2000	5,846	16,702	35,00	369,55	1583,70	385,80	662,60	191,30	214,60	185,40	477,20	149,40	0,00
2001	5,074	14,496	35,00	371,14	1631,60	363,00	1525,70	176,30	205,10	850,80	674,90	355,40	0,00
2002	5,146	14,702	35,00	373,28	1665,60	373,40	1342,80	187,50	205,20	688,50	654,30	346,20	0,00
2003	3,703	10,581	35,00	375,80	1665,10	379,70	685,40	184,00	214,20	275,60	409,80	179,80	0,00
2004	3,172	9,062	35,00	377,52	1650,30	398,50	658,10	208,90	210,60	285,90	372,20	203,40	0,00
2005	5,841	16,689	35,00	379,80	1666,10	375,30	663,00	189,40	205,00	242,60	420,40	124,70	0,00

Elaborado por: Andrea Abarca

En la siguiente FIGURA 4.21, se muestran los valores de rendimiento a lo largo del período de estudio de 25 años para el ciclo de siembra de invierno:

FIGURA 4.21 Rendimiento de cultivo para ciclo húmedo Guayas

Elaborado por: Andrea Abarca

4.3.2.2.1 Aplicación adicional

Se la realizó en la Provincia de Los Ríos, utilizando los datos climáticos de la estación Pichilingue (M0006). El perfil edáfico fue de la localidad Guarumal, cantón Mocache.

La aplicación para ciclo húmedo en Los Ríos en los 25 años de estudio se muestra en la TABLA 4.8 que se indica a continuación:

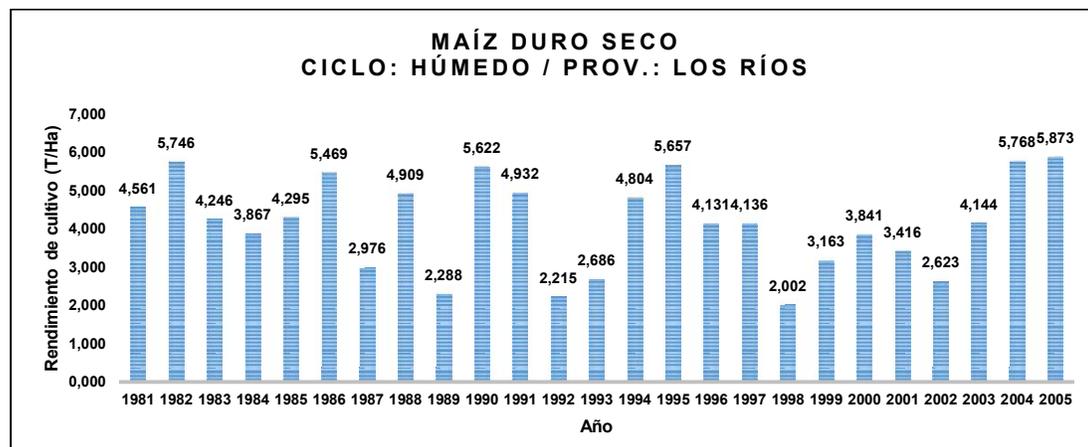
TABLA 4.8 Resultados obtenidos para ciclo húmedo Los Ríos

APLICACIÓN DEL MODELO AquaCROP													
PROVINCIA: Los Ríos													
ESTACIÓN: Pichilingue													
PERFIL DE SUELO: Mocache													
INVIERNO													
Siembra: 13 de enero													
AÑO	Rendimiento	Biomasa	HI adj	CO2	GD	ETo	Lluvia	Evaporación máx	Transpiración máx	Escorrentía	Infiltración	Drenaje	Irrigación
	T/Ha	T/Ha	%	ppm	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1981	4,561	13,032	35,00	340,11	1597,50	413,80	1181,70	200,60	234,20	319,50	862,20	503,70	0,00
1982	5,746	16,418	35,00	341,45	1602,50	411,50	825,80	202,90	229,90	167,40	658,40	280,80	0,00
1983	4,246	12,133	35,00	343,05	1633,50	447,80	1376,40	221,60	249,30	543,30	833,10	534,80	0,00
1984	3,867	11,049	35,00	344,65	1602,10	441,40	1275,00	217,40	246,70	370,20	904,80	571,70	0,00
1985	4,295	12,272	35,00	346,12	1580,20	413,90	674,20	205,20	229,90	162,20	512,00	301,10	0,00
1986	5,469	15,626	35,00	347,42	1590,30	414,80	1177,80	202,40	234,30	318,20	859,60	468,80	0,00
1987	2,976	8,502	35,00	349,19	1644,00	438,30	1487,70	213,00	248,30	455,90	1031,80	719,80	0,00
1988	4,909	14,025	35,00	351,57	1616,10	417,00	1048,20	203,00	235,80	326,50	721,70	447,80	0,00
1989	2,288	6,537	35,00	352,12	1599,80	423,60	1504,40	201,80	243,10	450,90	1053,50	772,70	0,00
1990	5,622	16,062	35,00	354,39	1623,50	418,70	1003,70	202,10	238,30	285,00	718,70	354,20	0,00
1991	4,932	14,092	35,00	355,61	1636,60	418,30	1231,10	203,40	236,60	379,10	852,00	519,90	0,00
1992	2,215	6,330	35,00	356,45	1644,20	412,70	1837,00	202,90	231,50	649,70	1187,30	902,10	0,00
1993	2,686	7,675	35,00	356,10	1605,40	421,40	1604,70	203,20	239,70	479,20	1125,50	820,80	0,00
1994	4,804	13,725	35,00	358,83	1591,40	395,40	1266,80	193,20	222,40	383,90	882,90	517,50	0,00
1995	5,657	16,158	35,00	360,82	1619,60	389,00	961,90	186,10	222,50	289,50	672,40	284,70	0,00
1996	4,131	11,802	35,00	362,61	1599,80	388,70	1243,80	190,90	218,20	390,80	853,00	532,20	0,00
1997	4,136	11,816	35,00	363,73	1623,90	382,40	1273,00	187,80	214,30	421,80	851,20	520,10	0,00
1998	2,002	5,720	35,00	366,70	1668,10	423,90	2755,30	205,50	239,80	1270,60	1484,70	1205,90	0,00
1999	3,163	9,034	35,00	368,38	1610,80	386,50	1598,80	188,70	218,00	592,20	1006,60	725,10	0,00
2000	3,841	10,976	35,00	369,55	1577,20	373,30	1074,00	179,40	212,90	277,90	796,10	504,90	0,00
2001	3,416	9,760	35,00	371,14	1623,30	387,20	1082,50	184,90	221,60	307,40	775,10	479,20	0,00
2002	2,623	7,494	35,00	373,28	1622,60	377,20	1764,60	183,20	213,00	722,30	1042,30	788,70	0,00
2003	4,144	11,839	35,00	375,80	1625,20	397,70	1156,00	190,00	227,40	337,50	818,50	488,30	0,00
2004	5,768	16,481	35,00	377,52	1630,20	400,20	671,00	201,80	218,70	146,40	524,60	179,10	0,00
2005	5,873	16,781	35,00	379,80	1625,10	381,30	634,70	190,00	210,50	96,60	538,10	187,70	0,00

Elaborado por: Andrea Abarca

En la siguiente figura se muestran los valores de rendimiento a lo largo del período de estudio de 25 años para el ciclo de siembra de invierno:

FIGURA 4.22 Rendimiento de cultivo para ciclo húmedo Los Ríos



Elaborado por: Andrea Abarca

4.3.2.3 Análisis

De acuerdo a los resultados obtenidos para el ciclo de siembra húmedo en la Provincia del Guayas, el rendimiento promedio es de 4.74 [ton/ha] con un Índice de Cosecha ajustado promedio (HI_{adj}) de 35.01%. No se requirió de irrigación y la lluvia fue suficiente para obtener cada uno de los rendimientos simulados en AquaCROP.

Para la misma provincia, el año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 2000 con un valor de 5.846 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 2004 con 3.172 [ton/ha].

En cuanto a la prueba adicional realizada en Los Ríos, se obtuvo para este ciclo, un rendimiento promedio de 4.13 [ton/ha] con un Índice de Cosecha ajustado promedio (HI_{adj}) de 35.00%. Al igual que el Guayas, en este ciclo la precipitación fue suficiente para lograr el rendimiento simulado y no se requirió de irrigación.

El año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 1982 con un valor de 5.746 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 1998 con 2.002 [ton/ha].

4.3.3 COMPARACIÓN ENTRE RENDIMIENTO SIMULADO Y RENDIMIENTO HISTÓRICO

La comparación que se realizó, consistió en obtener un valor promedio entre rendimiento de ciclo seco y húmedo simulado en cada provincia y compararlo con los valores de registro histórico de rendimiento obtenidos del INEC.

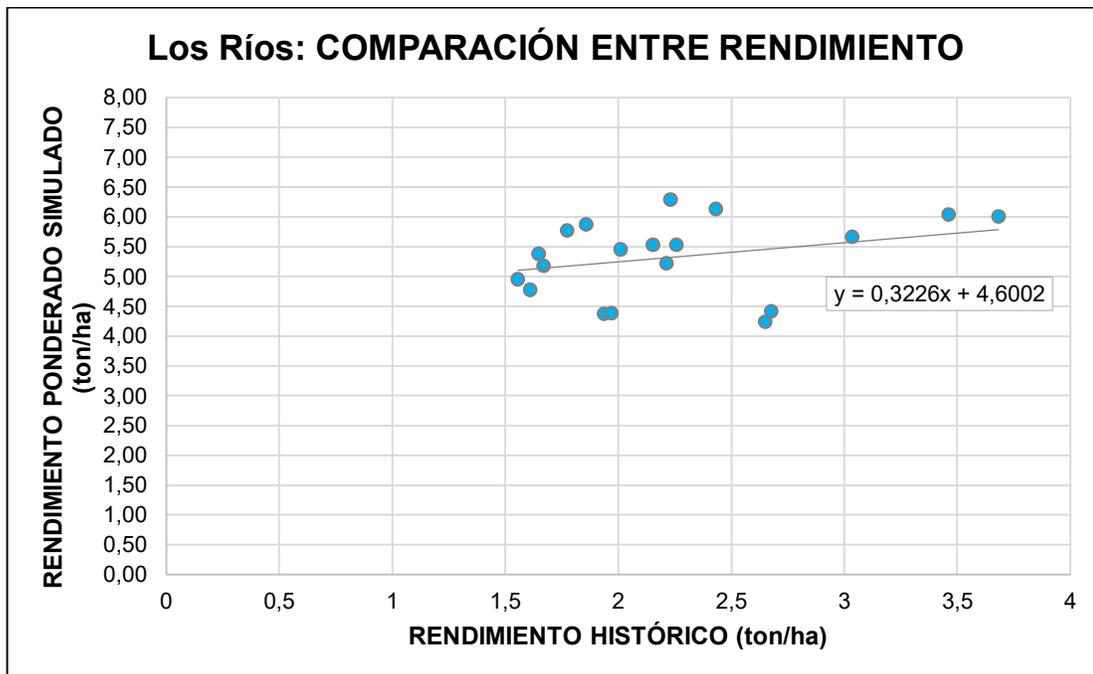
En la TABLA 4.9 que se expone a continuación, se presentan los resultados obtenidos en la Provincia de Los Ríos, así como la respectiva gráfica comparativa en la FIGURA 4.23:

TABLA 4.9 Rendimiento promedio simulado Vs. Rendimiento anual histórico para la provincia de Los Ríos

AÑO	PONDERADO SIMULADO Rendimiento prom. (T/Ha)	REGISTRO HISTÓRICO INEC Rendimiento (T/Ha)
1981	5,38	
1982	5,87	
1983	5,38	1,65
1984	4,95	1,55
1985	5,18	1,67
1986	5,77	1,77
1987	4,77	1,61
1988	5,53	2,26
1989	4,24	2,65
1990	5,88	1,86
1991	5,53	2,15
1992	4,37	1,94
1993	4,38	1,97
1994	5,45	2,01
1995	6,14	2,43
1996	5,22	2,21
1997	6,29	2,23
1998	5,22	
1999	4,74	
2000	5,06	
2001	4,83	
2002	4,41	2,68
2003	5,67	3,04
2004	6,04	3,46
2005	6,01	3,68

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.23 Comparación de los rendimientos promedio simulado e histórico anual para la provincia de Los Ríos. En esta Figura se muestra la ecuación de la tendencia lineal obtenida de los 19 pares de datos en (X, Y) (Rendimiento histórico, Rendimiento promedio simulado). El valor del coeficiente de ajuste o determinación (R^2) para esta línea es de 0,0927.



Elaborado por: Andrea Abarca

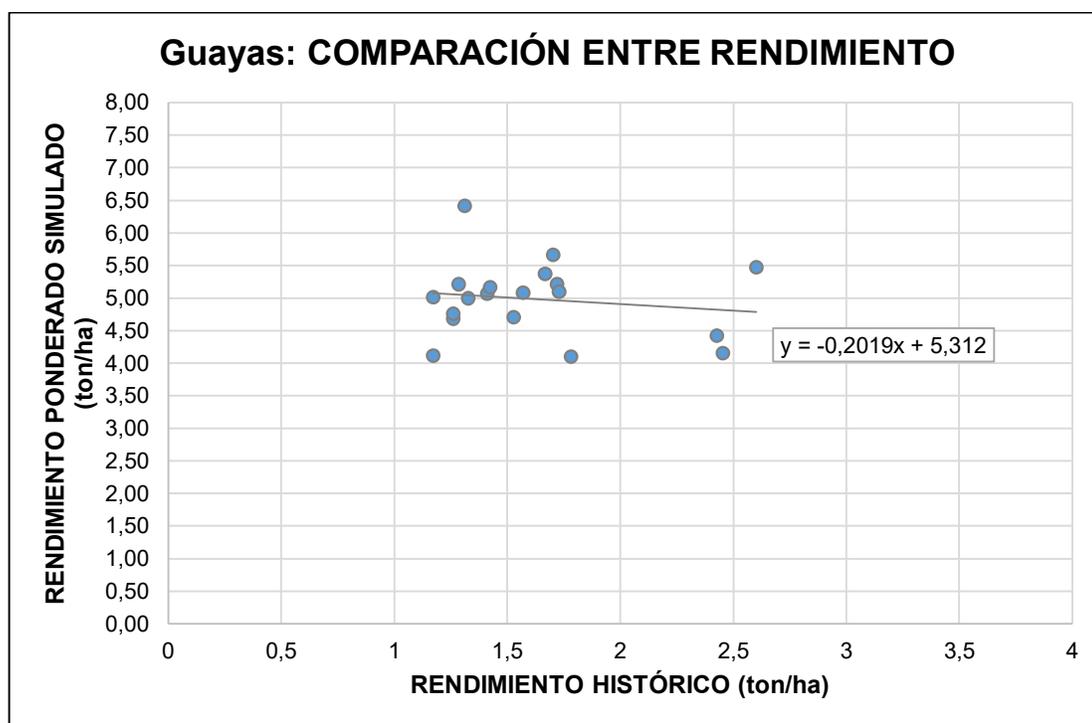
A continuación, en la TABLA 4.10 se presentan los resultados obtenidos en la Provincia del Guayas y la respectiva gráfica comparativa (FIGURA 4.24).

TABLA 4.10 Rendimiento promedio simulado Vs. Rendimiento histórico para la provincia del Guayas

AÑO	PONDERADO SIMULADO Rendimiento prom. (T/Ha)	REGISTRO HISTÓRICO INEC Rendimiento (T(Ha)
1981	4,11	
1982	5,05	
1983	6,41	1,31
1984	5,00	1,33
1985	4,70	1,53
1986	5,07	1,41
1987	5,01	1,17
1988	4,68	1,26
1989	5,21	1,29
1990	5,17	1,43
1991	4,12	1,17
1992	4,76	1,26
1993	5,08	1,57
1994	4,10	1,78
1995	5,21	1,72
1996	5,37	1,67
1997	5,67	1,70
1998	4,73	
1999	5,21	
2000	5,47	
2001	5,11	
2002	5,10	1,73
2003	4,42	2,43
2004	4,16	2,45
2005	5,47	2,60

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.24 Comparación de los rendimientos promedio simulado e histórico anual para la provincia del Guayas. En esta Figura se presenta la ecuación de la tendencia lineal obtenida de los 19 pares de datos en (X, Y) (Rendimiento histórico, Rendimiento promedio simulado). El valor del coeficiente de ajuste o determinación (R^2) para esta línea es de 0,024.



Elaborado por: Andrea Abarca

4.3.3.1 Análisis

Tanto para la provincia de Los Ríos como para Guayas, no existe registro de datos históricos de rendimiento histórico por parte del INEC en los años: 1981, 1982, 1998, 1999, 2000 y 2001. De este modo se pueden evaluar únicamente 19 datos anuales por provincia. Se realizó esta prueba para observar el comportamiento del rendimiento promedio simulado entre los dos ciclos de siembra (por considerarse que cada uno de éstos ocupa seis meses del año) y así poder compararlo con el valor anual de rendimiento obtenido por el INEC a partir de censos en las zonas de producción de maíz duro seco en las provincias de Los Ríos y Guayas.

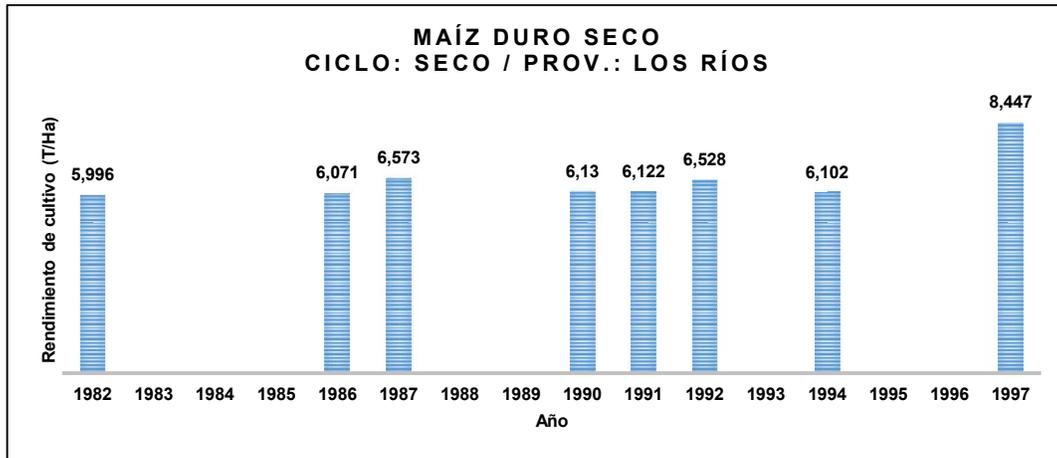
Las FIGURAS 4.23 y 4.24, muestran la dispersión de los datos mencionados y la línea de tendencia de los mismos. En estas gráficas se observa que la tendencia para la provincia de Los Ríos es creciente. De manera contraria, para Guayas, la tendencia muestra que es decreciente. Las funciones para cada provincia se encuentran las respectivas figuras.

Se observa que los valores de rendimiento recabados por la institución competente, en este caso, el INEC, son mucho menores a los valores simulados. Esta significativa variación se debe esencialmente a que el modelo AquaCROP no considera que durante las etapas de desarrollo de la planta hayan existido factores que disminuyan la producción. Estos factores son: Plagas, enfermedades, malas prácticas en manejo (campo e irrigación), falta de nutrientes en el suelo.

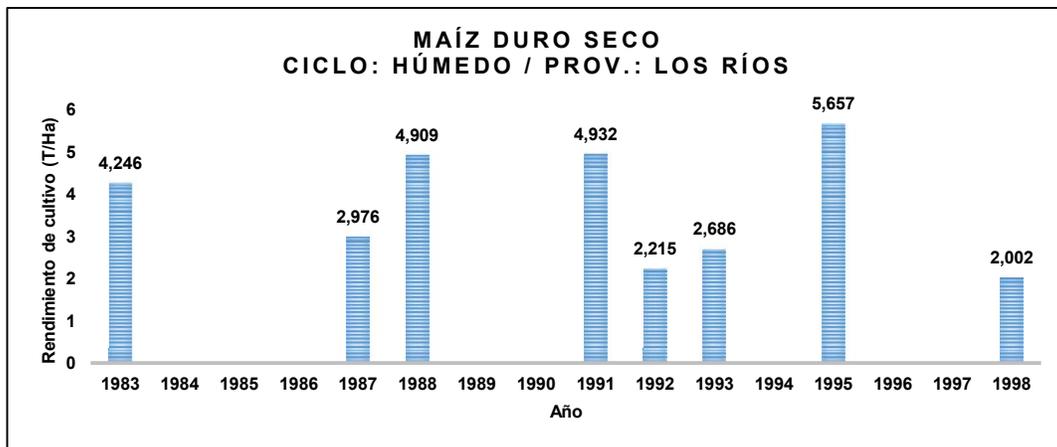
El modelo considera la influencia del clima, la condición y tipo de suelo y la fenología del cultivo, de manera que es razonable la existencia de valores simulados elevados en relación a los valores reales. Además, cabe indicar que los datos recopilados por el INEC son anuales mas no son un promedio entre ciclo seco y húmedo, como lo fue en el caso de la obtención del rendimiento promedio simulado de AquaCROP.

4.3.4 EVENTOS EXTREMOS

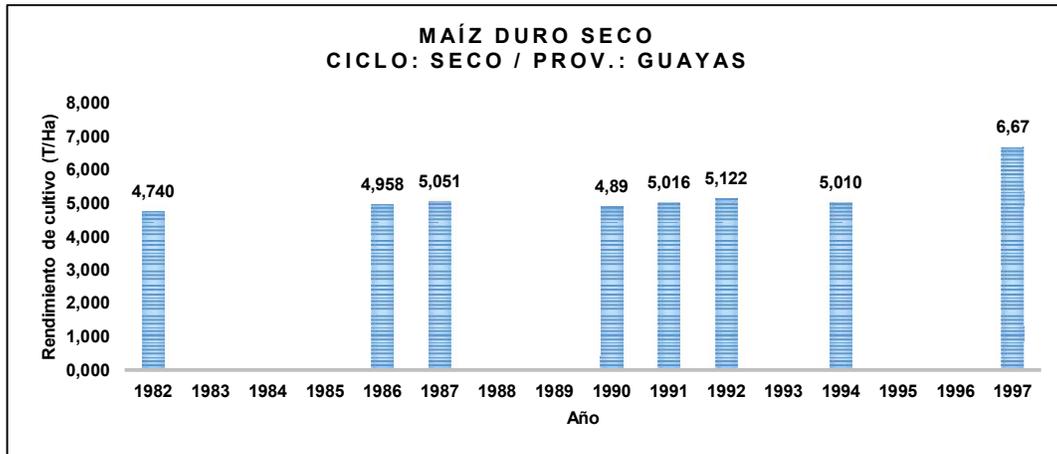
Tomando en consideración los eventos extremos, de El Niño, de la TABLA 3.4 (Pg. 71) considerados dentro del período de estudio, se muestra en las FIGURAS 4.25 a la 4.28, para las provincias de Los Ríos y Guayas, los valores de rendimiento para los dos ciclos de siembra.

FIGURA 4.25 Rendimiento para ciclo seco en eventos extremos Los Ríos

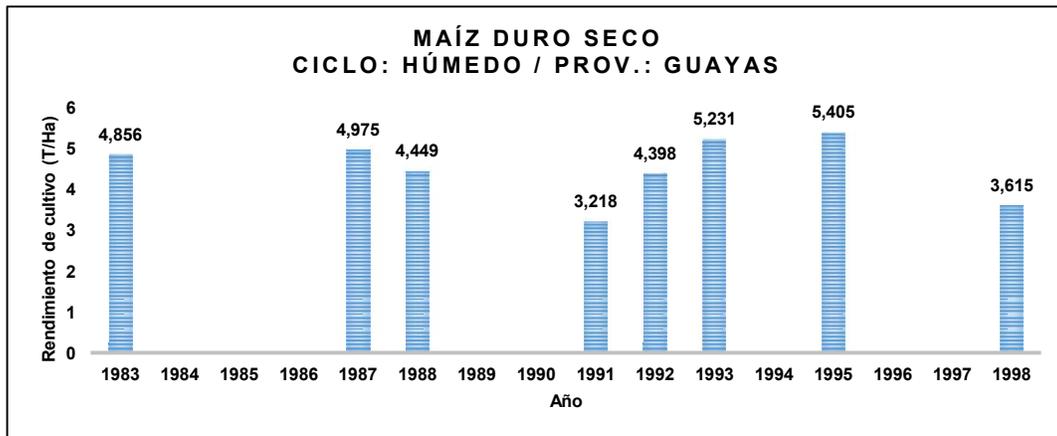
Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.26 Rendimiento para ciclo húmedo en eventos extremos Los Ríos

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.27 Rendimiento para ciclo seco en eventos extremos Guayas

Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.28 Rendimiento para ciclo húmedo en eventos extremos Guayas

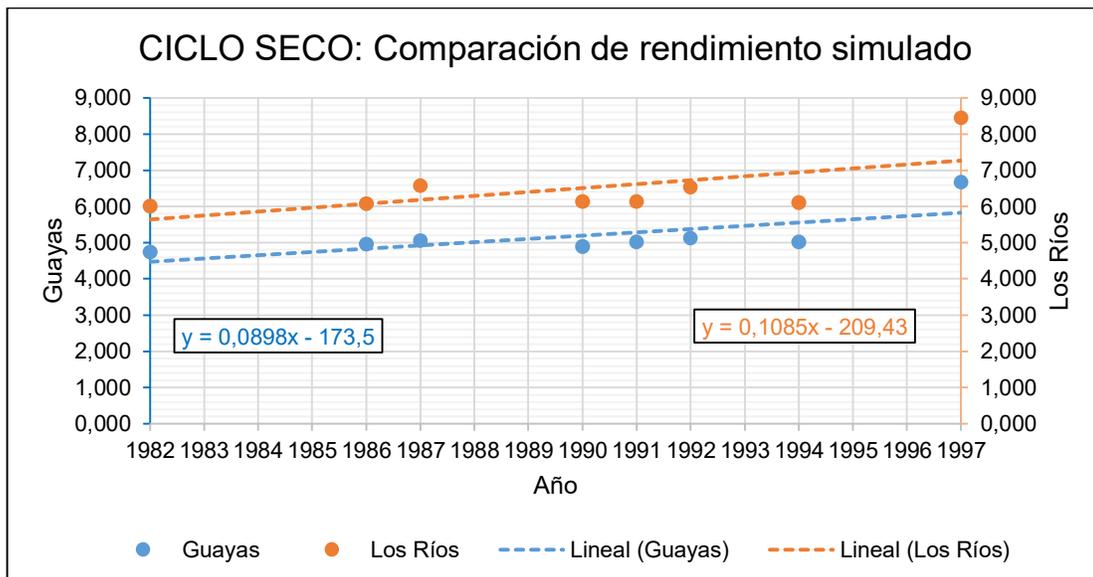
Elaborado por: Andrea Abarca

4.3.4.1 Comparación de rendimiento simulado para período seco y húmedo durante eventos extremos de El Niño

La comparación realizada a continuación, muestra cuál es la variación existente entre el rendimiento simulado del cultivo en estudio en los dos ciclos de siembra y para las dos provincias, Guayas y Los Ríos durante los eventos extremos de El Niño. En la FIGURA 4.29 a continuación, se presenta la comparación de

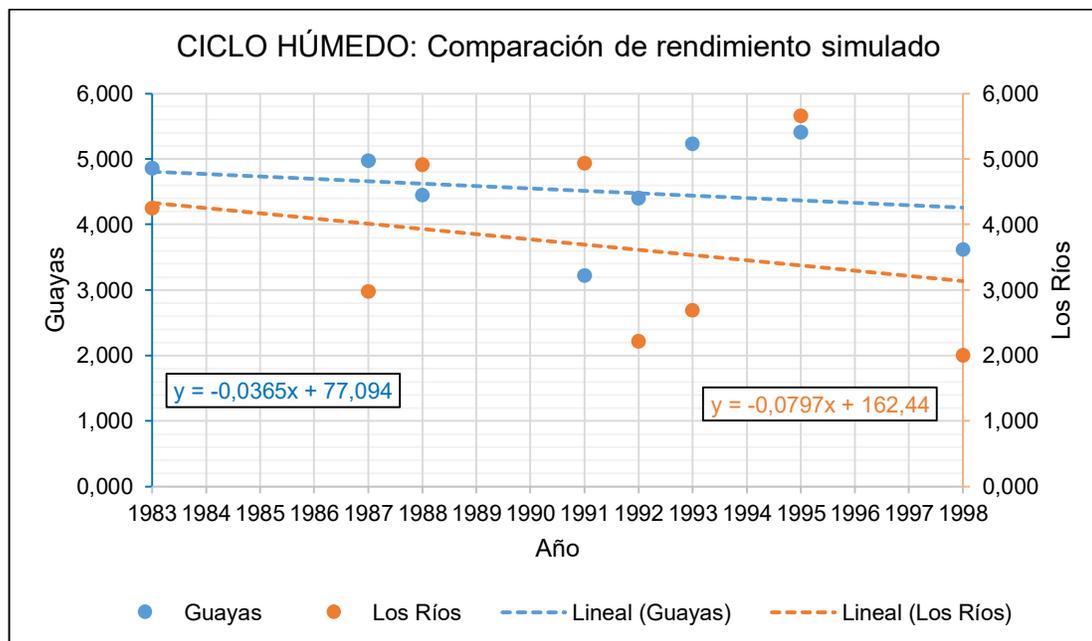
rendimiento simulado en las provincias de Guayas y Los Ríos para ciclo seco. De igual manera, se presenta en la FIGURA 4.30 la comparación de rendimiento simulado en las provincias de Guayas y Los Ríos pero, para ciclo húmedo.

FIGURA 4.29 Comparación de rendimiento para ciclo seco durante extremo El Niño. Los puntos de color azul representan el rendimiento simulado en la provincia del Guayas y los puntos de color naranja, el rendimiento simulado en la provincia de Los Ríos. Se presentan además las ecuaciones para las líneas de tendencia de la serie de 8 datos. Para la línea azul (Guayas) el coeficiente de ajuste o determinación (R^2) es 0,4885 y para la línea naranja (Los Ríos), el valor R^2 es de 0,4003.



Elaborado por: Andrea Abarca

FIGURA 4.30 Comparación de rendimiento para ciclo húmedo durante extremo El Niño. Los puntos de color azul muestran el rendimiento simulado en la provincia del Guayas y los puntos de color naranja, el rendimiento simulado en la provincia de Los Ríos. Se presentan las ecuaciones para las tendencias lineales de la serie de 8 datos. Para la línea azul (Guayas) el coeficiente de ajuste o determinación (R^2) es 0,051 y para la línea naranja (Los Ríos), el valor de R^2 es 0,0735.



Elaborado por: Andrea Abarca

4.3.4.2 Análisis

Las condiciones climáticas durante los eventos extremos de El Niño se manifiestan como intensas lluvias, derivadas éstas en inundaciones, y un incremento de temperatura en el límite Este del Océano Pacífico (lo que baña las costas de América del Sur, incluyendo Ecuador). Para el presente análisis, se observó el comportamiento del rendimiento simulado en AquaCROP, bajo las condiciones meteorológicas en estos eventos. De este modo se pudo obtener las ecuaciones de las líneas de tendencia para las dos provincias en estudio, para los dos ciclos de siembra.

Para la siembra en ciclo seco se tiene que tanto en Guayas como en Los Ríos, la tendencia es creciente. El rendimiento para este ciclo tiende a incrementar. En este

caso, la temperatura del ambiente desempeña un papel muy importante en cuanto al desarrollo del cultivo. Aquí es esta variable la responsable de que cada planta cumpla de manera eficiente sus etapas fenológicas y se obtenga el rendimiento deseado.

Para el caso del ciclo húmedo, la tendencia en cambio, es decreciente. Las dos provincias presentan descenso en la producción potencial simulada. Esto, es lo contrario de lo que sucede en el ciclo de siembra seca. La temperatura en este caso, al disminuir por ser estación invernal, no le ayuda al cultivo a llevar a cabo su ciclo vegetativo y reproductivo. De modo que al tener menos calor y en este caso, mayor precipitación (por estar bajo los efectos del evento de El Niño) la producción baja ya que la planta no se desarrolla totalmente.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

- Este análisis permitió observar cual es el comportamiento del rendimiento de cultivo, aplicando el modelo de simulación de cultivo AquaCROP, bajo condiciones climáticas propias de cada localidad, en dos ciclos de siembra, seco y húmedo, para maíz duro seco, en dos provincias de la costa ecuatoriana, Guayas y Los Ríos. El período de estudio fue de 25 años, comprendido desde 1981 hasta 2005.
- Se requirió de un proceso de calibración de los cultivars respectivos, para la semilla de alto rendimiento INIAP - DK7088, en cada ciclo de siembra que sería utilizado tanto para la validación como para la aplicación del modelo AquaCROP. Conforme a los datos del experimento de campo realizado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - INIAP, esta calibración se la realizó en la localidad de San Carlos, Provincia de Los Ríos para el ciclo de verano o seco (2013) y en la localidad de Balzar, Provincia del Guayas para el ciclo de invierno o húmedo (2014). Se pudo evidenciar que el comportamiento del cultivo fue diferente en cada ciclo pese a que se trataba de la misma semilla.
- El valor del rendimiento simulado para la Provincia de Los Ríos en ciclo seco en 2013, fue de 6.33 [ton/ha], y este valor fue ligeramente superior al valor de rendimiento real proporcionado por el MAG, 6.26 [ton/ha], en un 1.11% (0.07 [ton/ha]). Para la provincia del Guayas, en el mismo ciclo, pero de 2014, el MAG registró un valor de 5.15 [ton/ha] y el valor simulado fue de 5.154 [ton/ha]. Con estos valores se determinó como válido el cultivar calibrado y que este podía ser utilizado para la aplicación en el período de estudio elegido.

- Para ciclo húmedo, el valor del rendimiento simulado para la provincia del Guayas en 2014, fue de 5.978 [ton/ha], y este valor fue menor al valor de rendimiento real proporcionado por el MAG, 5.99 [ton/ha], en un 0.2% (0.012 [ton/ha]). En tanto que, en la provincia de Los Ríos, en el mismo ciclo, pero de 2013, el MAG registró un valor de 5.9 [ton/ha] y el valor simulado fue de 5.959 [ton/ha]. Con estos valores se determinó como válido el cultivar calibrado y que este podía ser utilizado para la aplicación en el período de estudio elegido.
- De la aplicación del modelo AquaCROP, se obtuvo que, para el ciclo de siembra seco en la Provincia de Los Ríos, el rendimiento promedio fue de 6.45 [ton/ha] con un Índice de Cosecha promedio ajustado (HI_{adj}) de 50.30% y un valor promedio de irrigación de 229.36 [mm]. El año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 1997 con un valor de 8.447 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 1982 con 5.996 [ton/ha].
- Al realizar este proceso en la Provincia del Guayas, se obtuvo un rendimiento promedio de 5.22 [ton/ha] con un Índice de Cosecha promedio ajustado (HI_{adj}) de 50.40% y un valor promedio de irrigación de 225.43 [mm]. El año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 1983 con un valor de 7.967 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 1982 con 4.74 [ton/ha].
- A partir de la aplicación del modelo AquaCROP en el ciclo de siembra húmedo para la Provincia del Guayas, el rendimiento promedio fue de 4.74 [ton/ha] con un Índice de Cosecha promedio ajustado (HI_{adj}) de 35.00%. No se requirió de irrigación y la lluvia fue suficiente para obtener cada uno de los rendimientos simulados. El año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 2000 con un valor de 5.846 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 2004 con 3.172 [ton/ha].
- En Los Ríos, para el mismo ciclo, se obtuvo un rendimiento promedio de 4.13 [ton/ha] con un Índice de Cosecha promedio ajustado (HI_{adj}) de 35%. Tampoco se requirió de irrigación. El año donde se simuló un mayor rendimiento fue en 1982 con un valor de 5.746 [ton/ha] y el año con menor cantidad de rendimiento simulado fue 1998 con 2.002 [ton/ha].
- Los rendimientos obtenidos de la simulación en AquaCROP para las dos provincias de estudio, Guayas y Los Ríos, para cada ciclo de siembra (Seca

y Húmeda) del presente trabajo, son valores potenciales o ponderados de producción y estos son alcanzables en la realidad si se mejoran las prácticas de manejo en campo. Los valores de producción potencial pueden ser considerados como referenciales de la capacidad real de producción agrícola de las localidades estudiadas.

- Se realizaron comparaciones entre los valores de rendimiento ponderado simulado (promedio del resultados del ciclo seco y húmedo, por considerar cada uno de seis meses en el año) por provincia y los valores de rendimiento anual histórico registrado por el INEC. De acuerdo a la línea de tendencia obtenida para las dos provincias de estudio, se pudo observar que la línea de tendencia para la provincia del Guayas es decreciente y para Los Ríos es creciente.
- El dato de rendimiento anual de los productores registrados en este caso, por el INEC, son valores muy diferentes a los valores simulados en AquaCROP muy probablemente por factores que el modelo no considera en las simulaciones como lo es el nivel de fertilidad edáfica, presencia de maleza, plagas inesperadas en el lote sembrado y aparición de enfermedades a inicio o medio ciclo.
- En cuanto a los valores de rendimiento en condiciones climáticas extremas, se tomó en cuenta los eventos de El Niño de los años: 1982 - 1983 (Muy Fuerte), 1986 - 1988 (Moderado), 1990 - 1993 (Fuerte), 1994 - 1995 (Fuerte) y 1997 - 1998 (Muy Fuerte). Durante estos eventos, se pudo evidenciar que para las dos provincias en el ciclo de siembra seco, la temperatura atmosférica beneficia el desarrollo de la planta y hace que el rendimiento agrícola simulado tienda a incrementar. No así, durante el ciclo de siembra húmedo, donde se pudo evidenciar que el rendimiento de cultivo disminuyó.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

Se pueden ejecutar simulaciones en el MSC AquaCROP, utilizando series de datos meteorológicos provenientes de proyecciones climáticas a futuro. Con esto, se modelaría la respuesta del rendimiento a la disponibilidad de agua bajo diferentes escenarios de concentración de CO₂ o RCP's (Trayectorias de concentración

representativas, por sus siglas en inglés). Con esta información, se realizaría en general, una eficiente planificación y gestión de los recursos hídricos destinados a riego para producción agrícola de maíz duro. Específicamente, se podría generar con la información obtenida de las simulaciones de rendimiento del futuro, calendarios de riego y fertilización, que logren maximizar los valores de producción del campo y se pueda enfrentar los efectos adversos producto del cambio climático, mismo que son inevitables.

Se podría realizar el mismo proceso de calibración, validación y aplicación del modelo AquaCROP, para otras variedades de maíz duro que se cultivan en la costa ecuatoriana, de manera que se mejore la producción a nivel nacional y, por ende, los costos sean más competitivos a nivel local e inclusive con otros países productores de este cultivo de consumo directo e indirecto. Además, este análisis se podría realizar en otros cultivos herbáceos y arbóreos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, J. E., Arkin, G. F., & Ritchie, J. T. (1976). Influence of Row Spacing and Straw Mulch on First Stage Drying. *Soil Science Society of America Journal*, 40(3), 436-442p.
- AGROCALIDAD. (2014). Buenas prácticas agrícolas para maíz duro. Ministerio de Agricultura - MAG. Quito. Ecuador. 52p.
- Alaniz, E. (2016). Resistencia de variedad de maíz a *Ustilago maydis*, en dos comunidades del estado de México. Tesis de Ingeniero Agrónomo Industrial. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca. México. 48p.
- Alarcón, L. D. (2015). Efecto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz amarillo duro bajo condiciones de la molina utilizando el modelo AquaCrop. Tesis de Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú. 93p.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 56. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. Roma. Italia. 322p.
- Arias Hernández, G. (2016). Efecto del cambio climático en el rendimiento del maíz (*Zea mays*) variedad jaguan para cuatro regiones del Estado de Coahuila. Tesis de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo. México. 46p.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Calidad del agua para la agricultura. Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 29. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. Roma. Italia. 29p.
- Bradford, K. J., & Hsiao, T. C. (1982). Physiological responses to moderate water stress. *Physiological Plant Ecology II*, 12 (B). 263-324p.

- Bruinsma, J. (2009). The Resource Outlook to 2050: By how much do land water and crop yields need to increase by 2050. Expert meeting on how to feed the world in 2050. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. [Conferencia dada del 24 al 26 de Junio de 2009]. Roma. Italia. 33p.
- Cabrera, Á. (2010). Babahoyo, Río y Ciudad: Centro de Convivencia, Volumen III. Trabajo de fin de Carrera de Arquitectura. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador. 45p.
- Capa-Morocho, M., Rodríguez-Fonseca B., Ruíz-Ramos, M. (2009). Impactos de la variabilidad climática en los cultivos de verano en regadío mediterráneos. 8° Congreso Internacional Cambio Climático: Extremos e impactos. Asociación Española de Climatología. [Congreso dado del 25 al 28 de Septiembre de 2012]. Salamanca. España. 747-755p.
- Castro, M. (2017). Rendimientos de maíz duro seco en invierno 2017. Dirección de Análisis y Procesamiento de la Información. Coordinación General del Sistema de Información Nacional. Ministerio de Agricultura - MAG. Quito. Ecuador. 93p.
- CGSIN. (2014). Zonificación agroecológica económica del cultivo del maíz duro (*Zea mays* L.) en el Ecuador continental. Ministerio de Agricultura - MAG. Quito. Ecuador. 7p.
- Changnon, S. (2000). El Niño 1997-1998: The climate event of the century. Editorial Oxford University Press. Nueva York. Estados Unidos. 232p.
- de la Casa, A. C. (2011). Monitoreo de cultivos de maíz y estimación de rendimiento a nivel de lote con datos de aqua-modis en Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina. 284p.
- de Wit, C. T. (1958). Transpiration and crop yield. Institute of Biological Chemistry Research On Field Crops and Herbage. 64(6).1-88p.
- Delgado, R. (2017). Modelación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en el suelo Ferralítico Rojo. Tesis de Ingeniero Hidráulico. Universidad

- Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". La Habana. Cuba. 76p.
- Deras, H. (2010). Guía Técnica: El cultivo del maíz. [17 de enero de 2019]. URL: <http://repiica.iica.int/docs/b3469e/b3469e.pdf>
- Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Respuesta del rendimiento al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 33. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. Roma. Italia. 212p.
- Duncan, W. G. (1975). Maize. CROP PHYSIOLOGY: SOME CASE HISTORIES. Editor: L. T. Evans. Cambridge University Press. Londres. Inglaterra. 23-50p.
- Espadafor, M., Couto, L., Resende, M., Henderson, D. W., García-Vila, M., Fereres, E. (2017). Simulation of the responses of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation. Transactions of the ASABE. 60(6). 1983-1994p.
- Espinoza, T. (2014). Modelo Geológico-Térmico de Guayaquil. Tesis de Ingeniero en Geología. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. Ecuador. 216p.
- Esposito, G., Balboa, G., Cerliani, C., & Balboa, R. (2015). Rendimiento potencial de maíz. El cultivo de maíz en San Luis. Editores: J. A. Garay, C. Colazo, & Juan. INTA Ediciones. La Pampa, Argentina. 32-52p.
- FAO. (2009). ETo Calculator. Land and Water Digital Media Series N° 36. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. Roma. Italia. 37p.
- FAO. (2011). Base de datos en línea. [20 de enero de 2019]. URL: <http://faostat.fao.org>
- FAO. (2017). AquaCrop: El modelo de productividad del agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. Roma, Italia. 4p.
- Fassio, A., Carriquiry, A. I., Tojo, C., & Romero, R. (1998). Maíz: Aspectos sobre fenología. Ediciones INIA. Montevideo. Uruguay. 51p.

- Fernandes, D. (2017). Mapa Provincias del Ecuador. [12 de enero de 2019]. URL: <https://www.flickr.com/photos/thejourney1972/3474613168/in/photolist-6i3irA-F8Qxn5-xhzYGS-4JKWbA-51htLj-k7xdqe-62y5rY-crLbQs>
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E., & Mejía-Saénz, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*, 47(4), 347-359p.
- GADP Guayas. (2016). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia del Guayas. Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial del Guayas - GADP Guayas. Guayaquil. Ecuador. 495p.
- GADP Los Ríos. (2012). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Provincia de Los Ríos. Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Los Ríos- GADP Los Ríos. Babahoyo, Ecuador. 256p.
- González-Robaina, F., Delgado-Acosta, R., Díz-Pérez, Y., Herrera-Puebla, J., López-Seijas, T., Cid-Lazo, G. (2018). Simulación del efecto del estrés hídrico en el cultivo del sorgo en suelo Ferralítico Rojo. *Revista Ingeniería Agrícola*. 8(1). 3-12p.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99p.
- Hsiao, T. C., & Jackson, R. B. (1999). 1.- Interactive effects of water stress and elevated CO₂ on growth, photosynthesis, and water use efficiency. *Carbon dioxide and environmental stress*. Editorial Elsevier. Davis. Estados Unidos. 3-31p.
- Hsiao, T. C., Fereres, E., Acevedo, E., & Henderson, D. W. (1976). Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. *Water and plant life*. Volumen 19. Editores: Large O. L., Kappen L., Schulze E.-D. Editorial Springer. Berlín. Alemania. 281-305p.
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: III.

- Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101(3). 448-459p.
- IEE. (2012). IDE-Portal. Instituto Espacial Ecuatoriano - IEE. [10 de enero de 2019]. URL: <http://www.ideportal.iee.gob.ec/>
- IGM. (1988). Carta Topográfica Guayas. Instituto Geográfico Militar - IGM. [10 de mayo de 2019]. URL: http://www.igm.gob.ec/work/files/cartabase/n/NIII_E4
- Ion, V., Dicu, G., Dumbrava, M., Temocico, G., Alecu, I. N., Basa, A. G., State D. (2015). Harvest index at maize in different growing conditions. *Romanian Biotechnology Letters*. 20(6).10951-10960p.
- Kaboosi, K., & Kaveh, F. (2012). Sensivity analysis of FAO 33 crop water production function. *Irrigation Science*. 30(2). 89-100p.
- Lagos, C. (1982). Maíz: Suelo, variedades, densidad y época de siembra. *Investigación y Progreso Agropecuario-Quilamapu*. Volumen 11. Editorial INIA. Chillán. Chile. 2-5p.
- Lorite, I. J., García-Vila, M., Santos, C., Ruíz-Ramos, M., Fereres, E. (2013). AquaData and AquaGIS: Two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop. *Computer and Electronics in Agriculture*. Volumen 96. Editorial Elsevier. Wageningen. Holanda. 227-237p.
- MAG. (2018). Rendimientos objetivos del maíz duro época de verano 2017. Ministerio de Agricultura - MAG. Quito. Ecuador. 22p.
- MAGAP-CGSIN. (2014). Boletín Situacional Maíz Duro Seco. [22 de diciembre de 2018]. URL: <http://sinagap.agricultura.gob.ec>
- Marcos Solorio, B., Martínez Campos, A., López Urquidez, G., López Orona, C., Arteaga Reyes, T. (2016). La biomasa de los sistema productivos de maíz nativo (*Zea mays*) como alternativa a la captura de carbono. *Revista internacional de contaminacion ambiental*. 40(3). 361-367p.

- Martínez, D. (2015). Ecofisiología del cultivo de maíz . El cultivo de maíz en San Luis. Editores: J. A. Garay, C. Colazo, & Juan. INTA Ediciones. La Pampa, Argentina. 7-31p.
- McMaster, G. S., & Wihelm, W. W. (1997). Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*. 87(4). 291-300p.
- Medina, D. (2014). El cultivo de Maíz (*Zea mays* L). Universidad Politécnica Territorial del estado Portuguesa - UTPT. Portuguesa. Venezuela. 67p.
- Mendoza Alcivar, M. R., & Valdez Rodríguez, M. G. (2015). Labranza mecanizada en la productividad de maíz h. trueno. Tesis de Ingeniero Agrícola. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Calceta. Ecuador. 77p.
- Monteros, A., & Salvador, S. (2014). Rendimientos de maíz duro seco en el Ecuador verano 2014 (Julio - Noviembre). Dirección de Análisis y Procesamiento de la Información. Coordinación General del Sistema de Información Nacional. Ministerio de Agricultura - MAG. Quito. Ecuador. 1-19p.
- Montoya, F. (2013). Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum* L.) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas. Tesis Doctoral de Ingeniería Agrónoma. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete. España. 270p.
- Moot, D. J., Jamieson, P. L., Henderson, A., Ford, M. A., & Porter, J. R. (1996). Rate of change in harvest index during grain-filling of wheat. *The Journal of Agricultural Science*. 126(4). 387-395p.
- Morla, F. D., & Giayetto, O. (2012). Calibración y Validación del Modelo AquaCROP de FAO en Cultivos Representativos del Centro Sur de Córdoba. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. [Congreso dado del 16 al 20 de abril de 2012]. Mar de la Plata. Argentina. 6p.
- NCBI. (2015). Taxonomy Browser. National Center for biotechnology Information - NCBI. [7 de enero de 2019]. URL:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/wwwtax.cgi?mode=Info&id=4577&lvl=3&lin=f&keep=1&srchmode=1&unlock>

- Olivera, N. T., Manrique, O. B., Masjuan, Y. G., & Alega, A. M. (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 25(3). 23-30p.
- Ortiz Solorio, C. A., Ojeda Trejo, E., & Pájaro Huertas, D. (2005). Estimación de rendimientos máximos de cultivos por el método de zonas agroecológicas. *Revista de Geografía Agrícola*. No. 35: julio - diciembre. 57-65p.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101(3). 438-447p.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). AquaCrop - Reference Manual. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. [15 de enero de 2019]. URL: <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>
- Rhoads, F. M., & Bennett, J. M. (1990). Corn. Irrigation of agricultural crops. Editores: Stewart, E. A., Nielsen, D. R. American Society of Agronomy. Madison. Estados Unidos. 569-596p.
- Ritchie, J. T., & Hanway, J. J. (1982). How a corn plant development. Special Report No. 48. Iowa State University Extension. Estados Unidos. 21p.
- Sánchez, F. (2001). Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves. Universidad de Salamanca. Salamanca. España. 3p.
- SENAGUA. (2016). Sistemas hídricos de la Provincia del Guayas. Secretaría Nacional del Agua - SENAGUA. [17 de enero de 2019]. URL: <https://www.agua.gob.ec>
- SIMARBC. (2006). Cálculo de Evapotranspiración de cultivo (ETc) mediante el uso de coeficientes (Kc). Sistema de Información para el manejo de agua de riego en Baja California - SIMARBC. [4 de enero de 2019]. URL: [http://www.simarbc.gob.mx/descargas/Coeficiente%20del%20cultivo%20\(Kc\).pdf](http://www.simarbc.gob.mx/descargas/Coeficiente%20del%20cultivo%20(Kc).pdf)

- Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. 25(3). 189-207p.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje N° 66. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación - FAO. Roma, Italia. 510p.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. 101(3). 426-437p.
- Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Vásquez-Peña, M. A., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2016). Requerimientos de riego y predicción del rendimiento en el cultivo de banano mediante un modelo de simulación en el Urabá Antioqueño, Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua*. VII(6). 105-122p.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., García, M., Mejías P. (2014). AquaCrop: FAO'S crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*. Volumen 62. Editor: Ames D. P. Editorial Elsevier. Provo. Estados Unidos. 351-360p.
- Zamora-Salgado, S., Ruíz-Espinoza F., Beltrán-Morales, F., Fenech.Larios, L., Murillo-Amador B., Loya-Ramirez J., Troyo-Diéguez, E. (2011). Régimen hídrico del maíz en una zona árida, determinado en porcentajes de evaporación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13(2). 181-186p.
- Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agricultural Water Management*. 69(2). 115-133p.