

**TENDENCIAS MUNDIALES EN LA APLICACIÓN DE MODELOS
HIDROLÓGICOS EN EL ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DE LA AGRICULTURA:
UNA REVISIÓN**

Ruddy Lizette Huertas Beltrán

Tutor: MSc. Albert Johan Portela Ramírez

**Trabajo de grado como requisito para obtener el título de “Especialista en
Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas”**

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ciencias y Tecnologías

Especialización en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Bogotá D.C., 2022

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
OBJETIVOS.....	6
OBJETIVO GENERAL.....	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
INTRODUCCIÓN.....	7
JUSTIFICACIÓN	8
METODOLOGÍA	9
SISTEMA DE ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.....	10
RESULTADOS.....	12
ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS ASOCIADOS AL ESTUDIO Y PLANIFICACIÓN DE LA AGRICULTURA A NIVEL GLOBAL.....	19
CONCLUSIONES.....	20
RECOMENDACIÓN	21
BIBLIOGRAFÍA.....	22

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Orden de importancia para los factores clave identificados a nivel mundial en las tres bases de datos seleccionadas.	11
Tabla 2. Distribución mundial del estudio de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura.	12
Tabla 3. Resumen de las tendencias de modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura a nivel global.	19

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Distribución mundial por países del estudio de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura a nivel mundial.	13
---	----

ANEXOS

Anexo 1	26
---------------	----

Resumen

Los modelos hidrológicos son herramientas que contribuyen a comprender, explorar y analizar los procesos de ocurrencia y obtener opciones de gestión sostenibles. Los resultados que generan estos modelos constituyen una información muy valiosa para la toma de decisiones estratégicas a futuro o en tiempo real. El objetivo de esta revisión es identificar las tendencias de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura entre los años 2011 a 2021 a escala mundial. Se utilizó un método de revisión sistemática de literatura, que incluyó un índice de frecuencia de citación mediante cuartiles (Q) (Ome y Zafra, 2018). Se evidenció a Estados Unidos a nivel mundial como país tendencia de la aplicación de los modelos hidrológicos en el estudio y planificación de la agricultura, seguido por China y México. Además, se pudo identificar que el modelo RZWQM2 fue el de mayor tendencia, debido a su integralidad al evaluar eficazmente el impacto de las prácticas de gestión agrícola en la producción de cultivos y la calidad del agua y del suelo. Finalmente, esta revisión servirá como insumo para investigaciones futuras de entes gubernamentales e instituciones ambientales para la elección de herramientas de gestión del recurso.

Palabras clave: modelos hidrológicos, modelos de cultivos, agricultura.

Abstract

Hydrological models are tools that help us understand, explore and analyze the processes of occurrence and obtain sustainable management options. The results generated by these models constitute very valuable information for making strategic decisions in the future or in real time. The objective of this review is to identify trends in hydrological models associated with the study and planning of agriculture between the years 2011 to 2021 on a global scale. A systematic literature review method was used, which included a citation frequency index by quartiles (Q). The United States was evidenced worldwide as a trend country for the application of hydrological models in the study and planning of agriculture, followed by China and Mexico. In addition, it was possible to identify that the RZWQM2 model was the one with the greatest trend, due to its comprehensiveness when effectively evaluating the impact of agricultural management practices on crop production and the quality of water and soil. Finally, this review will serve as input for future research by government entities and environmental institutions for the choice of resource management tools.

Keywords: hydrological models, crop models, agriculture.

Objetivos

Objetivo General

Realizar la identificación de las tendencias en los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura; esto a través de una revisión bibliográfica para los últimos 10 años (2011-2021) realizada a nivel mundial y delimitada por tres bases de datos.

Objetivos Específicos

Indagar acerca de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura a nivel global.

Establecer un orden de importancia de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura a nivel global.

Determinar la distribución geográfica de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura de aplicación más común.

Introducción

Los modelos de cultivos demuestran que la producción de alimentos es vulnerable al cambio climático en muchas regiones debido a una combinación de cambio de temperatura, estrés hídrico y clima extremo (Challinor y col., 2009, 2010; Lobell y Field, 2007; Fraser et al., 2013). Aunque existe una considerable incertidumbre en estos modelos, y se debate sobre la forma en que la contaminación por ozono, la fertilización con dióxido de carbono y la escasez de agua pueden interactuar con el cambio climático para afectar la productividad, existe una preocupación general en la literatura que estos problemas probablemente causen que la producción de alimentos caerá en los próximos 100 años (Jaggard y col., 2010; Long y col., 2005; Royal Society, 2008; Sitch y col., 2007; Fraser et al., 2013).

Esto lleva a algunos a argumentar que la seguridad alimentaria mundial está amenazada a menos que la producción aumente hasta en un 70% (Bruinsma, 2009; Godfray y col., 2010a; Fraser et al., 2013). Por tanto, las nuevas tecnologías (Brown y Funk, 2008; Fraser et al., 2013), y en particular biotecnologías (Tester y Langridge, 2010; Fraser et al., 2013) pueden ser necesarias para crear cultivos más productivos y garantizar la seguridad alimentaria durante el siglo XXI.

Además, en el contexto socioeconómico, ecológico e institucional de la agricultura esta tiene una enorme influencia sobre, si un productor puede adaptarse a los factores ambientales estresantes y seguir siendo productivo. (Adger, 2006; Brooks y col., 2005; Patt y col., 2005; Smit y Skinner, 2002; Thomas y col., 2007; Watts y Bohle, 1993; Fraser et al., 2013).

La mejora de la productividad del agua de los cultivos requiere la reducción de componentes no beneficiosos como la escorrentía, la evaporación del suelo y la percolación. Por lo tanto, el enfoque es la interacción entre la superficie y el subsuelo y, más específicamente, el balance hídrico del suelo (Kanda et al., 2018).

Dada la situación reportada, la mayoría de los modelos hidrológicos que se utilizan en la agricultura se centran principalmente en los procesos físicos del suelo y simplifican el proceso de transpiración, la absorción de agua de la raíz y el crecimiento de los cultivos, mientras que

los modelos de cultivos, por otro lado, incluyen procesos detallados de asimilación de carbono y desarrollo de cultivos, pero son inadecuados para describir los procesos de la zona raíz (Vereecken et al., 2016; Kanda et al., 2018). Por tanto, el rendimiento y la producción de biomasa son procesos complejos que dependen significativamente de la interacción entre el suelo y el cultivo y están influenciados por las actividades humanas (Vereecken et al., 2016; Kanda et al., 2018).

Considerando los efectos que se acentúan con mayor fuerza en el presente y los que se avecinan a raíz de las condiciones ambientales cambiantes, es relevante estar atentos y preparados para la adaptación integral. Y basados en las herramientas que se han estado evaluando a través de los años, surge un criterio de gran importancia para poder afrontar de manera más eficaz el cambio climático y sus efectos tendiente a investigar y validar modelos acoplados aplicables al recurso hídrico y su integralidad con la producción agrícola como estrategia para la seguridad alimentaria ante la creciente tasa poblacional a nivel mundial.

Justificación

A nivel global el uso eficiente del agua ha adquirido relevancia, incluso buscando garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos en el mundo. En Colombia la oferta de agua está cada vez más amenazada y los problemas de escasez aumentan. Certeza de esto es que más del 80 % de los municipios se proveen con fuentes que no tienen el caudal suficiente para este fin, con pérdidas en las condiciones de regulación y mayor vulnerabilidad, postura que se agrava frente a los fenómenos de variabilidad y cambio climáticos (MAVDT, 2010).

La alta presión sobre el recurso hídrico es próxima, por lo cual es imprescindible promover e implementar el uso eficiente y ahorro del agua (MAVDT, 2010). Por tal razón se deben crear e implementar instrumentos de gestión que contribuyan a promover la conservación del recurso, fundamentados en la optimización de la demanda de agua permitiendo la regulación de las cuencas y el equilibrio del ciclo hidrológico para asegurar la sostenibilidad de los recursos agua y suelo.

Basados en lo anterior y como objetivo de la administración ambiental y sostenibilidad del agua, se realizó esta investigación para contribuir a la mejora de la capacidad administrativa del país en lo relacionado con los recursos naturales a escala nacional, regional y local con el planteamiento en la búsqueda de modelos hidrológicos. Aportando así de una manera clara y precisa a la administración y mejora del servicio ecosistémico agua, enfatizado en el ahorro y el no desperdicio del recurso hídrico. De esta manera se están aunando acciones como administradores ambientales para contribuir con el objetivo *objetivo 13 de acción por el agua de la guía para el uso eficiente y ahorro del agua: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia*.

Por otra parte, con este escrito se pretende impulsar la conservación en renovación de los recursos naturales y el capital natural de las generaciones futuras. Influyendo en gran medida en la preservación de los recursos suelo y agua con la producción de alimentos de manera sostenible convirtiéndose en capital natural de esta generación y de las futuras. Con ello contribuir a la seguridad alimentaria y promover la búsqueda de la renovación del recurso nuevamente a través de un instrumento de gestión como lo son los modelos hidrológicos.

Metodología

Esta revisión se basó en la metodología desarrollada por Ome y Zafra en 2018. Donde se formuló la revisión con base en el sistema de búsqueda bibliográfica desarrollado a partir de bases de datos para la revisión de literatura. Para este caso se emplearon las siguientes: (i) Google Académico, (ii) Academic Research, y (iii) Springer Link. En la primera fase de búsqueda bibliográfica, se utilizaron las siguientes palabras clave en idioma inglés: (i) soil (suelo) y (ii) water models (modelos hidrológicos); estas palabras clave, se tomaron como principales descriptores temáticos. La revisión bibliográfica se realizó entre 2011 y 2021 y sobre el contenido total de artículos y libros depositados en las tres bases de datos consultadas (Ome y Zafra, 2018). En esta primera fase, se detectaron 48.700, 6.981 y 20.831 documentos en las bases de datos Google Scholar, academic research y Springer Link, respectivamente (Tabla 1).

La segunda fase de revisión fue desarrollada para incluir palabras clave adicionales en idioma inglés, reportadas por la base de datos Google Académico (descriptores temáticos: keywords). Estas palabras clave adicionales permitieron identificar los factores clave en los estudios de modelación hidrológica aplicada a la agricultura. A continuación, se listan las palabras clave detectadas (Tabla 1): (i) crop growth (crecimiento de cultivos), (ii) irrigation management (manejo del riego), (iii) soil water dynamic (dinámica del agua del suelo), (iv) y crop models (modelos de cultivos) (Ome y Zafra, 2018).

Sistema de Análisis Bibliográfico

Las bases de datos consultadas se usaron con el objetivo de dar un orden de importancia para los factores clave, identificados a partir de su frecuencia de citación en escritos científicos. Respectivamente, se asumió que los factores clave más significativos en las tendencias de aplicación de modelos hidrológicos en el estudio y planificación de la agricultura fueron frecuentemente citados por las bases de datos consultadas. Por lo tanto, se consideró la importancia de las tecnologías, estudios y factores clave detectados a través de su frecuencia de citación en dichos escritos (Ome y Zafra, 2018). La revisión se realizó durante el período comprendido entre los años 2011-2021.

Se originó un índice de frecuencia de citación (Q) que relacionó el número de documentos detectados en la segunda y primera fase de la metodología de revisión utilizada. Este se hizo con el fin de establecer un orden de importancia mediante cuartiles para los factores clave detectados en las tendencias de aplicación de modelos hidrológicos en el estudio y planificación de la agricultura (Ome y Zafra, 2018). El índice (Q) tuvo una variación entre 0 y 1, siendo: (i) Q1, entre 0,0-0,25; (ii) Q2, entre 0,25-0,5; (iii) Q3, entre 0,5-0,75 y (iv) Q4, entre 0,75-1,0 (Ome y Zafra, 2018), es decir, Q4 representó los factores clave de mayor importancia o frecuencia de citación en los documentos científicos incluidos en las bases de datos consultadas (Tabla 1); por ejemplo, para el factor clave Soil water models, los documentos detectados en la segunda fase fueron 49.800 en relación con los 48.700 documentos detectados en la primera fase; de esta manera, el índice de citación Q fue 0,77 (Q4).

Tabla 1. Orden de importancia para los factores clave identificados a nivel mundial en las tres bases de datos seleccionadas.

Fase	Palabras clave en idioma inglés	Bases de datos					
		Google Scholar		Academic Search Premier		Springer Link	
		Documentos detectados	Índice (Q)	Documentos detectados	Índice (Q)	Documentos detectados (artículos)	Índice (Q)
1	Soil water models	48700	1.0	5835	1.0	20831	1.0
2	Crop growth	64000	1.0	14540	1.0	0	0
	Irrigation management	31800	0.49	10	0.0006	18502	0.89
	Soil water dynamics	49800	0.77	244	0.16	40939	0.93
	Crop models	24400	0.54	232	0.15	48176	0.96
3	Trends	738000		8		64365	
	World wide	111000		200333		30997	
	Europe	361000		2		22245	
	Asia	92600		2		16265	
	North America	302000		216017		14360	
	South America	112000		214731		12595	
	Colombia	17300		19918		2183	

Fuente: Elaboración propia

Luego se desarrolló una tercera fase de revisión, que consistió en el análisis comparativo de distribución geográfica de las tendencias en la aplicación de los modelos hidrológicos a nivel mundial y por regiones en los diferentes continentes. En esta fase, se utilizó también el supuesto basado en la frecuencia de citación de documentos científicos (índice Q) (Ome y Zafra, 2018). Las palabras clave en idioma inglés utilizadas durante esta fase de revisión fueron las siguientes: (i) Trends (tendencias), (ii) World wide (todo el mundo), (iii) Europe (Europa), (iv) Asia (Asia), (v) North America (Norteamérica), (vi) South America (Suramérica) y (vii) Colombia (Colombia).

El principal criterio de inclusión de la información bibliográfica seleccionada para la presente revisión fue que los documentos científicos reportaran datos cuantitativos de los factores clave identificados (Ome y Zafra, 2018). De esta manera, en el análisis de cada factor clave, se consideró la siguiente cantidad de documentos científicos: (i) crop models (10 documentos), (ii) soil water dynamics (7), (iii) irrigation management (3) y (iv) crop growth (2).

Finalmente, para la elaboración del presente manuscrito, se seleccionaron en total 21 documentos científicos.

Resultados

Los resultados encontrados, evidencian a los continentes Americano y Europeo como los líderes en las tendencias y aplicabilidad de los modelos hidrológicos para la planificación de la agricultura; seguidos por Asia donde se demuestra que están adelantando el estudio y empleo de estos modelos (tabla 2).

Tabla 2. Distribución mundial del estudio de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura.

Localización Geográfica	Artículos
ÁFRICA	1
AMÉRICA	5
AMÉRICA Y EUROPA	1
ASIA	3
ASIA ORIENTAL	1
EUROPA	5
AMÉRICA Y ASIA	1
OCEANÍA	1
SUR AMÉRICA	1
AMÉRICA, EUROPA Y ASIA	1

Fuente: Elaboración propia

Los datos obtenidos revelaron que el país que más estudia los modelos hidrológicos asociados a la planificación de la agricultura fue Estados Unidos en el continente Americano, seguido de China como principal ponente de estas investigaciones en Asia y finalmente México como país americano en importancia del estudio de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura como se muestra en la figura 1.

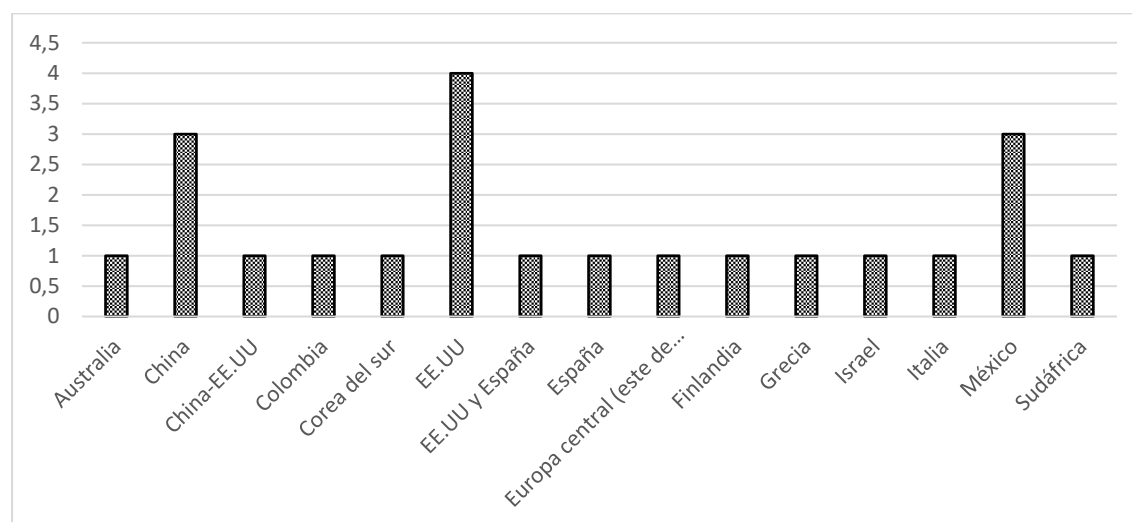


Figura 1. Distribución mundial por países del estudio de los modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura a nivel mundial.

Las principales metodologías de modelos hidrológicos encontradas en la revisión fueron:

Modelos hidrológicos como HYDRUS, aquellos que simulan el movimiento del agua y el transporte de solutos en un medio poroso saturado variable en una dimensión (HYDRUS-1D) y bidimensional / tridimensional (HYDRUS - 2D / 3D) teniendo en cuenta la absorción de agua de la raíz (Šimůnek et al., 2005; Šimůnek et al., 2006; Kanda et al., 2018). Además, existe otro tipo de modelo numérico que su finalidad es la modelación del movimiento del agua y solutos en dos dimensiones, siendo este el modelo CHAIN - 2D (Šimůnek et al., 1994); Kanda et al., 2018), predecesor de HYDRUS - 2D.

Tomando como base estos dos modelos anteriormente descritos, se creó el modelo HYDRUS, CHAIN - 2D complementados para poder ser aplicados en la simulación del efecto del patrón de enraizamiento del cultivo en la absorción de agua y la lixiviación de nitratos (Benjamin et

al., 1996; Kanda et al., 2018), la comparación de la lixiviación de nutrientes bajo riego por aspersión, surco y goteo (Wang et al., 1997; Kanda et al., 2018) especialmente.

Como complemento a los modelos hidrológicos y su aplicabilidad en la agricultura para contribución en la generación de herramientas de gestión del recurso agua, existen modelos que se acoplan y ofrecen una respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua como lo son: AquaCrop, siendo este un modelo que requiere menos datos de entrada y al mismo tiempo el modelo es lo suficientemente robusto, simple y preciso, ya que enfatiza los importantes procesos fisiológicos y prácticas agronómicas en la producción de cultivos (Steduto et al., 2009; Kanda et al., 2018).

Tiene en cuenta criterios como el desarrollo del dosel que se describe como cobertura de dosel (CC) en lugar del índice de área foliar (LAI) (Evetts y Tolks, 2009; Kanda et al., 2018). Caracterizado por la división de la evapotranspiración (ET) en la transpiración del cultivo (Tr) y la evaporación del suelo (E); siendo así un modelo más simple para el crecimiento del dosel y la senescencia, tratando el rendimiento final (Y) como un producto de la biomasa final (B) y el índice de cosecha (HI), y dividir los efectos del estrés hídrico en crecimiento del dosel, senescencia del dosel, Tr y HI (Steduto et al., 2009; Kanda et al., 2018). Adicionalmente, AquaCrop utiliza la función empírica de capacidad de drenaje del suelo para calcular el movimiento del agua del suelo (Ahuja et al., 2014), que es un enfoque de cubo basculante modificado.

Otro modelo de cultivos es WOFOST, desarrollado como una herramienta para simular la respuesta de los cultivos a una variedad de condiciones climáticas y del suelo (Diepen et al., 1989; Kanda et al., 2018). Este modelo se caracteriza por ser complejo y requiere muchos parámetros de entrada que limitan su aplicabilidad más amplia, especialmente en condiciones de escasez de datos (Diepen et al., 1989; Todorovic et al., 2009; Kanda et al., 2018). WOFOST simula el crecimiento y el rendimiento de los cultivos basándose en tres enfoques (i) condiciones óptimas de agua y fertilidad, (ii) fertilidad óptima, pero condiciones de agua limitadas, y (iii) condiciones de fertilidad limitadas (Diepen et al., 1989; Kanda et al., 2018). El balance hídrico del suelo en WOFOST utiliza el enfoque del cubo basculante con tres secciones.

Por otra parte, se encuentra el modelo EPIC impulsado por radiación, caracterizado por la utilización del enfoque del cubo basculante en la simulación del balance hídrico del suelo

(Connolly, 1998; Kanda et al., 2018). Sin embargo, existe otro modelo de cultivo denominado DSSAT, que es un paquete de software integrado con modelos independientes para simular sistemas de cultivo y suelo, donde algunos son impulsados por radiación y otros son impulsados por carbón (Jones et al., 1998; Kanda et al., 2018)., así mismo el balance hídrico del suelo en DSSAT se basa en el enfoque del cubo basculante.

De esta manera se definen como un acoplamiento muy bueno entre el modelo hidrológico HYDRUS, CHAIN - 2D con los modelos AquaCrop, EPIC y WOFOST en mejora de la simulación de la respuesta de los cultivos a la disponibilidad de agua.

Y como herramienta integradora existe el paquete denominado Sistema de Apoyo para Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT), que agrupa modelos de simulación de clima, suelo, agua y nutrientes, y permite simular el desarrollo de 16 cultivos en cualquier región, el efecto de su rotación a largo plazo y diferentes sistemas de manejo de los cultivos.

Presenta cuatro niveles de simulación. En el primero, se asume que la disponibilidad de radiación, temperatura y el potencial genético son las limitantes del desarrollo del cultivo; el agua y los nutrientes no limitan, es una estimación del rendimiento potencial. El segundo considera que el desarrollo del cultivo es limitado por la disponibilidad del agua, pero la disponibilidad de nutrientes no es limitante. En el tercero, la disponibilidad de nitrógeno representa una posible limitación. En el cuarto nivel se considera a la disponibilidad de fósforo, además de las restricciones de los niveles anteriores (Bowen y Jaramillo, 2001; Candelaria et al,2011).

Posee una herramienta de procesamiento de datos climáticos y con modelos específicos para cada tipo de cultivo, los cuales son de fácil adquisición e interpretación, aunque requiere grandes cantidades de información de suelos tienen la capacidad de contar con una base de datos para estimar los datos faltantes (Bowen y Jaramillo, 2001; Candelaria et al,2011).

Además, existen submodelos como CERES-Maize y CERESWheat de DSSAT v4.0 como alternativa para una mejor simulación la respuesta entre el suministro de agua del suelo y el crecimiento de maíz / trigo. Estos submodelos simulan los componentes del rendimiento del cultivo, el número de hojas y el desarrollo fonológico y morfológico del cultivo con un paso de tiempo diario desde la siembra hasta la madurez, que se describen mediante los parámetros

fisiológicos en forma de coeficientes genéticos para el tipo de cultivo individual (Candelaria et al., 2011).

Hay que mencionar, además, el modelo hidrológico global establecido Mac-PDM.09, que simula la humedad del suelo y la escorrentía en todo el mundo con una resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Una descripción detallada y la validación del modelo es proporcionada por Gosling y Arnell (2011) y el modelo se ha aplicado en varios estudios recientes del ciclo hidrológico global (Haddeland et al., 2011; Gosling et al., 2010, 2011).

Enseguida, Bruins y colaboradores en 2019 afirman que los sistemas de información geográfica (SIG) y los modelos digitales de elevación (MDE) permiten el desarrollo de modelos hidrológicos para investigar todos los antiguos campos en terrazas de una manera no invasiva, sin perturbar los restos arqueológicos. Se desarrollan modelos hidrológicos basados en SIG, como el acoplado al algoritmo D-Infinity (Tau DEM) para evaluar los rendimientos anuales de escorrentía.

Existen otros modelos hidrológicos como el FLUSH, siendo este un modelo distribuido en 3D basado en procesos, que describe el flujo de agua (Warsta y col., 2013a; Nousiainen et al., 2015), erosión (Warsta y col., 2013b; Nousiainen et al., 2015) y transporte de solutos (Salo et al., 2015; Nousiainen et al., 2015) procesos en campos agrícolas arcillosos, subsuperficiales drenados en condiciones de latitud alta. El flujo de agua en la superficie del campo se simula con la aproximación de onda difusa de las ecuaciones de Saint Venant utilizando la ecuación de Manning como término de fricción (Warsta y col., 2013a; Nousiainen et al., 2015). Las profundidades de las raíces de los cultivos prescritas se pueden utilizar para simular el crecimiento de las plantas durante la temporada de crecimiento. La evapotranspiración potencial (PET) se divide en el perfil del suelo de acuerdo con la densidad de raíces del cultivo que disminuye linealmente con la profundidad. La evapotranspiración real se calcula disminuyendo la PET con el enfoque de Feddes y col. 1978 (Nousiainen et al., 2015) en condiciones secas. La evapotranspiración de referencia para una superficie de césped se calculó previamente utilizando la ecuación de Penman Monteith (Allen et al., 1998; Nousiainen et al., 2015) similar a Turunen y col. 2013 (Nousiainen et al., 2015) y se introdujo en el modelo como una serie de tiempo por horas.

El modelo puede describir varios sistemas de drenaje que incluyen zanjas abiertas y drenajes subterráneos con contabilidad de descarga de agua separada (Turunen et al., 2013; Nousiainen

et al., 2015). Parágrafos demasiado extensos, limitar a 8 líneas para mejor entendimiento aplica en todo el documento, Tenga en cuenta no cortar secuencia de la idea, cuando limite los párrafos.

También se encontró el modelo de extensión de política agrícola / medioambiental (APEX) (Williams y col., 1995; Prada et al., 2017), descrito como un modelo hidrológico y ambiental conceptual y distribuido. Se caracteriza por simular los diferentes procesos hidrológicos a escala de cuenca mientras evalúa los impactos de la conservación y las mejores prácticas de manejo (Wang et al., 2012; Prada et al., 2017) sobre la calidad del agua. Las principales entradas del modelo son la elevación, el suelo, el uso de la tierra y las series de tiempo de las variables climáticas.

Los resultados del modelo son series de tiempo de variables hidrológicas calculadas, nutrientes y rendimientos de cultivos en diferentes resoluciones temporales (anual, mensual y diaria) y diferentes escalas espaciales (sub áreas o cuencas).

Otro tipo de modelo y de mayor uso es el modelo SWAT, desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola del USDA. Este es un modelo de tiempo continuo, escala de cuenca y con base física que opera en un paso de tiempo diario. En el entorno SWAT basado en SIG, una cuenca se divide en múltiples subcuencas, que posteriormente se dividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU). Las HRU representan áreas con uso de suelo, gestión, características del suelo y pendiente homogéneas. Los procesos asociados con el transporte de agua y sedimentos, el crecimiento de cultivos y el ciclo de nutrientes, incluidas las prácticas de gestión agrícola, se modelan a nivel de HRU. Los procesos hidrológicos incluyen escorrentía / infiltración superficial, evapotranspiración, flujo lateral, percolación y flujo de retorno.

El modelo considera un acuífero poco profundo no confinado, que contribuye al flujo de retorno, y un acuífero profundo y confinado que actúa como fuente o sumidero. Las prácticas de gestión agrícola, como la siembra, la cosecha, la labranza, el riego, el pastoreo y las aplicaciones de nutrientes se pueden simular aplicando un programa definido por el usuario (Psomas et al., 2016).

Por otra parte se encontró el modelo SWIM, que utiliza un esquema de desagregación de tres niveles: cuenca - subcuencas - hidrotopos. El paso del tiempo en el modelo es diario, el módulo de vegetación constituye una interfaz importante entre la hidrología y la dinámica de nutrientes y representa cultivos y vegetación natural. Para calcular el crecimiento de las plantas, SWIM

utiliza parámetros específicos de las plantas definidos para 76 tipos de cultivos / vegetación, así como tiempos representativos de siembra, fertilización y cosecha incluidos en las rutinas de gestión Krysanova et al., 1998, 2000; Wortmann, 2020a, 2020b; Sietz et al., 2021).

Además, existen modelos como el RZWQM2 (Modelo de Calidad del Agua de la Zona Raíz) de simulación agrícola-hidrológica basado en procesos que integra procesos biológicos, físicos y químicos para predecir respuestas hidrológicas y químicas y evaluar el impacto de las prácticas de gestión agrícola en la producción de cultivos y la calidad del agua y del suelo (Ahuja et al., 2000; Kanda et al., 2018).

Siendo este un modelo de sistema unidimensional que simula los principales procesos físicos, químicos y biológicos en un sistema de producción de cultivos agrícolas. Consiste en componentes para hidrología, nutrición y transporte y transformación de plaguicidas, crecimiento de plantas y producción de cultivos, y actividades de manejo (Ahuja y col., 2000; Ma et al., 2005, 2006; Su et al., 2016).

En este cada componente es simulado por submodelos. Por ejemplo, la infiltración por lluvia, riego o deshielo se calcula utilizando un modelo Green-Ampt modificado. La redistribución del agua en el perfil del suelo se simula mediante la ecuación de Richards al tratar la evaporación de la superficie y la absorción de agua de las raíces de las plantas como sumideros. El agua almacenada en el perfil del suelo, si excede la capacidad del campo, se drena para formar una capa freática por encima de la capa impermeable y el flujo de drenaje de las baldosas subsiguiente se calcula usando la ecuación de estado estable de Hooghoudt.

Además, el flujo lateral y la filtración se cuantifican mediante parámetros definidos por el usuario para la tasa constante de flujo de agua de la capa inferior y el gradiente hidráulico, respectivamente. Para el límite superior, la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas se estiman mediante el modelo de doble capa de (Shuttleworth y Wallac, 1985 ; Su et al., 2016), que es una extensión del concepto Penman-Monteith. Los procesos de química de nutrientes son simulados por OMNI (Shaffer y col., 2000; Su et al., 2016), un modelo de última generación para el ciclo del carbono y el nitrógeno en los suelos.

Análisis de Resultados de los Modelos Hidrológicos Asociados al Estudio y Planificación de la Agricultura a Nivel Global.

Tabla 3. Resumen de las tendencias de modelos hidrológicos asociados al estudio y planificación de la agricultura a nivel global.

Modelo	Resultado
RZWQM2	Modelo de simulación agrícola-hidrológica basado en procesos que integra procesos biológicos, físicos y químicos para predecir respuestas hidrológicas y químicas y evaluar el impacto de las prácticas de gestión agrícola en la producción de cultivos y la calidad del agua y del suelo (Ahuja et al., 2000; Kanda et al., 2018).
YDRUS, CHAIN - 2D	Su aplicación se da en la simulación del efecto del patrón de enraizamiento del cultivo en la absorción de agua y la lixiviación de nitratos (Benjamin et al., 1996; Kanda et al., 2018).
FLUSH	Modelo hidrológico distribuido en 3D basado en procesos, que describe el flujo de agua, erosión (Warsta y col., 2013b; Nousiainen et al., 2015) y transporte de solutos (Salo et al., 2014; Nousiainen et al., 2015) procesos en campos agrícolas arcillosos, subsuperficiales drenados en condiciones de latitud alta.
SWAT	La herramienta de evaluación de suelos y aguas (SWAT) se considera un modelo prominente basado en procesos, que sirve como una herramienta sólida e interdisciplinaria para la simulación de la gestión de cuencas agrícolas. Se ha utilizado en una amplia gama de estudios para diseñar medidas relacionadas con el agua en cuencas agrícolas. Estudios recientes también se han centrado en acoplar productos de teledetección y SWAT para analizar los impactos del cambio de uso de la tierra o las prácticas de gestión agrícola (Psomas et al., 2016).

DSSAT	Agrupación de modelos de simulación de clima, suelo, agua y nutrientes, y permite simular el desarrollo de 16 cultivos en cualquier región, el efecto de su rotación a largo plazo y diferentes sistemas de manejo de los cultivos (Bowen y Jaramillo, 2001; Candelaria et al., 2011).
AquaCrop	Complemento a los modelos hidrológicos. Y es lo suficientemente robusto, simple y preciso, ya que enfatiza los importantes procesos fisiológicos y prácticas agronómicas en la producción de cultivos (Steduto et al., 2009; Kanda et al., 2018)
WOFOST	Desarrollado como una herramienta para simular la respuesta de los cultivos a una variedad de condiciones climáticas y del suelo (Diepen et al., 1989; Kanda et al., 2018). Este modelo se caracteriza por ser complejo y requiere muchos parámetros de entrada que limitan su aplicabilidad más amplia, especialmente en condiciones de escasez de datos (Diepen et al., 1989; Todorovic et al., 2009; Kanda et al., 2018).
APEX	Modelo de extensión de política agrícola / medioambiental. Simula los diferentes procesos hidrológicos a escala de cuenca mientras evalúa los impactos de la conservación y las mejores prácticas de manejo (Wang et al., 2012; Prada et al., 2017) sobre la calidad del agua. Los resultados del modelo son series de tiempo de variables hidrológicas calculadas, nutrientes y rendimientos de cultivos en diferentes resoluciones temporales (anual, mensual y diaria) y diferentes escalas espaciales (sub áreas o cuencas).

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Los países líderes en el estudio de modelos hidrológicos aplicados a la agricultura son Estados Unidos, China y México, debido a la importancia del desarrollo de la humanidad y la protección y uso de los recursos naturales. Estados Unidos está como principal país en estos estudios porque cuenta con una agricultura industrializada, con tecnologías y que aporta un gran presupuesto para agricultura; especialmente programas de seguridad alimentaria, investigación y conservación de bosques.

El RZWQM2 fue el modelo de mayor tendencia en esta revisión, puesto que dentro de sus factores de consideración presenta mayor integralidad porque fue el único en evaluar el impacto de las prácticas de gestión agrícola en la producción de cultivos y la calidad del agua y del suelo.

El modelo SWAT es el más utilizado debido a que se presenta como una herramienta amigable cuando es necesario acoplar estudios de cuencas de que tipo pequeñas, medianas, grandes y prácticas de gestión agrícola.

Igual que la herramienta SWAT, el modelo Aquacrop, permite ser usado constantemente como complemento a los modelos hidrológicos en que líneas productivas, por su simplicidad, robustez y precisión.

DSSAT es el modelo por excelencia para ser aplicado en la simulación de diferentes cultivos a nivel mundial, debido a su flexibilidad en el uso de diferentes datos de toda clase de cultivos.

Existen algunos modelos como el caso de WOFOST, que aunque permite simular varios procesos es complejo en su aplicabilidad debido a su alta demanda en el uso de datos que lo limita en su funcionamiento.

Este estudio cobra valor debido a que en algún momento otros estudios puedan consultar esta revisión y tener una respuesta a las opciones en tendencias según las condiciones del estudio y el tipo de variables a evaluar.

Recomendación

Es necesario que se siga actualizando esta información bibliográfica para estudios futuros en el estudio y planificación de la agricultura.

Bibliografía

Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global environmental change*, 16(3), 268-281.

Ahuja, L. R., Ma, L., Lascano, R. J., Saseendran, S. A., Fang, Q. X., Nielsen, D. C., ... & Colaizzi, P. D. (2014). Syntheses of the current model applications for managing water and needs for experimental data and model improvements to enhance these applications. *Practical applications of agricultural system models to optimize the use of limited water*, 5, 399-437.

Ahuja, L., Rojas, K. W., & Hanson, J. D. (Eds.). (2000). *Root zone water quality model: modelling management effects on water quality and crop production*. Water Resources Publication.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.

Benjamin, J. G., Ahuja, L. R., & Allmaras, R. R. (1996). Modelling corn rooting patterns and their effects on water uptake and nitrate leaching. *Plant and Soil*, 179(2), 223-232.

Bowen, W., & Jaramillo, R. (2001). Modelos de dinámica de nutrientes en el suelo y en la planta. In *Congreso Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo [CD-ROM archivo]*. Sociedad Ecuatoriana de la ciencia del Suelo (7: 2000 oct. 19-20 octubre: Quito).

Brooks, N., Adger, W. N., & Kelly, P. M. (2005). The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global environmental change*, 15(2), 151-163.

Bruinsma, J. (2009, June). The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050. In *Expert meeting on how to feed the world in* (Vol. 2050, pp. 24-26).

Bruins, H. J., Bithan-Guedj, H., & Svoray, T. (2019). GIS-based hydrological modelling to assess runoff yields in ancient-agricultural terraced wadi fields (central Negev desert). *Journal of arid environments*, 166, 91-107.

Candelaria Martínez, B., Ruiz Rosado, O., Gallardo López, F., Pérez Hernández, P., Martínez Becerra, Á., & Vargas Villamil, L. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(3), 999-1010.

Challinor, A. J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E., & Fraser, E. (2009). Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. *Journal of experimental botany*, 60(10), 2775-2789.

Challinor, A. J., Simelton, E. S., Fraser, E. D., Hemming, D., & Collins, M. (2010). Increased crop failure due to climate change: assessing adaptation options using models and socio-economic data for wheat in China. *Environmental Research Letters*, 5(3), 034012.

Connolly, R. D. (1998). Modelling effects of soil structure on the water balance of soil–crop systems: a review. *Soil and Tillage Research*, 48(1-2), 1-19. crop yield, Wageningen, 189 p.

Evetts, S. R., & Tolks, J. A. (2009). Introduction: Can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management?. *Agronomy Journal*, 101(3), 423-425.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and

Fraser, E. D., Simelton, E., Termansen, M., Gosling, S. N., & South, A. (2013). “Vulnerability hotspots”: Integrating socio-economic and hydrological models to identify where cereal production may decline in the future due to climate change induced drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 195-205.

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *science*, 327(5967), 812-818.

Godfray, H. C. J., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Nisbett, N., ... & Whiteley, R. (2010). The future of the global food system.

Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2011). Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation, and sensitivity analysis. *Hydrological Processes*, 25(7), 1129-1145.

Gosling, S. N., Bretherton, D., Haines, K., & Arnell, N. W. (2010). Global hydrology modelling and uncertainty: running multiple ensembles with a campus grid. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1926), 4005-4021.c

Gosling, S. N., Taylor, R. G., Arnell, N. W., & Todd, M. C. (2011). A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 279-294.

Guía para el uso eficiente y ahorro del agua: Una visión colectiva para el uso sostenible y responsable del agua [recurso electrónico] / Dirección de Gestión Integral de Recurso Hídrico. Edición y textos: Moreno Barco, Diana Marcela; Callejas Moncaleano, Diana Carolina. ---- Bogotá, D. C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018.

Haddeland, I., Clark, D. B., Franssen, W., Ludwig, F., Voß, F., Arnell, N. W., ... & Yeh, P. (2011). Multimodel estimate of the global terrestrial water balance: Setup and first results. *Journal of Hydrometeorology*, 12(5), 869-884.

Jaggard, K. W., Qi, A., & Ober, E. S. (2010). Possible changes to arable crop yields by 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2835-2851.

Jeong, H., & Adamowski, J. (2016). A system dynamics based socio-hydrological model for agricultural wastewater reuse at the watershed scale. *Agricultural Water Management*, 171, 89-107.

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., ... & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 235-265.

Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., ... & Singh, U. (1998). Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. In *Understanding options for agricultural production* (pp. 157-177). Springer, Dordrecht.

Kanda, E. K., Mabhaudhi, T., & Senzanje, A. (2018). Coupling hydrological and crop models for improved agricultural water management—A review. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(3), 380-390.

Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D. I., & Becker, A. (1998). Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological modelling*, 106(2-3), 261-289.

Krysanova, V., Wechsung, F., Arnold, J., Srinivasan, R., Williams, J., 2000. SWIM - Soil and Water Integrated Model. User Manual. PIK Report 69, Potsdam Institute for D. Sietz et al. Agricultural Systems 193 (2021) 10318311 Climate Impact Research, Potsdam, Germany.

Lobell, D. B., & Field, C. B. (2007). Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental research letters*, 2(1), 014002.

Long, S. P., Ainsworth, E. A., Leakey, A. D., & Morgan, P. B. (2005). Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2011-2020.

Ma, L., Hoogenboom, G., Ahuja, L. R., Ascough II, J. C., & Saseendran, S. A. (2006). Evaluation of the RZWQM-CERES-Maize hybrid model for maize production. *Agricultural Systems*, 87(3), 274-295.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial -MAVDT. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá: Imprenta Nacional.

Nousiainen, R., Warsta, L., Turunen, M., Huitu, H., Koivusalo, H., & Pesonen, L. (2015). Analyzing subsurface drain network performance in an agricultural monitoring site with a three-dimensional hydrological model. *Journal of Hydrology*, 529, 82-93.

Ome Barrera, Ó., & Zafra Mejía, C. (2018). Key factors in bioremediation processes for wastewater treatment. A review.. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 573-585.

Patt, A., Suarez, P., & Gwata, C. (2005). Effects of seasonal climate forecasts and participatory workshops among subsistence farmers in Zimbabwe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(35), 12623-12628.

Psomas, A., Dagalaki, V., Panagopoulos, Y., Konsta, D., & Mimikou, M. (2016). Sustainable agricultural water management in Pinios River basin using remote sensing and hydrologic modeling. *Procedia engineering*, 162, 277-283.

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), 438-447.

Royal Society, 2008. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. R. Soc. Sci. Policy Rep. 15 (08), 1–148.

Salo, H., Warsta, L., Turunen, M., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., & Koivusalo, H. (2015). Development and application of a solute transport model to describe field-scale nitrogen processes during autumn rains. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(sup1), 30-43.

Shaffer, M. J., & Gupta, S. C. (1981). Hydrosalinity models and field validation. In *Modeling wastewater renovation* (pp. 136-181). John Wiley New York, NY.

Shuttleworth, W. J., & Wallace, J. S. (1985). Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(469), 839-855.

Sietz, D., Conradt, T., Krysanova, V., Hattermann, F. F., & Wechsung, F. (2021). The Crop Generator: Implementing crop rotations to effectively advance eco-hydrological modelling. *Agricultural Systems*, 193, 103183.

Simunek, J. I. R. K. A., & Van Genuchten, M. (1994). The chain_2d code for simulating two-dimensional movement of water flow, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media, version 1.1 USSL research report no. 136. *Laboratory publication*.

Simunek, J. I. R. K. A., Van Genuchten, M. T., & Sejna, M. (2006). The HYDRUS software package for simulating the two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *Technical manual, 1*.

Simunek, J., Van Genuchten, M. T., & Sejna, M. (2005). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. *University of California-Riverside Research Reports*, 3, 1-240.

Sitch, S., Cox, P. M., Collins, W. J., & Huntingford, C. (2007). Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature*, 448(7155), 791-794.

Smit, B., & Skinner, M. W. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7(1), 85-114.

Sun, M., Zhang, X., Huo, Z., Feng, S., Huang, G., & Mao, X. (2016). Uncertainty and sensitivity assessments of an agricultural–hydrological model (RZWQM2) using the GLUE method. *Journal of hydrology*, 534, 19-30.

Tester, M., & Langridge, P. (2010). Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967), 818-822.

Thomas, D. S., Twyman, C., Osbahr, H., & Hewitson, B. (2007). Adaptation to climate change and variability: farmer responses to intra-seasonal precipitation trends in South Africa. *Climatic change*, 83(3), 301-322.

Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M. T. A., Stöckle, C., & Steduto, P. (2009). Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101(3), 509-521.

Turunen, M., Warsta, L., Paasonen-Kivekäs, M., Nurminen, J., Myllys, M., Alakukku, L., ... & Koivusalo, H. (2013). Modeling water balance and effects of different subsurface drainage methods on water outflow components in a clayey agricultural field in boreal conditions. *Agricultural Water Management*, 121, 135-148.

Van Diepen, C. V., Wolf, J., Van Keulen, H., & Rappoldt, C. (1989). WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil use and management*, 5(1), 16-24.

Vereecken, H., Schnepf, A., Hopmans, J. W., Javaux, M., Or, D., Roose, T., ... & Young, I. M. (2016). Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives. *Vadose zone journal*, 15(5).

Wang, D., Yates, S. R., Simunek, J., & Genuchten, M. T. V. (1997). Solute transport in simulated conductivity fields under different irrigations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 123(5), 336-343.

Wang, X., Williams, J. R., Gassman, P. W., Baffaut, C., Izaurralde, R. C., Jeong, J., & Kiniry, J. R. (2012). EPIC and APEX: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1447-1462.

Warsta, L., Karvonen, T., Koivusalo, H., Paasonen-Kivekäs, M., & Taskinen, A. (2013). Simulation of water balance in a clayey, subsurface drained agricultural field with three-dimensional FLUSH model. *Journal of hydrology*, 476, 395-409.

Watts, M. J., & Bohle, H. G. (1993). The space of vulnerability: the causal structure of hunger and famine. *Progress in human geography*, 17(1), 43-67.

Williams, J. R., Jones, C. A., Gassman, P. W., & Hauck, L. M. (1995). Simulation of animal waste management with APEX. *Innovations and New Horizons in Livestock and Poultry Manure Management*, 1, 22-26.

Xi, M., Lu, D., Gui, D., Qi, Z., & Zhang, G. (2017). Calibration of an agricultural-hydrological model (RZWQM2) using surrogate global optimization. *Journal of Hydrology*, 544, 456-466.

Anexo 1

Autores					Modelos
----------------	--	--	--	--	----------------

	Año	Localización Geográfica País	Localización Geográfica	Escala del estudio o Experiencia	<i>Hydrological models</i>	<i>Crop growth models</i>	<i>Hydrological models+ Crop growth models</i>
Kanda, E. K., Mabhaudhi, T., & Senzanje, A.	2018	SUDÁFRICA	ÁFRICA	University of KwaZulu-Natal, School of Agricultural_Internacional	CHAIN-2D, HYDRUS-1D, HYDRUS 2D / 3D y MODFLOW.	Water-driven model (AquaCrop), solar-radiation driven model (EPIC), and the carbon-driven models (WOFOST and DSSAT).	
Sun, M., Zhang, X., Huo, Z., Feng, S., Huang, G., & Mao, X..	2016	CHINA	ASIA	Sur de Beijing_local	Modelo RZWQM2	RZWQM.método o GLUE.	RZWQM-DSSAT (RZWQM2) y CERES-Maize y CERESWheat de DSSAT v4.0 s método PEST
Candelaria Martínez, B., Ruiz Rosado, O., Gallardo López, F., Pérez Hernández, P., Martínez Becerra, Á., & Vargas Villamil, L	2011	MÉXICO	AMÉRICA	Tabasco-Regional	DSSAT-Modelaje participativo	1) TAMU–Beef-JAVA/PC-Herd-CNCPS,-4) GRAZFEED,-5) EDINBURGH, GANADERIA modelo mecanístico Turix v1.0	(DIASPORA),-AGROSIM-ZR-SAM AGROECOSISTEMAS
Fraser, E. D., Simelton, E., Termansen, M., Gosling, S. N., & South, A	2013	EE.UU	sureste de EE. UU., Sureste de América del Sur, noreste del Mediterráneo y partes de Asia central.	Mundial	GCM-Modelo hidrológico	Modelo de capacidad adaptativa	"Hotspots" de vulnerabilidad Cuando se toman en conjunto los resultados de los modelos de capacidad hidrológica y adaptativa,
Bruins, H. J., Bithan-Guedj, H., & Svoray, T.	2019	Israel	Asia	Regional- región central de Negev	Modelo hidrológico basado en SIG, acoplado al algoritmo D-Infinity (Tau DEM)	Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Modelos Digitales de Elevación (MDE)	
Du, E., Tian, Y., Cai, X., Zheng, Y., Li, X., & Zheng, C.	2020	China	Asia	Nacional	ABM y GSFLOW		

Jeong, H., & Adamowski,	2016	Corea del Sur	Asia Oriental	Regional - río Osan, en el centro de Corea del Sur	Modelo SWAT		Modelo SD-socio hidrológico
Chávez-Jiménez, A. y González-Zeas, D.	2015	España	Europa	Regional - Cuenca del Guadalquivir, ubicada al sur de España	Indicador de satisfacción de la demanda (I1) y el indicador de confiabilidad en la atención de las demandas debido al cambio climático (I2p).	Se determinaron los diversos Qe como percentiles y porcentajes de las aportaciones medias mensuales y anuales respectivamente.	
Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A., & Sastre-Merlín, A.	2016	México	América	Regional- Norte de México	Modelo SWAT	Proyecciones basadas en CMIP3	Interfaz ArcSWAT
Nousiainen, R., Warsta, L., Turunen, M., Huitu, H., Koivusalo, H., & Pesonen, L.	2015	Finlandia	Europa	Vihti, Finlandia meridional	Modelo de elevación digital (DEM) - herramientas Spatial Analyst del software ESRI ArcGIS	FLUSH es un modelo hidrológico distribuido en 3D	Ecuación de Penman-Monteith
Peña-Arancibia, J. L., Mainuddin, M., Kirby, J. M., Chiew, F. H., McVicar, T. R., & Vaze, J.	2016	Australia	Oceanía	Regional- Noreste de Murray-Darling Basin (Australia)	Modelo de bosque aleatorio que utiliza la fenología de la vegetación RS y la evapotranspiración real	Modelo hidrológico de alcance fluvial	Modelo de riego (IMRS)
Prada, A. F., Chu, M. L., Guzman, J. A., & Moriasi, D. N. (2017).	2017	EE. UU	América	Regional - cuenca de Lake Creek ubicada en el suroeste de Oklahoma, EE. UU	El modelo de extensión de política agrícola / medioambiente al (APEX)- modelo hidrológico y ambiental conceptual y distribuido		

Psomas, A., Dagalaki, V., Panagopoulos, Y., Konsta, D., & Mimikou, M	20 16	Grecia	Europa	Regional - Cuenca del río Pinios, centro de Grecia	Modelo hidrológico basado en procesos (SWAT) utilizando el mapa de uso de la tierra producido. Basado en SIG		
Qiu, H., Niu, J., & Phanikumar, M. S.	20 19	EE. UU	América	Cuenca del río Kalamazoo en Michigan, EE. UU - suroeste de la península inferior de Michigan	Modelos hidrológicos distribuidos basados en procesos (PBHM)		
Sietz, D., Conradt, T., Krysanova, V., Hattermann, F. F., & Wechsung, F.	20 21	Europa central	Europa	Región de estudio de caso en Europa central que cubre el este de Alemania, República Checa y Eslovaquia e incluye la cuenca del río Elba	The Crop Generator	SWIM	
Troyo Diéguez, E., Mercado Mancera, G., Cruz Falcón, A., Nieto Garibay, A., Valdez Cepeda, R. D., García Hernández, J. L., & Murillo Amador, B.	20 14	México	América	Regional-Baja California Sur	Índice de De Martonne	Índice Climático (Ic)	
Xi, M., Lu, D., Gui, D., Qi, Z., & Zhang, G.	20 18	Respaldado por el Departamento de Energía de los EE. UU	Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China- Fundación de Ciencias Naturales para Colegios y Universidades en la provincia de Jiangsu	Datos de Gilmore en Iowa	Modelo de Calidad del Agua de la Zona Raíz (RZWQM2)	Optimización global computacionalmente eficiente	
Chandrasekhar, P., Kreiselmeier, J., Schwen, A., Weninger,	20 18	EE. UU y España	América y Europa	Artículo de revisión_ modelo de Or et al	(SWAT, TOPLATS, WASIM)		

T., Julich, S., Feger, K. H., & Schwärzel, K.							
Capolupo, A., Pindozi, S., Okello, C., Fiorentino, N., & Boccia, L.	20 15	Italia	Europa	Regional- Localidad de Trentola Ducenta de la provincia de Caserta, en el sur de Italia	Modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución	Índice Topográfico (TI) y el Índice Clima-Topográfico (CTI) p	
Uribe, N., Corzo, G., Quintero, M., van Griensven, A., & Solomatine, D	20 18	Colombia	Sur América	Regional	Modelo SWAT		