



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA PREDICIÓN DEL USO
DEL AGUA Y DEL RENDIMIENTO DEL MAÍZ EN NAMPULA -
MOZAMBIQUE**

**CALIBRATION OF THE AQUACROP MODEL FOR WATER USE AND YIELD
PREDICTION IN MAIZE AT NAMPULA - MOZAMBIQUE**

Actividad formativa equivalente a tesis para optar al Grado de Magíster en Manejo de
Suelos y Aguas

MUNIR NAIMO

Director de Tesis:

OSVALDO SALAZAR GUERRERO

Profesores consejeros:

OSCAR SEGUEL SEGUEL

MARCO ISAAC GARRIDO SALINAS

SANTIAGO - CHILE

2021

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**CALIBRACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA PREDICIÓN DEL USO
DEL AGUA Y DEL RENDIMIENTO DEL MAÍZ EN NAMPULA –
MOZAMBIQUE**

**CALIBRATION OF THE AQUACROP MODEL FOR WATER USE AND YIELD
PREDICTION IN MAIZE AT NAMPULA - MOZAMBIQUE**

**Actividad formativa equivalente a tesis para optar al Grado de Magíster en Manejo
de Suelos y Aguas**

MUNIR NAIMO

Calificaciones:

DIRECTOR DE TESIS:

Osvaldo Salazar Guerrero
Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.

PROFESORES CONSEJEROS

Marco Isaac Garrido Salinas
Ingeniero Agrónomo, Mg. Dr.

Oscar Seguel Seguel
Ingeniero Agrónomo, Dr.

SANTIAGO – CHILE

2021

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Abdul Abacar Satar Naimo, Ana Bela Gregorio Gil y Maria Margarida Gil (*in memoria*) por su apoyo incondicional, no sólo en esta etapa de mi vida, sino que, en todo momento, por la paciencia que han tenido y por creer en mí. A mis hermanos y mi compañera Ivanovithsa Malôa quiero agradecerles su cariño, por estar siempre dispuestos a ayudarme y de tenderme la mano en momentos difíciles desta dura vida.

A mi director de tesis, profesor Osvaldo Salazar por su apoyo incondicional y disposición para guiarme en todos los momentos al largo de este proceso formativo y en el presente trabajo, siempre demostró estar apto para orientarme en esta causa de formación académica.

A la señora Jeannette Angelica Piza Soto por sus consejos y moral luego al primero contacto con ella antes de conocer la facultad físicamente y tampoco Chile que para mi no solo es una profesional de la universidad, se no que es una madre que gané en Chile.

A mis compañeros y amigos que siempre estuvieron conmigo, Berthin, Lwando, Valentina, Melsen, Juan, Jimmy, Andrea, Theresa, Antonio, Carlos, Alson, Dinoclaudio, Leonora, Miteca, Boaventura, Rogerio, Aleixo, Cassamo, Vilanculos, Muibo, Mabasso, Abujate, Euginol, Rodrigues, Olimpia, Titos, Timoteo, Cesario, Carmen, Teodosio, Manuela, Miguel, Moisés, Felipe, Rebolledo, Santos, Zulmira, Nilda, Chaneta, Luis, Assucena, N'sira, Leskim, Celestino, Tatiana, Vânia, Ragú, Jorge, Elizeth, Lidia, Onélio, Gonzaga, Bambo, por ser parte de este largo camino que recorrimos juntos y los que no están citados porque esta página seria pequeña para todos, así que no se sientan excluidos y gracias por todos los momentos que compartimos. De igual forma agradezco a los profesores Manuel Casanova, Oscar Seguel, Marco Pfeiffer, Yasna Tapia, y Marco Salinas por su apoyo y enseñanzas.

Al Delegado Regional del Centro Zonal Nordeste del Instituto de Investigación Agraria de Mozambique Dr. António Chamuene, Dr. Leonel Moiana y Ex-Gobernador de Nampula Dr. Víctor Borges por su confianza y autorización para venir a estudiar los agradezco.

Por su apoyo financiero durante el desarrollo de mi magíster a la Agencia Chilena de Cooperación Internacional y Desarrollo-AGCID en especial la Beca Nelson Mandela me faltarían palabras para expresar mis agradecimientos.

Finalmente agradezco a todas las personas que sean familia o amigos y de la universidad en general que han estado involucrados de una u otra manera para pueda lograr este sueño y objetivo que tenía planificado los tengo en mi corazón.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
Key words: Climate change; modeling; water productivity; yield.	2
INTRODUCCIÓN	3
La producción agrícola en Mozambique	3
Maíz.....	3
Uso de AquaCrop como herramienta de modelación.....	4
Hipótesis.....	7
Objetivo general	7
Objetivos específicos.....	7
MATERIALES Y MÉTODO	8
Ubicación del estudio	8
Datos de rendimiento y clima.....	9
Modelo AquaCrop	9
Metodología	9
Calibración del modelo AquaCrop	10
Cambio climático.....	10
Parametrización del modelo AquaCrop	12
Evapotranspiración en el cultivo de maíz	13
Simulaciones de la productividad del agua del cultivo de maíz	15
CONCLUSIONES	21
LITERATURA CITADA	22

Índice de Cuadros

Cuadro 1: Requerimientos de entrada para los módulos del modelo AquaCrop	5
Cuadro 2. Escenarios de cambio climático y su efecto en el estrés hídrico par cultivos de secano para ser evaluados en la Región de Nampula-Mozambique.	11
Cuadro 3. Parámetros y sus valores utilizados en las simulaciones del rendimiento de maíz en el modelo AquaCrop (Versión 6.1).	12
Cuadro 4. Precipitación (PP) y evapotranspiración de cultivo (ETc) durante el periodo de 5 temporadas del estudio.....	13
Cuadro 5. Rendimiento observado (OBS) y simulado (SIM) del cultivo de Z. mays L. obtenido en las temporadas 2013-2018.....	14
Cuadro 6. Factores de estrés, productividad del agua y rendimientos simulados de maíz por el modelo AquaCrop para cinco temporadas de maíz (2013-2018).	16
Cuadro 7. Precipitación (PP) y evapotranspiración de cultivo (ETc) de los tres escenarios en estudio correspondientes a valores promedios de los 25 años de cada escenario.	17
Cuadro 8. Factores de estrés, productividad del agua y rendimientos de maíz simulados por el modelo AquaCrop para tres escenarios de cambio climático para un periodo de 25 años.	18

Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación de la Región de Nampula, Mozambique en África.....	8
Figura 2: Registro de rendimientos observado y simulado del cultivo de maíz en la región de Nampula-Mozambique entre las temporadas 2013 a 2018.	15
Figura 3: Rendimientos de maíz bajo tres escenarios de cambio climáticos para 25 años (2019-2043) en Nampula, Mozambique.	17
Figura 4: Productividad del agua con tres escenarios de cambio climáticos para 25 años (2019-2043) en Nampula-Mozambique.....	18

RESUMEN

En Mozambique hay poca experiencia en el uso y aplicación de modelos computacionales para predecir rendimientos potenciales, evaluar el uso del agua en la agricultura o evaluar el efecto del cambio climático en la producción de cultivos. El cultivo de maíz es muy prometedor para cumplir la meta de incrementar la seguridad alimentaria de las familias africanas; sin embargo, este cultivo se ha visto afectado por los efectos del cambio climático, en especial bajo condiciones de cultivo de secano. El objetivo principal de este estudio fue calibrar el modelo AquaCrop para predecir los rendimientos del maíz, utilizando datos de suelo, clima y rendimiento de la región de Nampula en Mozambique, durante cinco temporadas consecutivas (2013-2018). Adicionalmente, se evaluó la productividad del agua con respecto a la transpiración del maíz (WP_{ET}) y el efecto de tres escenarios de cambio climático en el rendimiento de maíz en Nampula, Mozambique. Se puede concluir que fue posible utilizar el modelo AquaCrop para predecir los rendimientos del maíz de forma aceptable dentro un rango de error de un 15% respecto a los valores promedio medidos en la región de Nampula-Mozambique. Durante las 5 temporadas fue posible identificar que el principal factor de estrés fue el cierre de estomas, con un rango que varió entre 82 y 89%. En relación con la WP_{ET} , se puede observar que junto al rendimiento más alto de maíz se registró el valor más alto de WP_{ET} . La aplicación del modelo AquaCrop bajo tres escenarios de cambio climático y su efecto en el rendimiento del maíz en la Provincia de Nampula mostró que bajo el escenario de mayor estrés hídrico se reportaron los menores rendimientos y WP_{ET} . Además, bajo el escenario de mayor restricción hídrica se encontró una mayor variabilidad interanual en rendimiento y en la WP_{ET} .

Palabras Claves: Cambio climático; modelización; productividad del agua; rendimiento.

ABSTRACT

In Mozambique, there is little experience in the use and application of computer models to predict potential yields, evaluate water use in agriculture, or assess the effect of climate change on crop production. Maize cultivation holds great promise for meeting the goal of increasing food security for African households; however, this crop has been affected by the effects of climate change, especially under rainfed conditions. The main objective of this study was to calibrate the AquaCrop model to predict maize yields using soil, climate and yield data from the Nampula region of Mozambique for five consecutive seasons (2013-2018). Additionally, water productivity with respect to maize transpiration (WP_{ET}) and the effect of three climate change scenarios on maize yield in Nampula, Mozambique were evaluated. It can be concluded that it was possible to use the AquaCrop model to predict maize yields acceptably within an error range of 15% with respect to the average values measured in the Nampula-Mozambique region. During the 5 seasons it was possible to identify that the main stress factor was stomata closure, with a range that varied between 82 and 89%. In relation to WP_{ET} , it can be observed that together with the highest maize yield, the highest WP_{ET} value was recorded. The application of the AquaCrop model under three climate change scenarios and its effect on maize yield in Nampula Province showed that under the highest water stress scenario the lowest yields and WP_{ET} were reported. In addition, under the most water restriction scenario, greater inter-annual variability in yield and WP_{ET} was found.

Key words: Climate change; modeling; water productivity; yield.

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola en Mozambique

Mozambique es un país del continente africano en el que gran parte de su población se dedica a la actividad agrícola, donde alrededor del 90% de la producción de alimentos se producen en las zonas rurales. Según el MASA (2015) el país tiene alrededor de 4,0 millones de predios actualmente explotadas para la actividad agrícola, de las cuales 3,9 millones son pequeños agricultores; de la superficie restante, 1,3% son medianos agricultores y sólo <1% son grandes explotaciones. El tamaño medio de los hogares es de 5 miembros por hogar y el 29% están encabezados por mujeres.

En este país se practica agricultura de subsistencia, bajo un sistema de agricultura familiar campesina, donde se incluyen varios cultivos como cereales para satisfacer las necesidades de bienes y servicios. En este sentido, el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) se considera como una importante fuente de ingreso para los agricultores de las zonas rurales (Dias, 2013).

Maíz

El maíz es un cereal que ocupa un lugar muy importante en la dieta de la población mozambiqueña, así como de una gran parte de la población africana, en especial en la Región de Nampula. También se considera que es el cultivo que más ha contribuido a la seguridad alimentaria, debido a su importancia para el sustento de las familias rurales de Mozambique (Uaiene, 2006).

Lo anterior se relaciona a su alto contenido en carbohidratos, principalmente almidón y otros componentes como proteínas, aceites y vitaminas, transformando al maíz en un producto de gran importancia comercial y alimentaria. Así, el maíz es el cultivo más producido en Mozambique, representando un 73% del total de la producción de los cultivos del país (Uaiene, 2006).

El maíz se cultiva principalmente bajo condiciones de secano y es además el más importante de los cereales al ser producido por más del 96% de los hogares en Mozambique (Brito *et al.*, 2009). Sus rendimientos actuales producidos durante la estación seca oscilan entre 500 y 800 kg ha⁻¹, muy por debajo de su potencial normal, estimado en unas 5 a 7 ton ha⁻¹, obtenidas en la estación seca en los países de la Comunidad de Desarrollo de África Austral (Midgley *et al.*, 2012).

Uele (2011) también confirma lo anterior, informando que el rendimiento medio del grano de maíz no supera los 900 kg ha⁻¹, cantidad inferior al potencial de este cultivo, lo que sigue siendo preocupante para la seguridad alimentaria de los hogares en Mozambique. Por su parte, Uaiene (2006) agrega que el rendimiento bajo del grano de maíz está asociado con el uso de variedades de maíz de baja calidad, con alta incidencia de enfermedades y en general con una mala gestión del cultivo.

Por otra parte, Mozambique es el tercer país más afectado por los desastres naturales en África, después de Mauricio y Benín, y es el segundo más vulnerable a los fenómenos extremos en África meridional, como sequías, inundaciones y ciclones tropicales; además puede esperar cambios en las pautas estacionales de las precipitaciones (frecuencia, intensidad, extensión), duración y el período de ocurrencia (Brito *et al.*, 2009).

Los impactos del cambio climático en las precipitaciones, la evapotranspiración de referencia y la temperatura son de importancia crítica, en particular en los países en desarrollo como Mozambique, donde el sustento de la población está vinculado principalmente a la agricultura de secano (Lacombe *et al.*, 2012; Manhique, 2016). En consecuencia, asociado a estos factores el rendimiento de los cultivos como el maíz han disminuido drásticamente y han generado déficits que a menudo son sinónimo de inseguridad alimentaria en la región (Manhique, 2016).

Uso de AquaCrop como herramienta de modelación

Según el INGC (2009), se espera que el cambio climático provoque un aumento de las temperaturas, un cambio en los patrones de precipitaciones y un aumento de las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) y de ozono (O₃) en la superficie de la Tierra. El comportamiento de estos factores pone en peligro la producción de maíz en el futuro (2081-2100).

En este sentido, los modelos computacionales han sido utilizados como una herramienta de toma de decisiones que permite integrar diversos componentes en sistemas biológicos complejos, para evaluar el impacto del cambio climático en la producción de cultivos (Martínez *et al.*, 2011).

Dentro de los modelos disponibles, se encuentra el modelo AquaCrop, desarrollado por la FAO, que permite la simulación de crecimiento de los cultivos para abordar la seguridad alimentaria y evaluar el impacto del medio ambiente y la gestión de los cultivos sobre la producción (Vanuytrecht *et al.*, 2014).

Este modelo ha sido utilizado previamente para evaluar el efecto del cambio climático en los rendimientos de los cultivos y es particularmente adecuado para las condiciones en las que el agua es un factor limitante en la producción de cultivos (Warnatzsch *et al.*, 2020). Los requerimientos de entrada para los módulos del modelo AquaCrop consideran variables climáticas, de suelo, del cultivo, y su manejo como se presenta en el Cuadro 1.

Raes *et al.* (2009) señalan que el modelo AquaCrop requiere la siguiente información meteorológica diaria, semanal o mensual: temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), precipitación (P_p) y evapotranspiración de referencia (ET₀). Además, considera una concentración media anual de CO₂ en la atmósfera de 369,47 ppm para el año 2000, según las mediciones del observatorio en Mauna Loa, Hawái. Hawái. Sin

embargo, los valores de la concentración de este gas pueden sustituirse con los niveles actuales

Cuadro 1. Requerimientos de entrada para los módulos del modelo AquaCrop

Módulos de AquaCrop				
Cultivo	Clima	Suelo	Prácticas de manejo	
			Riego	Campo
Emergencia. Cobertura de dosel inicial (o densidad de siembra). Cobertura máxima de dosel. Inicio y duración de floración. Senescencia. Madurez fisiológica del grano. Índice de cosecha (HI). Fecha de siembra. Método de siembra. Temperaturas críticas (base y máxima). Profundidad inicial y máxima de raíces. Días a máxima profundidad de raíces. Productividad del agua (WP).	Precipitación. Temperaturas máxima y mínima. Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET _o). Concentraciones de CO ₂ .	Textura, número de horizontes. Punto de marchitez permanente. Capacidad de campo. Punto de saturación. Conductividad hidráulica saturada. Curva número (CN). Lámina rápidamente evaporable (REW.) Profundidad de capa restrictiva. Profundidad de nivel freático.	Método. Lámina neta. Lámina bruta. Fechas de aplicación. Eficiencia de la aplicación.	Grado de fertilidad del suelo respecto al cultivo. Presencia de acolchados o residuos de cosecha. Capa de agua permanente sobre el suelo.

La producción de biomasa y de grano depende de los parámetros del cultivo, como conductancia estomática, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha. La ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo (Y) es la ecuación:

$$Y = B \times Hi \quad (\text{Ec.1})$$

donde B es la biomasa del cultivo y Hi es el índice de cosecha que depende de la variedad o híbrido del cultivo. El modelo AquaCrop es una herramienta viable para evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo (Heng *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2009). Por tanto, es útil para planear y evaluar estrategias en diferentes condiciones de disponibilidad de agua, sistema de riego, tipo de suelo y fecha de siembra.

Sin embargo, en Mozambique en general hay poca experiencia en el uso y aplicación de modelos computacionales para predecir rendimientos potenciales, evaluación del uso del agua en la agricultura o la evaluación del efecto del cambio climático en la producción de cultivos. Por ejemplo, la productividad del agua con respecto a la evapotranspiración (WP_{ET}) podrían ser un indicador importante para seleccionar las especies de maíz que debiesen ser utilizadas en sistema de agricultura de secano en Nampula-Mozambique.

Considerando esta potencialidad, el modelamiento de la WP_{ET} en condiciones con baja adopción tecnológica, puede constituir una herramienta potencial para proyectar políticas y manejos adecuados, para contribuir a la pequeña agricultura a mejorar su condición actual, en particular frente al escenario de cambio climático al cual se enfrenta el planeta.

Hipótesis

El modelo AquaCrop puede predecir los rendimientos y la productividad del agua con respecto a la evapotranspiración (WP_{ET}) del maíz, ante escenarios de cambio climático en la Región de Nampula, Mozambique.

Objetivo general

Calibrar el modelo AquaCrop para predecir los rendimientos del maíz en Nampula-Mozambique.

Objetivos específicos

- Evaluar la productividad del agua con respecto a la evapotranspiración (WP_{ET}) en el maíz en Nampula-Mozambique.
- Aplicar el modelo AquaCrop para evaluar el efecto de tres escenarios de cambio climático en el rendimiento del maíz en Nampula-Mozambique.

MATERIALES Y MÉTODO

Ubicación del estudio

El estudio se realizó utilizando información de la Región de Nampula, en Mozambique, situada en latitud $15^{\circ}06'59''$ S y longitud $39^{\circ}15'59''$ O, a una altitud de 431 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). La Región de Nampula posee una superficie de 334 km^2 , con mayor parte explotaciones agrícolas, principalmente de agricultura familiar; destaca un relieve altiplano montañoso. Según el MAE (2015), Nampula se caracteriza por un clima tropical húmedo con dos estaciones: una cálida y otra lluviosa que comienza en noviembre y termina en abril, con frecuentes lluvias y tormentas eléctricas. La máxima temperatura absoluta del aire es de $33,9^{\circ}\text{C}$ y la mínima de $19,0^{\circ}\text{C}$ y el promedio anual de precipitaciones es de 1.045 mm .

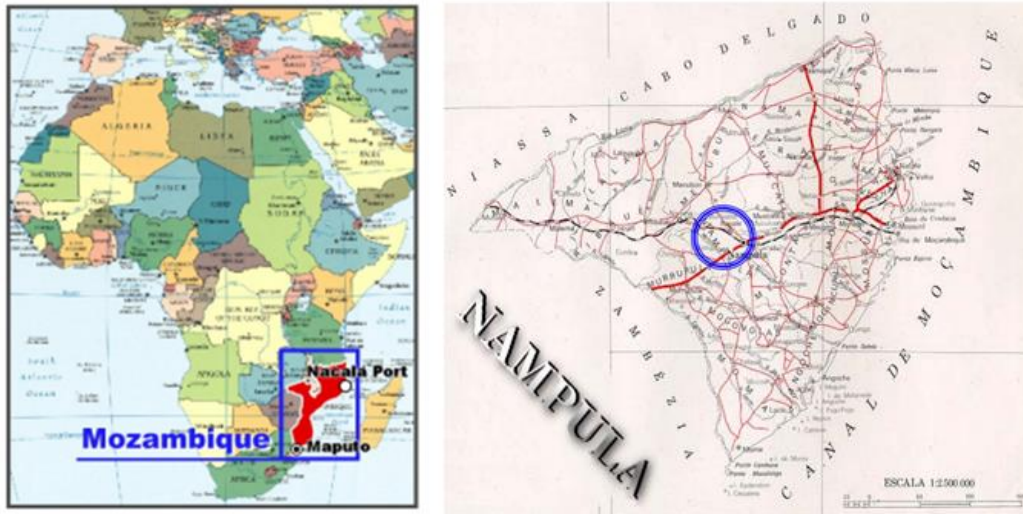


Figura 1. Ubicación de la Región de Nampula, Mozambique, en África (MAE, 2015).

Para las simulaciones del rendimiento de maíz, se utilizaron en el modelo los datos obtenidos de la estación meteorológica de Nampula, durante las temporadas 2013-2018 (MASA, 2019). Según MASA (2010) los suelos de la Región de Nampula presentan una alta variabilidad de suelos, que según el Sistema WRB de la FAO (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007) corresponderían a Lixisoles, Ferralsoles, Arenosoles, Gleysoles, Fluvisoles, Acrisoles y Leptosoles. Es importante destacar que los Lixisoles dominan en términos de representación por el total de predios de Nampula. Los Lixisoles comprenden a suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente translocación de arcilla), llevando a la formación de un horizonte argílico en el subsuelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). En este tipo de suelos se adaptan mejor tanto cultivos perennes como anuales.

Materiales

Datos de rendimiento y clima

En este estudio se trabajó con datos promedios de la región de Nampula, los que son reportados anualmente por parte del gobierno de Mozambique, donde esta región en particular tiene el potencial mayor de producción del maíz en comparación con las demás regiones del país. Así, se generaron rendimientos promedios de cinco temporadas agrícolas, que se inician en el mes de diciembre de cada año y terminan en abril del año siguiente, durante los periodos: 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017 y 2017-2018. Se utilizaron registros diarios de la estación meteorológica de Nampula (INE, 2013; INE, 2014; INE, 2015; INE, 2016; INE, 2017; INE, 2018) que considera las variables climáticas utilizadas por el modelo AquaCrop, como: precipitación, temperatura máxima y mínima y evapotranspiración de referencia (ET_0); además de la concentración de CO_2 .

Modelo AquaCrop

Se utilizó el modelo AquaCrop, disponible en su versión gratuita 6.1. De acuerdo con Raes *et al.* (2009), el modelo AquaCrop consta de varias ecuaciones asociadas al clima, densidad de población de plantas, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico como se presentó en el Cuadro 1, que se integran para simular el crecimiento y rendimiento de una serie de cultivos previamente incluidos en la base de datos del modelo, que incluyen también al cultivo de maíz.

Metodología

Se utilizó la información del clima y suelo disponible para Nampula, donde generalmente el cultivo de maíz se siembra en diciembre y la cosecha se realiza en abril del año siguiente con un ciclo vegetativo de 140 días para la variedad *matuba*, que es la más utilizada en la Región. La preparación del suelo para la siembra en su mayor parte se hace de forma manual, con uso de utensilios rudimentarios, como por ejemplo el azadón y en pocas ocasiones se ocupa la mecanización para esta actividad.

Por otra parte, los únicos factores que afectan la evapotranspiración de referencia (ET_0) son parámetros climáticos. Por lo tanto, la ET_0 es un parámetro climático que puede ser calculado a partir de los datos meteorológicos (Allen *et al.*, 2006). AquaCrop no calcula la evapotranspiración de manera directa, por lo tanto, en este estudio se utilizó el software de circulación gratuita ET_0 Calculator, desarrollado por la FAO. Este es un módulo complementario del software AquaCrop que utiliza el método Penman Monteith-FAO para obtener la evapotranspiración de referencia como función de variables climáticas y de la localización geográfica.

En la simulación del desarrollo del cultivo realizado con AquaCrop se genera la respuesta posible al estrés hídrico que pueda presentarse, según las condiciones climáticas durante su ciclo de desarrollo. Éste se estima de acuerdo con las condiciones del clima a partir de la fecha de siembra y se usa especialmente para el período de polinización. El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico: i) inhibición de la expansión del dosel vegetal, ii) aceleración de la senescencia del dosel vegetal y iii) cierre estomático. Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta, el modelo considera una curva que se activa al alcanzar límites establecidos para el contenido de agua del suelo.

Finalmente, el modelo también predice la productividad del agua con respecto a la evapotranspiración (WP_{ET}) según el volumen de agua disponible en el suelo, estimado a partir de datos de lluvia o riego en el suelo. En particular, la aplicación de AquaCrop es considerado muy útil cuando el agua es el factor limitante (FAO, 2003).

Calibración del modelo AquaCrop

Para analizar el impacto de la variabilidad climática sobre los rendimientos del maíz en la Región de Nampula se realizaron simulaciones del cultivo, manteniendo el tipo de suelo y el nivel de tecnología utilizada por los/as agricultores/as, considerando además las limitaciones de la fertilidad de los suelos y la variabilidad climática inter-anual medida entre los años 2013 a 2018 y desde el mes de diciembre hasta mayo de cada temporada. Además, se utilizaron los parámetros como temperatura máxima y mínima, precipitaciones, velocidad del viento, radiación solar, también parámetros por defecto para la especie maíz que se encuentra disponible en el modelo, tales como: germinación, máxima cobertura del dosel, máxima profundidad de enraizamiento, inicio de la senescencia del dosel, maduración, floración, índice de cosecha (H_i) y duración de la floración.

El objetivo del proceso de calibración es minimizar las diferencias entre los rendimientos medidos y los simulados por AquaCrop. Los parámetros calibrados fueron fecha de siembra, cobertura del dosel inicial y máximo, duración del ciclo, índice de cosecha y fertilidad y sus rangos seleccionados en base a mediciones de campo, el manual de referencia AquaCrop (Steduto *et al.*, 2009) y los valores reportados en la literatura. Para evaluar la eficiencia de la modelización de los datos de rendimiento de maíz, se asumió que una simulación es aceptable si el rendimiento simulado se encontraba dentro de un rango de $\pm 15\%$ el valor del rendimiento promedio medido.

Cambio climático

Una vez parametrizado el modelo para el rendimiento de maíz, se utilizó el modelo AquaCrop con la intención de estudiar tanto los efectos del cambio climático, como las posibles medidas de adaptación de los cultivos. En la Región de Nampula se proyecta que bajo los escenarios de cambio climático se podría presentar una variación en la temperatura en un rango de $-0,10^\circ\text{C}$ a $0,10^\circ\text{C}$ y una reducción en el monto de precipitaciones de -2% por 10 años (WFP, 2017). Por lo tanto, en este estudio, se evaluó el porcentaje de cambio respecto a los rendimientos simulados de las temporadas agrícolas de 2013-2018.

Se utilizó el modelo CLIMAGEN (modelo en desarrollo de la Universidad de Córdoba, España) para generar tres escenarios de cambio climático para los próximos 25 años, desde un escenario de bajo hasta uno de alto estrés hídrico en el cultivo de secano en Nampula (Cuadro 2). El modelo CLIMAGEN se basa en los trabajos de Richardson y Wright (1984) y Geng *et al.* (1988) y permite modificar (aumentar o reducir) la temperatura media anual y la precipitación media anual registrada en una zona geográfica en particular del planeta. Aunque el modelo CLIMAGEN no ha sido publicado, ha sido recientemente utilizado satisfactoriamente por García-Vila *et al.* (2019) y Mairech *et al.* (2020).

Cuadro 2. Escenarios de cambio climático y su efecto en el estrés hídrico par cultivos de secano para ser evaluados en la Región de Nampula-Mozambique.

Escenario	Cambio de la temperatura media anual	Cambio de la precipitación media anual	Estrés hídrico
	----- % -----		
1	0,025	- 0,5	Bajo
2	0,050	- 1,0	Medio
3	0,100	- 2,0	Alto

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parametrización del modelo AquaCrop

En el proceso de parametrización del modelo AquaCrop se ajustaron algunos parámetros de acuerdo con los datos encontrados en la literatura como se muestra en el Cuadro 3. Estos parámetros ajustados se utilizaron para las simulaciones iniciales de las 5 temporadas de producción de maíz, y también para las proyecciones de 25 años ante escenarios de cambio climático.

Cuadro 3. Parámetros y sus valores utilizados en las simulaciones del rendimiento de maíz en el modelo AquaCrop (Versión 6.1).

Parámetros	Valores	
Ciclo del cultivo de maíz	140 días	
Densidad de plantas	8.000 plantas ha ⁻¹	
Productividad del agua	0,170 toneladas ha ⁻¹	
Efecto del estrés de fertilidad del suelo	Sin estrés	65 días
Desarrollo de la cubierta vegetal	Según la calibración	71 días
Infestación de malezas	16-25%	
Tipo de suelo (clase textural)	Arcillosa	
Profundidad de suelo	4 m	
Número de horizontes	1	
Profundidad máxima de raíces	1 m	

El modelo AquaCrop se parametrizó según las características de la región de estudio en Nampula-Mozambique, en particular con parámetros de entrada como clima, cultivo, manejo y suelo. Es importante destacar que el modelo permite la ejecución de simulaciones para usuarios que tengan limitaciones en la capacidad de computadores básicos y es además muy amigable para usuarios principiantes. En este sentido, el modelo no pierde la exactitud porque ocupa menos parámetros cuando se compara a con otros modelos biofísicos más complejos (Raes *et al.*, 2009).

Lo anterior se ha demostrado en numerosas aplicaciones exitosas del modelo, mostrando calibraciones con buen ajuste al compararse con resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo. Igualmente, hay resultados de múltiples investigaciones a nivel mundial y se han reportado experiencias de la adaptación y calibración exitosa en lugares con diferentes condiciones ambientales y características propias de los cultivos (Bautista, 2016).

Por ejemplo, en Colombia un grupo de investigadores reportó que el modelo AquaCrop les permitió estimar rendimientos agrícolas ante los impactos del cambio climático, donde concluyeron que los modelos de simulación de cultivos se presentan como una útil alternativa para analizar la incidencia del clima en el rendimiento y, analizar fenómenos de

variabilidad climática inter-anual e intra-anual y escenarios de cambio climático (FAO, 2013).

Además, este modelo es confiable para las simulaciones de biomasa, rendimiento y demanda de agua, y se recomienda para su aplicación en efectos del clima (Stricevic *et al.*, 2011). Por ejemplo, AquaCrop fue parametrizado y evaluado de forma satisfactoria para la simulación del rendimiento del cultivo de maíz utilizando datos experimentales de seis temporadas de cultivo en la Universidad de California Davis, Estados Unidos (Heng *et al.*, 2009).

Evapotranspiración en el cultivo de maíz

Durante las simulaciones de las 5 temporadas, fue posible observar una variabilidad de la precipitación, generándose un superávit respecto a la evapotranspiración (Cuadro 4). Es importante destacar que cuando hay una cobertura del dosel completa y hay agua disponible durante el ciclo, el cultivo de maíz transpira a una tasa ligeramente superior a la evapotranspiración de referencia (ET₀).

Cuadro 4. Precipitación (PP) y evapotranspiración de cultivo (ET_c) durante el periodo de 5 temporadas del estudio.

Temporada	Precipitación	ET _c	Δ (PP-ET _c)
	-----mm-----		
2013-2014	722	430	292
2014-2015	757	421	336
2015-2016	780	438	342
2016-2017	984	424	560
2017-2018	902	439	463

Por otra parte, es importante discutir la relación que existe entre variables climáticas y los estados fenológicos del cultivo. Así por ejemplo en el periodo de siembra, casi el 100% de la evapotranspiración ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal está completa, más del 90% de la ET ocurre como transpiración (Villegas y Torres, 1977). Por otra parte, cuando se superan los umbrales de las temperaturas máximas se genera una reducción de la fotosíntesis y un aumento de las tasas de evapotranspiración y, por tanto, una mayor demanda de agua (Crafts-Brandner y Salvucci, 2002; Zampieri *et al.*, 2019).

En situaciones de buena distribución de agua, la evapotranspiración estacional varía de menos de 500 a más de 800 mm, que corresponde a la evapotranspiración estacional típica de una variedad de ciclo medio (Allen *et al.*, 2006).

Además, las temperaturas más altas aceleran la transición entre las fases fenológicas y reducen el rendimiento de los cultivos (Tebaldi y Lobell, 2018). De este modo, se deben buscar métodos sostenibles para aumentar la productividad del agua de los cultivos,

principalmente en regiones áridas y semiáridas, las cuales sufren frecuentemente de periodos prolongados de sequía (Debaeke y Aboudrare, 2004).

Es importante enfatizar que la región de Nampula en general presenta un clima que se caracteriza por dos estaciones muy marcadas: verano e invierno. Generalmente hay mayor ocurrencia de precipitaciones en el verano que en el invierno, donde las precipitaciones son intensas y con una variabilidad inter-anual muy alta.

Simulaciones del rendimiento del cultivo de maíz

Los valores promedios medidos y las simulaciones obtenidas por el modelo AquaCrop de los rendimientos de maíz en la región de Nampula-Mozambique para las temporadas de 2013-2018 se presentan en el Cuadro 5 y la Figura 2. Se observó que en general las simulaciones del rendimiento del grano de maíz siguieron las tendencias de los datos observados, donde las diferencias entre el rendimiento observado (OBS) y simulado (SIM) se encontraron siempre dentro de un rango de diferencias de un $\pm 15\%$. Además, la producción de maíz grano para las cinco temporadas fue de 3.885 kg ha^{-1} para el rendimiento observado y de 3.636 kg ha^{-1} para el rendimiento simulado, lo que representa solo una subestimación en un 6% en el rendimiento OBS total de un quinquenio.

Cuadro 5. Rendimiento observado (OBS) y simulado (SIM) del cultivo de *Zea mays* L. obtenido en las temporadas 2013-2018.

Temporada	Rendimiento	
	OBS	SIM
	---- kg ha^{-1} ----	
2013-2014	797	858
2014-2015	804	685
2015-2016	732	694
2016-2017	740	649
2017-2018	808	749
Total (5 temporadas)	3.885	3.636
Promedio (5 temporadas)	776	727

De igual forma, Heng *et al.* (2009) en un estudio en Estados Unidos demostró que AquaCrop fue capaz de simular adecuadamente el cultivo de cobertura, crecimiento de la biomasa y el rendimiento de los granos de cuatro cultivares de maíz durante seis temporadas. Por otra parte, en África, Fiwa (2015) evaluó la capacidad de AquaCrop para simular el rendimiento del maíz bajo condiciones de secano en Malawi-Central, donde encontró una buena correlación entre los datos observados y los resultados simulados.

Stevens y Madani (2016) también evaluaron la capacidad de AquaCrop para simular el rendimiento del maíz en Malawi-Central y descubrieron que, aunque el modelo sobrestimaba los rendimientos en su estudio, seguía siendo adecuado para evaluar el

cambio relativo. Estos autores agregan que AquaCrop se considera apropiado para evaluar los posibles efectos del cambio climático en los rendimientos del maíz en Malawi-Central, en particular si se utiliza el cambio relativo en el rendimiento en lugar de los valores absolutos.

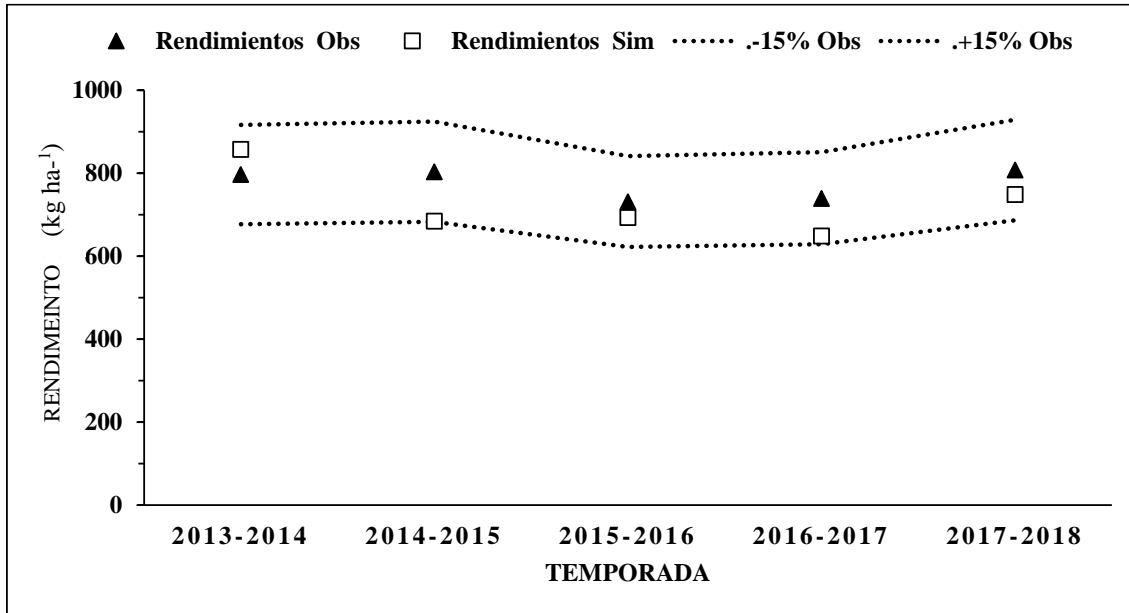


Figura 2. Registro de rendimientos observado y simulado del cultivo de maíz en la región de Nampula-Mozambique entre las temporadas 2013 a 2018.

Simulaciones de la productividad del agua del cultivo de maíz

Durante las 5 temporadas de desarrollo del cultivo de maíz fue posible identificar que el principal factor de estrés fue el cierre de estomas, con un rango que varió entre 82 y 89%. En relación con la productividad del agua respecto a la evapotranspiración (WP_{ET}), se puede observar que junto al rendimiento más altos de maíz se registró el valor más alto de WP_{ET} en la temporada 2013-2014 (Cuadro 6).

Lo anterior es el resultado de una conductancia estomática más baja de las hojas del maíz en relación con la mayoría de las especies de cultivos de hojas anchas. Dado que se trata de un cultivo C4, la eficiencia en el uso del agua del maíz es alta (Steduto *et al.*, 2007; Steduto *et al.*, 2012), principalmente debido a la alta tasa de fotosíntesis, con solamente un aporte mínimo de la tasa de transpiración ligeramente más restringida.

Por otra parte, el uso eficiente del agua para el maíz depende de varios factores, entre ellos se destaca la demanda evaporativa de la atmosfera, del clima, momento de siembra, ciclo del cultivo y la disponibilidad de agua.

Cuadro 6. Factores de estrés, productividad del agua y rendimientos simulados de maíz por el modelo AquaCrop para cinco temporadas de maíz (2013-2018).

Temporada	Factores de estrés*				WP _{ET}	Rendimiento
	Temperatura	Agua		Malezas		
		CE	EC			
		----- % -----			- kg m ⁻³ -	- kg ha ⁻¹ -
2013-2014	-	84	-	21	0,47	858
2014-2015	-	89	-	21	0,38	685
2015-2016	1	82	1	21	0,40	694
2016-2017	-	84	-	21	0,37	649
2017-2018	-	85	-	21	0,39	749

* CE= Cierre de estomas; EC=Expansión de la canopia; WP=Productividad del agua

Por otra parte, el maíz bajo condiciones favorables responde de manera positiva al incremento del CO₂ atmosférico, como lo indica el aumento del área foliar (Hsiao y Jackson, 1999) y de la biomasa, al menos hasta 520 ppm de CO₂. Por tanto, los ajustes de AquaCrop normalizan la productividad del agua (WP*) según la concentración de CO₂ atmosférico, año tras año. Por ejemplo, la WP* del maíz se ajustó de 32,4 g m⁻² en 1990 a 33,7 g m⁻² en el año 2000.

Aplicación del modelo AquaCrop para evaluar escenarios de cambio climático

El cambio climático es un proceso causado por actividades naturales y antropogénicas, considerándose estas últimas como la principal causa del reciente calentamiento global según los expertos (IPCC, 2007). A nivel mundial, la temperatura media ha aumentado 0,78 °C entre 1850 y 2012 (IPCC, 2013). Además, el informe del IPCC (AR5) mostró que la temperatura media anual seguirá aumentando entre 2016 y 2035 (Stocker, 2013) y la concentración de CO₂ alcanzará las 560 ppm en 2050 (IPCC, 2014). Así, en el Cuadro 7 se presentan las simulaciones de los 3 escenarios evaluados en este estudio, que muestran claramente que en la medida que se incrementa el estrés hídrico (escenarios 1 al 3), se reduce el monto de precipitaciones y aumenta la ETc del cultivo de maíz en Nampula.

Cuadro 7. Precipitación (PP) y evapotranspiración de cultivo (ETc) de los tres escenarios en estudio correspondientes a valores promedios de los 25 años de cada escenario.

Escenarios	Precipitación	ETc	Δ (PP-ETc)
	-----mm-----		
1	810	440	370
2	786	435	351
3	758	521	237

Como se muestra en el Figura 3 en la medida que los escenarios de cambio climático aumentan sus condiciones de estrés hídrico, se observó un aumento en la variabilidad interanual en los rendimientos. Claramente lo anterior muestra una amenaza a la seguridad alimentaria en la Región, cuando los efectos del cambio climático podrían generar una incertidumbre mayor en los rendimientos del cultivo bajo condiciones de secano que dependen directamente de las precipitaciones que se registran cada año.

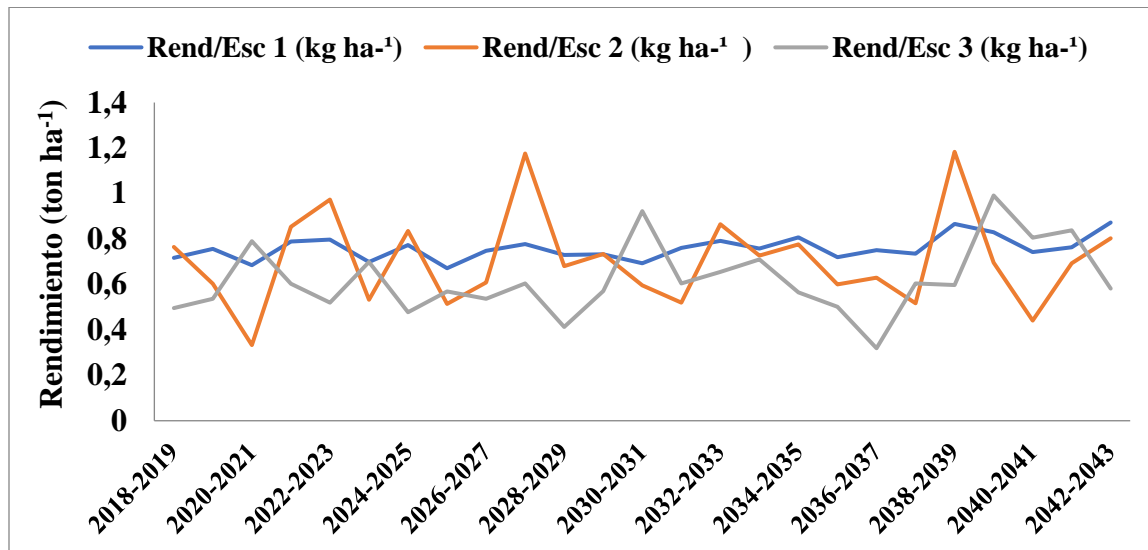


Figura 3. Rendimientos de maíz bajo tres escenarios de cambio climáticos para 25 años (2019-2043) en Nampula, Mozambique.

Al igual que en las simulaciones de las 5 temporadas, en los tres escenarios de cambio climático se identificó que durante el desarrollo del cultivo de maíz el principal factor de estrés fue el cierre de estomas, con un rango que se incrementó desde un 81 hasta un 88% en la medida que se generaban condiciones de estrés hídrico mayores (Cuadro 8). Respecto a la productividad del agua en relación a la transpiración (WP_{ET}), los escenarios muestran que en la medida que el estrés hídrico aumenta, la WP_{ET} disminuye. De igual forma, bajo el escenario de mayor restricción hídrica (Escenario 3) la WP_{ET} muestra una mayor variabilidad interanual, como se muestra en la Figura 4.

Cuadro 8. Factores de estrés, productividad del agua y rendimientos de maíz simulados por el modelo AquaCrop para tres escenarios de cambio climático para un periodo de 25 años.

Escenario	Factores de estrés*				WP _{ET} - kg m ⁻³ -	Rendimiento - kg ha ⁻¹ -
	Temperatura	Agua		Malezas		
		CE	EC			
		----- % -----				
1	-	81	21	-	0,45	758
2	-	86	21	-	0,43	706
3	-	88	21	-	0,38	620

CE= Cierre de estomas; EC=Expansión de la canopia; WP=Productividad del agua

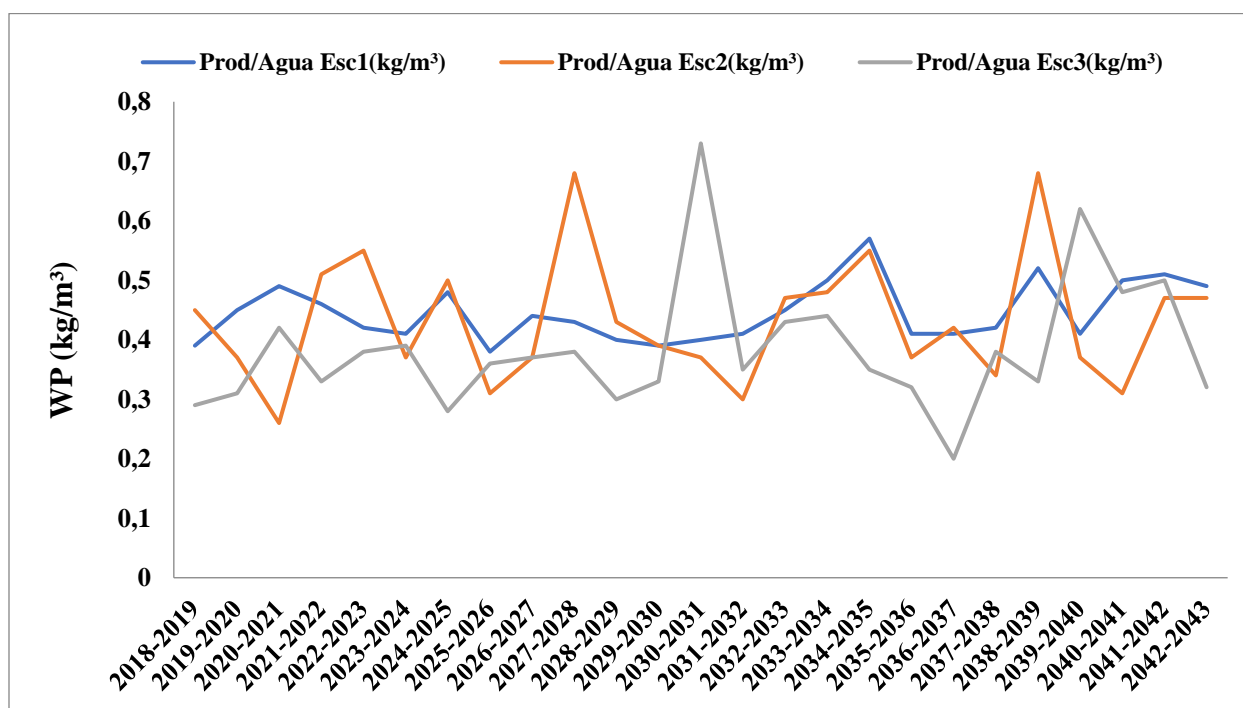


Figura 4. Productividad del agua (WP) con tres escenarios de cambio climáticos para 25 años (2019-2043) en Nampula-Mozambique.

Los resultados anteriores confirman que la agricultura es uno de los sectores más afectados por el cambio climático (Godfray *et al.*, 2011; Ho *et al.*, 2018) ya que los sistemas agrícolas responden directamente a las variables climáticas, por ejemplo, la temperatura, las precipitaciones, la concentración de CO₂, la radiación solar para alcanzar la productividad. Sin embargo, la adaptación agrícola es una técnica importante para mitigar los efectos negativos del cambio climático en la producción de cultivos (Hoffmann y Sgro 2011; Lobell, 2014). En este sentido, este estudio confirmó que el modelo AquaCrop se puede utilizar para evaluar el impacto del cambio climático en la productividad de un cultivo en

una región determinada, lo que puede ser utilizado como un insumo para el desarrollo y procesos de toma de decisiones de políticas agrarias.

En particular, sobre la base de las proyecciones del cambio climático para el África subsahariana, varios estudios han indicado la vulnerabilidad de la productividad futura de los cultivos de maíz en la región, y se espera que los rendimientos del maíz disminuyan durante el siglo XXI (Challinor *et al.*, 2014; Gachene *et al.*, 2015).

De las fuentes de alimentos básicos, como los cultivos de cereales (por ejemplo, el trigo, el arroz, el maíz, la cebada, el sorgo) en muchas partes del mundo también se enfrentarán a las graves consecuencias del cambio climático (Parry *et al.*, 2004; Lobell y Field, 2007; Özdoğan, 2011; Gammans *et al.*, 2017), y se ha proyectado una disminución general de los rendimientos de hasta un 22% para 2080. Por otra parte, entre los cultivos mencionados, el maíz es importante no solo como cultivo comestible, sino también como fuente de biocombustibles en otras ocasiones (Blackie *et al.*, 2016).

Los resultados anteriores pueden ser utilizados para adelantar el manejo del cultivo, por ejemplo, cambiar la fecha de siembra para disminuir los efectos adversos del cambio climático puede tener un impacto positivo en la producción de maíz (Sultana *et al.*, 2009; Stancu *et al.*, 2010). Así, Wang *et al.* (2012) señalan que cambiar los tiempos de siembra y cosecha, para contrarrestar los efectos adversos del cambio climático puede aumentar el rendimiento de maíz en un 4-6%.

En relación con lo anterior, la prolongación de las temporadas de lluvia más cortas y de los períodos de sequía han reducido el rendimiento del maíz en un 40% del promedio a largo plazo en las regiones agroecológicas (RAE) I y II (UNDP, 2010). El cambio climático y la variabilidad de precipitaciones son dos importantes factores que contribuyen para estimar los rendimientos de los cultivos, pero también pueden afectar de forma negativa y en la agricultura en general. En consecuencia, la variabilidad de la precipitación y la temperatura afectan la productividad agrícola de secano (Ojeda *et al.*, 2018).

Para la década de 2050, se estima que el planeta tendrá una población mundial de 9.100 millones (Rosenzweig *et al.*, 2013), con un clima más cálido por 2°C y la concentración de CO₂ cercana a 550 ppm (Jaggard *et al.*, 2010). Con relación a este último factor, en algunas regiones, el aumento del CO₂ en la atmósfera podría aumentar los rendimientos de los cultivos en aproximadamente un 13% (Jaggard *et al.*, 2010), lo que transforma al cambio climático en una oportunidad.

Sin embargo, el aumento de la temperatura del aire afecta negativamente al crecimiento y al rendimiento de los cultivos (Tigchelaar *et al.*, 2018). Además, el cambio climático reduciría el consumo del agua de todos los cultivos, pero el aumento de las tasas de evapotranspiración anularía este efecto debido al aumento de la temperatura del aire (Jaggard *et al.*, 2010).

Así, por cada aumento de grado en la temperatura media del aire mundial, se prevé que el rendimiento del maíz se reduciría en un 7,4% (Zhao *et al.*, 2017; Tigchelaar *et al.*, 2018). En este sentido, el cambio climático para 2050 reduciría el rendimiento del maíz a nivel

mundial y en África en un 3%-10% y 20%, respectivamente (Thornton y Cramer, 2012; Macauley y Ramadjita, 2015; Blackie *et al.*, 2016).

Por último, varios estudios han analizado las posibilidades de disminución del rendimiento de los cultivos en todo el mundo debido al aumento de la temperatura asociado al cambio climático (Alcamo *et al.*, 2007; Ruane *et al.*, 2013; Duncan *et al.*, 2015), mientras que la concentración elevada de CO₂ podría aumentar la producción de los cultivos y ayudar a reducir el estrés por sequía al aumentar la productividad del agua (Leakey *et al.*, 2019). Sin embargo, la adopción de las prácticas de gestión de cultivos podría ser el camino por seguir para mitigar las amenazas al rendimiento del maíz asociadas a los cambios en las tendencias climáticas futuras (Tao *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2017).

CONCLUSIONES

Se puede concluir que fue posible utilizar el modelo AquaCrop para predecir los rendimientos del maíz de forma aceptable dentro un rango de error de un 15% respecto a los valores medidos promedio de la región de Nampula-Mozambique durante cinco temporadas.

Durante las cinco temporadas de desarrollo del cultivo de maíz fue posible identificar que el principal factor de estrés fue el cierre de estomas, con un rango que varió entre 82 y 89%. En relación con la productividad del agua respecto a la evapotranspiración (WP_{ET}), se puede observar que junto al rendimiento más altos de maíz se registró el valor más alto de productividad del agua.

La aplicación del modelo AquaCrop bajo tres escenarios de cambio climático y su efecto en el rendimiento del maíz en la Región de Nampula mostró que bajo el escenario de mayor estrés hídrico se reportaron los menores rendimientos y productividad del agua. Además, bajo el escenario de mayor restricción hídrica se encontró una mayor variabilidad interanual en rendimiento y en la productividad del agua respecto a la transpiración.

LITERATURA CITADA

- Alcamo J, Dronin N, Endejan M, Golubev G, Kirilenko A (2007) A new assessment of climate change impacts on food production shortfalls and water availability in Russia. *Global Environmental Change*. 17: 429–444
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (2006) Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. 297 p.
- Bautista BH (2012) Uso del modelo de simulación FAO-AquaCrop para determinar el período óptimo de siembra de maíz bajo condiciones de temporal. II congreso nacional de riego y drenaje. Chapingo, Mexico.
- Blackie M, Reeves T, Thomas G, Ramsay G (2016): Save and Grow in practice: a guide to sustainable cereal production. Maize, rice, wheat; a guide to sustainable production FAO, Rome, 110 pp. *Food Security*. 8, 1207–1208
- Brito R, Famba S, Munguambe P, Ibraimo N, Julaia C, Agronomia F De, Mondlane UE (2009) Profile of the Limpopo Basin in Mozambique, a contribution to the Challenge Program on Water and Food Project 17 “Integrated Water Resource Management for Improved Rural Livelihoods: Managing risk, mitigating drought and improving water productivity in the the water scarce Limpopo Basin. Gaza, Mozambique.
- Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N (2014) A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Natural Climate Change* 4: 287–291
- Crafts-Brandner SJ, Salvucci ME (2002) Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. *Plant Physiol* 129: 1773–1780
- Debaeke P, Aboudrare A (2004) Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal Agronomy* 21: 433–446
- Dias P (2013) Analysis of incentives and disincentives for maize in Mozambique. Technical Notes Series, MAFAP, FAO. Rome, Italy.
- Duncan JMA, Dash J, Atkinson PM (2015) Elucidating the impact of temperature variability and extremes on cereal croplands through remote sensing. *Global Change Biological* 21: 1541–1551
- FAO (2003) Descubrir el Potencial del Agua para la Agricultura. Disponible en: <http://www.fao.org/3/y4525s/y4525s00.htm#Contents> (Consultado en 24 de Junio de 2020).

- FAO (2013) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. ESTUDIO FAO: RIEGO Y DRENAJE 66, Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf> (Consultado en 6 de Junio de 2020).
- Fiwa L (2015) Improving rainfed cereal production and water. Modelling field management options in response to current and future climatic conditions. Science, Engineering & Technology Uitgegeven in eigen beheer, Lilongwe, Malawi.
- Gachene CKK, Karuma AN, Baaru MW (2015) Sustainable Intensification to Advance Food Security and Enhance Climate Resilience in Africa. Sustainable Intensification to Advance Food Security and Enhance Climate Resilience in Africa. Nairobi, Kenya.
- Gammans M, Mérel P, Ortiz-Bobea A (2017) Negative impacts of climate change on cereal yields: Statistical evidence from France. Environmental Research Letters.
- Garcia-Vila M, Morillo-Velarde R, Fereres E (2019) Modeling sugar beet responses to irrigation with aquacrop for optimizing water allocation. Water (Switzerland).
- Geng S, Auburn J, Brandstetter E, Li B (1988) A program to simulate meteorological variables: documentation for SIMMETEO. Agron. Prog. Rep 204
- Godfray HCJ, Pretty J, Thomas SM, Warham EJ, Beddington JR (2011) Linking policy on climate and food. Science (80-) 331: 1013–1014
- Heng LK, Hsiao T, Evett S, Howell T, Steduto P (2009) Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. Agronomy Journal 101: 488–498
- Ho CH, Lur HS, Yao MH, Liao FC, Lin YT, Yagi N, Lu HJ (2018) The impact on food security and future adaptation under climate variation: a case study of Taiwan's agriculture and fisheries. Mitig Adapt Strateg Global Change 23: 311–347
- Hoffmann AA, Sgró CM (2011) Climate change and evolutionary adaptation. Nature 470: 479–485
- Hsiao TC, Jackson RB (1999) Interactive effects of water stress and elevated CO₂ on growth, photosynthesis, and water use efficiency. pp 3–31 In: Luo Y, Mooney HA (eds) Carbon dioxide and environmental stress. Academic, New York.
- INE (2013) Instituto Nacional de Estatística. Anuário de Estatísticas. Disponible en: <http://www.ine.gov.mz/estatisticas/publicacoes/anuario/nacionais> (Consultado en 24 de Junio de 2020).
- INE (2014) Instituto Nacional de Estatística. Anuário de Estatísticas. Disponible en: <http://www.ine.gov.mz/estatisticas/publicacoes/anuario/nacionais> (Consultado en 24 de Junio de 2020).

- INE (2015) Instituto Nacional de Estatística. Anuário de Estatísticas. Disponible en: <http://www.ine.gov.mz/estatisticas/publicacoes/anuario/nacionais> (Consultado en 24 de Junio de 2020).
- INE (2016) Instituto Nacional de Estatística. Anuário de Estatísticas. Disponible en: <http://www.ine.gov.mz/estatisticas/publicacoes/anuario/nacionais> (Consultado en 24 de Junio de 2020).
- INE (2017) Instituto Nacional de Estatística. Anuário de Estatísticas. Disponible en: <http://www.ine.gov.mz/estatisticas/publicacoes/anuario/nacionais> (Consultado en 24 de Junio de 2020).
- INE (2018) Instituto Nacional de Estatística. Anuário de Estatísticas. Disponible en: <http://www.ine.gov.mz/estatisticas/publicacoes/anuario/nacionais> (Consultado en 24 de Junio de 2020).
- INGC (2009) Study on the impact of climate change on disaster risk in Mozambique. Change, INGC-Mozambique.
- IPCC (2007) Intergovernmental Panel on Climate Change. A report of working group one of the intergovernmental panel on climate change-summary for policy makers. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Moscow, Russia, p. 5-13.
- IPCC (2013) Intergovernmental Panel on Climate Change 2013: Summary for policymakers. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J (Eds), Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 28.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Manag Risks Extrem Events Disasters to Climate Change Adaption Special Report Intergovernment Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007) IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos N°. 103. FAO, Roma. Informacion sobre Recursos Mundiales Suelos 103: 117
- Jaggard KW, Qi A, Ober S (2010) Possible changes to arable crop yields by 2050. *Philosophy Trans R Soc B Biol Sci* 365: 2835–2851
- Lacombe G, Hoanh CT, Smakhtin V (2012) Multi-year variability or unidirectional trends? Mapping long-term precipitation and temperature changes in continental Southeast Asia using PRECIS regional climate model. *Climate Change* 113: 285–299

- Leakey ADB, Ferguson JN, Pignon CP, Wu A, Jin Z, Hammer GL, Lobell DB (2019) Water Use Efficiency as a Constraint and Target for Improving the Resilience and Productivity of C 3 and C 4 Crops.
- Lin Y, Feng Z, Wu W, Yang Y, Zhou Y, Xu C (2017) Potential impacts of climate change and adaptation on maize in Northeast China. *Agronomy Journal* 109: 1476–1490
- Lobell DB (2014) Climate change adaptation in crop production: Beware of illusions. *Global Food Security* 3: 72–76
- Lobell DB, Field CB (2007) Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environment Results Letts*.
- Macauley H, Ramadjita T (2015) Feeding Africa. *Chemical Engineering News* 86: 74
- Mairech H, López-Bernal Á, Moriondo M, Dibari C, Regni L, Proietti P, Villalobos FJ, Testi L (2020) Is new olive farming sustainable? A spatial comparison of productive and environmental performances between traditional and new olive orchards with the model OliveCan. *Agricultural Systems* 181: 102816
- Manhique EV (2016) Impacto das Mudancas Climaticas sobre o rendimento do milho (*Zea mays*) em sequeiro na bacia do rio Limpopo. Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de agronomia, Maputo, Moçambique.
- Martínez BC, Rosado OR, López FG, Hernández PP, Becerra ÁM, Villamil LV (2011) Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Trop Subtrop Agroecosystems* 14: 999–1010
- MAE (2005) Ministério da Administração Estatal 2005: Perfil da Província de Nampula. MAE, Moçambique.
- MAE (2015) Ministério da Administração Estatal 2005: Perfil da Província de Nampula. MAE, Moçambique.
- MASA (2019) Anuário de Estatísticas Agrárias 2019. MASA (Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar), Moçambique.
- MASA (2015) Plano director para o desenvolvimento agrícola do corredor de Nacala en Mozambique. 151: 10–17
- Midgley S, Dejene A, Mattick A (2012) Adaptation to climate change in semi-arid environments: experience and lessons from Mozambique.
- Ojeda JJ, Caviglia OP, Irisarri JGN, Agnusdei MG (2018) Modelling inter-annual variation in dry matter yield and precipitation use efficiency of perennial pastures and annual forage crops sequences. *Agriculture for Meteorological* 259: 1–10
- Özdoğan M (2011) Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agricultural Ecosystem Environment* 141: 1–12

- Parry ML, Rosenzweig C, Iglesias A, Livermore M, Fischer G (2004) Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environment Change* 14: 53–67
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E (2009) Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal* 101: 438–447
- Raja W, Kanth RH, Singh P (2018) Validating the AquaCrop model for maize under different sowing dates. *Water Policy* 20: 826–840
- Richardson CW, Wright DA (1984) WGEN: A model for generating daily weather variables. *ARS*
- Rosenzweig C, Jones JW, Hatfield JL, Ruane AC, Boote KJ, Thorburn P, Antle JM, Nelson GC, Porter C, Janssen S, et al (2013) The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. *Agricultural for Meteorological* 170: 166–182
- Ruane AC, Cecil LDW, Horton RM, Gordón R, McCollum R, Brown D, Killough B, Goldberg R, Greeley AP, Rosenzweig C (2013) Climate change impact uncertainties for maize in Panama: Farm information, climate projections, and yield sensitivities. *Agricultural for Meteorological* 170: 132–145
- Stancu GD, Kaddouri F, Lacoste DA, Laux CO (2010) Atmospheric pressure plasma diagnostics by OES, CRDS and TALIF.
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E (2007) On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Scienc* 25: 189–207
- Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (2012) Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. *Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura*.
- Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E (2009) Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101: 426–437
- Stevens T, Madani K (2016) Future climate impacts on maize farming and food security in Malawi. *Science Rep* 6: 1–14
- Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (2013) Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Stricevic R, Cosic M, Djurovic N, Pejic B, Maksimovic L (2011) Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize,

- sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management* 98: 1615–1621
- Sultana H, Ali N, Iqbal MM, Khan AM (2009) Vulnerability and adaptability of wheat production in different climatic zones of Pakistan under climate change scenarios. *Climate Change* 94: 123–142
- Tao F, Zhang Z, Zhang S, Rötter RP, Shi W, Xiao D, Liu Y, Wang M, Liu F, Zhang H (2016) Historical data provide new insights into response and adaptation of maize production systems to climate change/variability in China. *F Crop Res* 185: 1–11
- Tebaldi C, Lobell D (2018) Estimated impacts of emission reductions on wheat and maize crops. *Clim Change* 146: 533–545
- Thornton P, Cramer L (2012) Impacts of climate change on the agricultural and aquatic systems and natural resources within the CGIAR's mandate. CGIAR Res Program Climate Change Agricultural Food Security CCAFS Work: 1–201
- Tigchelaar M, Battisti DS, Naylor RL, Ray DK (2018) Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proc Natl Acad Sci U S A* 115: 6644–6649
- Uaiene RN (2006) Introdução de Novas Tecnologias Agrícolas e Estratégias de Comercialização no Centro de Moçambique. Instituto de Investigação Agrária Moçambique.
- UELE DI (2013) Impactos dos Modos de Variabilidade Climática no. 169
- UNDP (2010) Adaptation to the effects of drought and climate change in Agro-ecological Regions I and II in Zambia. Lusaka, Zambia: UNDP.
- Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Heng LK, Garcia Vila M, Mejias Moreno P (2014) AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Model Software* 62: 351–360
- Villegas JA, Torres BE (1977) Evapotranspiracion. Facultad de agronomia Agron. y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucuman, Colombia.
- Wang J, Wang E, Yang X, Zhang F, Yin H (2012) Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation. *Climate Change* 113: 825–840
- Warnatzsch EA, Reay DS, Camardo Leggieri M, Battilani P (2020) Climate Change Impact on Aflatoxin Contamination Risk in Malawi's Maize Crops. *Front Sustain Food System*.
- WFP (2017) Moçambique Analises de Clima de 1981-2017 Disponible en https://fscluster.org/sites/default/files/documents/mozclimateanalysisl_pt.pdf (Consultado en 26 de Mayo de 2020).

- Zampieri M, Ceglar A, Dentener F, Dosio A, Naumann G, van den Berg M, Toreti A (2019) When Will Current Climate Extremes Affecting Maize Production Become the Norm? *Earth's Future* 7: 113–122
- Zhao C, Liu B, Piao S, Wang X, Lobell DB, Huang Y, Huang M, Yao Y, Bassu S, Ciais P, et al (2017) Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Academy Science USA* 114: 9326–9331