



PROYECTO EUROCLIMA - IICA

Modelos de simulación y herramientas de modelaje



PROYECTO EUROCLIMA - IICA

Modelos de simulación y herramientas de modelaje

Elementos conceptuales y sistematización de herramientas
para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el
cambio climático sobre las actividades agrícolas^{1,2}

«La presente publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea a través del PROGRAMA EUROCLIMA. El contenido de la misma es responsabilidad exclusiva del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y en ningún caso debe considerarse que refleja necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea».

1. Primera versión elaborada por Adriana Bonilla, consultora. Revisada por Christian Bunn, consultor.

2. En este documento se presenta una síntesis de los conceptos básicos sobre los modelos de simulación para estudiar el impacto de la variabilidad y el cambio climático en la agricultura. Dicha síntesis se complementa con una sistematización de 22 herramientas o modelos aplicables a distintas escalas. Este documento está orientado a los actores del sector agrícola no expertos en simulación y modelaje. Su propósito es favorecer el incremento de sus capacidades en esa área, en función de las necesidades de adaptación de la agricultura ante el cambio climático.



Modelos de simulación y herramientas de modelaje: elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícolas por IICA se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-Compartir igual 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>)
Creado a partir de la obra en www.iica.int.

El Instituto promueve el uso justo de este documento. Se solicita que sea citado apropiadamente cuando corresponda.

Esta publicación también está disponible en formato electrónico (PDF) en el sitio web institucional en <http://www.iica.int>

Coordinación editorial: Ronny Cascante Ocampo

Corrección de estilo: Máximo Araya

Diagramación: Carlos Umaña

Diseño de portada: Carlos Umaña

Impresión: Publicación en formato digital

Modelos de simulación y herramientas de modelaje: elementos conceptuales y sistematización de herramientas para apoyar el análisis de impactos de la variabilidad y el cambio climático sobre las actividades agrícolas / Unión Europea, IICA -- San José: C.R.: IICA, 2015.

66 p.; 21,59cm x 27,94cm

ISBN: 978-92-9248-610-5

1. Agricultura 2. Cambio climático 3. Variación climática 4. Simulación 5. Modelos simulados 6. Evaluación del impacto 7. Accidentes atmosféricos I. IICA II. Unión Europea III. Título

AGRIS
P40

DEWEY
363.34

Índice

Introducción	5
I. Elementos conceptuales básicos sobre modelos de simulación para estudiar el clima y sus impactos en la agricultura	9
1.1. ¿Qué es un modelo?	9
1.2. ¿Qué es un sistema?	9
1.3. ¿Qué es la simulación o el modelado?.....	10
1.4. ¿Cuáles son las alternativas a la simulación?	11
1.5. ¿Cuándo se usa la simulación?.....	11
1.6. ¿Qué es un modelo de simulación?.....	13
1.7. ¿Cómo se clasifican los modelos de simulación?	15
1.8. ¿Por qué se emplean modelos de simulación para estudiar el clima y el impacto del cambio climático sobre las actividades agrícolas?	15
1.9. Simplicidad versus complejidad en el diseño de modelos de simulación	16
1.10. La incertidumbre en los modelos de simulación	17
1.11. ¿Cómo manejar la incertidumbre?	19
1.12. ¿Cuál modelo del clima se debería escoger?	20
1.13. ¿Cuál escenario de cambio climático se debería usar?	21
II. Herramientas de modelaje climático	23
2.1. Modelos para el estudio en el nivel de finca o parcela	24
2.2. Modelos para el estudio en los ámbitos de región y cuenca hidrográfica.....	38
2.3. Modelos integrados, análisis espacial e intercomparación de modelos.....	46
III. Consideraciones finales.....	53
Bibliografía	55
Glosario	63



Introducción

Este documento se compone de dos secciones. La inicial, titulada “Elementos básicos sobre modelos de simulación para estudiar el clima y sus impactos en la agricultura”, presenta conceptos y aspectos esenciales de la modelación. La segunda sección, “Sistematización de herramientas de modelación”, muestra una selección de modelos y herramientas de apoyo al modelaje de impactos del cambio climático en la agricultura. Estos constituyen recursos técnicos relevantes en el estudio de los impactos que puede ocasionar el cambio climático y la variabilidad climática en los sistemas agrícolas.

Esta síntesis busca contribuir a una fácil comprensión de la temática por parte de usuarios del sector agrícola, tanto técnicos y funcionarios en general como productores, así como favorecer su interacción con modeladores y desarrolladores de modelos relacionados con las actividades productivas propias del gremio.

Entender la simulación como una herramienta para evaluar impactos

La simulación de impactos del cambio climático en la agricultura para contribuir a la ampliación de los conocimientos de la relación clima-producción agrícola en diferentes escalas temporales, no solo es relevante para los gremios de productores y los ministerios de agricultura, sino también para los sectores que se encadenan con esa producción mediante la transformación industrial y el comercio global, los cuales dependen de la agricultura para obtener materias primas y los insumos que derivan de su conversión en bienes intermedios y finales. De ahí la importancia de crear recursos que sirvan como puentes entre los actores sectoriales y del gremio, pues el desafío y las implicaciones potenciales alcanzan extremos insospechados, cuando se trata de estimar tanto el daño como las oportunidades que la agricultura tiene ante lo que el escenario planteado por el cambio climático puede presentar en toda Latinoamérica.

El aporte de la simulación de impactos del clima en la agricultura y el fortalecimiento de las capaci-

dades relacionadas con la modelización entre los actores del sector, son aspectos que informan la toma de decisiones y contribuyen con el diseño de otras herramientas para la adaptación al cambio climático y la reducción de la vulnerabilidad. Ante los desafíos que plantean estas circunstancias, urge generar condiciones para la modernización de las políticas públicas traducidas en medidas ante el cambio climático, que favorezcan a los sectores y subsectores estratégicos de las economías nacionales latinoamericanas.

El cambio climático aumenta los riesgos climáticos para la agricultura

El cambio climático cambiará la importancia de los riesgos climáticos para la agricultura. Históricamente, la variabilidad climática resultaba en eventos que redujeron los rendimientos con frecuencias aceptables. Ahora, el cambio climático significa que esta frecuencia de eventos inusuales aumentará y se magnificará, hasta que años con un clima histórico pasarán a ser los años inusuales, por lo que las pérdidas podrían ser mayores y catastróficas, si no se toman medidas al respecto.

Para minimizar las pérdidas que resultan de la nueva variabilidad climática, la agricultura debe adaptar sus prácticas agronómicas. La adaptación al cambio climático se presenta en dos sentidos: adaptación a cambios ya evidentes y adaptación proactiva a cambios venideros. En el primer caso, los costos de rendimientos perdidos serán altos, pero las inversiones en la adaptación serán mínimas. En el segundo caso, se trata de anticipar los cambios venideros y adaptarse de manera que permita reducir pérdidas inesperadas causadas por eventos climáticos extremos. Sin embargo, hay que tener mucho cuidado con inversiones en adaptaciones a cambios proyectados que no se manifiesten, ya que se perderán sin un beneficio real; pueden reducir los fondos destinados para la implementación de mecanismos de adaptación planificada, o bien, resultar en pérdidas adicionales en casos de estrategias inadecuadas de adaptación.



La cadena de modelación de los impactos del cambio climático

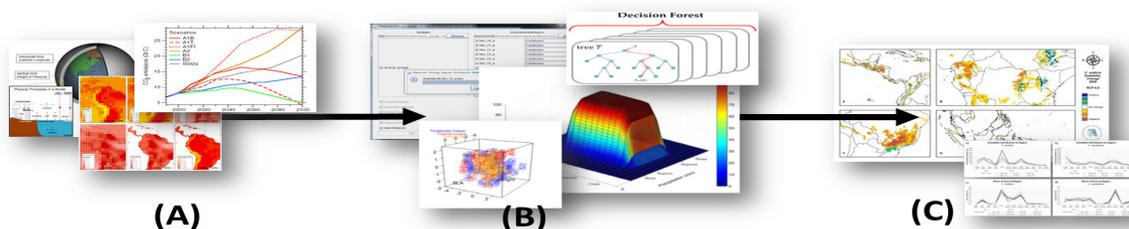
El reto para el modelador y los tomadores de decisiones es el desarrollo de estrategias de adaptación con base en la mejor información disponible, buscando la maximización del rendimiento del capital invertido. La herramienta que se usa para evaluar tales estrategias de manera anticipada son los modelos de simulación. La cadena de la modelación de los impactos del cambio climático casi siempre incluye tres componentes: la modelación de cambios climáticos, la modelación de los impactos a la agricultura y el análisis de los cambios e impactos en el contexto en que se toman decisiones (figura 1).

manera calificada. Estos modelos se presentan con más detalle en la parte 1.6 (recuadro 3)³.

Escalas de modelaje

El enfoque de este documento está en el uso de la modelación para contestar a la pregunta: ¿cómo los cambios climáticos afectarán a la agricultura y qué se puede hacer frente a estos cambios? Para varios modelos, la información detallada se presenta en las fichas que incluyen 17 ítemes para explicar las características esenciales de cada uno, de manera que el lector reciba una síntesis de lo que cada modelo puede brindarle, así como algunas diferencias entre ellos, que pueden ayudar a comprender esta temática de la

Figura 1. Cadena de modelación de los impactos del cambio climático en la agricultura: (A) modelos del clima global; (B) modelos de simulación de cultivos; y (C) evaluación de los impactos.



Fuente: Elaborada por el autor con base en datos de Blonder et al. 2014, Bunn et al. 2015, Phillips et al. 2006, Ramirez y Jarvis 2010 y Solomon et al. 2007.

Mediante el uso de la cadena de modelación, se busca responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son los cambios climáticos proyectados?
2. ¿Cómo afectarán estos cambios a la producción agrícola y qué se puede hacer frente a ellos?
3. ¿Hay efectos indirectos a otros sistemas de interés que cambian la priorización de medidas de adaptación?

La proyección de cambios climáticos en el futuro se hace mediante modelos globales del clima (Global Climate Model – GCM). Usualmente el desarrollo mismo de estos modelos está fuera del alcance de estudios en el sector agrícola; su complejidad requiere institutos especializados con supercomputadoras. Sin embargo, de la cantidad de datos disponibles, el experto agrícola tiene que escoger datos aptos para el estudio planteado e interpretarlos de

modelación en agricultura, específicamente orientada a contar con herramientas que brinden criterios acerca de cómo el cambio climático podría afectar al sector agrícola. Los modelos están ordenados por escala o criterio de intervención, para ayudar a facilitar la comprensión del alcance de cada uno. Esas escalas o criterios son los siguientes:

- parcela o finca
- cuenca, territorio o región país
- escala nacional o global

Para reflejar la amplitud de las actividades y los enfoques abordados en la actualidad por medio de la modelización, se diversificó, en lo posible, el tipo de modelos incluidos. Los hay más y menos complejos o sofisticados, individuales e integrados; hay modelos para estudiar el crecimiento de los cultivos, modelos económicos, modelos integrados (que acoplan un conjunto de modelos individuales en un sistema).

3. Para escalas temporales cortas, una alternativa al uso de GCM es el análisis y la extrapolación de tendencias en series temporales del clima histórico. Sin embargo, el análisis estadístico de tendencias muchas veces falla por la mala calidad de los datos disponibles, y una extrapolación de tendencias al largo plazo no se permite.

De modelos a decisiones

Los modelos integrados representan el paso de la mera simulación de los impactos del cambio climático en la producción agrícola hacia el análisis de efectos indirectos y del contexto de decisiones. La priorización de medidas de adaptación representa un tema de investigación en sí mismo y, por esta razón, la presentación de herramientas queda incompleta en esta categoría. Existen tres tipos de análisis de modelos: el análisis espacial, la intercomparación de modelos y los modelos integrados (figura 2).

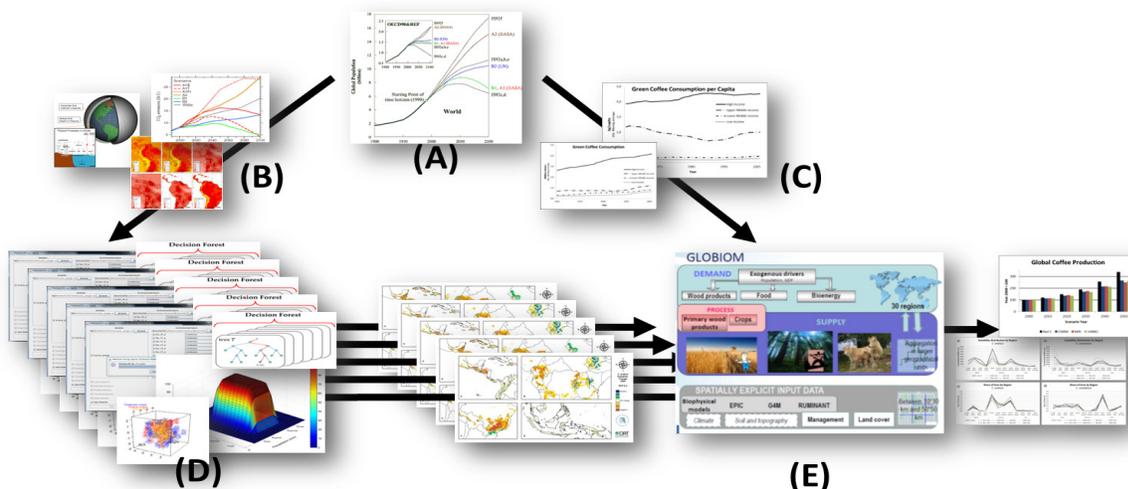
Igual a la simulación de los impactos, el análisis se hace a escalas espaciales. Se incluyen dos herramientas para el análisis de este tipo: ArcGis y R., que son softwares con capacidades avanzadas y que se utilizan cada vez más para representar los resultados obtenidos en los modelos de simulación, puesto que permiten hacer análisis espaciales y representaciones gráficas de los resultados de los modelos de simulación. La diferencia se encuentra en la facilidad del aprendizaje y la flexibilidad del programa. ArcGis es más accesible que R, pero R ofrece más opciones y automatización.

Dadas las limitaciones de la simulación de producción agrícola, es importante entender las capa-

cidades del modelo mismo. La intercomparación de modelos permite analizar los efectos de la parametrización de los modelos, las limitaciones de los modelos y la identificación de impactos unívocos. El AgMIP es un proyecto ejemplar a nivel mundial, que busca fortalecer el conocimiento científico sobre la modelación en la agricultura. Los protocolos, las publicaciones y los resultados desarrollados por AgMIP son una fuente valiosa para mejorar las capacidades en la modelación.

Finalmente, los modelos integrados buscan combinar modelos de producción con modelos económicos. Esto permite el análisis de efectos indirectos de impactos de un cultivo a otro, o de una región a otra, y se pueden incluir efectos de políticas y una demanda aumentada (figura 2). A nivel de país, se han usado modelos CGE (Computable General Equilibrium), que permiten analizar diferentes efectos; por ejemplo, la demanda de labor rural. Sin embargo, más usual es el empleo de modelos de equilibrio parcial (PE) por su capacidad de simular efectos de una manera espacialmente explícita, lo que es más realista en el caso del cambio climático. Aquí se presentan dos ejemplos, el modelo IMPACT y el modelo GLOBIOM, los que se han usado para investigar impactos del cambio climático sobre la seguridad alimentaria en Latinoamérica.

Figura 2. Cadena de modelación integrada: (A) escenarios de emisiones de origen humano con supuestos sobre crecimiento de población y economía; (B) modelos del clima global proyectan cambios del clima, accionados por los escenarios de emisiones; (C) cambios en la demanda inducidos por el crecimiento de la población y la economía; (D) modelos de simulación para evaluar los efectos de los cambios del clima; y (E) modelos económicos integran los cambios en la demanda y la producción para incluir los efectos de los mercados y los precios.



Fuente: Elaborada por el autor con base en datos de Havkik et al. 2012.



I. Elementos conceptuales básicos sobre modelos de simulación para estudiar el clima y sus impactos en la agricultura

1.1. ¿Qué es un modelo?

Una definición genérica del concepto de “modelo” lo describe como la representación de un objeto, sistema o idea, distinto al de la entidad misma u original (Bermón Angarita s. f.). De manera más compleja, puede definirse como “un esquema teórico, generalmente expresado en forma matemática, de un sistema o de una realidad”. Un modelo puede tratar de explicar, por ejemplo, la evolución económica de un país, elaborado para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento (RAE 2014d). Puede tener diversos propósitos, pero siempre implica la intención de ayudar a entender o ya sea, mejorar un sistema. Cuando se trata de la representación de un sistema, un modelo permite observar situaciones o relaciones entre sus componentes de forma concisa, eficiente y efectiva (Bermón Angarita s. f.). Todo modelo tiene limitaciones con respecto al sistema que trata de representar, dado que no puede tomar ni simular cada detalle del original.

Por estas limitaciones, se dice que “todos los modelos son erróneos, pero unos son útiles” (Box y Draper 1987, p. 424). Esto quiere decir que en la evaluación para escoger un modelo adecuado siempre se debe hacer la pregunta; ¿sirve a su propósito?, el cual es ayudar a entender. El modelador, quien busca entender las implicaciones del cambio climático, muchas veces será confrontado con las limitaciones de sus modelos. Dada la complejidad del objeto de la modelación, el sistema climático, el crecimiento de una planta, la economía agrícola, resulta imposible hacer predicciones exactas del futuro, ni es posible incluir todos los detalles del sistema analizado, pero lo que sí es posible es diseñar un modelo que ayude a entender y explicar un evento o situación particular.

- Un modelo es una representación matemática de un sistema.
- Un modelo no es una bola de cristal.
- Un modelo es una herramienta para entender interrelaciones.

1.2. ¿Qué es un sistema?

Un sistema es una parte limitada de la realidad que contiene elementos interrelacionados. Es una entidad que existe y opera en un tiempo y en un espacio dado y depende de la interacción entre sus componentes, lo que le permite realizar procesos que dan la razón de ser al propio sistema, según sea su naturaleza o propósito (Atehortúa et al. 2008, Caselles 2008).

Cuando se describe y estudia un sistema se hacen suposiciones acerca de su comportamiento, pero no siempre se puede observar un sistema funcionar. Por eso, la alternativa es el diseño de modelos, con la finalidad de poder estudiar el sistema, simulándolo, representando algunas o muchas de sus variables⁴, entidades e interrelaciones.

La simulación de los impactos del cambio climático en la agricultura, usualmente formula modelos de tres sistemas: el sistema global del clima, el sistema de producción agrícola, y el sistema de la economía agrícola. En esta cadena secuencial de modelos, los resultados de modelos de escala superior se trasladan a modelos de escala inferior, pero no en sentido contrario. La delimitación de los sistemas de modelos de simulación es histórica, ya que la ciencia del cambio climático es una disciplina nueva. Los proyectos para evaluar los impactos son de carácter transdisciplinario, porque se requiere de un intercambio intensivo entre investigadores de diferentes disciplinas. El propósito es la formulación de modelos que son incluyentes de todos los elemen-

4. Se trata de atributos que se definen al diseñar el sistema, o se identifican al estudiarlo, si ya existe. Las variables esenciales del sistema se trasladan al modelo para estudiarlo y experimentar con él (Caselles 2008, Llebot 2009).



tos interrelacionados por el cambio del clima. Sin embargo, en la delimitación de sistemas de manera secuencial también sirve la eficiencia en la formulación de modelos, lo cual facilita la interpretación de los resultados, con el fin de generar conocimiento útil para los tomadores de decisiones.

En la simulación de sistemas agrícolas también se hacen distinciones de tipos de sistemas, que luego dan lugar a distintos tipos de simulación. Usualmente la definición del sistema se hace por la escala del estudio: planta, finca, cuenca, región, nación y también global. Para cada escala, los elementos interrelacionados son diferentes, por ejemplo, a nivel de la planta se pueden considerar distintas copias de genes presentes; a nivel global podrían ser la precipitación anual y la temperatura promedio. Si se toma en consideración un exceso de parámetros e interrelaciones en la formulación de un modelo que incluya todas las escalas y variables, se corre el riesgo de ser no interpretable, fallando en su propósito de ayudar a entender las interrelaciones. De ahí la necesidad de distinguir claramente el sistema que se desea simular y de esta forma, facilitar el análisis y comprensión de los resultados obtenidos.

- Un sistema es una parte limitada de la realidad con elementos interrelacionados.
- Es necesario definir bien el sistema de interés.
- Definir su relación con otros sistemas.
- Definir el flujo de datos entre modelos.
- El abarcar un exceso de variables al diseñar un modelo que incluya todas las escalas, puede resultar en datos no interpretables.

1.3. ¿Qué es la simulación o el modelado?

La simulación consiste en diseñar un modelo a partir de conocimiento previo sobre un sistema real, para experimentar con él y entender el comportamiento de ese sistema, de modo que en el futuro sea posible predecirlo. El desarrollo de la capacidad de predicción permite evaluar estrategias y alternativas de gestión, comparar resultados y tomar decisiones acerca del sistema en estudio, para optimizar inversiones, reducir costos o disminuir vulnerabilidades, daños y pérdidas, en función del período y de las actividades y prioridades que interesan a los actores involucrados (Tarifa s. f., Bermón Angarita s. f.). Es por eso que la ciencia del modelado es una herramienta de primer orden para la evaluación de los sistemas agrícolas ante el impacto del cambio climático (recuadro 1).

Recuadro 1. Etapas que componen una simulación.

- a. Formulación del problema
- b. Definición del sistema a modelar
- c. Formulación del modelo
- d. Recolección de datos
- e. Implementación del modelo en la computadora
- f. Verificación
- g. Validación
- h. Diseño del experimento

La simulación es un proceso cuantitativo y el modelo que se diseña para realizarla es una abstracción de la realidad, que captura lo esencial de esta. Inicia con el desarrollo del modelo en el nivel conceptual. Si el modelo conceptual que da lugar al diseño del modelo como herramienta es erróneo, entonces el modelo cuantitativo no cumplirá las expectativas para las que fue desarrollado (UNCUYO s. f.).

Para determinar cómo reaccionaría el proceso o sistema real ante ciertos cambios en el tiempo, lo que se hace es inducir o generar esos cambios en el modelo diseñado, simulando la respuesta que el sistema tendría. Usualmente, los sistemas reales no permiten la experimentación, y cuando esta es posible, puede resultar muy cara o riesgosa. De ahí la utilidad de emplear un modelo para hacer experimentaciones (Caselles 2008).

Entre las utilidades que proporciona la modelación o simulación está la contribución al conocimiento del funcionamiento de algunos sistemas esenciales, tales como los climáticos, los agrícolas, los hídricos y los ecosistemas, por mencionar algunos que tienen una significativa relación, influyéndose unos a otros.

El diseño de un modelo obliga a ordenar y completar la información acerca del sistema que es objeto del estudio y ayuda a identificar sus vacíos y necesidades, a través del proceso de modelación o simulación. Este proceso depende, más bien, de la ejecución del modelo y su resultado, concreto y cuantitativo, lo que es importante cuando se trata de representar o discutir procesos de cierta complejidad, como ocurre con el sistema climático. Modelar permite la predicción y la experimentación, lo que es fundamental para estimar posibles efectos positivos y negativos del cambio climático sobre las actividades agrícolas (Caselles 2008).



La complejidad metodológica y la cantidad significativa de datos que se requieren para el estudio de un sistema que puede ser agrícola, climático o una combinación de ambos actualmente implican la gestión y el almacenamiento de una gran cantidad de datos. En ocasiones esto se resuelve corriendo un programa de simulación o modelaje en una computadora para estudiar, por ejemplo, las condiciones de producción de arroz en una parcela, empleando el programa DSSAT (ver ficha 3 en la sección II). No obstante, cuando la cantidad de datos que se necesita almacenar y procesar es mucho mayor, como sucede con la modelización del clima de una región o del planeta, se utilizan “clústers” (UNAM 2003; ver glosario) o sistemas de cómputo.

- Modelos de simulación se desarrollan a partir de conocimiento previo.
- Permiten proyecciones en espacio y tiempo.
- También son una herramienta para descubrir vacíos en el conocimiento del sistema.
- La gestión de datos es clave para el éxito de proyectos de simulación.

1.4. ¿Cuáles son las alternativas a la simulación?

Los modelos de simulación son deductivos, ya que se usa conocimiento previo para su desarrollo (por ejemplo, con base en una revisión de literatura). La alternativa sería el uso de modelos estadísticos, o inductivos, para explicar impactos a partir de variables indicadoras; por ejemplo, si existen datos que muestran que la producción de café es baja en años con una temperatura promedio alta durante los meses del verano, uno podría inducir que temperaturas altas durante cierta época del año, generalmente causan rendimientos bajos (Gay et al. 2006).

El desarrollo de este tipo de modelos puede ser prometedor, especialmente cuando el sistema de interés se defina en márgenes estrechos; así que unas pocas variables bastan para explicar efectos relevantes. Adicionalmente, se requieren suficientes datos para identificar efectos significativos. Sin embargo, pocas veces es posible definir un sistema de interés de manera limitada, y la disponibilidad de datos muchas veces es escasa.

Una consideración importante en el caso de la investigación de los impactos del cambio climático, es que la capacidad de extrapolar modelos estadísticos a

otros lugares o tiempos se considera muy limitada. El cambio climático resultará en eventos climáticos previamente no observados. Extrapolar modelos inductivos fuera del rango de los datos observados, puede resultar en conclusiones erróneas. Por ejemplo, en una publicación famosa se mostró que los efectos de temperaturas altas sobre la producción de maíz son lineales, dentro de rangos tolerables para el cultivo. Sin embargo, fuera de este rango, los impactos eran exponenciales. Los autores concluyeron que los modelos que suponen una relación lineal en este caso, subestimaron impactos. Este efecto fue demostrado a gran escala con una base de datos global, donde estudios locales estadísticos no hubieran capturado este efecto, mientras que con un modelo de simulación a escala regional o global, sí se puede reflejar conocimiento de este tipo.

Últimamente se han usado nuevos algoritmos de aprendizaje de máquinas que son capaces de encontrar patrones dentro de datos complejos. Un problema de los modelos estadísticos era que en muchos casos se usaron bases de datos complejas con variables de distintos tipos. Las metodologías, usando regresiones comunes, fallaron en estos casos. Mientras que las metodologías de aprendizaje de máquinas tienen su origen en la minería de datos y se consideran más robustas para la extrapolación, además de que pueden utilizar más variables que las metodologías comunes.

- Alternativas a la simulación son modelos estadísticos o de aprendizaje de máquinas.
- El sistema debe ser limitado en su definición y bien descrito por datos.
- La extrapolación de estos modelos puede resultar errónea.
- Modelos inductivos se usan para generar hipótesis.

1.5. ¿Cuándo se usa la simulación?

El uso de modelos de simulación permite aprovechar todo conocimiento disponible sobre un sistema. Sin embargo, el desarrollo de un modelo puede ser costoso, lento y laborioso. Debe comprenderse que la simulación es una técnica experimental de resolución de problemas lenta e iterativa; es decir, que se basa en la repetición de una operación. La simulación, por tanto, alcanza un resultado por aproximación a este (recuadro 2). Se opta por emplearla cuando se dan las siguientes condiciones:



- No existe un sistema real que permita aplicar el análisis que sí admite el modelo de simulación, o hacerlo es muy costoso, peligroso o imposible, como sucede con el sistema climático.
- La modelación exclusivamente matemático – analítica del sistema es imposible, como sucede con la climatología y la meteorología, debido a la cantidad de datos que deben ser procesados y almacenados.
- Los modelos matemáticos carecen de soluciones analíticas o numéricas para el sistema en cuestión.
- El modelo de simulación admite la validación de sí mismo y de sus soluciones de forma satisfactoria.
- El modelo de simulación permite suponer una precisión consistente con los requisitos del problema concreto que le es planteado.
- Aprovechar todo conocimiento sobre el sistema.
- Permite experimentos en sistemas complejos.
- La simulación requiere de inversiones para su desarrollo, análisis e interpretación.

Recuadro 2. Ventajas y desventajas de la simulación.

Ventajas de la simulación	Limitaciones de la simulación ⁵
<ul style="list-style-type: none"> • Permite una experimentación controlada. • Permite comprimir el tiempo al experimentar. • Permite el análisis de sensibilidad del sistema ante determinados cambios. • Evita costos o riesgos, ya que no es necesario interrumpir el desarrollo del sistema para estudiar su comportamiento. • No es necesario destruir al sistema si se desea investigar sus límites de resistencia. • Si solo es un sistema propuesto, no es necesario construirlo físicamente. • Es una herramienta efectiva de entrenamiento. • Puede ayudar a simplificar procesos productivos. • Permite evaluar diseños alternativos de sistemas. • En ocasiones es el único método disponible para analizar un sistema. • Es un proceso relativamente eficiente y flexible. • Puede ser usada para analizar y sintetizar una compleja y extensa situación real. • Permite estudiar los efectos interactivos de los componentes individuales o variables para determinar las más importantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • El desarrollo de un modelo puede ser costoso (por el equipamiento y el tiempo y costo de mano de obra); laborioso y lento. • Existe la posibilidad de cometer errores. La experimentación se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema real, por lo que si el modelo está mal o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos. • No se puede conocer el grado de imprecisión de los resultados. Por lo general, el modelo se utiliza para experimentar situaciones nunca planteadas en el sistema real (por ejemplo, impactos del cambio climático en magnitudes desconocidas como parte de la variabilidad climática), por lo tanto, no existe información previa para estimar el grado de correspondencia entre la respuesta del modelo y la del sistema real, ante un cambio dado. • Es la última opción, cuando otras técnicas no son factibles para analizar un sistema. • Es experimental e iterativa, es decir, se acerca a un resultado por aproximación, mediante la reiteración de un ejercicio. • Generalmente proporciona soluciones subóptimas, debido a que se basa en la iteración de un proceso. • Su validación es compleja. • La recopilación, análisis e interpretación de resultados requiere buenos conocimientos de probabilidad y estadística.

5. Basado en Meelamkavil 1987 y Bermón Angarita s. f.



1.6. ¿Qué es un modelo de simulación?

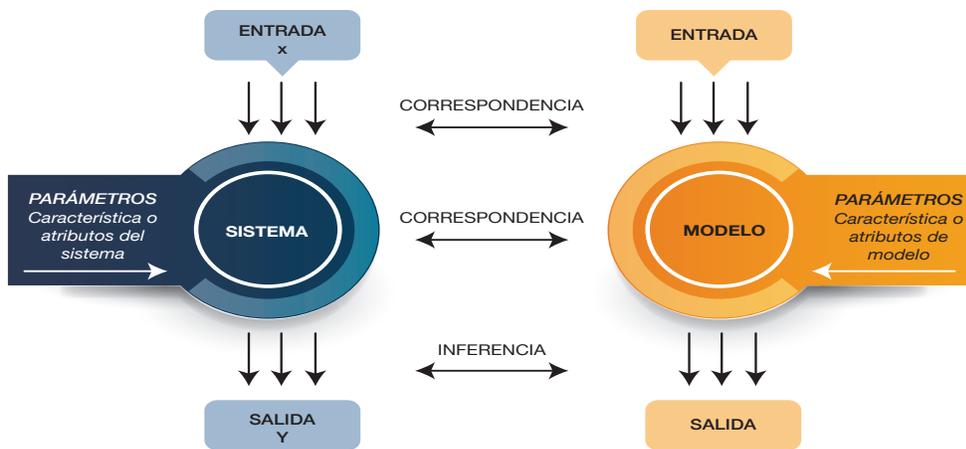
Un modelo de simulación es una abstracción de un sistema que existe en la sociedad o en la naturaleza. En la agricultura, los modelos de simulación intentan capturar todos los procesos relevantes en los sistemas de producción de cultivos. Otro ejemplo son los modelos económicos. En el caso del clima, un modelo de simulación trata de imitar el sistema climático, ya sea globalmente o en alguna de sus características, a partir de unas condiciones iniciales que le son indicadas, como parte del diseño del modelo (Llebot 2009).

En la agricultura, los modelos de simulación imitan los procesos ecobiofísicos de la cultivación para modelar el impacto de factores del medio ambiente en los cultivos y sus sistemas ecológicos. Datos de entrada son condiciones iniciales (por ejemplo, la humedad de suelo y el nitrógeno disponible), informaciones sobre el cultivo (como las características de la variedad), el manejo (riego, plantación, fertilizantes) y datos del tiempo a nivel diario de escenarios actuales (verificación) y del futuro (extrapolación). Diferencias entre los modelos existen en los procesos implementados, en las opciones de manejo o en la escala. En la teoría, entonces, se comparan los resultados de varias simulaciones con diferentes condiciones iniciales, mientras que en la práctica se trata de resolver numerosos problemas de disponibilidad y calidad de datos.

Estos modelos matemáticos, dada su complejidad y para efectos de eficiencia, se calculan mediante computadoras, por lo que a partir del modelo matemático se desarrolla un programa informático^{6,7}. Un modelo de este tipo se elabora para poder experimentar con las características esenciales de un sistema real, sin manipularlo directamente. Sus componentes deben corresponderse con los más importantes o relevantes de la entidad (sistema u objeto) modelada, que a diferencia del modelo, sí existe en la realidad (figura 3) (Llebot 2009). En su diseño debe lograrse describir con suficiente detalle el sistema que representan esos modelos, de manera que a partir de ellos sea posible hacer predicciones válidas sobre el comportamiento del sistema, en relación con una actividad o un contexto determinado.

Los modelos de simulación no pueden incluir la representación de la totalidad de los procesos que intervienen en sus sistemas. Esta limitación se resuelve aplicando una técnica denominada “parametrización” (ver glosario), basada en el uso de algoritmos (ver glosario), que se agregan al programa o software que ejecuta la modelización. Así, se logra obtener un resultado que de otro modo no podría el modelo obtener, debido a que la escala que ese cálculo requiere estaría más allá de su alcance. Por ejemplo, la nubosidad en una celda o cuadrante de la atmósfera de un tamaño de 100 km² no está relacionada únicamente con la humedad de esa celda, pues los elementos y factores del clima interactúan todos entre sí de forma continua. No obstante, se

Figura 3. Representación gráfica del concepto de un modelo de simulación.



Fuente: Bermón Angarita s. f.

6. Un modelo matemático tiene tres fases básicas: 1. Construcción del modelo: transformación del objeto no matemático en lenguaje matemático; 2. Análisis del modelo: estudio del modelo matemático; 3. Interpretación del análisis matemático: aplicación de los resultados del estudio matemático al objeto inicial no matemático (ver Rodríguez y Steegman 2000).

7. Para profundizar en la teoría sobre modelos matemáticos, puede consultarse Rodríguez y Steegman 2000.



sabe que si la humedad en esa celda aumenta, la nubosidad también se incrementa. Para poder describir esta reacción, se parametriza la relación entre la humedad y la nubosidad, en un modelo del clima del lugar que se estudia (Llebot 2009), lo cual significa que se agrega al modelo un algoritmo que le permitirá representar esa reacción y cuantificarla (recuadro 3).

- Modelos de simulaciones son representaciones matemáticas de procesos en un sistema.
- Sus componentes deben corresponderse con los más relevantes del sistema modelado.
- En la agricultura, representan procesos del crecimiento de cultivos, manejo y efectos del clima.

Recuadro 3. Modelos climáticos.

Los modelos climáticos y meteorológicos se basan en la aplicación a la atmósfera de las ecuaciones de la física, la química y la dinámica de los fluidos. Los modelos que se emplean específicamente para el estudio del clima y del cambio climático están sustentados en principios físicos y pueden reproducir las características observadas del clima actual y de cambios climáticos del pasado. La confianza que se tiene en las estimaciones de los modelos es mayor para algunas variables climáticas que para otras, como sucede con la temperatura y la precipitación, respectivamente. En el transcurso de varios decenios de desarrollo, los modelos han brindado, de forma sistemática, una idea clara e inequívoca del calentamiento del clima, como respuesta al incremento de los GEI.

Puesto que la atmósfera es muy variable en el tiempo y el espacio y se hace necesario tratar de predecir su comportamiento, a pesar de la incertidumbre, las ecuaciones deben resolverse para un número muy grande de puntos en la atmósfera, con el fin de realizar análisis meteorológicos. Si estas simulaciones se realizan durante un período prolongado, entonces pueden hacerse análisis climáticos, entendiendo el clima como el estado promedio del sistema atmosférico y su variabilidad. Para poder resolver muchas ecuaciones en un gran número de puntos durante un período prolongado, los modelos se informatizan como programas que son “corridos” o “ejecutados” en los clústers o súpercomputadoras. Los modelos dividen el sistema por describir —la atmósfera, el océano— en una malla con celdas, o una “grilla”. El modelo resuelve las ecuaciones para cada celda, teniendo en cuenta la interacción de cada una de ellas con sus vecinas.

Una vez efectuado este cálculo para cada celda a partir de unas condiciones iniciales, se obtiene la variación del sistema climático según el modelo en una iteración temporal y, por consiguiente, se dispone de unos valores de las variables fundamentales del modelo para cada celda. Luego, corresponde convertir los resultados anteriores en nuevas condiciones iniciales para una nueva iteración, que a su vez arrojará nuevos valores para las variables de cada celda. Dado que el clima es dinámico, su estudio también debe serlo. Cuanto más pequeña sea cada celda, más preciso será el modelo, pero su cálculo demorará más y será más complicado de obtener. Al estar la atmósfera y los océanos estrechamente acoplados, el esfuerzo del viento sobre la superficie del océano crea fricción y es el principal impulsor de la circulación superficial en el mar. Luego, la evaporación del agua hacia la atmósfera libera calor al condensarse, siendo una fuente importante de energía que caracteriza la circulación atmosférica. Así, los modelos climáticos globales con acoplamiento atmósfera-océano son los que actualmente se utilizan, empleando celdas de entre 100 y 200 km de anchura para la atmósfera y de menores dimensiones para el océano.

Los modelos climáticos y meteorológicos se emplean para pronosticar el tiempo a corto plazo y para estudiar cómo reacciona el sistema climático ante distintos cambios o forzamientos (por ejemplo, variaciones en la energía emitida por el sol, aumentos de la concentración de GEI, o cambios en el uso de la superficie terrestre), en plazos mayores. Estos modelos son validados usándolos para estudiar el clima actual y según los resultados que brinden, se emplean para simular el cambio climático pasado y futuro. Esto último implica poder representar los cambios posibles o previstos de los forzamientos climáticos, naturales y antropogénicos. Algunos forzamientos naturales, como la variación de la energía del sol, funcionan a través de mecanismos físicos y pueden incluirse en las proyecciones del estado del clima futuro; otros, como la emisión de gases y partículas de origen volcánico a la atmósfera, son menos predecibles. Los forzamientos de origen humano se sitúan entre esos dos extremos; es decir, no son ni muy predecibles ni esencialmente aleatorios.



1.7. ¿Cómo se clasifican los modelos de simulación?

Los modelos de simulación se clasifican según su propósito original, su estructura y los procesos implementados. Otras diferencias importantes se encuentran en la inclusión del tiempo como variable y en la formulación matemática del modelo.

La clasificación, según el propósito original, refleja la escala en que los modelos fueron desarrollados. Esta clasificación también se usará en la segunda sección de este documento. Ejemplos de modelos a nivel de la finca son EPIC o DSSAT. Estos modelos incluyen interacciones dinámicas entre cultivos, suelo, atmósfera y aspectos del manejo. Normalmente, la calibración se hace a partir de resultados de experimentos agronómicos. A nivel de la cuenca o ecosistema, modelos como STREAM o APEX fueron desarrollados para simular las dinámicas del uso de agua, emisiones de carbón y uso de nitrógeno. Muchas veces la implementación se hizo a partir de cultivos genéricos y las dinámicas entre cultivos, aspectos del manejo y variables económicas, se introdujeron luego. A nivel global, se habla de modelos de cultivos reticulados globales (Global Gridded Crop Models). Estos son modelos de cuencas o fincas que se parametrizarán y aplicarán a una escala grande (píxeles de 0.5° lon/lat o 50 km al Ecuador). Una alternativa es una zonificación agroecológica (FAO s. f.) que no es un modelo de simulación como tal porque no es dinámico, pero que implementa muchos procesos relevantes a escala global.

Usualmente, los modelos a nivel de finca incluyen más procesos que los modelos de cuencas; por ejemplo, en EPIC incluye estrés por aluminio, potasio, densidad y estrés por calor específico al cultivo, mientras los modelos de cuencas no siempre modelan limitaciones por nutrientes y estrés por sequía o temperaturas altas, sino que se implementan de manera generalizada. Dado que el cambio climático es en parte causado por niveles altos de dióxido de carbono en la atmósfera, el efecto de la alta concentración de este gas como fertilizante de plantas es un aspecto relevante en la modelación de los impactos del cambio climático. Generalmente, una inclusión de efectos de este tipo reversa unos impactos negativos. Sin embargo, la magnitud de este efecto es sujeto de discusiones reñidas.

Otra clasificación separa los modelos en estáticos y dinámicos. Un modelo estático no reconoce el tiempo como variable cambiante: se enfoca en des-

cribir un instante del estado de un sistema, como si se tratara de una fotografía. En este tipo de modelo, el tiempo no tiene una función. Un modelo dinámico sí incorpora el tiempo y el transcurso de este es un criterio básico para el diseño, en el que se representa el sistema a lo largo de su evolución. Este tipo de modelo brinda una secuencia del sistema sobre una línea cronológica, a lo largo de la cual describe sus relaciones y estados en diferentes momentos (UTN s. f.). Esta clasificación es importante en el caso de modelos económicos, que usualmente comparan equilibrios del mercado (por ejemplo, al principio de un periodo y al final de este). Los modelos sobre crecimiento de cultivos, usualmente son dinámicos ya que lo que pasa entre comienzo y final del periodo es de interés. Obviamente, los modelos dinámicos requieren de más recursos de procesamiento.

Los modelos de simulación también pueden clasificarse como deterministas o estocásticos. Los primeros se caracterizan porque las entidades que los integran se relacionan entre sí con base en una lógica constante, es decir, no son aleatorias ni dependen de la probabilidad. En el caso de los estocásticos, se trata de modelos en los cuales al menos una parte del proceso de simulación tiene una naturaleza casual, dependiente del azar. En el ámbito de las matemáticas, este concepto se emplea para referirse a los procesos cuya evolución en el tiempo también es aleatoria, tal como una secuencia de lanzamiento de los dados en un juego de mesa en la que no se puede controlar el resultado, aunque sea uno mismo el que lance los dados (RAE 2014c).

- Clasificación según propósito original: finca, cuenca o global
- Procesos implementados: estreses específicos, CO₂, interacciones entre módulos
- Dinámicos o estáticos
- Deterministas o estocásticos

1.8. ¿Por qué se emplean modelos de simulación para estudiar el clima y el impacto del cambio climático sobre las actividades agrícolas?

La variabilidad climática siempre ha dado lugar a amenazas recurrentes sobre el sector agrícola. El cambio climático agrega incertidumbre a dicha variabilidad, puesto que modifica sus parámetros, lo que hace más complejo, pero también más necesario, es-



timar cómo será afectado el sector agropecuario por esa causa. Un aspecto favorable de esta circunstancia, agregada a las interrogantes que persisten en torno al funcionamiento del sistema climático, es el fomento que ha recibido el desarrollo de capacidades asociadas con la modelización del clima. Esto ha contribuido a conocer mejor las interacciones del sistema atmósfera-océano-superficie terrestre, en relación con el calentamiento global. Este último es descrito por expertos como un “experimento” que se origina en el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera terrestre. No es posible conocer cuál sería el clima actual ni el de las décadas próximas, sin el forzamiento (ver glosario) de origen antrópico inducido al sistema climático por parte de las actividades humanas desde hace algunos siglos, ni las consecuencias definitivas de este proceso sobre el clima del planeta (Oglesby y Rowe 2010).

La necesidad de conocer mejor los efectos del cambio climático se ha convertido en un incentivo para estudiar y comprender mejor la vulnerabilidad del sector agropecuario ante las amenazas climáticas en general. El objetivo fundamental de la simulación del clima y de sus impactos sobre la agricultura, es el de prever qué ocurriría en caso de darse determinadas alteraciones de las condiciones anteriormente conocidas, como parte de la variabilidad climática estacional. Aun con la incertidumbre inevitable de los modelos para el estudio de la influencia del cambio climático sobre los sistemas naturales y en particular, sobre la agricultura, sus resultados ofrecen una alternativa para mirar al futuro de una manera sistemática y estimar posibles impactos, pudiendo proponer respuestas que reduzcan sus efectos negativos y contribuyan a obtener beneficios que resulten positivos o favorables para las actividades agrícolas y consecuentemente para la estabilidad social, económica y política de las naciones.

Los impactos potencialmente causados por el cambio climático se entienden como las consecuencias específicas que pueden operarse en un sistema que está expuesto a él (Oglesby y Rowe 2010). La vulnerabilidad, por su parte, puede entenderse como “la propensión o predisposición de un ente, sujeto o sistema, a ser afectado de forma negativa”. Comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC 2014). El sistema en cuestión puede ser natural o de tipo humano y socioeconómico, o una mezcla de ambos.

La vulnerabilidad es altamente dinámica y por ello, variable en el tiempo y el espacio. La necesidad de comprenderla representa el principal desafío de la adaptación al cambio climático, junto con el diseño de políticas y medidas que contribuyan con esa adaptación como tal. No obstante, el cambio climático puede ocasionar no solo impactos con consecuencias negativas, sino también puede dar lugar a efectos positivos o favorables para algunas actividades, entornos, paisajes o sectores.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ha establecido siete criterios para identificar las principales vulnerabilidades: i) magnitud de los impactos, ii) cronología de los impactos, iii) persistencia y reversibilidad de los impactos, iv) probabilidad (estimaciones de incertidumbre) de los impactos y las vulnerabilidades y grado de confianza en esas estimaciones, v) potencial de adaptación, vi) aspectos relacionados con la distribución de los impactos y las vulnerabilidades y vii) importancia del sistema o de los sistemas que corren riesgo (Oglesby y Rowe 2010).

La modelización de los impactos es un insumo sumamente útil para conocer la vulnerabilidad específica de componentes y actividades agropecuarias y contribuir a aportar información para el análisis de estos criterios, de forma que sean útiles en la formulación de políticas de adaptación al cambio climático, así como para el desarrollo de medidas concretas que las hagan efectivas.

1.9. Simplicidad versus complejidad en el diseño de modelos de simulación

Un modelo puede ser más sencillo o más complejo, según el tipo de sistema específico que trata de representar y el nivel de detalle con que se diseña. No obstante, debe tenerse en cuenta que siempre representará la realidad del sistema original de manera simplificada, pues es solo una abstracción de aquel. Además, un único modelo no puede pretender brindar todas las respuestas posibles sobre el sistema en cuestión, sino a lo sumo, aquellas relacionadas con las preguntas de interés para el investigador y otros actores, en un momento dado y ante un escenario determinado.

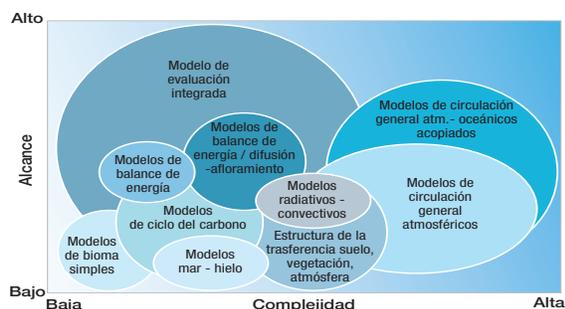
El balance entre lo sencillo y lo complejo, así como en cuanto al nivel de detalle, es un aspecto crítico cuando de diseñar un modelo se trata. En el caso de un modelo de cierta complejidad, es inevita-



ble que el número de parámetros sea mayor que en uno simple, pero siempre debe buscarse que todas las variables tengan un propósito que contribuya al objetivo común que justifica la creación del modelo y del proceso de simulación. Incorporar mayores niveles de detalle implica, usualmente, disponer de más datos para alimentar la estructura del diseño, lo cual no siempre es factible, puesto que puede ser que los datos no existan o no estén disponibles, o que el modelo se torne inmanejable. Sin embargo, un mayor nivel de detalle, diversidad de variables, y un aumento en la cantidad de datos pueden contribuir a reducir la incertidumbre (ver glosario), en la medida en que permiten responder las preguntas con más precisión, o, responder más preguntas. Un nivel de detalle significativo o de cierta profundidad, ofrece mayores oportunidades para estudiar distintas combinaciones acerca de la respuesta del sistema ante distintas circunstancias.

Es por eso que los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente sobre ella, lo que sucede a menudo con sistemas complejos, como el climático. En su caso, existe un amplio abanico de modelos para la mayoría de los componentes de ese sistema, cada uno de ellos con objetivos específicos (figura 4). Esta complejidad se hace evidente cuando se trata de relacionar el clima con la agricultura, en un contexto de escenarios de cambio en el clima.

Figura 4. Comparación esquemática de modelos climáticos diferentes y de los componentes de esos modelos en términos de alcance (eje vertical) y complejidad (eje horizontal). El alcance se refiere a la cantidad de componentes o procesos incluidos en el modelo. La complejidad se refiere al grado de detalle con que se analizan los componentes.



Fuente: IPCC 1997.

Un modelo de simulación debidamente diseñado, se caracteriza por cumplir estos criterios (Tarifa s.f.):

- Se basa en un objetivo claro.
- Dispone de los datos necesarios para alimentar las variables con que experimentará.
- Es fácil de comprender y sigue una progresión, desde lo sencillo a lo complejo, para facilitar el abordaje de su operación por parte del usuario.
- Busca respuestas que no son obvias ni absurdas, es decir, que requieran del diseño, ejecución y análisis del modelo y de su resultado, para alcanzarlas.
- Cumple con resolver una carencia que no se puede solventar con otra técnica, por ejemplo, con base en modelos analíticos.
- Puede ser controlado y manipulado por el usuario, de tal forma que permita la realización de los experimentos propuestos.
- Es completo y coherente; es decir, trata de guardar las relaciones del ente, objeto o sistema original que representa, y contiene los elementos básicos o esenciales de este en su diseño. Esta característica lo hace funcional y manejable.

1.10. La incertidumbre en los modelos de simulación

La certeza o certidumbre es el conocimiento seguro y claro de algo (RAE 2014a). La pregunta principal cuando se valora la certeza de un modelo es si hace bien lo que se le pidió que hiciera (Oglesby y Rowe 2010). En otras palabras, el modelo se limita a hacer lo que se le indica cuando fue diseñado, o así debe ser. La respuesta a ello determina si se puede confiar en el modelo y en sus resultados. Esto explica también el porqué un modelo mal diseñado, no contestará a las preguntas que se le planteen (recuadro 4).

Los modelos de simulación que estudian el clima y sus efectos sobre los sistemas biofísicos y la agricultura se basan en principios relacionados con aspectos tales como el conocimiento de la atmósfera, la hidrología, el sustrato geológico, la fenología de los cultivos y otras características de la producción, de los sistemas hídricos, los ecosistemas. El acervo técnico necesario para desarrollarlos es amplio y el conocimiento sobre ellos en la actualidad es significativo. En ese sentido, los modelos de simulación



Recuadro 4. Validación de un modelo: una explicación básica.

En el recuadro 1 se hizo alusión a la validación como uno de los últimos pasos en el desarrollo de un modelo. Este es un paso importante, por su relación con la confianza que el modelo puede ofrecer para hacer lo que se espera de él. Un modelo se construye para ser aplicable a una generalidad o conjunto de sistemas, no para un sistema en exclusiva. Esta es una condición determinante para poder decir que es en efecto, un “modelo”. No obstante, dado que se construye a partir de datos tomados de un pequeño subconjunto de sistemas, es necesario hallar la forma de asegurar su validez para darle un uso amplio, en la explicación de un conjunto mayor de sistemas. Validar un modelo es comprobar que con el tipo de datos disponibles se pueden obtener los resultados deseados y que estos serán fiables. Esto se logra comparando las predicciones del modelo con mediciones realizadas en el sistema real en funcionamiento, con datos históricos de ese sistema o de sistemas similares. El método clásico de validación es el que se denomina “predicción del pasado” o, “simulación ex post”. Consiste en suministrar al modelo datos históricos, cuyos resultados también se conocen y observar si los reproduce. Si lo hace de forma aceptable, entonces funciona bien y queda validado. Para ello se espera que obtenga un coeficiente de variación menor al 5 % con respecto a los resultados conocidos del mismo modelo. En el caso de los modelos de simulación del cambio climático, se usan observaciones reales para validar, en la mayor medida posible, su capacidad para simular el clima actual y poder establecer cuáles son los factores de incertidumbre. Como resultado de esta etapa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o recolectar datos adicionales.

representan recursos válidos y sumamente útiles, para responder preguntas y generar escenarios de análisis que, de otro modo, no serían posibles.

A pesar de lo anterior, hay aspectos que los modelos para el estudio del cambio climático no pueden prever o cuyas características aún se desconocen. Los modelos de simulación arrojan escenarios de un comportamiento futuro, ya sea de un futuro inmediato o más distante, según el plazo que se desee estudiar. Se tiene un nivel de confianza considerable en cuanto al hecho de que los modelos climáticos proporcionan estimaciones cuantitativas creíbles sobre los cambios climáticos futuros, en particular, para la escala continental (Oglesby y Rowe 2010), sin desconocer que persiste la incertidumbre, es decir, que lo que el modelo señala es uno de varios posibles resultados. Pese a ello, en las últimas décadas, los modelos han sido consistentes en mostrar que el clima evidencia una tendencia al calentamiento, como respuesta del sistema atmosférico al incremento de los GEI. Es imposible que un modelo resuelva todos los problemas planteados en relación con un sistema o un proceso, como tampoco puede responder todas las preguntas relacionadas con lo que puede suceder, en cualquier período de análisis.

En el ámbito de los modelos de simulación, la incertidumbre es un factor inevitable que varía de un modelo a otro y que tiene por origen fuentes y causas diversas. Conocer cuáles son los factores

de incertidumbre en un modelo de simulación, ya sea de circulación global o regional del clima, o de estimación de impactos del cambio climático sobre alguna actividad agrícola, la disponibilidad de agua u otro aspecto relevante para la agricultura, es muy importante puesto que se relaciona con la confianza que el modelo puede ofrecer al modelador y al usuario.

Los modelos como los que se incluyen en la sistematización adjunta, también tienen limitaciones, dado que podría ser que los datos con que se alimenta a algunos de ellos, no sean de calidad, o que por su diseño, funcionen muy bien en unas latitudes y en otras no. En ello influyen las suposiciones asumidas en la fase de diseño del modelo y los controles de calidad que se aplican a los datos con que un modelo se alimenta. Además, los modelos pueden contener errores, derivados ya sea de las simplificaciones que pudieron aplicarse en su elaboración para facilitar el procesamiento de los datos, de la transcripción en forma numérica, o de la definición de las condiciones iniciales del sistema que se alimentan en el modelo (Llebot 2009). No obstante, tenga o no errores, un modelo siempre tiene incertidumbre.

Cada método tiene insuficiencias e incertidumbres únicas. Entre los aspectos que generan incertidumbre en los modelos para el estudio del sistema climático están las propiedades de las nubes, el efecto de los aerosoles sobre el balance de radiación del



clima, los cambios que se producen en la circulación oceánica o en el ciclo del carbono, por su acumulación y flujo entre la atmósfera y la biosfera terrestre y los océanos. Todos ellos aún no han podido ser incorporados adecuadamente dentro de los modelos de simulación, puesto que se desconocen aspectos claves de su comportamiento e influencia dentro del sistema climático. Las variables que se emplean y la determinación de los valores de los parámetros también introducen otra fuente de incertidumbre en los modelos, al desconocer cómo influyen en el resultado que estos arrojan. En la medida de lo posible, los modelos climáticos emplean principios físicos básicos o simplificaciones que crean la menor cantidad de incertidumbres.

El IPCC afirma que la mayoría de las fuentes de incertidumbre a escala regional son similares a las que se observan a escala mundial, afectando así los modelos climáticos en ambas escalas. También señala que la falta de homogeneidad en la cubierta terrestre y los cambios en el uso de la tierra, así como los forzamientos como resultado de aerosoles atmosféricos, influyen y afectan el resultado de los modelos de circulación empleados para estudiar el cambio climático. Esto es relevante en el caso de América Latina, porque el cambio climático atribuible a cambios en el uso de la tierra, como la urbanización y la deforestación, puede ser muy grande, y si la deforestación se produce por medio de incendios forestales, por ejemplo, constituye una de las principales fuentes de aerosoles, que también pueden tener un impacto importante sobre el clima regional, y son difíciles de estimar con base en los modelos disponibles. Por ejemplo, el forzamiento total que existía en 1990, debido a los cambios de ozono troposférico en la atmósfera tiene una incertidumbre de al menos $\pm 50\%$, es decir, no hay certeza y lo mismo puede llegarse a un resultado que al otro, en una proporción de un 50 % en cualquier dirección. Este es un ejemplo de cómo persiste la incertidumbre en la ciencia del cambio climático.

Hay muchos otros criterios y variables que tienen estimaciones de incertidumbre elevadas, incluso en la actualidad, cuando se trata de estudiar el cambio climático futuro. No obstante, aceptando que metodológicamente hay desafíos importantes por resolver, la modelización o simulación ha contribuido en las últimas décadas a aclarar de forma significativa los vacíos en el marco conceptual y técnico en relación con el estudio del clima actual

y futuro, ha permitido avances en el desarrollo de múltiples herramientas con ese fin y ha ayudado a comprender mejor la relación entre los componentes del clima, tanto atmosféricos como oceánicos.

- Un modelo siempre tiene incertidumbre.
- La incertidumbre se debe a la complejidad del sistema modelado, la imposibilidad de desarrollar una representación perfecta del sistema y la escasez de datos.
- Repeticiones de las simulaciones con variaciones de supuestos permiten la identificación de resultados consistentes.

1.11. ¿Cómo manejar la incertidumbre?

En la sección anterior se dio una presentación acerca de la incertidumbre en la modelación de los impactos del cambio climático y sus fuentes. La incertidumbre es inevitable por la complejidad del sistema climático y la imposibilidad de hacer una representación perfecta de ello y la escasez de datos de alta calidad. Sin embargo, los modelos climáticos son consistentes en su resultado que las emisiones de GEI causarán un calentamiento global. A pesar de la incertidumbre de los modelos, es posible llegar a conclusiones definitivas.

La manera de manejar la incertidumbre es la repetición de experimentos de simulación de manera independiente con variaciones en los supuestos. Sin embargo, un modelo de simulación muchas veces es complejo y su desarrollo requiere de recursos sustanciales. Así es, no es factible para el modelador o funcionario del sector variar y controlar el efecto de cada variable de entrada para investigar el impacto de la incertidumbre. Es necesario identificar las variables con mayor impacto sobre el resultado.

En la introducción se presentó la cadena de modelaje que se usa para investigar los impactos del cambio climático a la agricultura. El primer paso era la identificación de los cambios proyectados por los modelos de clima. La modelación del clima mismo usualmente está afuera del marco de estudios en el sector agropecuario. El segundo paso fue la simulación de estos impactos al sistema de estudio. Se planteó que en el diseño de un estudio es necesario escoger los datos correctos de la multitud de datos disponibles de proyecciones del clima, y que, además, es importante definir bien el sistema de estudio y las preguntas que se quiere investigar.



Son estos factores los que se pueden variar para hacer un análisis de incertidumbre, con el propósito de identificar resultados consistentes. En las siguientes dos secciones se discute con más detalle el manejo de la incertidumbre de las proyecciones del clima. Primero, se presentan los escenarios de emisiones de GEI y luego las diferencias entre modelos del clima.

La cuestión de incertidumbre debido a la definición de sistema y enfoque de investigación es específica al estudio planteado. Es clave entender un modelo de simulación como una herramienta para formalizar conocimiento y entender interrelaciones. La simulación es un proceso iterativo en el cual los resultados iniciales se usan para adaptar los supuestos originales. La inclusión en el proceso de modelación de talleres con tomadores de decisiones, expertos locales y otros usuarios de la información generada apoya para interpretar los resultados de la simulación, disminuir la incertidumbre y la identificación de recomendaciones consistentes.

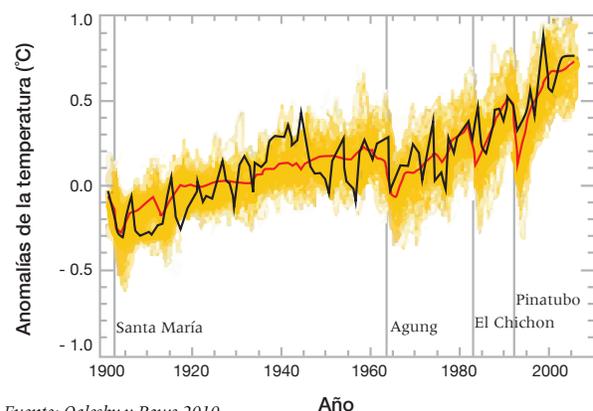
- Se deben tener claras las fuentes de incertidumbre en el estudio.
- La interpretación de los resultados de la simulación solamente es válida en el contexto de la incertidumbre.
- La retroalimentación de resultados apoya para identificar resultados consistentes.

1.12. ¿Cuál modelo del clima se debería escoger?

Estudios sobre los impactos del cambio climático en la agricultura comienzan con un análisis de los cambios proyectados. Estas proyecciones son los resultados de modelos de simulaciones del clima global. No obstante, persiste una incertidumbre significativa acerca del clima del futuro, relevante para estudios de los impactos. Los resultados de la intercomparación de modelos del IPCC muestran que, especialmente en la región tropical, la coherencia entre modelos para la precipitación es baja. Significa que los datos de los modelos del clima deben ser interpretados con cuidado. Aquí se presentan tres estrategias para manejar la incertidumbre del clima del futuro. Solamente dos de estas se recomiendan: escoger “el mejor” modelo, usar todos los modelos, usar una muestra representativa de los modelos.

Hasta ahora, ningún modelo conocido se considera “el mejor” para simular el cambio climático, debido a que no existe uno que modele perfectamente el clima actual. La diferencia entre el clima observado y el clima simulado representa el sesgo del modelo y todos los modelos padecen esa circunstancia. Para contrarrestarla parcialmente, se emplean modelos múltiples en este tipo de análisis, aunque esto no elimina el sesgo propio de cada diseño específico de modelaje. En el caso del clima actual, este sesgo puede estimarse cuantificando la incertidumbre del modelo, en relación con el clima observado y registrado en los datos. Para la mayoría de los modelos, el sesgo es pequeño y los factores que lo crean son bastante conocidos, aunque el sesgo varía de un modelo a otro. El problema radica en que no hay ninguna garantía de que los sesgos del modelo utilizado para simular el cambio climático futuro, sean los mismos que los que el modelo produce al simular el clima actual. Hasta que estos sesgos no se reduzcan al mínimo, se corrijan o, al menos, se comprendan, es difícil asignar probabilidades más robustas a la posibilidad de ocurrencia de las predicciones de los modelos de cambio climático⁸ (figura 5).

Figura 5. Temperaturas medias mundiales de las zonas cercanas a la superficie durante el siglo XX, con base en las observaciones (negro) y según datos obtenidos a partir de 58 simulaciones realizadas mediante 14 modelos climáticos diferentes, motivados por factores naturales y humanos que influyeron en el clima (amarillo). Se muestra también la tendencia media (línea roja gruesa). Las anomalías de la temperatura se muestran en relación con la media entre 1901 y 1950. Las líneas grises verticales indican el momento en que tuvieron lugar las principales erupciones volcánicas.



Fuente: Oglesby y Rowe 2010.

8. Preparado con base en Oglesby y Rowe 2010, Liebot 2009 e IPCC 2007.

Dado que no existe “el mejor” modelo según la reproducción del clima histórico y que no hay medio de saber cuál modelo representa correctamente el clima del futuro, se ha establecido usar modelos múltiples para investigar los impactos del cambio climático. La figura 5 muestra que la tendencia media del conjunto de los modelos (línea roja) representa bien la tendencia observada (línea negra). Esta observación se usa como argumento para proponer el uso de datos de todos los modelos climáticos. En este caso, los modelos de simulación agrícolas se corren para cada modelo climático y el análisis se basa en los impactos promedios, muchas veces junto con escenarios pesimistas y optimistas. Lo que no se permite es calcular un promedio de los modelos climáticos y usar este para la simulación agrícola: los impactos en cultivos muchas veces no son lineales fuera de rangos de tolerancia; usar el promedio de los modelos climáticos en este caso, resultaría en una subestimación de los impactos probables.

Se presentan dos críticas acerca del uso de un conjunto de todos los modelos climáticos disponibles. La primera crítica es que la trayectoria del clima del futuro es desconocida y que podría ser que el promedio de los modelos no refleje bien los cambios venideros. En la ciencia, hay una tendencia de ser conformista: modelos que proyectan cambios fuera del rango de los otros modelos serán criticados de ser no realistas. Resulta que los modelos más extremos podrían ser los que den las proyecciones más correctas. La segunda crítica es de carácter práctico: correr y resumir simulaciones de impactos para todos los modelos climáticos, puede ser laborioso.

Por esto, se propuso usar una muestra representativa de los modelos disponibles. Usualmente se calculan indicadores útiles para la región del estudio como: aumento en temperatura promedio, cambio en evapotranspiración o la duración de sequías para todos los modelos. Con base en estos indicadores, se escoge una muestra que incluye la mayor parte de la variabilidad de las proyecciones climáticas.

- No existe “el mejor” modelo.
- Usar todos los modelos climáticos para simulaciones brinda un escenario más probable.
- Usar una muestra representativa de modelos climáticos permite la identificación de resultados consistentes con mayor eficiencia.

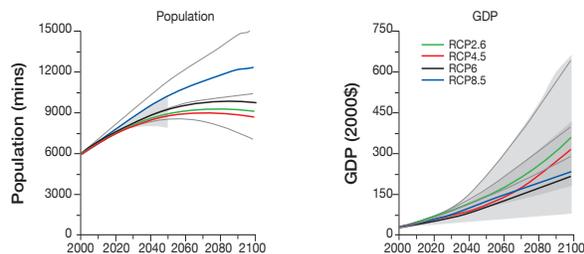
1.13. ¿Cuál escenario de cambio climático se debería usar?

Si la temperatura global aumenta 1 °C o 5 °C hasta el año 2100 depende de escenarios de emisiones. La selección del escenario tiene implicaciones importantes para el propósito de estudios sobre los impactos del cambio climático. Proyecciones del clima en el futuro se generan con modelos del clima. Estos modelos son representaciones matemáticas de los procesos atmosféricos del clima global. El proceso clave para el cambio del clima es el forzamiento radiativo causado por emisiones de GEI de origen humano. El forzamiento radiativo resulta en una mayor energía del sol absorbida en la atmósfera y se expresa en W/m^2 . Las emisiones de GEI dependen de las trayectorias del desarrollo humano. Una gran incertidumbre persiste en el incremento de la población humana global, el desarrollo económico, el cambio de uso de tierra, y el éxito del uso de fuentes de energía renovables, en vez de energía fósil. Es por eso que se usan escenarios que son representativos de las posibles trayectorias del desarrollo humano, en lugar de simulaciones.

Estos escenarios se llaman “Representative Concentration Pathways” (trayectorias representativas de concentración - RCP). Se denominan por sus niveles de forzamiento radiativo RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 (por ejemplo, RCP 8.5 resultará en un forzamiento radiativo de $8.5W/m^2$ hasta 2100). La figura 6 muestra los supuestos de los escenarios para el crecimiento de la población global y el aumento de la actividad económica.



Figura 6. Proyecciones de población (en millones de habitantes) e ingresos (en USD 2000) en los escenarios RCP. El área en gris representa el rango de proyecciones de las naciones unidas para la población. El área en gris, para ingresos, representa el rango de escenarios que se consideraba en escenarios anteriores (también indicado por las líneas en gris).



Fuente: Van Vuuren et al. 2011.

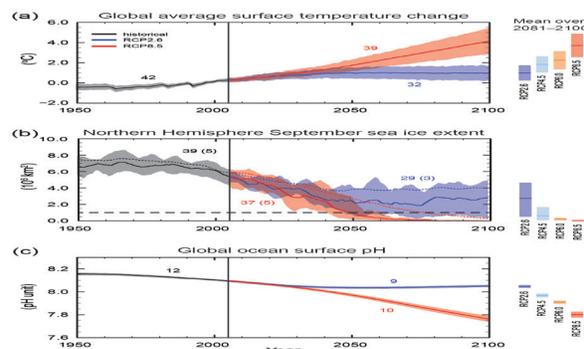
Los escenarios tienen propósitos diferentes. El RCP 2.6 describe escenarios con concentraciones de GEI extremadamente bajas. Es un escenario “peak” en que las emisiones resultan en un forzamiento de 3.1 W/m² en 2050 y vuelven a 2.6 W/m² hasta el final del siglo. Este escenario tiene el propósito de investigar trayectorias posibles para limitar el calentamiento global a un máximo de 2° C.

El RCP 4.5 propone una trayectoria que resulta en una estabilización del forzamiento hasta el año 2100. Esto requiere una estabilización de las emisiones de GEI antes de la mitad del siglo, mediante el uso de tecnologías nuevas y luego por medio de la reducción de las emisiones. El calentamiento en este escenario sería de unos 3° C.

En vez de estabilizar el forzamiento hasta el final del siglo, en el escenario RCP 6.0 se estabilizan las emisiones hacia la mitad del siglo; las consecuencias globales serán parecidas a las del escenario RCP 4.5, pero en el año 2100 el impacto será más fuerte porque el forzamiento sigue aumentando (hasta 3.5° C más se proyectaron en este escenario).

El RCP 8.5 se desarrolló con el supuesto de que las políticas y las tecnologías para disminuir las emisiones de GEI no serían exitosas. En este escenario, las emisiones y el forzamiento aumentan hasta el final del siglo. El resultado sería un aumento en la temperatura global de hasta 5.5° C.

Figura 7. Calentamiento global proyectado por varios modelos climáticos (número colorido) en los escenarios RCP.



Fuente: Stocker et al. 2013.

Los resultados de estudios sobre el impacto del cambio climático deben interpretarse en el contexto de estos escenarios. Dado que las negociaciones intergubernamentales sobre reducciones en las emisiones hasta ahora han resultado en poco éxito, muchos consideran que el escenario optimista RCP 2.6 es inválido. Igual, se ha comentado que un forzamiento de 8.5 W/m² requiere el agotamiento completo de las fuentes de energía fósil, y que resultaría en impactos tan graves que, si en una sociedad actual estuviera hacerlo, no sería factible su existencia bajo estas circunstancias.

Por estas razones, estudios en el sector agropecuario usualmente incluyen los escenarios RCP 4.5 o RCP 6.0. Estos dos escenarios resultarán en un forzamiento y calentamiento parecido, hasta la mitad del siglo. Son representativos de escenarios de emisiones factibles y pues resultados de estudios con base en ellos. Sin embargo, muchas veces se lleva a cabo un análisis de sensibilidad usando escenarios del clima para RCP 2.6 y RCP 8.5. Los impactos en el escenario RCP 2.6 representan el impacto mínimo, mientras que en el RCP 8.5 representan el impacto máximo. Igualmente, resultados basados en RCP 8.5 se usan para llamar la atención a las amenazas del cambio climático, y resultados del escenario RCP 2.6 en comparación con cambios más fuertes, para mostrar las oportunidades de una reducción de emisiones de GEI.

- RCP 2.6 para mostrar oportunidades de la mitigación de emisiones.
- RCP 8.5 para llamar atención a la amenaza.
- RCP 4.5 y RCP 6.0 para impactos esperados.
- Varios escenarios para investigar incertidumbre y sensibilidad.

II. Herramientas de modelaje climático

Este listado describe 22 herramientas de modelaje que pueden usarse en el análisis, tanto de la variabilidad climática como del cambio climático, para estudiar sus impactos sobre las actividades agrícolas y los sistemas naturales en los que estas se sustentan. Dada la abundancia de herramientas de modelaje, las que se incluyeron en esta selección están orientadas al grupo de usuarios de este documento: autoridades y funcionarios técnicos de ministerios e instituciones vinculados al agro. El propósito es fomentar la interacción con otros actores, tales como los desarrolladores de modelos y científicos que estudian el clima, para simular los futuros efectos del cambio climático sobre las actividades del sector agropecuario. Se brinda al lector un conjunto de elementos, ordenados en tablas, por escala de intervención, para tener un vistazo de cada modelo, sus características básicas, y los usos que se le pueden dar.

Se incluyen modelos que pueden servir para estimar la respuesta de una actividad agrícola dada, tanto para la variabilidad climática actual, como para aquella propia de un contexto de cambio climático futuro. Esto también requiere recordar que los modelos hacen una manipulación de los datos para obtener un resultado controlado, el cual es procesado en sistemas de software. Dichos sistemas brindan una serie de posibles condiciones y consecuencias esperadas de la relación entre clima y agricultura. Como una de las conclusiones de este proceso, debe tomarse en cuenta que la incertidumbre es intrínseca a todos los modelos de simulación, lo cual significa que los resultados obtenidos de cualquiera de ellos, representan una probabilidad de ocurrencia de ese resultado, de entre un conjunto que podrían tener lugar.

Clasificación en niveles

Las herramientas han sido clasificadas en niveles de dificultad para el usuario, que van de 1 a 3, siendo este último el de mayor dificultad por la complejidad de la herramienta. Esta clasificación es solo una guía para ayudar a orientar en cuanto a la diferenciación entre modelos más complejos y más simples. No constituye un criterio técnico absoluto.

Los modelos incluidos en esta sistematización son los siguientes:

2.1 Finca o parcela

1. Herramienta para la evaluación del impacto del CC en la agricultura (MOSAICC-FAO)
2. Modelo para la predicción de rendimientos agrícolas en condiciones de déficit hídrico (AQUACROP-FAO)
3. Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia Agrotecnológica (DSSAT)
4. Modelo para el cultivo del arroz (ORYZA 2000)
5. Estudios sobre la alimentación en el mundo (WOFOST)
6. Modelo climático de integración de políticas ambientales (EPIC)
7. Modelo de análisis de intercambio para la evaluación multidimensional de impacto (TAO-MD)
8. Programa para el pronóstico de rendimientos de cultivos (AGROMETSHELL – AMS)
9. Modelo de crecimiento del pasto (LINGRA-N)
10. Modelo de simulación de sistemas de cultivos (CROPSYST)
11. Recurso de modelación para el análisis del ambiente productivo (CERES-MAIZE)

2.2 Cuenca o región

12. Sistema mesoamericano de alerta por crisis alimentaria (MFEWS)
13. Herramientas espaciales para el análisis ambiental de las opciones de gestión en cuencas hidrográficas (STREAM)
14. Aplicaciones de modelos biofísicos (AGRI4Cast BIOMA).
15. Modelo de política en agricultura y ambiente (APEX)
16. Índice de satisfacción del requerimiento hídrico (GeoWRSI)
17. Detección de amenazas climáticas mediante el monitoreo de lluvia satelital (CHIRPS)

2.3 Modelos integrados, análisis espacial e intercomparación de modelos



18. Modelo Internacional para el Análisis de Políticas sobre la Producción Agrícola y el Comercio (IMPACT)
 19. Global Biomass Management Model (GLOBIOM)
 20. Sistema de Información Geográfica (Base de Datos Espacial) (ARCGIS)
 21. R Estadística
 22. Proyecto de Comparación y Mejoramiento de Modelos Agrícolas (AGMIP)
- A continuación se incluyen las 22 fichas sistematizadas de cada uno de ellos: 2.1. Modelos para el estudio a nivel de una finca o parcela.

Ficha 1 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas) ⁹	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de modelación de impactos del cambio climático en la agricultura / Modelling system for the agricultural impacts of climate change. ▪ Otro nombre que se le da en español: Herramienta para la evaluación del impacto del cambio climático (CC) en la agricultura. ▪ Sigla: MOSAICC.
Descripción general	<p>MOSAICC fue desarrollado con el fin de aumentar la resolución de los escenarios climáticos y mediante la técnica de reducción de escala, simular la disponibilidad de agua para riego, estimar el impacto en la producción agrícola y en la economía a nivel nacional.</p> <p>Los modelos y las herramientas funcionan desde un servidor central, por medio del cual los usuarios se pueden comunicar utilizando interfaces web. Todos los modelos se conectan con una base de datos espacial única, la cual facilita el intercambio de datos.</p> <p>Componentes del sistema:</p> <p>CLIMA - preparación de los datos estimados por los escenarios climáticos a una escala apta para la toma de decisiones, a nivel nacional.</p> <p>HIDROLOGÍA - evaluación de los recursos hídricos de acuerdo con las proyecciones climáticas futuras.</p> <p>CULTIVOS - estimación de cosechas de acuerdo con las proyecciones climáticas futuras y los escenarios del progreso tecnológico.</p> <p>ECONOMÍA - evaluación económica de los impactos que ocasionará el cambio climático en los cultivos, considerando a la vez las proyecciones de los recursos hídricos. Estos cuatro componentes o modelos se entrelazan, con el fin de completar las diferentes etapas de la evaluación del impacto CC.</p> <p>Los diferentes usuarios que participan en el diseño del estudio pueden gestionar el flujo y producción de datos según su especialización.</p> <p>Se compone de los siguientes modelos:</p> <p>PORTAL ESTADÍSTICO DE REDUCCIÓN DE ESCALA (PORTAL SD). Para aumentar la resolución de los escenarios climáticos (downscaling) se adaptó el portal desarrollado por el proyecto ENSEMBLES de la Unión Europea.</p> <p>AQUACROP. Modelo de cultivo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) que estima la productividad de los cultivos en relación con el suministro de agua, CO₂ y la gestión agronómica. Emplea los conceptos recientes en fisiología de las plantas, tomando en cuenta el balance de agua en el suelo.</p> <p>WABAL. Modelo específico de balance hídrico que forma parte de AgroMetShell, un software para el pronóstico de rendimiento de cultivos desarrollado por la FAO.</p> <p>STREAM. Modelo de escorrentía que simula la tasa de caudal en zonas de captación extensas.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1.0 (2014)
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en el marco del Programa Comisión Europea-FAO sobre “La vinculación de la información con la toma de decisiones para mejorar la seguridad alimentaria”.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cualquier cultivo.
Características de usuario	

9. Donde esté disponible. Algunos modelos tienen un nombre compuesto por siglas, sin que cuente con un nombre con un formato similar al de otros modelos.



Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Fue diseñado para el uso de las instituciones (ministerios de agricultura, meteorología e hidrología, centros de investigación, etc.) interesadas en los potenciales impactos del cambio climático y que cuentan con la capacidad y datos necesarios para realizar las simulaciones. Es por eso que la FAO solo lo ofrece a organismos nacionales de agricultura, y generalmente, con la aprobación de los ministerios o secretarías de agricultura de cada país.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> No tiene costos de licencia, pero sí de mantenimiento.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés (pendiente de verificar si la instrucción se da en español).
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Datos de la climatología, características del cultivo, economía de la unidad productiva, hidrología del área.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> 3
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> Sí. Los ministerios de agricultura deben gestionar ante la FAO el entrenamiento respectivo.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> La combinación de los modelos que emplea MOSAICC permite evaluar diferentes aspectos del impacto del cambio climático en la agricultura en forma coherente, en recursos hídricos, seguridad alimentaria y cultivos, análisis de vulnerabilidad, simulaciones de respuestas de las políticas en agricultura, etc. La implementación del sistema y las interfaces se pueden adaptar o modificar para satisfacer las necesidades del usuario final. Permite el intercambio de datos, consume poco tiempo, no requiere cambios de formato ni conversión de unidades. La estandarización de métodos y herramientas es útil para desarrollar estudios de impacto en diferentes áreas y obtener resultados que pueden ser comparables.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> No.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). 2014. MOSAICC: publications (en línea). Roma, IT. Disponible en http://www.fao.org/climate-change/mosaicc/67887/en/.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.fao.org/climatechange/mosaicc/en/ (para información). Para acceder hay que gestionar la autorización, previo entrenamiento en el uso de la herramienta.
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> MOSAICC@fao.org, División de Energía y Clima; Francois Delobel, Coordinador Técnico; e-mail: Francois.Delobel@fao.org

Ficha 2 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Modelo para la predicción de rendimientos agrícolas en condiciones de déficit hídrico. AQUACROP (FAO).
Descripción general	<p>Modelo de desarrollo de follaje que se usa para simular la biomasa potencial del cultivo y de la producción cosechable, como respuesta al agua disponible. Es decir, simula los rendimientos potenciales de cultivos herbáceos en función del consumo de agua, uno de los principales determinantes de la producción agrícola, a la vez que es un factor limitante por la competencia en su uso entre el agro y las demandas de otros orígenes, incluyendo la población creciente y la industrialización. Puesto que evalúa los rendimientos de la planta de acuerdo con la información climática, permite conocer y analizar ciertos riesgos, por ejemplo en zonas áridas. Diferencia entre dos tipos de variables, las conservativas (aquellas cuyo valor es propio de la especie y son independientes de la variedad y de la localización) y las no conservativas.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> AQUACROP 4.0
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).



Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Inespecífico. Fue desarrollado para lugares con diferentes condiciones medioambientales y cultivos. Arriba se indica, cultivos herbáceos.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Funcionarios y técnicos con formación en agronomía, de preferencia, aunque admite un amplio rango de usuarios, incluyendo empresas ligadas al agro, organismos de cuenca/riego, etc.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos	<ul style="list-style-type: none"> Gratuito.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Fue diseñado para correr en Microsoft Windows Versión 98 y superiores, sin requerir nada especial en cuanto a software adicional o hardware.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Ubicación (latitud y longitud por coordenadas), temperatura máxima y mínima; precipitación diaria; tipo y profundidad del suelo y cantidad de agua disponible, características del cultivo y prácticas de manejo.
Nivel de complejidad de uso para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> 2
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Estimación de rendimiento, consumo de agua y productividad. Permite manipular los datos de las variables, la respuesta ante condiciones proyectadas por escenarios de cambio climático, así como aproximarse a posibles rendimientos en el largo plazo en determinadas condiciones hídricas (por ejemplo, en secano con la lluvia natural de la zona o con la lluvia estimada futura ante cambios esperables en el clima). Es útil para comparar los rendimientos reales de un año dado, con lo que se hubiera debido lograr, bajo condiciones distintas de las variables empleadas. Permite diseñar sistemas de riego, estimando el aumento del rendimiento debido al agua adicional y su consecuente variación de rentabilidad en relación con la inversión requerida. Simula satisfactoriamente el rendimiento agrícola. Con un conjunto comparativamente pequeño de parámetros para cada uno de sus cuatro módulos (clima, cultivo, prácticas de manejo, suelo) describe de forma simple y directa los procesos que determinan la producción del cultivo y hace más fácil su manejo por parte de un público no experto. Se puede usar en estudios de papa, algodón, maíz, quinoa, tomate y otros cultivos.
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> Dispone de un manual en la web (en inglés), con información de parámetros y calibración para 14 cultivos. Incluye ejercicios prácticos.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> Flores-Gallardo, H; Ojeda-Bustamante, W; Flores Magdaleno, H; Sifuentes-Ibarra, E; Mejía-Sáenz, E. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (<i>Zea mays</i> L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. <i>Agrociencia</i> 47(4):347-359. Steduto, P; Raes, D; Hsiao, TC; Fereres, E; Heng, L; Izzi, G; Hoogeveen J. 2008. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. <i>Options Méditerranéennes, Series A</i>, No. 80, p. 285-292.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html (para descargarla). http://www.fao.org/nr/water/docs/Installation_guidelines_of_AquaCrop_Version_4_64bits.pdf (instrucciones de instalación). http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Chapter2.pdf (manual del usuario, en inglés). http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropNetwork.pdf (para consultar con organizaciones y expertos que utilizan el modelo, clasificados por tipo de cultivo que estudian). http://www.fao.org/nr/water/docs/AquacropLiterature.pdf (para consultar la lista de artículos disponibles en la web de la FAO, relacionados con AquaCrop).
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Aquacrop@fao.org



Ficha 3 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de Apoyo para la Toma de Decisiones en la Transferencia Agrotecnológica / Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Sigla: DSSAT.
Descripción general	<p>Es un modelo de simulación de cultivos. Se usa para analizar los efectos del cambio climático y de la mejora en la fertilidad del suelo causada por niveles elevados de CO₂, inicialmente, en cinco cultivos: arroz, trigo, maíz, soja y cacahuets (maní). El hecho de que se emplea en algunos de los cultivos más importantes de la región, le ha dado relevancia. Se apoya en programas de gestión de bases de datos para el suelo, el clima y el manejo de cultivos y datos experimentales. Simula el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento, como una función de la dinámica suelo-planta-atmósfera. En la actualidad, se emplea en la gestión de evaluaciones regionales sobre el impacto de la variabilidad climática y el cambio climático. Ha estado en uso durante más de 20 años por los investigadores, educadores, consultores, agentes de extensión, agricultores y responsables de las políticas y decisiones en más de 100 países en todo el mundo.</p> <p>Las simulaciones se inician ya sea a la siembra o antes de plantar, a través de la simulación de un período de barbecho desnudo.</p> <p>DSSAT integra los efectos de suelo, el fenotipo de los cultivos, clima y gestión de opciones, y permite a los usuarios preguntar “qué pasa si”, mediante la realización de experimentos de simulación virtuales en una computadora de escritorio en cuestión de minutos, en vez de tener que desarrollar experimentos reales.</p> <p>Actualmente, para la siguiente versión se están modificando la estructura de los modelos de cultivo, la interfase de los modelos y el análisis asociado con ellos.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 4.6
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> Un consorcio de universidades y centros de investigación (Universidad de Florida, Universidad de Georgia, Universidad de Guelph, Universidad de Hawaii, el Centro Internacional para la Fertilidad del Suelo y el Desarrollo Agrícola, USDA-Servicio de Investigación Agrícola, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Estatal de Washington y otros científicos del grupo ICASA).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> A partir de la versión 4.5, consta de modelos de simulación para más de 28 cultivos diferentes.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Técnicos agropecuarios, ingenieros agrónomos, funcionarios con formación básica en modelaje.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> La herramienta para usar el modelo no tiene costo, pero el entrenamiento sí. Los costos varían, porque dependen de si se recibe un curso como grupo, o si se asiste a una sede del grupo experto que desarrolló la herramienta.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Conexión a internet, computadora, sistemas operativos convencionales.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Requiere datos meteorológicos diarios, la superficie del suelo y la información de su perfil, y el manejo detallado del cultivo especificado. La información genética de los cultivos se define en un archivo de las especies de cultivos que es proporcionada por DSSAT.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> 3
Necesidad de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> Sí.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Permite a los usuarios comparar los resultados simulados con los resultados observados, con base en la evaluación de los resultados que obtiene el modelo y los datos experimentales de los cultivos. Esto es fundamental antes de cualquier aplicación de un modelo de cultivo, sobre todo si las decisiones o recomendaciones “del mundo real” se basan en los resultados del modelo. Mediante la simulación de los resultados probables de las estrategias de manejo de cultivos, DSSAT ofrece información a los usuarios, a fin de evaluar rápidamente nuevos cultivos, productos y prácticas para la adopción.
Información de referencia	



Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoogenboom, G; Jones, JW; Wilkens, PW; Porter, CH; Boote, KJ; Hunt, LA; Singh, U; Lizaso, JL; White, JW; Uryasev, O; Royce, FS; Ogoshi, R; Gijsman, AJ; Tsuji, GY; Koo, J. 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5.X.X (Replace X.X with sub-version numbers in your output files) [CD-ROM]. Honolulu, Hawaii, US, University of Hawaii. ▪ Jones, JW; Hoogenboom, G; Porter, CH; Boote, KJ; Batchelor, WD; Hunt, LA; Wilkens, PW; Singh, U; Gijsman, AJ; Ritchie, JT. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy 18(2003):235-265. ▪ Thorp, K; DeJonge, K; Kaleita, A; Batchelor, W; Paz, J. 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. Computers and Electronics in Agriculture 64(2008):276-285. Disponible en http://www.journals.elsevier.com/computers-and-electronics-in-agriculture.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://dssat.net/ (sitio oficial). ▪ http://dssat.net/downloads/dssat-v46 (acceso a v.4.65). ▪ Tutorial en línea: http://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/macrogdn/curso-dssat/manuais/dssat-3.5/vol3.pdf (tutorial vol. 3).
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://dssat.net/mailling-list ▪ Gerrit Hoogenboom, Washington State University; e-mail: gerrit.hoogenboom@wsu.edu

Ficha 4 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ORYZA 2000 (proviene de <i>Oryza sativa</i>, nombre científico del arroz). ▪ Sigla: ORYZA 2000.
Descripción general	<p>Se trata de una actualización e integración de modelos preexistentes usados para estudiar el crecimiento del arroz. Desde 2009 se le ha venido modificando para convertirlo, de un modelo de cultivo a uno enfocado en estudiar el estrés abiótico en el arroz, es decir, la alteración en el metabolismo celular, inducido por factores abióticos (agua, luz, contaminantes, temperatura, entre otros), con efecto sobre la fisiología y desarrollo de las plantas. En la versión actual, integra los modelos ORYZA1, para estudiar la producción potencial, ORYZA-W, que brinda el componente de producción bajo condiciones limitadas de agua, y ORYZA-N para estudiar la producción limitada de nitrógeno. Combina varios módulos que incluyen temas como el crecimiento del cultivo sobre el suelo, la evapotranspiración, la dinámica del nitrógeno, balance del agua del suelo, y otros.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3.0 (actualizada a septiembre de 2014).
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Centro Internacional para la Investigación en Arroz (IRRI).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Arroz.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profesionales en agronomía. Requiere un conocimiento avanzado de los procesos de crecimiento de las plantas.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costo y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuita. Se obtiene en línea.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Computadora con sistema Windows, conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datos climáticos diarios (irradiación o sol / hora, temperatura mínima y máxima, presión de vapor (temprano en la mañana), velocidad media del viento y precipitación), las propiedades del suelo y manejo del cultivo.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2



Necesidad de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Personas con la formación básica requerida (agrónomos con experiencia en cultivo de arroz) pueden recurrir a los tutoriales, pero la organización que desarrolló el modelo, brinda talleres de capacitación para usuarios.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estimación del rendimiento de los cultivos y la optimización de la gestión de cultivos; estudio del impacto del cambio climático y la producción de arroz para explorar las opciones de manejo adaptativo (fertilizantes, el tipo del cultivar, la estrategia de riego, fecha de siembra, etc.) en sitios específicos, pero puede ser usado a escala regional mediante sistemas de información geográfica (SIG).
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amiri Larijani, B; Sarvestani, ZT; Nematzadeh; GH; Manschadt, AM; Amiri, E. 2011. Simulating phenology, growth and yield of transplanted rice at different seedling ages in Northern Iran using ORYZA2000. Rice Science 18(4):321-334. ▪ Arora, VK. 2006. Application of a rice growth and water balance model in an irrigated semi-arid subtropical environment. Agricultural Water Management 83:51-57. ▪ Artacho, P; Meza, F; Alcalde, JA. 2011. Evaluation of the Oryza2000 rice growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated Mediterranean environment. Chilean Journal of Agricultural Research 71(1):23-33. ▪ Bouman, BAM; Kropff, MJ; Tuong, TP; Wopereis, MCS; Ten Berge, HFM; Van Laar, HH. 2001. ORYZA2000: modeling lowland rice. Los Baños, PH, International Rice Research Institute; Wageningen, NL, Wageningen University. 235 p. ▪ Bouman, BAM; Van Laar, HH. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. Agricultural Systems 87:249-273. ▪ IRRI (International Rice Research Institute). 2015. ORIZA: scientific documentation (en línea). Los Baños, PH. Disponible en https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/scientific-documentation.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/home ▪ https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/downloads/new-release (ofrece la descarga del programa, tutoriales, documentación científica, y otras fuentes de información relacionadas con el programa). ▪ https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/tutorials
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. B.A.M. Bouman, Crop, Soil and Water Sciences Division, International Rice Research Institute (IRRI), DAPO Box 7777, Metro Manila, Philippines; e-mail: b.bouman@cgiar.org

Ficha 5 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ World Food Studies-7. Estudios sobre la alimentación en el mundo. ▪ Sigla: WOFOST.
Descripción general	<p>Se originó en el marco de estudios interdisciplinarios sobre seguridad alimentaria mundial y producción agrícola potencial mundial, del Centro Mundial de Estudios sobre Alimentos. WOFOST simula el crecimiento diario de un cultivo específico, teniendo en cuenta el tiempo seleccionado y datos sobre el suelo. Cada simulación se lleva a cabo para condiciones del entorno específicas, que comprenden el calendario de cultivos, el agua del suelo y el estado de los nutrientes. WOFOST mantiene una distinción jerárquica entre la producción potencial, la interceptación de luz y de asimilación de CO₂, como procesos que impulsan el crecimiento y el desarrollo fenológico de los cultivos. WOFOST se puede utilizar para estimar la producción agrícola, indicar la variabilidad del rendimiento, evaluar los efectos de los cambios climáticos o cambios en la fertilidad del suelo, y determinar los factores limitantes biofísicos.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2.1.2 (2014).
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Centro Mundial de Estudios sobre Alimentos y Universidad de Wageningen.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los siguientes modelos de cultivos están disponibles en WOFOST: trigo, maíz en grano, cebada, arroz, remolacha azucarera, patatas, habas, soja, oleaginosas.
Características de usuario	



Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agrónomos capacitados, personas conocedoras de la fenología del cultivo de interés, y del entorno de producción.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No. Se puede acceder al sitio del modelo y descargarlo gratuitamente para su uso.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lluvia, temperatura, velocidad del viento, radiación global, la humedad del aire, contenido de humedad del suelo en los distintos niveles de aspiración, y los datos sobre el flujo de agua, saturados e insaturados. Los datos sobre el terreno específico del sitio y la gestión de los cultivos.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sin entrenamiento formal requerido, pero se necesita un conocimiento avanzado de crecimiento de la planta y los procesos del suelo.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El rendimiento del cultivo y la variabilidad de los diferentes escenarios de cambio climático. WOFOST es unidimensional, mecanicista y específico del sitio. Su aplicación a las regiones se basa en la selección de puntos representativos, seguido por la agregación espacial o la interpolación (por ejemplo, ligado a un SIG). Solo considera los factores ecológicos bajo el supuesto de que se apliquen las prácticas óptimas de manejo. Se ha utilizado para estudiar el impacto del cambio climático en el rendimiento potencial de los cultivos y el uso del agua en la cuenca del Rhin, Alemania. WOFOST también se ha incorporado en el Sistema de Monitoreo de Crecimiento Europeo de Cultivos (CGMS) del proyecto MARS (Supervisión de la Agricultura con Teledetección).
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Boogaard, HL; Van Diepen CA; Rötter, RP; Cabrera JMCA; Van Laar, HH. 2011. WOFOST Control Centre 1.8 and WOFOST 7.1.3 User Manual. Wageningen, NL, Alterra, Wageningen University and Research Centre. ▪ Bouman, BAM; van Keulen, H; van Laar, HH; Rabbing, R. 1996. The "School of de Wit" crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. <i>Agricultural Systems</i> 52(2-3):171-198. ▪ Hijmans RJ; Guiking-Lens, IM; van Diepen, CA. 1994. WOFOST 6.0: Guía del usuario para el WOFOST 6.0 Crop Growth modelo de simulación. Wageningen, NL, DLO Winand Staring Centre. Documento Técnico 12. ISSN 0928-0.944.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-and-models/WOFOST.htm
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Department of Land Evaluation Methods, The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Marijkeweg 11/22 P.O. Box 125, 6700 AC Wageningen, The Netherlands; tel.: +31.317.474230; e-mail: diepen@sc.dlo.nl



Ficha 6 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Environmental Policy Integrated Climate Model / Modelo Climático de Integración de Políticas Ambientales. ▪ Sigla: EPIC.
Descripción general	<p>Es un modelo para sistemas de cultivo que fue desarrollado con el propósito de estimar la productividad del suelo bajo condiciones de erosión, en la década de 1980. Este modelo pretende ser un aporte para mejorar la tecnología de evaluación del impacto de la erosión sobre la productividad. EPIC simula 80 cultivos, basándose en un modelo de crecimiento de las plantas, de acuerdo con parámetros cuyos valores se ajustan para cada cultivo. Predice los efectos de las decisiones de manejo de la unidad productiva, incluyendo los componentes de suelos, agua, nutrientes; y el impacto combinado sobre la pérdida de suelos, la calidad del agua, los rendimientos de cada cultivo, para áreas con suelos y modalidades de gestión homogéneas. Funciona en pasos o etapas a escala diaria, y puede simular períodos de cientos de años. Actualmente se le han adicionado algoritmos o funciones para simular aspectos como la calidad del agua, el proceso de los ciclos del nitrógeno y el carbono, el cambio climático y los efectos de dióxido de carbono suspendido en la atmósfera. El proceso que simula incorpora la intercepción de la radiación solar por las hojas de las plantas, la conversión de la biomasa; rendimientos de los cosechas, el crecimiento de las raíces, uso del agua y absorción de nutrientes. El modelo puede evaluar el costo de la erosión para determinar estrategias óptimas de gestión.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0810
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blackland, Centro de Investigación y Extensión (Research and Extension Center), USDA-ARS.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Más de 80 cultivos.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profesionales, estudiantes, personas con formación o vinculadas al sector agrícola y ambiental.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuito.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de suelo, climatología, parámetros de cultivos, entre otros.
Nivel de complejidad de uso para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se ofrecen talleres diseñados a la medida de los grupos interesados en aplicar este u otros modelos de la familia de APEX. No es necesario un entrenamiento formal, pero sí debe seguirse el tutorial, en el caso de usuarios con algún conocimiento en el uso de modelos de simulación.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permite desarrollar análisis sobre comparaciones de la erosión entre distintos tipos de suelos, estimación de la pérdida por erosión y sus impactos en la productividad de los cultivos; efectos de tratamientos al suelo con distintos nutrientes, pérdida de nitrógeno y fósforo en el suelo, valores de escorrentía; pérdidas en suelos por erosión eólica, impacto del cambio climático y de las sequías sobre los rendimientos y la erosión del suelo; estrategias de manejo de la unidad productiva para inducir sumideros de carbono; impacto de estrategias de irrigación y su periodicidad; relación entre rotaciones de cultivos y pérdidas de nutrientes y sedimentos.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí.



Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> Abrahamson, DA; Causarano, HJ; Williams, JR; Norfleet, ML; Franzluebbers, AJ. 2009. Predicting soil organic carbon sequestration in the southeastern United States with EPIC and the soil conditioning index. <i>Journal of Soil and Water Conservation</i> 64(2):134-144. doi:10.2489/jswc.64.2.134. Abrahamson, DA; Norfleet, ML; Causarano, HJ; Williams, JR; Shaw, JN; Franzluebbers, AJ. 2007. Effectiveness of the soil conditioning index as a carbon management tool in the southeastern USA based on comparison with EPIC. <i>Journal of Soil and Water Conservation</i> 62(2):94-102.
Web para el acceso a la herramienta y para consulta	<ul style="list-style-type: none"> http://epicapex.tamu.edu/model-executables/ (para descargas del programa). http://epicapex.tamu.edu/files/2014/10/EPIC.0810-User-Manual.pdf (para descarga del manual de usuario).
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> epicapex@brc.tamus.edu

Ficha 7 Información general

Nombre	<ul style="list-style-type: none"> Tradeoffs Analysis Model for Multi-Dimensional Impact Assessment / Modelo de Análisis de Intercambio para Evaluaciones Multidimensionales de Impacto. Sigla: TOA-MD.
Descripción general	El TOA-MD es un modelo de simulación que se basa en caracterizar y realizar descripciones estadísticas en una población de fincas para simular la adopción y los impactos de una nueva tecnología o los impactos de un cambio en las condiciones ambientales (por ejemplo, cambio de clima). El TOA-MD utiliza datos económicos de las fincas (datos detallados de insumos y productos) así como datos de otros modelos (como por ejemplo, modelos de simulación de cultivos), para simular lo que se observaría, si fuera posible desarrollar un experimento sobre los efectos de adopción de políticas o tecnología. El TOA-MD está diseñado de manera genérica para poder ser usado en cualquier lugar del mundo, ya sea con datos primarios o secundarios, y se puede aplicar a casos de estudio para analizar la adopción e impactos de políticas y tecnologías, para estimar la oferta de servicios eco-sistémicos (pagos por servicios ambientales), y los impactos de cambios ambientales y adaptación.
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> TOA-MD 5.0.2 y la versión beta del TOA-MD 6.0
Institución/organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> John M. Antle, Roberto O. Valdivia, Oregon State University.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Se pueden caracterizar la mayoría de las actividades productivas de la finca y del hogar: cultivos, ganadería, acuicultura, ingresos externos a la finca, etc.
Detalle de características del usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Se recomienda que el usuario sea un economista con un buen nivel de conceptos en estadística avanzada y econometría, al menos de nivel de maestría o posgrado.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> Gratuito. Se descarga de la página web. Al registrarse el usuario, se le remite a una versión de prueba, con todas las capacidades del programa original. La versión de prueba expira en 60 días. El usuario deberá completar el Módulo de Entrenamiento Básico (incluido en el envío) y remitir los ejercicios al equipo del TOA-MD. Una vez revisados los ejercicios, el usuario recibirá la versión definitiva, acompañada de los módulos de aprendizaje avanzado, de cambio de clima y el de pagos por servicios ambientales.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.
Características mínimas de equipo (tecnología)	<ul style="list-style-type: none"> El modelo funciona con MS Excel (de preferencia la versión en inglés).
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Datos económicos que caractericen el sistema productivo de las fincas.
Nivel de complejidad de uso (de usuarios no expertos en modelos a usuarios expertos)	<ul style="list-style-type: none"> 2. El desarrollador comenta que el modelo no es difícil de usar, pero para usarlo y entenderlo se requiere que el usuario tenga conocimientos en economía y estadística. El modelo es amigable (MS Excel) con menús que ayudan a correrlo y a realizar otras acciones de manera más fácil.



Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> El TOA-MD tiene unos módulos de aprendizaje diseñados para que el usuario pueda aprenderlo por sí solo. El equipo de TOA-MD puede ayudar a resolver consultas. Sin embargo, el equipo TOA-MD desarrolla un curso anual donde los participantes empiezan con el módulo de aprendizaje básico y avanzado a distancia. Se realizan seminarios por internet y los usuarios completan los ejercicios de estos módulos (aproximadamente 2 meses). En el tercer mes los usuarios preparan el modelo con sus propios datos y asisten a un taller de entrenamiento presencial (en lugares por definir; en el 2014 fue en Addis Abeba, Etiopía, y el anterior, en Oregón, Estados Unidos). En este último taller los usuarios completan su aplicación.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Evaluaciones de impacto sobre la adopción de políticas y tecnologías, pagos por servicios ambientales, impacto de cambios ambientales, como el cambio climático. El modelo puede predecir los impactos en pobreza, ingresos per cápita, ingreso familiar (por defecto) y si se tienen los datos apropiados, se pueden obtener los impactos de virtualmente cualquier indicador, por ejemplo, ambiental (erosión de suelos, cambio en nutrientes en el suelo, gas metano, etc.); social (nutrición, género, etc.)
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> Antle, JM. 2011. Parsimonious Multi-Dimensional Impact Assessment. American Journal of Agricultural Economics 93(5):1292-1311. Antle, JM; Stoorvogel, JJ; Valdivia, RO. 2014. New parsimonious simulation methods and tools to assess future food and environmental security of farm populations. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological sciences 369(1639):20120280. Antle, JM; Valdivia, RO. 2006. Modelling the supply of ecosystem services from agriculture: a minimum-data approach. Australian Journal of Agricultural Research Economics 50(1):1-15.
Web para el acceso a la herramienta y para consulta	<ul style="list-style-type: none"> http://tradeoffs.oregonstate.edu
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> John Antle; e-mail: john.antle@oregonstate.edu Roberto Valdivia; e-mail: Roberto.Valdivia@oregonstate.edu

Ficha 8 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> AgrometShell – Programa para el pronóstico de rendimientos de cultivos. Sigla: AMS.
Descripción general	AgroMetShell es una herramienta integrada de varios paquetes informáticos, diseñada para facilitar el trabajo de los servicios o unidades de agrometeorología y de seguridad alimentaria, investigaciones en agronomía, entre otros. Su aporte consiste en evaluar el impacto de las condiciones climáticas sobre los cultivos, analizar riesgos asociados al clima y hacer pronósticos regionales para cultivos empleando análisis estadísticos y modelización de cultivos. Esta herramienta incorpora el análisis integrado de datos de campo con información satelital de baja resolución, bajo una interfaz común.
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 1.57
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Cualquier cultivo. Sirve como insumo para desarrollar servicios de previsión de impactos ante amenazas relacionadas con la variabilidad climática.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Agrometeorólogos, investigadores agrícolas, agrónomos.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> El software y los documentos relacionados son gratuitos.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Windows 98 en adelante.



Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Series de datos climáticos, fenología de cultivos, tipos de suelos.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> 3
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> Requiere entrenamiento. Es relativamente fácil de usar para expertos calificados con una formación apropiada.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Se aplica a la evaluación de los impactos actuales y futuros del clima en los cultivos, permitiendo estudiar y elegir opciones de manejo de las unidades de producción según el caso. Ayuda a analizar las relaciones entre el balance de agua específico según el tipo de suelo, indicadores agrometeorológicos y agronómicos para evaluar las condiciones de los cultivos, por ejemplo, el consumo de agua según el cultivo, evapotranspiración potencial, probabilidades de lluvia, características de la estación de crecimiento del cultivo.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> Sí. Entre los documentos que incluye AgrometShell (AMS) están: la guía del usuario, varios tutoriales (según la región) y archivos de datos de estaciones meteorológicas, entre otros.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2004. AGROMET-SHELL Manual (en línea). Roma, IT. Disponible en http://www.fao.org/nr/climpag/aw_6_en.asp. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT); EC-FAO Food Security Programme<Information for Action>; SADC Food Security Program, ZW; Research Institute for Industrial Crops, IT; University of Liege, BE; Hoefsloot Software s.f. AgrometShell (AMS): Software for crop yield forecasting initiated by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (en línea). Versión 1.57. Disponible en http://www.hoefsloot.com/agrometshell.htm.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.fao.org/nr/climpag/aw_6_en.asp http://www.hoefsloot.com/agrometshell.htm http://unfccc.int/adaptation/knowledge_resources/databases/items/5308txt.php
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Michele Bernardi. Environment, Climate Change and Bioenergy Division (NRC), FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy; e-mail: michele.bernardi@fao.org

Ficha 9 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Modelo de crecimiento del pasto. Sigla: LINGRA-N.
Descripción general	<ul style="list-style-type: none"> LINGRA-N simula el crecimiento de un cultivo de pasto como una función de la radiación interceptada, temperatura y uso eficiente de la luz. LINGRA-N es un modelo relativamente simple de crecimiento del pasto, que puede calcular dicho crecimiento y sus rendimientos bajo condiciones dadas de disponibilidad de agua, ya sean óptimas o de secano y condiciones limitadas de disponibilidad de nitrógeno. LINGRA-N es un modelo genérico de simulación que corre en el software FORTRAN10. Puede ser usado para estudiar el crecimiento de diferentes tipos de pasto bajo un amplio rango de condiciones de suelo y clima y con distintas condiciones de cosecha. El modelo está basado en LINGRA. fst pero puede ser más fácilmente aplicado en la escala regional (para distintas combinaciones de suelo, pasto, clima y manejo). La resolución espacial es de una hectárea.
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 1 (2012).
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> Universidad de Wageningen.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Pasturas, tierras de praderas.

10. Es un lenguaje de programación de alto nivel, de propósito general, procedimental e imperativo, que está especialmente adaptado al cálculo numérico y a la computación científica.

Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Investigadores del área de la ganadería y las pasturas, estudiosos del paisaje de praderas.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> El software y los documentos relacionados son gratuitos.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Windows 98 en adelante, con editor de textos que permita modificar los archivos originales de datos de suelos, cultivo, clima y manejo. La corrida de la simulación se hace iniciando el archivo LINGRAN.exe.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Suelo, cultivo, clima, manejo.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> Sí.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Producción o crecimiento del pasto, evaporación de agua del suelo, transpiración del cultivo, percolación hacia capas de suelo más profundas; nitrógeno (disponibilidad y consumo del cultivo); efecto del estrés hídrico y estrés por nitrógeno en la producción del pasto. Se puede usar en el desarrollo de estudios de uso de la tierra a escala regional, con base en simulación de condiciones de suelo, tipo de pasto, clima y manejo, y la combinación de estas.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> No disponibles.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.pps.wur.nl/UK/ Guía del usuario: http://models.pps.wur.nl/content/lingra-n-grassland-model-potential-water-limited-and-n-limited-conditions-fortran
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Joost Wolf; e-mail: joost.wolf@wur.nl

Ficha 10 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Cropping Systems Simulation Model / Modelo de Simulación de Sistemas de Cultivos. Sigla: CropSyst.
Descripción general	<p>Es un sistema de modelo de simulación multianual, multi-cultivo, de tiempo diario, desarrollado como herramienta de análisis para estudiar el efecto del clima, los suelos y el manejo en la productividad de los sistemas de cultivos y el ambiente. Simula la humedad disponible en el suelo, así como la disponibilidad de nitrógeno, el crecimiento y desarrollo fenológico del cultivo, los rendimientos, residuos de producción y descomposición, erosión hídrica en el suelo, salinidad y trayectoria de los pesticidas. Estos componentes son afectados por el agua, las características del suelo y de los cultivos, opciones de manejo tales como la rotación y selección de cultivos, la irrigación, la fertilización con nitrógeno, el uso de pesticidas, salinidad, manejo de residuos, manejo de la labranza. El desarrollo de esta herramienta empezó en la década de 1990, evolucionando hacia un conjunto integrado de programas que incluían un sistema de simulación de cultivos, (CropSyst), un generador climático (ClimGen), el GIS CropSyst, que es un software auxiliar (ArcCS), un modelo de cuenca (CropSyst watershed), y varios programas misceláneos de utilidades informáticas. Una cualidad de este sistema es la implementación de un simulador genérico de cultivos que permite la simulación anual y multianual mediante un set de parámetros. Las simulaciones pueden elaborarse para un período menor a un año, tanto como para cientos de años. De ahí su utilidad para modelar condiciones de cambios en el clima y no solo de variabilidad climática. Este modelo se ha evaluado en muchas localidades del mundo, comparando estimados del modelaje con datos colectados en experimentos de campo.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 3.04.08 (2005).



Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Washington State University.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Múltiples cultivos.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profesionales y técnicos vinculados a la investigación y el monitoreo de cultivos; centros de investigación, empresas productoras del sector agrícola.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuito.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema operativo: Windows XP o superior, procesador dual core o similar, 256 GB en disco duro, 2 GB en RAM. Los paquetes de instalación consisten en programas de gran tamaño. Por esa razón, se proporciona la opción de una instalación desde la web que permite descargar los archivos individualmente para componentes seleccionados y no solo descargando el paquete completo (el modelo fue programado en C++).
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valores meteorológicos, edáficos, agronómicos y del cultivo (fenológicos).
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Es un programa de interfaz amigable, pero integra varios programas. La preparación en un entrenamiento guiado se recomienda.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El sistema puede simular los siguientes procesos: <ul style="list-style-type: none"> ○ Valores de humedad disponible en el suelo, incluyendo: cantidad de agua que ingresa al sistema, intercepción del dosel y los residuos, escorrentía; infiltración, redistribución, evaporación desde el suelo y los residuos; transpiración, percolación profunda. ○ Valores de nitrógeno en el sistema: transformación de nitratos y amonio; mineralización neta de materia orgánica y residuos de desechos de gramíneas, y estiércol fresco, nitrificación y desnitrificación; transporte de nitrógeno, lixiviación y captación. ○ Crecimiento del cultivo: calculado con base en la disponibilidad de radiación, y suministro de nitrógeno; se expresa en términos de acumulación de biomasa radicular superficial, área foliar de la planta, densidad y profundidad de las raíces. ○ El desarrollo fenológico del cultivo se calcula como una función del tiempo fisiológico basado en la acumulación térmica en el tiempo corregida por vernalización y efectos fotoperiódicos. ▪ Se ha utilizado para analizar escenarios de riesgo y escenarios económicos, para distintos sistemas de cultivos, opciones de manejo y condiciones climáticas y de suelos.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bechini, L; Bocchi, S; Maggiore, T; Confalonieri, R. 2005. Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.). <i>Environmental Modelling & Software</i> 21(7):1042-1054. Ferrer, F; Villar, J; Stöckle, C. Evaluación del modelo de simulación cropsyst para maíz de regadío en el Valle del Ebro. <i>Investigación agraria: producción y protección vegetales</i> 15(3):237-251. ▪ Milera, S; Crotti, C. s. f. Implementación del modelo Cropsyst para la simulación del rendimiento del cultivo del maíz en una región de Argentina (en línea). Santa Fe, AR, Centro de Investigación, Observación y Monitoreo Ambiental. Disponible en http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/milera2.pdf. ▪ Stöckle, CO; Donatelli, M; Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. <i>European Journal of Agronomy</i> 18(3-4):289-307. <i>Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications</i>.
Web para el acceso a la herramienta	<p>http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/index.html (sitio oficial).</p> <p>http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/manual/index.htm (manual del usuario).</p>



Información de contacto	Claudio O. Stöckle, Ph.D. E-mail: Stockle@wsu.edu; tel.: (509) 335-1578; fax: (509) 335-2722. LJSmith 255, Biological Systems Engineering. Washington State University. Pullman, WA 99164-6120.
-------------------------	---

Ficha 11 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Crop Environment Resource Synthesis (Recurso para el análisis del ambiente productivo) ▪ Sigla: CERES - MAIZE.
Descripción general	<p>El modelo CERES - Maize (Jones et al. 1986; Ritchie et al. 1989) simula los incrementos diarios de crecimiento, desarrollo y producción del cultivo del maíz. Puede utilizarse para la toma de decisiones en el manejo de los cultivos y en el análisis de riesgo. Para simular el crecimiento, el desarrollo y la producción del maíz, el modelo considera los siguientes procesos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ El desarrollo fenológico, especialmente la forma en que es afectado por las características genéticas y los factores climáticos. ○ La extensión del crecimiento de hojas, tallos y raíces. ○ La acumulación de biomasa, especialmente la manera en que el desarrollo fenológico afecta el desarrollo de los órganos vegetativos y reproductivos. ○ El balance del agua del suelo y el uso del agua por el cultivo. ○ Las transformaciones del nitrógeno del suelo y su incorporación por las diferentes partes de la planta. ○ El modelo está diseñado para simular los efectos del clima y los cambios en el manejo del cultivo.
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CERES-Maize Version 3.5 (corre en DSSAT); CSM-CERES-Maize version 4.5
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Universidad de Florida (grupo multidisciplinario de investigación dirigido por Godwin y Jones, 1991).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maíz.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Centros de investigación, profesionales del área agronómica vinculados al subsector de producción de maíz.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuito, en la versión que corre en DSSAT, accesible en línea.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema operativo: Windows XP o superior, procesador dual core o similar, 256 GB en disco duro, 2 GB en RAM.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bases de datos de clima, de suelo, de manejo de cultivo y de las variedades empleadas de maíz.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El modelo caracteriza a las diferentes variedades de maíz, mediante cinco coeficientes genéticos (P1, P2, P5, G2, G5), dos de ellos se pueden calcular a partir de los parámetros climáticos y los tres restantes se ajustan por medio de pruebas de ensayo y error, hasta obtener la fenología y rendimientos esperados para cada variedad. La comparación entre la producción simulada y la real permite calibrar el modelo antes de introducir las condiciones de cambio climático. O bien, es posible realizar estudios de sensibilidad, proponiendo incrementos en temperatura y precipitación que permitan analizar la capacidad de respuesta del cultivo a dichos cambios. El modelo también permite sugerir medidas de adaptación, al variar las condiciones del manejo de cultivo o proponiendo un cambio en la variedad de la semilla empleada.



Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amaral, TA; Teixeira, CL; Borges, ME; Freitas, D. Applying CSM-CERES-Maize to define a sowing window for irrigated maize crop – The Riacho’s Farm case study (en línea). 2011. Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science 6(2):38-53. Disponible en http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.184; http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/40917/1/Applying-CSM.pdf ▪ Manlla, A; Salvagiotti, F. Validación del modelo Hybrid maize en condiciones óptimas de crecimiento (en línea). EEA Oliveros INTA. Trabajo presentado en el IX Congreso Nacional de Maíz, Simposio Nacional Sorgo 2010 ▪ Rivera Peña, M; Amézquita Collazos, E. 2003. Evaluación del modelo de simulación CERES-maize aplicado a una variedad de maíz en oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia (en línea). Revista Acta Agronómica 52 (1-4):39-44. Disponible en https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/44322/48486-237085-1-SM.pdf?sequence=1.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnabu271.pdf (guía del usuario). ▪ http://agromet-cost.bo.ibimet.cnr.it/fileadmin/cost718/repository/CERES.pdf
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ J.W. Jones; e-mail: jjones@agen.ufl.edu

2.2. Modelos para el estudio en los ámbitos de región y cuenca hidrográfica

Ficha 12 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Famine Early Warning System / Sistema Mesoamericano de Alerta por Crisis Alimentaria. ▪ Sigla: MFEWS/FEWS NET.
Descripción general	<p>Permite la consulta en línea y a través de su lista de distribución para determinar el grado de inseguridad alimentaria de distintas áreas en la región, debido a diferentes siniestros como pérdida de cultivos, impactos de eventos extremos, alzas de precios, etc. Aplica la metodología de desarrollo de escenarios, para diagnosticar el escenario más probable en los siguientes seis meses. Depende de un análisis de la situación actual, el desarrollo de supuestos fundamentados acerca del futuro, una comparación de sus posibles efectos y las respuestas probables de diversos actores. En esencia, el desarrollo de escenarios es una afirmación matemática del tipo “si A ..., entonces B ...”, con base en datos que son analizados para tal fin. Esta técnica se actualiza trimestralmente, para estimar los resultados de la seguridad alimentaria en los seis meses siguientes, mediante la aplicación de 9 pasos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1: fijar los parámetros del escenario (lugar, tipo, duración, contexto de medios de vida) 2: describir y clasificar la seguridad alimentaria actual 3: desarrollar supuestos claves 4: describir los impactos sobre las fuentes de ingresos de los hogares 5: describir los impactos sobre las fuentes de alimentos de los hogares 6: desarrollar supuestos para las respuestas 7: describir y clasificar la seguridad alimentaria de los hogares 8: describir y clasificar la seguridad alimentaria proyectada para el área 9: identificar eventos que pudieran cambiar el escenario. <p>Por medio de ellos se evalúa la situación de seguridad actual en las áreas críticas, se plantean supuestos acerca del futuro y se consideran cómo esos supuestos podrían afectar la alimentación y los ingresos de las familias pobres. Con base en la convergencia de evidencias, mediante la aplicación de esos pasos se determina el escenario más probable y se clasifica el nivel esperado de inseguridad alimentaria. Por último, se identifican eventos o cambios importantes que podrían afectar el resultado. Los informes trimestrales de FEWS NET sobre la Perspectiva de la Seguridad Alimentaria se publican en enero, abril, julio y octubre de cada año. La metodología de desarrollo de escenarios reduce el exceso de dependencia del juicio pericial o de proyecciones excesivamente simples de lo que pudiera suceder. Funciona especialmente bien cuando se estiman los resultados de la seguridad alimentaria, debido a la regularidad con la que se recolectan datos.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El sistema en línea se actualiza cada cuatro semanas.

Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> FEWS NET.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Granos básicos de importancia para la SAN en Mesoamérica (especialmente, maíz y frijol).
Detalle de características del usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Funcionarios, técnicos, productores, comercializadores, ONG de cooperación para el desarrollo y cualquier persona interesada en la relación entre SAN, clima y agricultura de granos básicos.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> Gratuito. Se accede en línea, se puede suscribir a la página o inscribirse en la lista de distribución de la oficina regional. Además se puede obtener información instantánea por medio de Facebook y Twitter.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Español, inglés.
Características mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Conexión a internet, computadora.
Datos indispensables que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Ninguno. Por ser una herramienta de consulta, el usuario no la hace correr. Los modeladores agregan datos de sus propias fuentes. Actualmente, cubre cuatro países de Mesoamérica (Guatemala, Honduras, Nicaragua y El Salvador) y uno del Caribe (Haití), pero solo puede consultarse la información de los cultivos que son estudiados por el programa FEWS y en las regiones donde opera.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> 1
Diseño amigable para el usuario	<ul style="list-style-type: none"> Sí.
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> No. El sistema explica el detalle de la información sobre SAN que despliega en mapas con niveles de amenaza asociada a la seguridad alimentaria. Funciona como un sistema de consulta en línea, no requiere del usuario el procesamiento de datos.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Información acerca de la SAN en la región de Centroamérica y en Haití, a partir de información sobre agroclimatología, mercados y comercio y medios de vida.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> Sí (no como manual del sistema FEWS, pero sí sobre algunos de sus métodos, además de que se explican en línea los enfoques que desarrolla y los sectores sobre los que trabaja).
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> No disponibles.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.fews.net/central-america-and-caribbean
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Representación regional; e-mail: fews.lac@fews.net

Ficha 13 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Spatial Tools for River Basins and Environment Analysis of Management Options / Herramientas espaciales para el análisis ambiental de opciones de gestión en cuencas hidrográficas. Sigla: STREAM.
Descripción general	<p>STREAM es un modelo hidrológico espacial que permite la evaluación de los impactos hidrológicos del cambio climático y algunos determinantes socioeconómicos. Se basa en un marco de análisis de políticas aplicado a una cuenca hidrográfica. Utiliza datos hidrológicos, escenarios y estrategias de adaptación y proporciona datos de salida en relación con la disponibilidad y calidad del agua. Incorpora varios tipos de interacciones entre los efectos de la gestión de los ríos en la zona costera, la tierra y los usos del agua, como la deforestación a corto plazo y la construcción de presas, y los efectos a largo plazo del cambio climático. STREAM es un modelo espacial y utiliza datos de mapas SIG digitales y las observaciones por satélite, incluyendo el uso de la tierra. La base del instrumento es una rejilla para representar el balance hídrico. Puede simular el uso del agua, la distribución espacial de la agricultura, la urbanización y el almacenamiento de aguas subterráneas y superficiales.</p>



Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ STREAM Teaching version.
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instituto de Estudios Ambientales (IVM), Holanda.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No modela actividades agrícolas, sino comportamientos hidrológicos y los relaciona con contextos socioeconómicos, que están relacionados con actividades agrícolas, entre otras.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El modelo es fácil de usar para usuarios no técnicos. Sin embargo, se utiliza mejor en el marco de un equipo de expertos en hidrología y de responsables políticos. Es necesario tener algunos conocimientos de SIG.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuito. Se descarga del sitio del IVM.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temperatura, la precipitación, tipos de suelo, altitud. Y para la calibración y validación: datos de escorrentía.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2. El modelo es fácil de usar para usuarios no técnicos, pero es necesario tener algunos conocimientos en sistemas de información geográfica (SIG). Es deseable tener conocimientos en hidrología, pero no indispensable.
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si el usuario tiene experiencia en SIG, el tutorial puede ser suficiente. De no ser así, debe tomar un curso introductorio.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Información hidrológica espacial sobre la disponibilidad de agua en el suelo en valores mensuales, y de las descargas fluviales. Su producto puede representarse en un hidrograma o un mapa en SIG. La principal ventaja de este modelo es que utiliza datos de dominio público accesibles en internet, lo que permite obtener un primer vistazo de los posibles impactos, pero también puede darse una segunda etapa alimentada con series de tiempo de datos registrados localmente, lo que aumenta su fiabilidad y permite la calibración y validación, con la participación de actores locales.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Un manual de instalación y tutorial se suministra con el modelo. Se recomienda que los usuarios sigan un breve curso introductorio.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kiptala, JK; Mul, ML; Mohamed, YA; van der Zaag, P. 2014. Modelling stream flow and quantifying blue water using a modified STREAM model for a heterogeneous, highly utilized and data-scarce river basin in Africa (en línea). <i>Hydrology and Earth Systems Sciences</i> 18, 2287-2303. Disponible en http://dx.doi.org/10.5194/hess-18-2287-2014. ▪ Maina, J; de Moel, H; Zinke, J; Madin, J; McClanahan, T; Vermaat, JE. 2013. Human deforestation outweighs future climate change impacts of sedimentation on coral reefs. (en línea) <i>Nature Communications</i> 4:1986. Disponible en http://dx.doi.org/10.1038/ncomms2986.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://www.ivm.vu.nl/en/projects/Projects/spatial-analysis/stream/Downloads/index.asp
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dr. Robbert Misdorp, Coastal Zone Management Centre/National Institute for Coastal and Marine Management (RIKZ), Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Kortenaerkade 1, P.O. Box 20907, 2500EX The Hague. The Netherlands; tel.: +31.70.3114311, fax: +31.70.3114300, e-mail: r.misdorp@chello.nl



Ficha 14
Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biophysical Models Applications / Aplicaciones de Modelos Biofísicos. ▪ AGRi4cast BioMA. ▪ Sigla: BioMA.
Descripción general	Herramienta para la modelización agrometeorológica y biofísica. Fue diseñada y desarrollada para analizar, parametrizar y ejecutar soluciones de modelación basadas en modelos biofísicos sobre una base de datos de unidades espaciales. Se basa en componentes independientes para la integración tanto de las soluciones de modelación como de la interfase gráfica para el usuario. Cada componente está provisto con documentación de los algoritmos y del código requerido y con un kit para el desarrollo del software. La estructura basada en componentes permite al modelo BioMA implementar distintas soluciones de modelaje, enfocadas en resultados concretos de tipo biofísico.
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ BioMA version 0.1 (marzo de 2009).
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Joint Research Centre (JRC)/Centro de Investigación Conjunta, Universidad de Milán, MARS Agri4cast Center.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Múltiples.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funcionarios, técnicos e investigadores ligados a la agrometeorología.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuito.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema operativo: Windows XP/Vista/7/8 (32 or 64 bit). ▪ 1 GB RAM mínimo (recomendado 2 GB).
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de monitoreo de crecimiento de cultivos, serie de datos climáticos, escenarios de cambio climático del IPCC, base de datos meteorológicos, perfiles de suelos agrícolas, base de datos de suelos, manejo agrícola y de cultivos.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Puede hacerse mediante capacitación guiada o de forma independiente, con la "guía del usuario" (manual).
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aporta soluciones basadas en el modelaje, en temas como cultivos, sistemas de cultivos, plagas de cultivos, índices climáticos y meteorológicos, otras soluciones de modelaje agregadas por el usuario.
Información de referencia	
Tutorial en línea	Sí. Disponible en http://bioma.jrc.ec.europa.eu/components/componentstools/bioma/BioMASpatialUserGuide.pdf
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pendiente de verificación.
Web para el acceso a la herramienta y para consulta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://bioma.jrc.ec.europa.eu/ ▪ https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/bioma-software-portal (The BioMA portal).
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maurits Van den Berg. Experto principal, JRC. E-mail: maurits.van-den-berg@jrc.ec.europa.eu



Ficha 15
Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agricultural Policy-Environmental Extender Model / Modelo de Políticas en Agricultura y Ambiente. ▪ Sigla: APEX.
Descripción general	Es un modelo de simulación basado en la escala de cuencas hidrográficas. Permite dar seguimiento a componentes como agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas a través de paisajes y sistemas de canales complejos, orientándolos hasta la salida o desagüe de la cuenca, al igual que para el agua subterránea y otras fuentes de reserva. Una cuenca puede ser subdividida tanto como sea necesario, para asegurar que cada subárea sea relativamente homogénea en términos de suelo, uso de la tierra, manejo de la unidad y tiempo atmosférico. Fue creado para evaluar estrategias de manejo de la tierra, considerando la sostenibilidad, erosión (en relación con el viento, la lámina de agua y el canal), economía, suministro y calidad de agua, calidad del suelo, competencia entre las plantas, tiempo atmosférico, y plagas. Tiene varias interfases: WinAPEX (modelo de gestión del riesgo de la producción en la unidad de finca), iAPEX, (permite hacer simulaciones de grandes juegos de datos con base en el modelo APEX), ArcAPEX (interfase gráfica para el usuario del modelo APEX).
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0806
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blackland, Research and Extension Center (Centro de Investigación y Extensión), USDA-ARS.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inespecífico (es integral, asociando ambiente y agricultura).
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Profesionales vinculados al análisis del paisaje, de cuencas y del área agrícola y ambiental.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gratuito. Se descarga de la web. Corre en ArcGIS.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Climáticos, hidrológicos, de crecimiento de cultivos, entre otros.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se ofrecen talleres diseñados a la medida de los grupos interesados en aplicar este u otros modelos de la familia de APEX. No es necesario un entrenamiento formal, pero sí debe seguirse el tutorial, en el caso de usuarios con algún conocimiento en el uso de modelos de simulación.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ APEX puede realizar simulaciones continuas a largo plazo para el modelado de los impactos de las diferentes prácticas de manejo de nutrientes, las operaciones de labranza, prácticas de conservación, sistemas de cultivos alternativos y otras prácticas de manejo de la escorrentía superficial y las pérdidas de sedimentos, nutrientes y otros indicadores de degradación en la cuenca, entre sus aplicaciones están las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> ○ Evaluar los efectos de clima y del dióxido de carbono por cambios globales, sobre los rendimientos de los cultivos. ○ Evaluar la aplicación de medidas alternativas de reducción de la degradación ambiental en la gestión agrícola dentro de la cuenca. ○ Analizar la producción de biomasa. ○ Demostrar los componentes del balance hidrológico y transporte de contaminantes para los diferentes sistemas de producción de cultivos y forestales. ○ Simular escenarios de pastoreo rotacional intensivo que representan el movimiento de ganado entre potreros.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí



Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> Gassman, PW; Williams, JR; Wang, X; Saleh, A; Osei, E; Hauck, LM; Izaurrealde, RC; Flowers, JD. The agricultural policy /environmental extender: (APEX) model. An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses (en línea). 2010. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers 53(3):711-740. Disponible en http://www.card.iastate.edu/environment/items/trans_asabe_review_paper.pdf.
Web para el acceso a la herramienta y para consulta	<ul style="list-style-type: none"> http://apex.tamu.edu/software/ http://apex.tamu.edu/documentation/ (para acceder al manual). http://epicapex.tamu.edu/workshop-request/ (para solicitar un taller diseñado a la medida).
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Dr. Cragi Nessler, Director; e-mails: CNessler@tamu.edu; eco.web@tamu.edu

Ficha 16 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Índice de Satisfacción del Requerimiento Hídrico. Sigla: GeoWRSI.
Descripción general	<p>El programa ejecuta un modelo de balance hídrico para un cultivo específico, seleccionado por el usuario en una región específica del mundo, utilizando datos de entrada en formato ráster (ver definición en el glosario). El programa produce una salida por categorías, la cual puede ser utilizada cualitativamente para ayudar a determinar y supervisar las condiciones de los cultivos durante los periodos de crecimiento, o para realizar regresiones con las producciones para obtener modelos de producción estimada o estimados de producción anteriores.</p> <p>Componentes del sistema:</p> <p>CLIMA – Datos de lluvia y evapotranspiración satelital y ajustada con datos de estaciones de campo (lluvia), análisis temporales de acumulados de lluvia pendatal y decadal.</p> <p>HIDROLOGÍA – Los datos del GeoWRSI pueden ser utilizados para balance hidrológicos de cuencas y datos de entada para análisis de inundaciones.</p> <p>CULTIVOS – Índice de Satisfacción del Requerimiento Hídrico (IBH), Anomalía del IBH respecto a la media, Anomalía del IBH respecto al Año Anterior, Inicio de Temporada de siembras, Anomalía en el Inicio de la Temporada, Fenología (porcentaje de LGP), Índice de agua en el suelo, Porcentaje del periodo de crecimiento, máximo del exceso de agua experimentado en cualquier decaída (serie de diez días) de estimación de cosechas de acuerdo con las proyecciones climáticas futuras y los escenarios del progreso tecnológico.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 3.0 (2014)
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> USGS/FEWSNET, con financiamiento de la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional (USAID).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Validado para maíz y frijol; sin embargo, ha mostrado buenos resultados para arroz en Panamá y se podría validar para otros cultivos.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Fue diseñado para funcionar a nivel nacional en diferentes instituciones principalmente para ministerios de agricultura y meteorología y para centros de investigación.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> Sin costo en cuanto a uso y mantenimiento.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés (con manual en español).
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Sistema operativo: <ul style="list-style-type: none"> Mínimo: Windows 2000 o superior. Recomendado: Windows XP o superior. Microsoft DotNet Framework 4.0 Service Pack 1.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Lluvia, evapotranspiración, suelos (profundidad efectiva), periodo de crecimiento y coeficiente de crecimiento del cultivo y fecha de siembra.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> 2



Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Debe gestionarse ante la Oficina Regional de FEWSNET, ubicada en Guatemala.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Técnicamente, el Índice de Satisfacción de Requerimiento Hídrico (IBH) es el cociente de la evapotranspiración actual de un cultivo (AETc) con el requisito de agua durante la estación, el cual es igual a la evapotranspiración potencial (PETc). Las estimaciones en la reducción de la producción basadas en WRSI o IBH contribuyen en la preparación y planeación de la seguridad alimentaria. El GeoWRSI como herramienta de monitoreo, al final de cada 10 días permite determinar el indicador de rendimiento de los cultivos durante el periodo de crecimiento. Como una herramienta de alerta temprana, el rendimiento de los cultivos puede ser estimado utilizando datos de promedios meteorológicos en periodos de largo plazo. Los datos de lluvia y evapotranspiración cuentan con descarga automática, interfaz basada en ventanas con salidas específicas y dinámicas.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CHG (Climate Hazards Group). s. f. GeoWRSI (en línea). Disponible en http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geowrsi/index.html.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geowrsi/index.html
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mario Rodríguez; e-mail: mrodriguez@fewsn.net ▪ Diego Pedreros; e-mail: pedreros@usgs.gov

Ficha 17 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Climate Hazards Infrared Precipitation and Stations / Detección de amenazas climáticas mediante el monitoreo de lluvia satelital. ▪ Sigla: CHIRPS.
Descripción general	<p>CHIRPS es una base de datos de lluvia en formato ráster o de grilla¹¹, basada en datos de infrarrojo, obtenidos por satélites, mezclados con una climatología desarrollada también por el Climate Hazards Group (CHG), y estaciones terrenas. Los datos tienen una resolución espacial de 5 km y una resolución temporal de 5 días. CHIRPS tiene una cobertura espacial de 180 a -180 grados de longitud y 50 a -50 de latitud. Estos datos son aplicables en áreas tales como: el análisis de disponibilidad hídrica, simulación y calibración de modelos hidrológicos e hidráulicos, análisis en el sector hidroeléctrico, análisis del patrón de la precipitación y su variabilidad a escala nacional y regional y análisis históricos de extremos. CHIRPS es ideal para análisis en la agricultura debido a su alta resolución tanto espacial como temporal, además de que cubre áreas donde en muchos casos no se tiene estaciones. Los datos de lluvia no necesitan ninguna transformación para ser usados. Estos pueden ser insertados a un sistema de información geográfica como una capa más.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1.8 (2014).
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ United States Geological Service/Red de Alerta Temprana por Inseguridad Alimentaria (USGS/FEWSNET), con financiamiento de la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional (USAID).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CHIRPS sirve como insumo en modelos de balance hídrico, así como para hacer análisis de sequías y relacionar históricamente las condiciones actuales de los cultivos.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El usuario debe tener conocimiento medio en el uso de las computadoras, conocimiento básico en sistemas de información geográfica. Fue diseñado para funcionar a nivel nacional o regional es ideal en diferentes instituciones principalmente para ministerios de agricultura y meteorología y para centros de investigación.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sin costo en cuanto a uso y mantenimiento.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés (con manual en inglés).

11. Ver glosario.



Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema operativo: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mínimo: Windows 2000 o superior. ○ Recomendado: Windows XP o superior.
Insumo(s) clave (s) que requiere para operar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ninguno de parte del usuario. El producto está listo para ser usado. Si el usuario desea mejorar el producto, puede agregar estaciones y desarrollar un proceso que necesita un poco más de capacitación en el uso de la herramienta Geoclim, también desarrollada por FEWS NET. La herramienta Geoclim es un software diseñado para practicar el análisis climático de series históricas de lluvia y temperatura (puede consultarse más información en http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geoclim/index.html, de Climate Hazard Group, CHG).
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 (moderado).
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Debe gestionarse ante la Oficina Regional de FEWSNET, ubicada en Guatemala.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los datos de lluvia CHIRPS pueden ser usados para hacer análisis.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Para facilitar el uso y análisis de CHIRPS se ha desarrollado una herramienta, el Geoclim: http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geoclim/index.html
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funk, CC; Peterson, PJ; Landsfeld, MF; Pedreros, DH; Verdin, JP; Rowland, JD; Romero, BE; Husak, GJ; Michaelsen, JC; Verdin, AP. 2014, A quasi-global precipitation time series for drought monitoring (en línea). U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p. Disponible en http://pubs.usgs.gov/ds/832/.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://chg.geog.ucsb.edu/data/CHPclim/index.html
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mario Rodríguez; e-mail: mrodriguez@fews.net ▪ Diego Pedreros; e-mail: pedreros@usgs.gov



2.3. Modelos integrados, análisis espacial e intercomparación de modelos

Ficha 18 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade / Modelo Internacional para el Análisis de Políticas sobre Productos Agrícolas y Comercio Sigla: IMPACT.
Descripción general	<p>Es un modelo de consulta de tendencias globales en el suministro y la demanda de alimentos. Creado para proyectar la oferta, demanda y seguridad alimentaria globales hasta el 2020. Simula cambios en productividad debido a la adopción de tecnologías que afectan el rendimiento, consumo y comercio de alimentos, los precios internacionales de los alimentos y la seguridad alimentaria. Los rendimientos de cada lugar específico son simulados en un tramo de medio grado (aproximadamente 60 kilómetros) para los cultivos de temporal o irrigados de maíz, arroz y trigo, con o sin acceso a las tecnologías potenciales, bajo condiciones actuales o futuras (hasta años de 2050s) del clima (según predicciones de MIROC -Modelo para la Investigación Interdisciplinaria en Clima-) A1B para los escenarios de cambio climático. El modelo básico IMPACT se combina con la simulación de Modelo IMPACT - Water (IWSM) con el fin de estimar las interacciones entre la oferta y demanda de agua y el suministro de alimentos, la demanda y el comercio. Los escenarios para el agua son reducidos desde modelos globales y calibrados para los modelos de circulación global que representan los climas futuros en los diferentes escenarios del IPCC SRES. Esto permite analizar las funciones separadas de superficie y rendimiento de secano y cultivos de regadío, la distribución del agua entre cultivos y las reducciones en rendimientos y áreas de cultivo por falta de agua. El modelo simula el aumento en la producción de cultivos, el cual se halla determinado por los precios de los cultivos y de los insumos, y por los parámetros externos que incluyen las tasas de crecimiento de la productividad, la expansión del área de cultivo, las inversiones en riego y la disponibilidad de agua. En cuanto a la metodología básica del modelo, el sub-módulo de alimentación es un sistema de ecuaciones que ofrecen una metodología de análisis y escenarios alternativos para la demanda mundial de alimentos, el suministro, el comercio, los ingresos, y la población. El submódulo de alimentos abarca 115 regiones geopolíticas y 126 cuencas hidrográficas del mundo. La intersección de estas dos capas geográficas crea 281 unidades de producción de alimentos (FPU). Dentro de cada región de la oferta, se determinan la demanda y los precios de los productos agrícolas. Todas las regiones están vinculadas a través del comercio. La oferta y las funciones de demanda incorporan elasticidades para aproximar la producción y la demanda subyacente. Actualmente el equipo de IFPRI está desarrollando mejoras en el modelo para que logre brindar más detalle sobre el comportamiento de las variables alimentarias y de las políticas públicas sobre el agua. Se busca integrarlo con otros modelos que mejoren la representación en escalas macro y micro, del suministro de alimentos, la demanda, el comercio, y las interacciones con los entornos socioeconómicos y biofísicos. Esta herramienta fue creada en 1993.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 2014.
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Analiza 32 productos agrícolas y ganaderos básicos en 281 regiones del mundo, que en forma combinada cubren toda la superficie del planeta (con excepción de la Antártida). Estas regiones se llaman unidades de producción de alimentos (FPU).
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Economistas, funcionarios del sector agropecuario y agroalimentario, académicos, personas interesadas en el enfoque económico de la producción de alimentos y las actividades vinculadas a ellos, funcionarios del sector agropecuario, analistas de seguridad alimentaria, actores relacionados con usos del agua para el agro, comercializadores de productos agrícolas.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> Debido a que el modelo fue desarrollado a partir del lenguaje GAMS (Sistema de Modelado de Álgebra General), el usuario debe pagar una licencia por él.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.



Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Ninguno (el sistema corre con la información a la que accede ordinariamente. Funciona como una fuente de consulta, pero también permite al usuario generar su propia simulación, si tiene los datos para ello). Se accede al modelo a través de una interfaz de Excel que permite al usuario especificar simulaciones de su interés.
Nivel de complejidad de uso para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> No. Requiere de intermediarios y la revisión del documento de descripción del modelo, si se desea comprender su diseño y funcionamiento. Los resultados pueden interpretarse sin necesidad de lo anterior, como un recurso de consulta, pero es necesario obtener el acceso o autorización por parte de IFPRI.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Consulta e información sobre alternativas futuras para el suministro mundial de alimentos, la demanda, el comercio, los precios y la seguridad alimentaria. Proporciona proyecciones fundamentales y globales de referencia, junto con los resultados de investigación más adelantados en el tema. Proyecciones globales acerca del suministro mundial de alimentos, la demanda, el comercio, los precios y la seguridad alimentaria. Resultados acerca de la SAN, puesto que explora los efectos de las variables modeladas en la seguridad alimentaria, IMPACT proyecta el porcentaje y el número de niños en edad preescolar desnutridos (0 a 5 años de edad) en los países en desarrollo, en función de la disponibilidad media de calorías per cápita, la proporción de mujeres con educación secundaria, la relación hombres-mujeres según la esperanza de vida al nacer y el porcentaje de la población con acceso a agua potable. No está abierto para su uso (se requiere autorización del IFPRI y esta depende de la compra de la licencia de GAMS).
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> No disponible. Lo que está disponible es un documento de referencia, "Descripción del modelo IMPACT", en http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/impactwater2012.pdf, que puede ayudar a comprenderlo, pero IFPRI usualmente brinda capacitaciones para ello, dada la cantidad de variables que el modelo tiene incorporadas.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> Rosegrant, MW; Ringler, C; Msangi, S; Sulser, TB; Zhu, T; Cline, SA. 2008. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT). Model Description (en línea). Washington, DC, US, IFPRI. Disponible en http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/impactwater2012.pdf.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.ifpri.org/book-751/ourwork/program/impact-model (información de referencia sobre la herramienta).
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Sherman Robinson, Director de Investigación de la División de Tecnología de la Producción y el Medio Ambiente, CGIAR; e-mail: s.robinson@cgiar.org

Ficha 19 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Global Biosphere Management Model. Sigla: GLOBIOM.
Descripción general	<p>GLOBIOM se usa para analizar la competencia por uso de tierra entre agricultura, forestaría y bioenergía, los cuales son los principales sectores de producción usando área. El modelo puede apoyar científicos y tomadores de decisiones con las medidas de evaluar la producción eficiente a nivel global de alimentos, fibras forestales y bioenergía. GLOBIOM cubre todo el mundo. Se han desarrollado versiones regionales, p.ej. para Brasil, junto con institutos nacionales y regionales. Estas versiones aportan más detalle espacial en su región de interés para poder evaluar políticas específicas de la región. GLOBIOM se aplica para explorar los trade-offs y sinergias en el uso de tierra y servicios eco sistémicos. Ayuda a científicos a entender y minimizar competencia en el uso de la tierra y recursos por medio de un enfoque holístico.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 2014
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas (IIASA).



Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Analiza los mercados de 18 cultivos y ganadería en 30 regiones del mundo, que en forma combinada cubren toda la superficie del planeta (con excepción de la Antártida). La producción se modela en >200,000 unidades de simulación que se caracterizan por clima, altitud, suelo, pendiente, latitud y longitud y nación.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Economistas, funcionarios del sector agropecuario y agroalimentario, académicos, personas interesadas en el enfoque económico de la producción de alimentos y las actividades vinculadas a ellos, funcionarios del sector agropecuario, analistas de seguridad alimentaria, actores relacionadas con usos del agua para el agro, comercializadores de productos agrícolas.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> Usualmente los proyectos se implementan en cooperación con el IIASA. Resultados e informes de proyectos anteriores están disponibles libremente. Debido a que el modelo fue desarrollado a partir del lenguaje GAMS (Sistema de Modelaje de Algebra General), el usuario debe pagar una licencia por él.
Idiomas en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Escenarios de demanda para productos agrícolas al nivel nacional. Escenarios de cambios en rendimientos de los cultivos por cambios técnicos o del clima a escala de 5 Arcmin.
Nivel de complejidad de uso para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> 3
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> No se requiere para lo referente a la interpretación de resultados. Para correr el modelo, desarrollar escenarios y adaptar la estructura del modelo, se requiere la cooperación del IIASA y una formación básica en el lenguaje de programación GAMS.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Consulta e información sobre alternativas futuras para el suministro mundial de alimentos, la demanda, el comercio, los precios y la seguridad alimentaria. Proporciona proyecciones fundamentales y globales de referencia, junto con los resultados de investigación más adelantados en el tema. Proyecciones globales acerca del suministro mundial de alimentos, la demanda, el comercio, los precios y la seguridad alimentaria.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> No disponible.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> Havlik, P; Schneider, UA; Schmid, E; Böttcher, H; Fritz, S; Skalský, R; Aoki, K; Cara, SD; Kindermann, G; Kraxner, F; Leduc, S; McCallum, I; Mosnier, A; Sauer, T; Obersteiner, M. 2011. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. Energy Policy 39(10):5690–5702.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.globiom.org/
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Petr Havlik, Reseach Scholar; e-mail: Havlikpt@iiasa.ac.at

Ficha 20 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de información geográfica ArcGIS en línea. Sigla: ArcGIS.
Descripción general	<p>Plataforma de información que permite crear, analizar, almacenar y difundir datos, modelos, mapas y globos en 3D, poniéndolos a disposición de todos los usuarios según las necesidades de la organización. El ArcGIS no es un modelo del mismo tipo que los demás aquí incluidos, pero es una herramienta de representación espacial que se usa cada vez más para presentar los resultados de los modelos, con un enfoque espacio temporal, propio de las bases de datos espaciales.</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 10.2.2 (2014).



Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ESRI - Environmental Systems Research Institute/Instituto de Investigación en Sistemas Ambientales (empresa especializada en el desarrollo de software, sistemas de información geográfica en línea y aplicaciones de bases de datos espaciales).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> Cualquiera que pueda ser georreferenciada.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Cualquier persona vinculada al sector agrícola, con experiencia o no en el uso de computadoras, puede aprender a usarlo con la debida capacitación. Como sistema de información, ArcGIS es accesible para usuarios desde estaciones desktop, navegadores web y terminales móviles que se conectan a servidores de departamento, corporativos o con arquitecturas de computación en la nube (cloud computing).
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> Sí tiene un costo. Dispone de licencias para organizaciones de lucro y de permisos de uso para organizaciones no lucrativas, mucho más económicas y que brindan acceso a un número determinado de usuarios, según la actividad que se desee desarrollar. Se puede probar la herramienta gratuitamente usando una versión de entrenamiento temporal gratuita (trial version). Existe una modalidad de acceso gratuito para explorar y visualizar, pero no para generar datos propios. El entrenamiento en su uso tiene un costo adicional que depende de las condiciones en que deba o quiera recibirse y del lugar, dado que el capacitador debe desplazarse al sitio donde el entrenamiento tendrá lugar.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés, español, portugués.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Equipo de cómputo estándar. No requiere condiciones especiales, excepto la conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Información (datos) georreferenciada para cada una de las variables, otros atributos espaciales que describan las variables, según la necesidad de representación que tenga el usuario (extensión o área, tipo de cobertura o uso de la tierra, entre otros).
Nivel de complejidad de uso para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> 2
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> No es indispensable, pero sí se recomienda. Se contrata por aparte (no está incluida en el pago de la autorización de acceso). Hay expertos que orientan en la gestión de la autorización cuando son contratados para impartir el entrenamiento en el uso de la herramienta. La capacitación puede tomar dos semanas, más la supervisión por el tiempo que se considere necesario.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> Las funciones del sistema en línea no son las mismas del sistema modular que se emplea mediante licencias de usuario, pero se estima que son suficientes para la mayoría de los usos y necesidades de usuarios que requieren representar espacialmente el comportamiento de variables de producción, análisis espacial de cultivos; cambios en las características espaciales de las unidades productivas; relaciones espaciales entre variables o cambios en la cobertura asociados a la influencia de factores como el clima, categorías de manejo, entre otros.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> University of Michigan, US. 2015. ArcGIS Online at the University of Michigan (en línea). Michigan, US. Disponible en http://www.lib.umich.edu/clark-library/gis-at-umich/arcgis-online.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> https://www.arcgis.com/home/ (versión en inglés). http://resources.arcgis.com/es/home/ (versión en español). http://www.arcgis.com/features/ (para la prueba gratuita de 30 días).
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Pablo Cabrera (instructor); e-mail: pablocabreragis@gmail.com



Ficha 21
Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> R
Descripción general	R es un sistema de computación estadístico y de visualización. Consiste de un lenguaje de programación y una superficie con visualización y la capacidad de correr programas guardados en archivos de scripts.
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> 3.1.2 (2014).
Institución u organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> R core team.
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> R es modular. Los usuarios contribuyen a la versión básica con librerías que agregan funciones. Hay librerías para cualquier tipo de análisis, entre ellos análisis espacial, aprendizaje de máquinas, y análisis estadístico avanzado.
Características de usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> Avanzado en la modelación y dedicado. R tiene una curva de aprendizaje empinada. Manejar R requiere que el usuario dedique semanas o meses para aprender las funciones básicas. Sin embargo, una vez que el usuario aprendió la lógica del lenguaje, la flexibilidad y la opción de automatizar el análisis ofrece posibilidades nuevas. Es por esto que R gana popularidad entre investigadores, estadísticos y otros especialistas.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> R no tiene costo ni restricciones en su uso.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> Inglés.
Condiciones mínimas de equipo	<ul style="list-style-type: none"> Equipo de cómputo estándar con Unix, Windows o Mac OS. No requiere condiciones especiales. Para instalar se requiere una conexión a internet.
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> Cualquier tipo de datos.
Nivel de complejidad de uso para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> 3
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> No es indispensable, pero sí se recomienda. Existen muchos recursos de aprendizaje en el internet y las librerías siempre están bien documentados y muchas veces ofrecen tutoriales. Sin embargo, para entender la lógica de la programación con R se recomiendan cursos universitarios.
Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> La ventaja de R es su flexibilidad, que permite – en teoría – cualquier tipo de análisis estadístico. Para implementar modelos de simulación o modelos económicos otros lenguajes son más eficientes.
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> Sí.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> The R Foundation. s. f. The R journal (en línea). Disponible en http://journal.r-project.org/. The R Foundation. s. f. The R project for statistical computing (en línea). Disponible en http://cran.r-project.org/doc/FAQ/.
Web para el acceso a la herramienta	<ul style="list-style-type: none"> http://www.r-project.org/
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> Depende del módulo.



Ficha 22 Información general

Nombre completo de la herramienta en español e inglés (y sus siglas)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project / Proyecto de Comparación y Mejoramiento de Modelos Agropecuarios. ▪ Sigla: AgMIP.
Descripción general	<p>Mejora sustancialmente los modelos agropecuarios y las capacidades científicas y tecnológicas, para evaluar los impactos de la variabilidad y cambio del clima y otros elementos importantes en la agricultura, seguridad alimentaria y pobreza a nivel local y global. AgMIP busca mejorar e incorporar modelos de clima, cultivos, ganaderos y de economía agrícola de última generación (“state of the art”) en evaluaciones coordinadas del impacto del cambio del clima a escalas regionales y globales. El uso de múltiples modelos, escenarios, localidades y cultivos, permite explorar la incertidumbre y valorar el efecto asociado con los datos elegidos para modelar el comportamiento del clima, así como las metodologías empleadas. Esto, a su vez, permite mejorar la capacidad científica y adaptativa en las diferentes regiones. AgMIP tiene el propósito de proveer a organizaciones globales y gobiernos nacionales con evaluaciones integrales de los impactos derivados del cambio en el clima, así como evaluaciones de estrategias de adaptación, usando metodologías novedosas y mejoradas con base en protocolos. Estos resultados serán la base para contribuir con el siguiente Informe de Evaluación del IPCC (AR6).</p>
Versión actual disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AgMIP es una metodología y enfoque que integra diversos modelos y herramientas que tienen diferentes versiones, por lo que no hay una única versión. Los protocolos que incorpora, brindan los criterios para mantener comparables los resultados basados en su metodología, que por su formulación, admite el uso de distintos modelos, según sea el caso. Dichos protocolos fueron revisados en el 2014.
Institución/organización que la desarrolló	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AgMIP y colaboradores (ver apartado de página web).
Actividades agrícolas que puede modelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluaciones integrales de los impactos de cambio del clima y medidas de adaptación en unidades de producción (fincas, chacras, etc.) en una determinada región.
Características del usuario	
Perfil del usuario esperado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El equipo multidisciplinario tiene como uno de sus objetivos el de ‘traducir’ los resultados científicos de manera que sean comprensibles para diferentes ‘stakeholders’ o usuarios. El grupo de estos se estima amplio, heterogéneo y vinculado a diferentes actividades y organizaciones.
Detalle técnico de la herramienta	
Condiciones de costos y acceso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AgMIP es un proyecto a la vez que una organización sin fines de lucro, por lo que no cobra licencias ni otros cargos para poder utilizar su metodología. No obstante, para poder aprender a usarla es necesario un entrenamiento que imparte su equipo técnico, cuyo costo corresponde a la remuneración de los instructores expertos, su traslado y manutención en el sitio de capacitación en el país e institución que lo solicite. Usualmente, son las instituciones de gobierno (ministerios, secretarías, centros de investigación del Estado), las que buscan estos entrenamientos.
Idioma(s) en que está disponible	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inglés.
Características mínimas de equipo humano y tecnológico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se necesita un equipo multidisciplinario (clima, cultivos/ganadería, economía y tecnología e información).
Datos que requiere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datos de clima (precipitación, temperatura máxima, mínima, radiación solar y otros), datos de cultivos (los datos que requieren los modelos de simulación de cultivos), encuestas socioeconómicas.
Nivel de complejidad de uso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3. La metodología AgMIP debe ser implementada por expertos, dada la complejidad de las interacciones y de los mismos modelos y herramientas que se usan.
Necesidades de capacitación formal para usuarios no expertos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sí. Las instituciones o los proyectos que deseen utilizar el enfoque y metodología de AgMIP pueden contactar al equipo de AgMIP para ver posibilidades y condiciones para entrenamiento.



Producto o resultado que puede brindar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluaciones integrales de impactos de cambio de clima y adaptación con base en indicadores importantes como tasas de pobreza, ingreso familiar, porcentaje de fincas vulnerables al impacto del cambio en el clima, porcentaje de fincas que ganan o pierden con el cambio de clima (los efectos del impacto pueden ser desfavorables o favorables, según la actividad).
Información de referencia	
Tutorial en línea	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Documentación y publicaciones relacionadas con el enfoque AgMIP están accesibles en la web. Dadas las características de esta metodología, no puede lograrse un nivel de uso adecuado de forma autodidáctica y con base en un tutorial.
Referencias académicas, de autor, artículos para consultar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adiku, SGK; Traore, SP. 2013. Climate change impacts on West African agriculture (en línea). Presentado en ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings. Symposium "Perspectives on Climate Effects on Agriculture: The International Efforts of AgMIP" (Tampa, FL, US). Proceedings. ▪ Boote, KJ; Porter, CH; Jones, JW; Thorburn, PJ; Hoogenboom, G. 2013. Sentinel Site Data for Model Improvement and Application – Definitions and Characterization. Presentado en ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings. Symposium "Perspectives on Climate Effects on Agriculture: The International Efforts of AgMIP" (Tampa, FL, US). Proceedings. ▪ Elliott, J; Muller, C; Deryng, D; Nelson, J; Piontek, F; Rosenzweig, C. 2013. The 2012 AgMIP/ISI-MIP Fast-Track Assessment. New York, US, Columbia University, Center for Climate Systems Research, AgMIP Project.
Web para el acceso a la herramienta y para consulta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ http://www.agmip.org/
Información de contacto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cynthia Rosenzweig, Principal AgMIP Investor; e-mail: crr2@columbia.edu ▪ Alex Ruane, Science Coordination; e-mail: czm2001@columbia.edu) ▪ Carolyn Mutter, International Coordination; e-mail: alexander.c.ruane@nasa.gov ▪ Roberto Valdivia, Latin America Coordinador, e-mail: Roberto.Valdivia@oregonstate.edu ▪ Consultas: info@agmip.org



III. Consideraciones finales

Este documento pretende contribuir a aumentar el conocimiento sobre el cambio climático en el sector agropecuario y, más específicamente, acerca de las opciones de modelaje disponibles en diferentes escalas.

Se espera que el lector no experto encuentre en este documento elementos orientadores que le brinden más seguridad al tratar de participar en espacios dedicados a la modelación de la variabilidad y el cambio climático, en su relación con la agricultura. A la vez, se desea que le sirva como un punto de partida para fomentar su acercamiento a estos temas y profundizar en ellos.

El uso de herramientas de modelaje (individuales, compuestas, etc.) para el estudio del clima y de sus efectos en la agricultura, representa un recurso actualmente indispensable para apoyar las acciones relacionadas con la adaptación al cambio climático, porque permite crear escenarios para analizar posibles consecuencias y oportunidades, así como apoyar el diseño de políticas públicas y de medidas de adaptación.

No debe olvidarse que la simulación tiene limitantes, dentro de las cuales la más importante y común a todos los modelos es la incertidumbre. Esto significa que los resultados de cualquier modelo representan una probabilidad de ocurrencia de ese resultado, de entre un conjunto que podrían tener

lugar, en función de las probabilidades que brinda el sistema climático en su interacción con la agricultura.

Los actores sectoriales deben incrementar sus capacidades para sacar más provecho de lo que los modelos pueden brindarles para reducir la vulnerabilidad de las actividades agrícolas y contribuir a que las unidades productivas se adapten al cambio climático. Por eso, este documento se enfoca en tratar de ayudar a comprender la simulación y los modelos, así como la diversidad de opciones que existen.

Este documento no resuelve el problema de los vacíos técnicos y las necesidades de acercamiento entre actores, haciendo necesario que las comunidades de la modelación y sus usuarios sectoriales insistan, participen y sean involucrados en actividades donde unos y otros puedan conocer la oferta de herramientas de modelaje para estudiar el impacto del cambio climático en las actividades agrícolas, las limitaciones y los alcances de esas herramientas, saber qué esperan los usuarios y qué necesitan y establecer asociaciones entre actores públicos y privados, académicos y de la administración pública, entre otros, para que los modelos puedan acercarse cada vez más a lo que la agricultura demanda, a fin de mejorar sus opciones ante la amenaza que presenta y proyecta el cambio climático.



IV. Bibliografía

4.1. Sección I

Atehortúa, F; Bustamante, R; Valencia, J. 2008. Sistema de Gestión Integral: una sola gestión, un solo equipo. Gestión y conocimiento. Medellín, CO, Editorial Universidad de Antioquia.

Bermón Angarita, L. s. f. Simulación: definición de modelo (en línea). Bogotá, CO, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Administración. Dirección Nacional de Innovación Académica. Consultado 14 may. 2014. Disponible en <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060010/lecciones/Capitulo1/modelo.htm>.

Blonder, B; Lamanna, C; Violle, C; Enquist, BJ. 2014. The n dimensional hypervolume. *Global Ecology and Biogeography* 23(5):595-609.

Box, GEP; Draper, NR. 1987. *Empirical Model Building and Response Surfaces*. Nueva York, US, Wiley & Sons.

Bunn, C; Läderach, P; Ovalle Rivera, O; Kirschke, D. 2015. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change* 129(1-2):89-101.

Caselles, A. 2008. *Modelización y simulación de sistemas complejos*. Valencia, ES, Universitat de Valencia.

Cortés, J; González, M; Pinilla, V. 2011. Introducción al análisis numérico y tratamiento de errores (en línea). México, D.F., MX, UNAM, Facultad de Ingeniería, Departamento de Matemáticas Aplicadas a la División de Ciencias Básicas. Consultado 14 may. 2014. Disponible en <http://www.ingenieria.unam.mx/~pinilla/2011/Intro/Intro.pdf>.

Edu2000 America Inc. 2007. Iteración (en línea). In *Diccionario visual de matemáticas* (en línea). Carson City, US. Consultado 16 may. 2014. Disponible en <http://www.mathematicsdictionary.com/spanish/vmd/full/i/iteration.htm>.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). s. f. GAEZ: Global Agro-Ecological Zones (en línea). Roma, IT. Consultado 16 may. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/nr/gaez/es/>.

_____. 1997. Análisis de sistemas de producción animal. Tomo 2: las herramientas básicas (en línea). Roma, IT. Estudio FAO Producción y Sanidad Animal 140/2. Consultado 16 may. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/w7452s/w7452s01.htm>.

Gay, C; Estrada, F; Conde, C; Eakin, H; Villers, L. 2006. Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: A Case Study of Coffee Production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change* 79(3-4):259-288.

González, P. s. f. Tema 1: Introducción al cálculo numérico (en línea). Granada, ES, Universidad de Granada, Departamento de Matemática Aplicada. Consultado 5 jun. 2014. Disponible en <http://www.ugr.es/~prodelas/ftp/Ciencias/Geologia/TEMA1.pdf>.

Havlik, P; Valin, H; Mosnier, A; Obersteiner, M; Baker, JS; Herrero, M; Rufino, MC; Schmid, E. 2012. Crop Productivity and the Global Livestock Sector: Implications for Land Use Change and Greenhouse Gas Emissions. *American Journal of Agricultural Economics* 95(2):442-448.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, MX). 2010. ¿Qué es el fenómeno del cambio climático? (en línea).



México, D.F., MX. Consultado 5 jun. 2014. Disponible en <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/comprendercc/queeselcc/queeselcc.html>.

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, CH). 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC (en línea). Ginebra, CH. Documento técnico II del IPCC, elaborado para la Convención Marco de Naciones Unidas contra el Cambio Climático. Consultado 5 jun. 2015. Disponible en <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/paper-II-sp.pdf>.

_____. 2001. Anexo B: glosario de términos (en línea). In Tercer Informe de evaluación. Cambio climático 2001: informe de síntesis. Ginebra, CH. Consultado 5 jun. 2014. Disponible en <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>.

_____. 2007. ¿Cuán confiables son los modelos utilizados para realizar los pronósticos de futuros cambios climáticos? (en línea). In Informe de Grupo de Trabajo I - Base de las Ciencias Físicas. Cambridge, UK, Cambridge University Press. Consultado 5 jun. 2014. Disponible en http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-8-1.html.

_____. 2014. Cambio climático 2014: impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (en línea). Eds. CB Field, VR Barros, DJ Dokken, KJ Mac, MD Mastrandrea, TE Bilir, M Chatterjee, KL Ebi, YO Estrada, RC Genova, B Girma, ES Kissel, AN Levy, S MacCracken, PR Mastrandrea, LL White. Ginebra, CH, Organización Meteorológica Mundial. 34 p. Consultado 5 jun. 2014. Disponible en https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf.

Llebot, JE. 2009. Bases de la modelización climática (en línea). In Agencia Catalana del Agua. Agua y cambio climático: diagnóstico de los impactos previstos en Cataluña. Barcelona,

ES. p. 64-72. Consultado 9 ago. 2014. Disponible en http://aca-web.gencat.cat/aca/documentes/es/publicacions/escenaris_climatics.pdf.

Meelamkavil, A. 1987. Sistemas, modelos y simulación (en línea). Consultado 9 ago. 2014. Disponible en <http://arantxa.ii.uam.es/~aguirre/OS/sms.pdf>.

Oglesby, R; Rowe, C. 2010. La ciencia del cambio climático. Manual práctico para tomadores de decisiones en Mesoamérica. Revisores en español: A Grünwaldt, S Valencia, I Ferreira. Washington, DC, US, BID. Notas Técnicas No. IDB-TN-145.

Phillips, SJ; Anderson, RP; Schapire, RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190(3-4):231-259.

RAE (Real Academia Española). 2014a. Certidumbre (en línea). In Diccionario de la lengua española. Madrid, ES. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en <http://lema.rae.es/drae/?val=certidumbre>.

_____. 2014b. Diccionario de la lengua española (en línea). Madrid, ES. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en <http://lema.rae.es/drae/?val=>.

_____. 2014c. Estocástico (en línea). In Diccionario de la lengua española. Madrid, ES. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en <http://lema.rae.es/drae/?val=estoc%C3%A1stico>.

_____. 2014d. Modelo (en línea). In Diccionario de la lengua española. Madrid, ES. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en <http://lema.rae.es/drae/?val=MODELO>.

_____. 2014e. Secuencia (en línea). In Diccionario de la lengua española. Madrid, ES. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en <http://lema.rae.es/drae/?val=secuencia>.

Ramirez, J; Jarvis, A. 2010. Disaggregation of Global Circulation Model Outputs. Cali, CO, CIAT.

Ramirez-Villegas, J; Jarvis, A; Läderach, P.



2013. Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: the EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology* 170:67-78.

Rodríguez, J; Steegman, C. 2000. Modelos matemáticos (en línea). Barcelona, ES, Universitat Oberta de Catalunya (UOC). Proyecto e-Math, financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD). Consultado 13 ago. 2014. Disponible en http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Modelos_matematicos.pdf.

Solomon, S; Qin, D; Manning, M; Chen, Z; Marquis, M; Averyt, KB; Tignor, M; Miller, HL. 2007. IPCC 2007: Summary for Policy-makers. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.*

Stocker, TF; Qin, D; Plattner, GK; Tignor, M; 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-Abstract for decision-makers.* Ginebra, CH, IPPC.

Tarifa, EE. s. f. Teoría de modelos y simulación: introducción a la simulación (en línea). San Salvador de Jujuy, AR, Universidad Nacional de Jujuy, Facultad de Ingeniería. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en http://samvisual.com.mx/cecyteg/soporte/media/media_archivos/13857465435298d06fe1a35.pdf.

UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). 2003. ¿Qué es un cluster? (en línea). *Revista Digital Universitaria* 4(2). Artículo n.º 3. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en <http://www.revista.unam.mx/vol.4/num2/art3/cluster.htm>.

UNCUYO (Universidad Nacional de Cuyo, AR). Cátedra de Cálculo Estadístico y Biometría. s. f. Modelos y simulación (en línea). Mendoza, AR. Consultado 22 jul. 2014. Dispo-

nible en campus.fca.uncu.edu.ar:8010/.../Modelos_y_Simulacion.

Universidad de Murcia, ES. 2006. El formato ráster: fundamentos (en línea). Murcia, ES, SIGMUR (Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en la Universidad de Murcia). Consultado 22 jul. 2014. Disponible en http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_4.pdf.

UTN (Universidad Tecnológica Nacional, AR). s. f. Simulación (en línea). Ingeniería en Sistemas de la Información. Santa Fe, AR. Consultado 22 jul. 2014. Disponible en www.frsf.utn.edu.ar/matero.php.

Van Vuuren, DP; Edmonds, J; Kainuma, M; Riahi, K; Thomson, A; Hibbard, K; Hurtt, GC; Kram, T; Krey, V; Lamarque, JF; Masui, T; Meinshausen, M; Nakicenovic, N; Smith, SJ; Rose, SK. 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109(1-2):5-31.

4.2. Sección II

Abrahamson, DA; Causarano, HJ; Williams, JR; Norfleet, ML; Franzluebbbers, AJ. 2009. Predicting soil organic carbon sequestration in the southeastern United States with EPIC and the soil conditioning index. *Journal of Soil and Water Conservation* 64(2):134-144. doi:10.2489/jswc.64.2.134.

_____; Norfleet, ML; Causarano, HJ; Williams, JR; Shaw, JN; Franzluebbbers, AJ. 2007. Effectiveness of the soil conditioning index as a carbon management tool in the southeastern USA based on comparison with EPIC. *Journal of Soil and Water Conservation* 62(2):94-102.

Adiku, SGK; Traore, SP. 2013. Climate change impacts on West African agriculture (en línea). Presentado en ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings. Symposium "Perspectives on Climate Effects on Agriculture: The International Efforts of AgMIP" (Tampa, FL, US). Proceedings.

AgMIP (The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project, US). 2014.



Sitio web (en línea). New York, US, Columbia University. Consultado 28 jul. 2014. Disponible en <http://www.agmip.org/>.

Amaral, TA; Teixeira, CL; Borges, ME; Freitas, D. Applying CSM-CERES-Maize to define a sowing window for irrigated maize crop – The Riacho’s Farm case study (en línea). 2011. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 6(2):38-53. Consultado 28 jul. 2014. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.184>; <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/40917/1/Applying-CSM.pdf>.

Amiri Larijani, B; Sarvestani, ZT; Nematzadeh, GH; Manschadt, AM; Amiri, E. 2011. Simulating phenology, growth and yield of transplanted rice at different seedling ages in Northern Iran using ORYZA2000. *Rice Science* 18(4):321-334.

Antle, JM. 2011. Parsimonious Multi-Dimensional Impact Assessment. *American Journal of Agricultural Economics* 93(5):1292-1311.

_____; Stoorvogel, JJ; Valdivia, RO. 2014. New parsimonious simulation methods and tools to assess future food and environmental security of farm populations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological sciences* 369(1639):20120280.

_____; Valdivia, RO. 2006. Modelling the supply of ecosystem services from agriculture: a minimum-data approach. *Australian Journal of Agricultural Research Economics* 50(1):1-15.

Arora, VK. 2006. Application of a rice growth and water balance model in an irrigated semi-arid subtropical environment. *Agricultural Water Management* 83:51-57.

Artacho, P; Meza, F; Alcalde, JA. 2011. Evaluation of the Oryza2000 rice growth model under nitrogen-limited conditions in an irrigated Mediterranean environment. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71(1):23-33.

Bechini, L; Bocchi, S; Maggiore, T; Confalonieri, R. 2005. Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Modelling & Software* 21(7):1042-1054.

Boogaard, HL; Van Diepen CA; Rötter, RP; Cabrera JMCA; Van Laar, HH. 2011. WOFOST Control Centre 1.8 and WOFOST 7.1.3 User Manual. Wageningen, NL, Alterra, Wageningen University and Research Centre.

Boote, KJ; Porter, CH; Jones, JW; Thornburn, PJ; Hoogenboom, G. 2013. Sentinel Site Data for Model Improvement and Application – Definitions and Characterization. Presentado en ASA, CSSA and SSSA International Annual Meetings. Symposium “Perspectives on Climate Effects on Agriculture: The International Efforts of AgMIP” (Tampa, FL, US). Proceedings.

Bouman, BAM; Kropff, MJ; Tuong, TP; Wopereis, MCS; Ten Berge, HFM; Van Laar, HH. 2001. ORYZA2000: modeling lowland rice. Los Baños, PH, International Rice Research Institute; Wageningen, NL, Wageningen University. 235 p.

_____; van Keulen, H; van Laar, HH; Rabblings, R. 1996. The “School of de Wit” crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52(2-3):171-198.

_____; Van Laar, HH. 2006. Description and evaluation of the rice growth model ORYZA2000 under nitrogen-limited conditions. *Agricultural Systems* 87:249-273.

CHG (Climate Hazards Group). s. f. GeoWRSI (en línea). Consultado 4 set. 2014. Disponible en <http://chg.geog.ucsb.edu/tools/geowrsi/index.html>.



DSSAT Foundation. 2015a. DSSAT v4.6 (en línea). Proseer, Washington, US. Consultado 4 set. 2014. Disponible en <http://dssat.net/downloads/dssat-v46>.

_____. 2015b. DSSAT.net (en línea). Proseer, Washington, US. Consultado 4 set. 2014. Disponible en <http://dssat.net/>.

Elliott, J; Muller, C; Deryng, D; Nelson, J; Piontek, F; Rosenzweig, C. 2013. The 2012 AgMIP/ISI-MIP Fast-Track Assessment. New York, US, Columbia University, Center for Climate Systems Research, AgMIP Project.

Esri. s. f. ArcGIS (en línea). Redlands, CA, US. Consultado 5 set. 2014. Disponible en <https://www.arcgis.com/home/>, <http://resources.arcgis.com/es/home/> y <http://www.arcgis.com/features/>.

European Commission. 2014. Biophysical Models Applications (BioMA) Portal (en línea). Bruselas, BE. Consultado 4 set. 2014. Disponible en <http://bioma.jrc.ec.europa.eu/>.

_____; Joint Research Centre. s. f. BioMA Software Portal (en línea). Bruselas, BE. Consultado 4 set. 2014. Disponible en <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/bioma-software-portal>.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 2004. AGROMETSHELL Manual (en línea). Roma, IT. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en http://www.fao.org/nr/climpag/aw_6_en.asp.

_____. 2014a. Climpag: Climate impact on agriculture. Methods and tools (en línea). Roma, IT. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en http://www.fao.org/nr/climpag/aw_6_en.asp.

_____. 2014b. MOSAICC: publications (en línea). Roma, IT. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/climate-change/mosaicc/67887/en/>.

_____. 2015a. AquaCrop literature (en línea). Roma, IT, Water Development and Management Unit. Consultado 23 ago. 2014. Dis-

ponible en <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquacropLiterature.pdf>.

_____. 2015b. AquaCrop Network (en línea). Roma, IT, Water Development and Management Unit. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropNetwork.pdf>.

_____. 2015c. AquaCrop standard window program: version 4.0 (en línea). Roma, IT, Water Development and Management Unit. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.

_____. 2015d. Installation guidelines of AquaCrop Version 4.0 for 64-bit PC (en línea). Roma, IT, Water Development and Management Unit. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en http://www.fao.org/nr/water/docs/Installation_guidelines_of_AquaCrop_Version_4_64bits.pdf.

_____. 2015e. MOSAICC: The FAO modelling system to assess climate change impacts on agriculture at national level (en línea). Roma, IT. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/climatechange/mosaicc/en/>.

_____; EC-FAO Food Security Programme <Information for Action>; SADC Food Security Program, ZW; Research Institute for Industrial Crops, IT; University of Liege, BE; Hoefsloot Software. s. f. AgrometShell (AMS): Software for crop yield forecasting initiated by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (en línea). Versión 1.57. Consultado 23 ago. 2014. Disponible en <http://www.hoefsloot.com/agrometshell.htm>.

Ferrer, F; Villar, J; Stöckle, C. Evaluación del modelo de simulación cropsyst para maíz de regadío en el Valle del Ebro. Investigación agraria: producción y protección vegetales 15(3):237-251.

FEWS NET (The Famine Early Warning Systems Network). s. f. Where we work: Central America and Caribbean (en línea). Consultado 5 set. 2014. Disponible en <http://www.fews.net/central-america-and-caribbean>.



Flores-Gallardo, H; Ojeda-Bustamante, W; Flores Magdaleno, H; Sifuentes-Ibarra, E; Mejía-Sáenz, E. 2013. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* l.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia* 47(4):347-359.

Funk, CC; Peterson, PJ; Landsfeld, MF; Pedreros, DH; Verdin, JP; Rowland, JD; Romero, BE; Husak, GJ; Michaelsen, JC; Verdin, AP. 2014. A quasi-global precipitation time series for drought monitoring (en línea). U.S. Geological Survey Data Series 832, 4 p. Consultado 29 may. 2014. Disponible en <http://pubs.usgs.gov/ds/832/>.

Gassman, PW; Williams, JR; Wang, X; Saleh, A; Osei, E; Hauck, LM; Izaurrealde, RC; Flowers, JD. The agricultural policy/environmental extender: (APEX) model. An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses (en línea). 2010. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 53(3):711-740. Consultado 11 jun. 2014. Disponible en http://www.card.iastate.edu/environment/items/trans_asabe_review_paper.pdf.

Havlík, P; Schneider, UA; Schmid, E; Böttcher, H; Fritz, S; Skalský, R; Aoki, K; Cara, SD; Kindermann, G; Kraxner, F; Leduc, S; McCallum, I; Mosnier, A; Sauer, T; Obersteiner, M. 2011. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy* 39(10):5690-5702.

Hijmans RJ; Guiking-Lens, IM; van Diepen, CA. 1994. WOFOST 6.0: Guía del usuario para el WOFOST 6.0 Crop Growth modelo de simulación. Wageningen, NL, DLO Winand Staring Centre. Documento Técnico 12. ISSN 0928-0.944.

Hoogenboom, G; Jones, JW; Wilkens, PW; Porter, CH; Boote, KJ; Hunt, LA; Singh, U; Lizaso, JL; White, JW; Uryasev, O; Royce, FS; Ogoshi, R; Gijsman, AJ; Tsuji, GY; Koo, J. 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5.X.X (Replace X.X with sub-version numbers in your output files) [CD-ROM]. Honolulu, Hawaii, US, University of Hawaii.

_____; Jones, JW; Wilkens, PW; Porter, CH; Boote, KJ; Hunt, LA; Singh, U; Lizaso, JL; White, JW; Uryasev, O; Ogoshi, R; Koo, J; Shelia, V; Tsuji, GY. 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6. Proseer, Washington, US, DSSAT Foundation.

IFPRI (International Food Policy Research Institute, US). 2015. Impact Model (en línea). Washington, DC, US. Consultado 1 jul. 2014. Disponible en <http://www.ifpri.org/book-751/ourwork/program/impact-model>.

IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis, AT). 2014. GLOBIOM:

A global model to assess competition for land use between agriculture, bioenergy, and forestry (en línea). Laxenburg, AT. Consultado 1 jul. 2014. Disponible en <http://www.globiom.org/>.

IRRI (International Rice Research Institute, PH). 2013a. ORYZA: A crop growth simulation model for rice (en línea). Los Baños, PH. Consultado 1 may. 2014. Disponible en <https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/home>.

_____. 2013b. ORYZA version 3 (en línea). Los Baños, PH. Consultado 1 may. 2014. Disponible en <https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/downloads/new-release>.

_____. 2013c. Tutorials ORYZA2000 v.2.xx (en línea). Los Baños, PH. Consultado 1 may. 2014. Disponible en <https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/tutorials>.

_____. 2015. ORIZA: scientific documentation (en línea). Los Baños, PH. Consultado 1 may. 2014. Disponible en <https://sites.google.com/a/irri.org/oryza2000/scientific-documentation>.

Jones, JW; Hoogenboom, G; Porter, CH; Boote, KJ; Batchelor, WD; Hunt, LA; Wilkens, PW; Singh, U; Gijsman, AJ; Ritchie, JT. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18(2003):235-265.



Kiptala, JK; Mul, ML; Mohamed, YA; van der Zaag, P. 2014. Modelling stream flow and quantifying blue water using a modified STREAM model for a heterogeneous, highly utilized and data-scarce river basin in Africa (en línea). *Hydrology and Earth Systems Sciences* 18, 2287-2303. Consultado 3 set. 2014. Disponible en <http://dx.doi.org/10.5194/hess-18-2287-2014>.

Maina, J; de Moel, H; Zinke, J; Madin, J; McClanahan, T; Vermaat, JE. 2013. Humand deforestation outweighs future climate change impacts of sedimentation on coral reefs (en línea). *Nature Communications* 4:1986. Consultado 4 set. 2014. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms2986>.

Manlla, A; Salvagiotti, F. Validación del modelo Hybrid maize en condiciones óptimas de crecimiento (en línea). EEA Oliveros INTA. Trabajo presentado en el IX Congreso Nacional de Maíz, Simposio Nacional Sorgo 2010.

Milera, S; Crotti, C. s. f. Implementación del modelo Cropsyst para la simulación del rendimiento del cultivo del maíz en una región de Argentina (en línea). Santa Fe, AR, Centro de Investigación, Observación y Monitoreo Ambiental. Consultado 20 ago. 2014. Disponible en <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo4/archivos/milera2.pdf>.

OSU (Oregon State University, US); College of Agricultural Sciences. 2015. Tradeoff Analysis Project (en línea). Corvallis, Oregon, US. Consultado 12 jun. 2014. Disponible en <http://tradeoffs.oregonstate.edu>.

Raes, D; Steduto, P; Hsiao TC; Fereres E. 2012. AquaCrop Version 4.0 Reference Manual. Chapter 2: Users Guide (en línea). Roma, IT, FAO, Land and Water Division. Consultado 25 jun. 2015. Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Chapter2.pdf>.

Ritchie, J; Singh, U; Godwin, D; Hunt, L. s. f. A User's Guide to CERES Maize - V2.10 (en línea). Muscle Shoals, Alabama, US, International Fertilizer Development Center. Consultado 30 may. 2014. Disponible en http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnabu271.pdf.

Rivera Peña, M; Amézquita Collazos, E. 2003. Evaluación del modelo de simulación CERES-maize aplicado a una variedad de maíz en oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia (en línea). *Revista Acta Agronómica* 52 (1-4):39-44. Consultado 24 jun. 2014. Disponible en <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/44322/48486-237085-1-SM.pdf?sequence=1>.

Rosegrant, MW; Ringler, C; Msangi, S; Sulser, TB; Zhu, T; Cline, SA. 2008. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT). Model Description (en línea). Washington, DC, US, IFPRI. Consultado 25 jun. 2015. Disponible en <http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/impactwater2012.pdf>.

Steduto, P; Raes, D; Hsiao, TC; Fereres, E; Heng, L; Izzi, G; Hoogeveen J. 2008. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A, No. 80*, p. 285-292.

Stöckle, CO; Donatelli, M; Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18(3-4):289-307. *Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications*.

Texas A&M University. 2015a. APEX: Documentation (en línea). College Station, TX, US. Consultado 26 jun. 2015. Disponible en <http://apex.tamu.edu/documentation/>.

_____. 2015b. ArcAPEX: ArcGIS-ArcView extension and graphical user input interface for APEX (en línea). College Station, TX, US. Consultado 26 jun. 2015. Disponible en <http://apex.tamu.edu/software/>.

_____; Texas A&M Agrilife Research. 2015a. EPIC & APEX models: Models executables (en línea). College Station, TX, US. Consultado 26 jun. 2015. Disponible en <http://epi-capex.tamu.edu/model-executables/>.

_____; Texas A&M Agrilife Research. 2015b. EPIC & APEX models: Workshop request (en línea). College Station, TX, US. Consultado 26 jun. 2015. Disponible en <http://epi-capex.tamu.edu/workshop-request/>.



_____. Texas A&M AgriLife; Blackland Research and Extension Center. 2014. Environmental Policy Integrated Climate Model: User's Manual version 0810 (en línea). College Station, TX, US. Consultado 26 jun. 2015. Disponible en <http://epicapex.tamu.edu/files/2014/10/EPIC.0810-User-Manual.pdf>.

The R Foundation. s. f. The R journal (en línea). Consultado 2 jul. 2015. Disponible en <http://journal.r-project.org/>.

_____. s. f. The R project for statistical computing (en línea). Consultado 2 jul. 2015. Disponible en <http://cran.r-project.org/doc/FAQ/> y en <http://www.r-project.org/>.

Thorp, K; DeJonge, K; Kaleita, A; Batchelor, W; Paz, J. 2008. Methodology for the use of DSSAT models for precision agriculture decision support. *Computers and Electronics in Agriculture* 64(2008):276-285. Consultado 2 jul. 2015. Disponible en <http://www.journals.elsevier.com/computers-and-electronics-in-agriculture>.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change, DE). s. f. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change: AgroMetShell (en línea). Bonn, DE. Consultado 27 jun. 2014. Disponible en http://unfccc.int/adaptation/knowledge_resources/databases/items/5308txt.php.

University of Michigan, US. 2015. ArcGIS Online at the University of Michigan (en línea). Michigan, US. Consultado 20 may. 2014. Disponible en <http://www.lib.umich.edu/clark-library/gis-at-umich/arcgis-online>.

VU University Amsterdam, NL; IVM (Institute for Environmental Studies, NL). s. f. Download STREAM (en línea). Amsterdam, NL. Consultado 20 may. 2014. Disponible en <http://www.ivm.vu.nl/en/projects/Projects/spatial-analysis/stream/Downloads/index.asp>.

Wageningen University. Plant Production Systems Group. 2012. LINGRA-N a grassland model for potential, water limited and N limited conditions (FORTRAN) (en línea). Wageningen, NL. Consultado 21 ago. 2014. Disponible en <http://models.pps.wur.nl/content/lingra-n-grassland-model-potential-water-limited-and-n-limited-conditions-fortran>.

Wageningen UR. s. f. Plant Production Systems Group (en línea). Wageningen, NL. Consultado 21 ago. 2014. Disponible en <http://www.pps.wur.nl/UK/>.

_____. s. f. WOFOST - World Food Studies (en línea). Wageningen, NL. Consultado 21 ago. 2014. Disponible en <http://www.wageningenur.nl/en/Expertise-Services/Research-Institutes/alterra/Facilities-Products/Software-and-models/WOFOST.htm>.

WSU (Washington State University, US); Biological Systems Engineering Department. 2015. CropSyst (en línea). Pullman, Washington, US. Consultado 23 jul. 2015. Disponible en http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/manual/index.htm y en http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/index.html.



V. Glosario¹²

Aerosol. Conjunto de partículas en suspensión en el aire. Este término se ha asociado incorrectamente al propelente utilizado en los “vaporizadores de aerosol” (IPCC 1997).

Algoritmo. Los diferentes problemas que trata el cálculo numérico son en sí procedimientos de aproximación que consisten en sucesiones de cálculos. Estos procedimientos se llaman algoritmos. Un algoritmo es un procedimiento que describe, sin ambigüedad posible, una sucesión finita de pasos que hay que realizar en un orden preciso, desde la introducción de datos hasta la obtención de resultados. Como medio para describir los algoritmos se usa un pseudocódigo que especifica tanto los datos de entrada, como el procesamiento que se les debe dar para obtener los resultados deseados, y también detalla la forma de salida de estos últimos. De ese modo, se puede esquematizar un algoritmo como sigue: ENTRADA PROCESO SALIDA (González s. f.).

Análisis numérico. Es una rama de las matemáticas que, mediante el uso de algoritmos iterativos (es decir, que se repiten o reiteran), obtiene soluciones numéricas a problemas en los cuales la matemática simbólica o analítica resulta poco eficiente y, en consecuencia, no puede ofrecer una solución. Estos algoritmos son llamados métodos numéricos. Se componen de un número de pasos que se ejecutan de manera lógica, desde el punto de vista de la coherencia matemática, mejorando sucesivamente las aproximaciones iniciales a cierta cantidad, tal como la raíz de una ecuación, hasta llegar al punto en que se alcanza cierta cota o nivel de error. Esta operación cíclica de mejora de un valor se conoce como “iteración” (Cortés et al. 2011).

Otra definición señala que el análisis o cálculo numérico es la rama de las matemáticas que estudia los métodos numéricos de resolución de problemas; es decir, los métodos que permiten obtener una solución aproximada (en ocasiones exacta) del problema considerado, tras realizar un número finito de operaciones lógicas y algebraicas elementales. Los problemas que trata el análisis numérico se pueden clasificar en dos grandes grupos, según tengan naturaleza numérica (finito-dimensional) o funcional (infinito-dimensional). En el primer grupo están los pro-

blemas relativos a la resolución de sistemas de ecuaciones lineales, cálculo de valores y vectores propios y resolución de ecuaciones y sistemas de ecuaciones no lineales. En el segundo grupo se encuentran los problemas de interpolación y aproximación de funciones, la derivación e integración numérica, los problemas de valor inicial y de contorno para ecuaciones diferenciales ordinarias y los problemas de contorno para ecuaciones en derivadas parciales. El desarrollo del análisis numérico como disciplina con entidad propia ha ido indisolublemente ligado a la vertiginosa evolución en la capacidad de procesamiento de las computadoras y la informática, habiéndose convertido en la actualidad en recursos imprescindibles para aquel, dado que le permiten aplicar con eficacia gran parte de los métodos propios del análisis numérico, debido al considerable volumen de cálculos y manipulaciones de datos que se requieren para cumplir con cada procedimiento de análisis (González s. f.).

Cambio climático. Modificaciones en el promedio del clima o la variabilidad de sus propiedades y que persiste por un período extenso de tiempo, normalmente por décadas o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos naturales internos, a forzantes externas o a cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra. No obstante, esta definición del IPCC difiere de la establecida por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), que define el cambio climático como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comparables de tiempo”. De esta manera, la UNFCCC diferencia el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica de la variabilidad climática atribuible a causas naturales (INECC 2010).

Clima. Se suele definir el clima como el “promedio del estado del tiempo” o, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante períodos de varios decenios (normalmente, tres decenios, según la defi-

12. Para consultar otros términos relacionados con esta temática, refiérase al glosario del IPCC (IPCC 2001). En la sección IV se brinda la información completa de las referencias bibliográficas.



nición de la Organización Meteorológica Mundial, OMM). Dichas cantidades son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento), aunque en un sentido más amplio, el “clima” es una descripción del estado del sistema climático (IPCC 1997).

Clúster. Es una súpercomputadora, compuesta por un número variable de servidores que trabajan en conjunto como un solo ordenador informático, con gran capacidad para almacenar y procesar datos. También se le denomina “cúmulo”, o “granja de computadoras”. A cada uno de los elementos del clúster se le conoce como “nodo” (UNAM 2003).

Formato ráster o de grilla. El formato ráster se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdillas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdillas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por tanto, cubre la totalidad del espacio, este hecho supone una ventaja fundamental, ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo (Universidad de Murcia 2006).

Forzamiento radiativo. Mide en términos simples la importancia de un posible mecanismo de cambio climático. El forzamiento radiativo es una perturbación del balance de energía del sistema Tierra-atmósfera (en $W m^{-2}$) que se produce, por ejemplo, a raíz de un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol; el sistema climático responde al forzamiento radiativo, de manera que se restablezca el balance de energía. Un forzamiento radiativo tiende, si es positivo, a calentar la superficie y, si es negativo, a enfriarla. El forzamiento radiativo suele expresarse como un valor medio mundial y anual. Una definición más precisa del forzamiento radiativo, tal como se emplea en los informes del IPCC, es la perturbación del balance de energía del sistema superficie-troposfera, dejando un margen para que la estratosfera se reajuste a un estado de equilibrio radiativo medio mundial (véase el capítulo 4 de IPCC 1994). Se denomina también “forzamiento del clima” (IPCC 1997).

Gas de efecto invernadero (GEI), gas de invernadero. Gas que absorbe radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación (radiación infrarroja) emitido por la superficie de la Tierra y por las nubes. El gas, a su vez, emite radiación infrarroja desde un nivel en que la temperatura es más baja que

en la superficie. El efecto neto consiste en que parte de la energía absorbida resulta atrapada localmente, y la superficie del planeta tiende a calentarse. En la atmósfera de la Tierra, los GEI son básicamente vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) y ozono (O_3) (IPCC 1997).

Herramientas de modelaje. Para los efectos de este documento, incluye todo tipo de modelos de simulación, individuales o compuestos, esquemas de modelos y software de representación de los resultados de la modelación, que ayudan a simular el comportamiento de sistemas reales, específicamente climáticos y agrícolas. Se trata de recursos de modelaje útiles para estudiar los efectos de la variabilidad y el cambio climático en las actividades productivas del sector, en particular en el comportamiento de los cultivos, según la escala o el horizonte temporal para el cual se desean aplicar y en función de las series de datos disponibles para las variables, sean climáticas, del cultivo, económicas, hidrológicas, y otras (definición elaborada por la autora con base en los criterios empleados en el desarrollo de este documento, según las especificaciones y los objetivos de este producto).

Incertidumbre. Expresión del nivel de desconocimiento de un valor o de una condición futura (como el estado futuro del sistema climático). La incertidumbre puede ser resultado de una falta de información o de desacuerdos sobre lo que se conoce o puede conocer. Puede tener muchos orígenes, desde errores cuantificables en los datos a conceptos o terminologías definidos ambiguamente, o proyecciones inciertas de conductas humanas. La incertidumbre se puede representar con valores cuantitativos (como una gama de valores calculados por varias simulaciones) o de forma cualitativa (como el juicio expresado por un equipo de expertos) (IPCC 2001).

Iteración. Método para resolver un problema mediante una serie de aproximaciones, que obtiene una solución más exacta utilizando la aproximación anterior como punto de inicio (Edu2000 America Inc. 2007).

Parametrización. En la modelización del clima o simulación climática, es una técnica empleada para representar aquellos procesos que no es posible resolver a la escala de resolución del modelo. Son procesos que suceden a escala subreticular, esto significa que su área es menor que la que cubre la grilla, celda o retícula sobre la que el modelo opera.



De allí que al parametrizar lo que se hace es agregar un algoritmo al programa del modelo, para que pueda describir lo que sucede en ese nivel de mayor resolución (IPCC 2001).

Respuesta de equilibrio. Respuesta, en estado estacionario, del sistema climático (o de un modelo climático) a un forzamiento radiativo impuesto (IPCC 1997).

Retroacción, retroalimentación (feedback). Se produce cuando una variable de un sistema desencadena cambios en otra variable que, a su vez, afectará en última instancia a la variable original; un efecto de retroacción positivo intensifica los efectos, y uno negativo los reduce (IPCC 1997).

Sensibilidad del clima. En los informes del IPCC, la sensibilidad del clima suele hacer referencia al cambio a largo plazo (en condiciones de equilibrio) de la temperatura media de la superficie mundial a raíz de una duplicación de la concentración de CO₂ (o de CO₂ equivalente) en la atmósfera. En términos más generales, hace referencia al cambio, en condiciones de equilibrio, de la temperatura del aire en la superficie cuando el forzamiento radiativo varía en una unidad (°C/W m⁻²). La “sensibilidad climática efectiva” es una medida relacionada con esto que sortea este requisito. Se evalúa a partir de una simulación para condiciones en evolución que no están en equilibrio. Es una medida de la fuerza de las respuestas en un momento determinado que pueden variar con el historial de los forzamientos y el estado climático (IPCC 1997, 2001).

Sistema climático. Sistema muy complejo que consiste de cinco componentes principales: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera, así como de las interacciones entre ellas. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna, debido a forzamientos externos (por ejemplo, erupciones volcánicas, variaciones solares y forzamientos inducidos por el hombre, tales como la composición cambiante de la atmósfera y el cambio en el uso de las tierras) (IPCC 2001).

Tiempo (atmosférico). Es el estado de la atmósfera en un lugar y momento determinados.

Tipos de sistemas y simulaciones. Hay distintos tipos de sistemas, que luego dan lugar a distintos tipos de simulación. Estos pueden ser continuos, discretos o una combinación de ambos, dependien-

do de cómo se comporten las variables que los integran. Los sistemas continuos responden a un intervalo de valores secuenciales. Un ejemplo de este tipo es la hora a lo largo de un día, en la que puede medirse un valor tras otro. En los sistemas discretos, las variables cambian en instantes separados en el tiempo; no existe una secuencia —entendida como un “conjunto de cantidades u operaciones ordenadas de tal modo que cada una está determinada por las anteriores” (RAE 2014e)— entre los datos, como en el caso anterior. Un ejemplo de este tipo es el número de días en un año que registran caída de nieve, que pueden ser 8, 11 o 22. En un sistema continuo, las variables no pueden ser medidas exactamente porque siempre hay otro valor potencialmente medible, entre dos valores conocidos. La mayoría de los modelos continuos emplea técnicas de análisis numérico (ver su definición en este glosario). Finalmente, la simulación discreta-continua combinada es útil para trabajar con sistemas que no son del todo discretos ni continuos, lo que hace necesario construir modelos híbridos que combinan ambos tipos (UTN s. f.).

Variabilidad climática. Está relacionada con las variaciones del estado promedio del clima en escalas temporales y espaciales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. Puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a procesos influenciados por fuerzas externas naturales o antropogénicas (variabilidad externa) (INECC 2010).

Variables. Estas pueden ser continuas, discretas o una combinación de ambas, dependiendo de cómo se comporten las variables dentro del sistema. En el primer caso, cambian de forma continua, como en un intervalo en el que siempre hay un valor en medio de otros dos valores. Un ejemplo de este tipo es la hora a lo largo de un día, en la que puede medirse un valor tras otro. La mayoría de los modelos continuos emplean técnicas de análisis numérico que son muy comunes en el estudio del clima. En los sistemas discretos, las variables cambian en instantes separados en el tiempo; no hay una secuencia —entendida como un “conjunto de cantidades u operaciones ordenadas de tal modo que cada una está determinada por las anteriores” (RAE 2014e)— entre los datos, como en el caso anterior. Un ejemplo de este tipo es el número de días en un año en que se registra caída de granizo, que pueden ser 5, 9 o 12. Una combinación de ambos tipos da lugar a sistemas discretos-continuos.





UNIÓN EUROPEA



Contáctenos

Proyecto EUROCLIMA-IICA

Por una agricultura sostenible con mayor capacidad para adaptarse y mitigar los efectos del cambio climático

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

Sede Central. San José, Vázquez de Coronado,

San Isidro 11101-Costa Rica, América Central

Apartado 55-2200

Teléfonos:+ (506) 2216-0188 / 2216-0194

Fax: (506) 2216-0233

