

CAMBIO CLIMÁTICO

ARTÍCULO ORIGINAL

El modelo WEAP: una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático

WEAP model: hydrological planning tool for climate change adaptation

Ing. Guillermo Hervis-Granda^I, Dr.C. Tatiana Geler-Roffe^{II}, Ing. Rosmely Díaz-García^{III} Dr. Iban Amestoy^{IV}, M.Sc. Ezio Cretaz^{IV}

^IUniversidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Marianao, La Habana, Cuba.

^{II} Instituto de Geografía Tropical, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana, Cuba.

^{III} Instituto Nacional de Ciencias Agropecuarias, Los Palacios, Pinar del Río, Cuba.

^{IV} Join Research Centre, Unión Europea, Ispra, Italia.

RESUMEN. La sostenibilidad de la agricultura cubana enfrenta grandes desafíos frente a un horizonte de menor disponibilidad de agua debido a la disminución de las precipitaciones pronosticadas por los efectos de la variabilidad y el cambio climático para Cuba. Este trabajo es un primer acercamiento a la aplicación del modelo WEAP como una herramienta para el apoyo a la toma de decisión en la gestión integral de los recursos hídricos en el municipio Los Palacios, en el occidente de Cuba, resaltando sus potencialidades en apoyo a la adaptación al cambio climático del sector agropecuario local. Se generaron con WEAP los modelos conceptuales de las cuencas presentes en el municipio, San Diego, Los Palacios y Bacunagua; los cuales alimentan a un modelo general que visualmente es agregado pero en sus bases de datos conserva el enfoque de desagregado por usuario y por grupo de cultivos y permite tratar a estas cuencas como un sistema, ya que la infraestructura hidráulica que las conecta funciona como una sola cuenca. El modelo conceptual generado de la gestión del agua en este municipio bajo el enfoque de planeamiento hidrológico tiene como particularidades principales que la variación de la demanda se analiza a nivel mensual y permite describir los calendarios de siembra de los cultivos y las prácticas particulares de los productores, permite el análisis del escurrimiento por subcuencas y estimar los escurrimientos no regulados, las pérdidas de agua por conducción de los sistemas y la posibilidad del reuso de agua dentro de las zonas de riego.

Palabras clave: modelo conceptual, gestión de agua, cuenca hidrológica.

ABSTRACT. Sustainability of Cuban agriculture faces great challenges in a lower water availability horizon due to the decrease in rainfalls by the effects of variability and climate change for Cuba. This work is a first approach to the application of WEAP model as a tool to support decision making in the integrated management of water resources in the municipality of Los Palacios, in western Cuba, highlighting its potential in support of the adaptation to climate change of the local agricultural sector. The conceptual models of the basins in the municipalities San Diego, Los Palacios and Bacunagua, were generated with WEAP, which feed a general model that is visually aggregated but in its databases retains the disaggregated approach per user and per group of crops and allows these basins to be treated as a system, since the hydraulic infrastructure that connects them works like a single basin. The generated conceptual model of water management in this municipality under the hydrological planning approach has as main features that the variation of demand is analyzed on a monthly basis and allows to describe the sowing calendars of the crops and the particular practices of the farmers, and also the analysis of runoff by sub-basins and estimate unregulated runoff, water losses by conduction in the systems and the possibility of water reuse within the irrigation zone.

Keywords: conceptual model, water management, hydrological basin.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han vivido períodos de sequías que han afectado grandemente a la agricultura cubana; esta situación se agravará frente a un horizonte de menor disponibilidad de agua debido a la disminución de las precipitaciones pronosticadas por los efectos de la variabilidad y el cambio climático para Cuba (Planos, 2014). Ante este escenario es una necesidad vital la previsión de los impactos de este fenómeno en la natural disponibilidad de los recursos hídricos para poder tomar acciones que garanticen la sostenibilidad de nuestra agricultura, principal consumidor del agua en el país.

La sostenibilidad a largo plazo de la agricultura frente a los impactos del clima futuro, es un tema de máxima prioridad para las instituciones y gobierno cubano, lo cual quedó explícito desde la aprobación por el Parlamento Cubano en diciembre de 2009 del “Programa de Enfrentamiento al Cambio Climático” (PECC) a partir del cual se elaboró por el Ministerio de la Agricultura el “Programa de Enfrentamiento al Cambio Climático para el Sector Agropecuario y Forestal”. En estos planes se describe la estrategia de adaptación haciendo énfasis en la protección y uso racional de los recursos hídricos y de los suelos así como se definen las estrategias del sector agropecuario para la evaluación y el enfrentamiento a este fenómeno. Entre esos impactos, se pueden mencionar la disminución de la disponibilidad y calidad del agua para la producción agrícola, el aumento del nivel del mar y su efecto sobre áreas forestales y agrícolas y la degradación de los suelos. Estos programas se encuentran en estos momentos en fase de actualización a partir de la llamada “Tarea Vida” (CITMA, 2017) que constituye el Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático.

Una de las experiencias que se han desarrollado con éxito desde el año 2013 en Cuba en apoyo al proceso de adaptación al cambio climático, es el proyecto de colaboración internacional BASAL (Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local), financiado por la Unión Europea (UE) y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) e implementado por la Agencia de las Naciones Unidas para el Desarrollo en Cuba (PNUD), la Agencia de Medio Ambiente y el Instituto de Geografía Tropical del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA) de Cuba. En cinco años de trabajo el proyecto BASAL, con la colaboración de diversas instituciones científicas cubanas y extranjeras, ha dado pasos importantes en la definición e implementación de medidas de adaptación del sector agropecuario cubano al cambio climático a escala local y nacional.

Entre los resultados de mayor impacto generados por el Proyecto BASAL, específicamente en su resultado 3, se encuentra la asimilación de herramientas de modelación como soporte a la toma de decisión en el sector de los recursos hídricos. Este trabajo se acerca a la aplicación del modelo WEAP (Water Evaluation And Planning) a las cuencas del municipio Los Palacios, como herramienta para la planificación y evaluación de la disponibilidad de los recursos hídricos. Se presentan los resultados de los diagnósticos de usuarios y demanda de agua del municipio y se resaltan las potencialidades de los resultados de la modelación en apoyo a la adaptación al cambio climático del sector agropecuario local.

MÉTODOS

Área de intervención

El municipio Los Palacios es uno de los municipios pilotos donde actúa el proyecto BASAL, éste se encuentra enmarcado en cuatro cuencas superficiales: San Diego, Los Palacios, Bacunagua y Herradura. En cada uno de los ríos principales existen embalses, por orden de las cuencas enunciadas se encuentra: La Juventud, Los Palacios, Bacunagua y Herradura. Según el INRH (2015), estos embalses pueden llegar a almacenar un total de 281,08 millones de metros cúbicos. Además, el territorio cuenta con otras fuentes superficiales como Arroyos, Lagunas y Manantiales y con 3 microembalses: Pitirre I, Pitirre II y La Bija; estos permiten contar aproximadamente con 4 millones de metros cúbicos de agua adicionales.

El territorio cuenta con un conjunto de obras hidrotécnicas, formadas por tres tramos de canales magistrales: San Diego-Los Palacios, Los Palacios-Bacunagua y Herradura-San Diego y cuatro derivadoras, en la intersección de cada uno de los ríos con el canal magistral, que tienen como objetivo redistribuir las aguas desembalsadas a este canal (Figura 1).

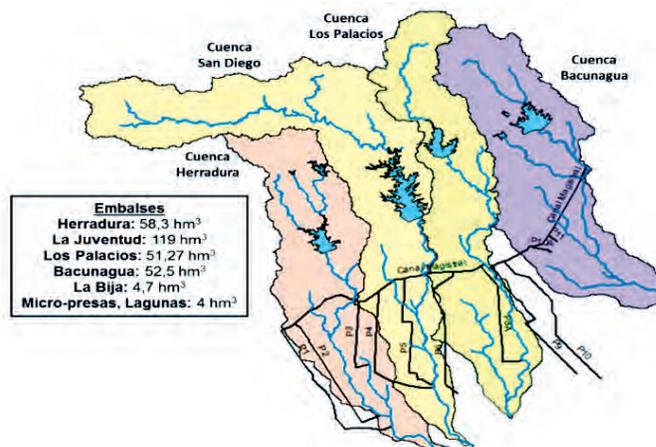


FIGURA 1. Esquema de las cuencas e infraestructura hidráulica que componen el Municipio de Los Palacios.

La actividad económica fundamental del municipio es la agricultura especializada en el cultivo del arroz, alto consumidor de agua. Con este coexisten otros cultivos de interés como: la caña de azúcar, los cultivos varios y el tabaco, principalmente. Otras actividades económicas como la producción pecuaria, la producción acuícola y las microindustrias, también requieren de los recursos hídricos para su desempeño pero en menor medida que los cultivos agrícolas. Por otro lado, se encuentra el consumo de la población y el de los ecosistemas acuáticos y costeros presentes en el municipio, para su preservación.

Diagnóstico del uso del agua en el Municipio Los Palacios

El diagnóstico partió de la recopilación de información relacionada con los diferentes usos y usuarios del recurso; en las diferentes cuencas fue levantada ésta información a través de trabajos de campos que comprendieron los años 2015 y 2016.

Los principales usuarios del agua del sector agropecuario y su demanda aproximada se muestran en la Tabla 1, ésta información fue obtenida a partir de los trabajos de inventario de los consumidores. Puede observarse como las unidades arroceras demandan 255 millones de metros cúbicos de agua,

aproximadamente el 91% de la capacidad de almacenamiento en los embalses del municipio; solamente la Empresa Arroceras Sierra Maestra demanda 94 millones de metros cúbicos anuales, equivalente al volumen de almacenamiento del mayor embalse del conjunto hidráulico.

TABLA 1. Consumo anual de agua de las principales entidades productivas

Empresa	Renglón productivo	Demanda anual
<i>UEBA Sierra Maestra</i>	Se dedica fundamentalmente al cultivo del arroz. Posee una pequeña área dedicada a cultivos varios.	94 millones
<i>EUBA Cubanacán</i>	Empresa arroceras. Posee una pequeña área dedicada a cultivos varios y a la producción pecuaria	70 millones
<i>EUBA Agrícola Vueltabajo</i>	Empresa arroceras. Posee una pequeña área dedicada a cultivos varios y a la producción pecuaria	55,7 millones
<i>EAM La Cubana</i>	Empresa agropecuaria militar. Se dedica fundamentalmente al cultivo del arroz, aunque posee pequeñas áreas de dedicadas a cultivos varios.	36 millones
<i>Empresa Cubaquivir</i>	Cuenta con 24 unidades productivas distribuidas espacialmente e todo el municipio. La empresa se dedica principalmente a cultivos varios. Posee unidades destinadas a la producción tabacalera y a la cría de animales de granja.	23,2 millones
<i>CAI 30 Noviembre</i>	Cuenta con 4 unidades productivas. La empresa se dedica principalmente a los cultivos varios. Posee áreas sembradas con caña de azúcar y pequeñas áreas sembradas de arroz para su autoconsumo.	9 millones
<i>UEB Alevinaje</i>	Producción y cría de peces de agua dulce con destino a los principales polos turísticos. Puede definirse como un usuario,	4 millones
<i>INCA</i>	Instituto Nacional de Ciencias Agrícola. En sus áreas cultivan las semillas de arroz que se emplean en todo el municipio.	2 millones

(Fuente: Levantamiento de consumidores de agua realizado por los autores.)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la demanda histórica de agua

La demanda de agua en el municipio Los Palacios, siempre supera los volúmenes disponibles en las fuentes, incluso para años con una disponibilidad alta. El arroz, el principal cultivo agrícola en el territorio demanda aproximadamente 15.000 m³ por cada hectárea de tierra cultivada y al ser un cultivo de alta importancia económica, la demanda aumenta anualmente por la necesidad creciente de producir más arroz para el autoabastecimiento de las necesidades nacionales. En los últimos años se han vivido episodios de escases de agua, dados por extensos y frecuentes períodos de sequía, unido a la deteriorada infraestructura de riego en las empresas arroceras por donde se pierden miles de m³ de agua. También ha aumentado la demanda de agua por razones como: la diversificación de la producción agrícola y la recuperación de tierras ociosas para sembrar alimentos de diverso tipo. Todo lo anteriormente expuesto implica un aumento de las tensiones en torno al agua, que se agravarán por la repercusión del cambio climático en la natural disponibilidad de los recursos hidráulicos.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la demanda de agua de la Empresa Agroindustrial de Granos del municipio Los Palacios para el período 2004-2017. En el gráfico puede observarse el aumento de la demanda hasta alcanzar su valor máximo en el año 2011 con una demanda de 550 millones de

m³; a partir de este año se nota una estabilización de la demanda que se reduce en un 50%.

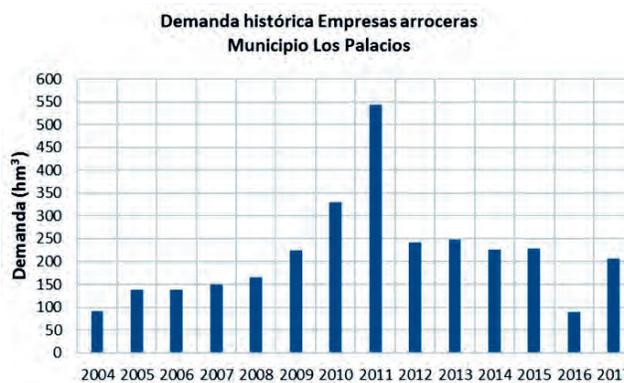


FIGURA 2. Comportamiento de la demanda de agua en el período 2004-2017 en las empresas arroceras de la Empresa Agroindustrial de Granos de Los Palacios. Fuente: Balances de Agua, GEARH Pinar del Río, 2004-2017.

Este comportamiento se debe a la disminución de la disponibilidad de los recursos hidráulicos a causa de eventos extremos de sequía como los vividos en los períodos 2011-2012 y 2015-2016. En la Figura 3 se muestran los volúmenes almacenados en los embalses del municipio en el período 2004-2016; en el gráfico puede apreciarse como los embalses de regulación hiperanual, se encuentran totalmente vacíos en varios momentos del período e incluso muchas veces por debajo de sus volúmenes muertos.

Estos gráficos son una muestra de la alta demanda de agua en el municipio Los Palacios y como los períodos de escases de agua han condicionado el cultivo de arroz en esta zona geográfica; al mismo tiempo sirve para enviar un mensaje de alerta sobre los retos que supone la planificación y gestión del agua en una zona donde aumentan las tensiones en torno al agua. En este escenario complejo, resulta útil contar con herramientas de modelación que faciliten el análisis de disímiles alternativas de manejo del agua para los planes de desarrollo existentes y futuros, lo que contribuirá a que estos últimos sean más realistas a partir del balance integral de la disponibilidad y la demanda.

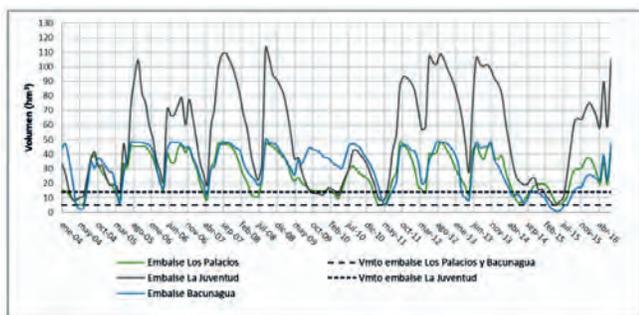


FIGURA 3. Volumen almacenado en los embalses del municipio Los Palacios en el período 2004-2016. Fuente: Boletines hidrológicos INRH, 2004-2016.

Herramientas de modelación de la gestión integral de los recursos hidráulicos

Los modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos facilitan el manejo adaptativo de la cuenca, a través del monitoreo y la revisión continuos de la situación de los recursos hídricos. Dichos modelos han sido enfocados en la comprensión de cómo fluye el agua a través de las cuencas en respuesta a los eventos hidrológicos (por ejemplo, simulaciones hidrológicas y/o hidráulicas) o de cómo distribuir el agua que queda disponible en respuesta a tales eventos (por ejemplo, simulaciones sobre manejo de recursos hídricos).

La mayoría de los modelos que trabajan en la línea del planeamiento y gestión de los recursos hídricos tienen acoplados un modelo hidrológico. Estos pueden estar presentes como modelos físicos o abstractos, los modelos físicos incluyen representaciones a escala reducida de un sistema, mientras que los modelos abstractos representan a los sistemas en forma matemática a través de ecuaciones que relacionan variables de entrada y salida que están en función del espacio y el tiempo.

La filosofía de trabajo de la mayoría de los modelos de planeamiento y gestión de los recursos hídricos es construir virtualmente una cuenca hidrográfica y traer a escena, a todos los recursos de la cuenca (río, embalses, lagunas, acuíferos, infraestructura de aprovechamiento) y cada uno de los usuarios del agua dentro de ésta (Hervis *et al.*, 2017 a). En su mayoría estas herramientas trabajan bajo la consideración de escenarios, estos permiten analizar un amplio rango de temas e incertidumbres a las que se ven enfrentados los planificadores de los recursos hídricos. Entre estas incertidumbres pueden citarse: análisis de disímiles políticas de manejo del agua en la cuenca,

proyecciones de demanda, regulaciones ambientales, cambio de uso de la tierra y escenarios climáticos disímiles.

Modelo WEAP (Water Evaluation And Planning system)

El modelo WEAP, fue creado en 1988 por Jack Sieber, con el patrocinio de Stockholm Environment Institute (SEI). Es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua, que opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas. El modelo se distingue por integrar a la simulación componentes naturales (demandas por escorrentía, flujo base) y componentes humanos (demanda humana, embalses).

WEAP permite la planificación de recursos hídricos balanceando la disponibilidad de agua y la demanda. La disponibilidad de agua es analizada a partir de módulos físicos hidrológicos a escala de subcuenca (ríos, arroyos, manantiales, embalses, aguas subterráneas, etc.) y la demanda es analizada a partir del distribución espacial y temporal de los consumidores con diferentes niveles de prioridades (Sieber y Purkey, 2007).

El modelo hidrológico integrado en WEAP es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo. Un modelo cuasi físico unidimensional, con dos receptáculos de balance de agua para cada tipo de cobertura/uso de suelo, reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los valores de cada una de estas áreas se suman para obtener los valores agregados en una subcuenca. En cada tiempo de corrida del modelo, WEAP calcula primero los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos y acuíferos asociados. La distribución de agua se realiza para el mismo tiempo de corrida, donde las restricciones relacionadas con las características de los embalses y la red de distribución, las regulaciones ambientales y a la vez las prioridades y preferencias asignadas a diferentes puntos de demanda son usadas como condiciones de operación de un *algoritmo de programación lineal* que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible (Sieber y Purkey, 2007).

Aplicaciones del modelo WEAP

El grupo de Modelación de Agua y Prácticas Agrícolas (MASPA) del Proyecto BASAL, ha trabajado en dos aplicaciones del modelo WEAP como herramienta para la adaptación al cambio climático en el sector agropecuario. Los modelos tratan de complementar las necesidades de los usuarios de la gestión y demanda de agua en el Municipio Los Palacios, el Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (GEARH) y el Ministerio de la Agricultura (MINAG), respectivamente. Se presentan dos aplicaciones con enfoques de modelado diferentes, que presentan puntos en común y logran abarcar gran parte de los problemas en torno a los recursos hí-

dricos que se presentan en el Municipio Los Palacios. El *modelo para el estudio de la disponibilidad de agua* que realiza una modelación biofísica del balance de agua en la cuenca, mientras que el modelo para la *planificación hidrológica* realiza una modelación de disponibilidad y demanda en base a un balance simplificado.

En este trabajo solo se presenta la aplicación para la planificación hidrológica, aunque las potencialidades de ambas aplicaciones como apoyo a la toma de decisión son similares.

Modelo para el planeamiento hidrológico

Modelos de las cuencas independientes, desagregadas por usuario y por grupo de cultivos, siguiendo la misma concepción del Balance de Agua que realiza el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Estos modelos se enfocan en el planeamiento hidrológico para la producción agropecuaria a escala local para un corto plazo, como apoyo a la ejecución de los balances de agua de cada cuenca hidrológica; aunque puede

perfectamente ser empleado para el estudio del planeamiento a mediano y largo plazo.

En la concepción de la aplicación se consideran las zonas agrícolas como un usuario que demanda un volumen que dependerá de los requerimientos netos de agua de los cultivos y su calendario de siembra, es decir, no se trata de una modelación biofísica del balance hídrico pues no se tiene en cuenta que parte de la demanda de agua puede ser cubierta por la precipitación; esta es la situación más desfavorable para el planeamiento, pues la satisfacción de la demanda de los cultivos dependerá únicamente de la disponibilidad en las fuentes de agua.

En la Figura 4 se muestran los Modelos Conceptuales de las cuencas San Diego, Los Palacios y Bacunagua; estos modelos conceptuales independientes alimentan a un modelo general que visualmente es agregado, pero en sus bases de datos conserva el enfoque de un modelo desagregado por usuario y por grupo de cultivos. El modelo general permite tratar a estas cuencas como un sistema, pues por la infraestructura hidráulica que las conecta funcionan como una sola cuenca.

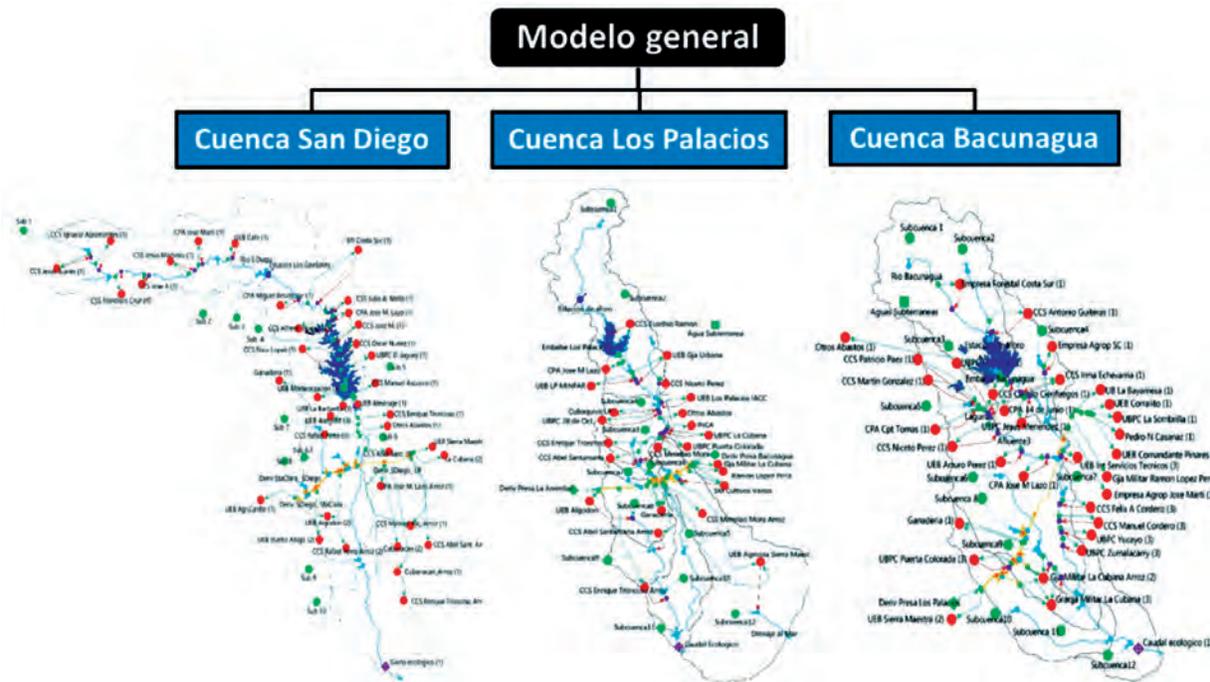


FIGURA 4. Concepción del modelo para el planeamiento hidrológico en Municipio Los Palacios. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5 se muestra el Modelo Conceptual de la Gestión del Agua en el municipio Los Palacios creado en WEAP para el enfoque de Planeamiento Hidrológico. En el esquema se encuentran representados los sitios de demanda agrícola (●) con diferentes prioridades en la asignación de agua¹, cada uno de los puntos rojos representa un usuario del agua identificado por el Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (GEARH). Aparecen en el esquema las subcuencas o

captaciones (●), que permiten generar los flujos hidrológicos² que pasan al río y están disponibles para la asignación a los usuarios. También están representados en el esquema los ríos principales y sus afluentes (→), los embalses y/o lagunas (▲), las derivaciones (→) desde el río hacia los canales magistrales de riego que abastece la zona sur de la cuenca, los flujos de retornos de los sitios de demanda (→) y las conducciones de los usuarios a las fuentes de suministro de agua (→).

¹ Las diferentes prioridades pueden observarse en la figura a través del número que aparece entre paréntesis en las etiquetas de los nombres de los sitios de demanda. Las prioridades son establecidas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, teniendo la máxima prioridad el abasto a la población y a la ganadería, la prioridad de las empresas agropecuarias es decisión de los gobiernos locales en función de la importancia económica de las producciones que desarrollan.

² Los flujos hidrológicos dentro de las subcuencas se generan a partir de las variables hidroclimáticas aportadas y dependen del método de balance hídrico seleccionado en este proceso.

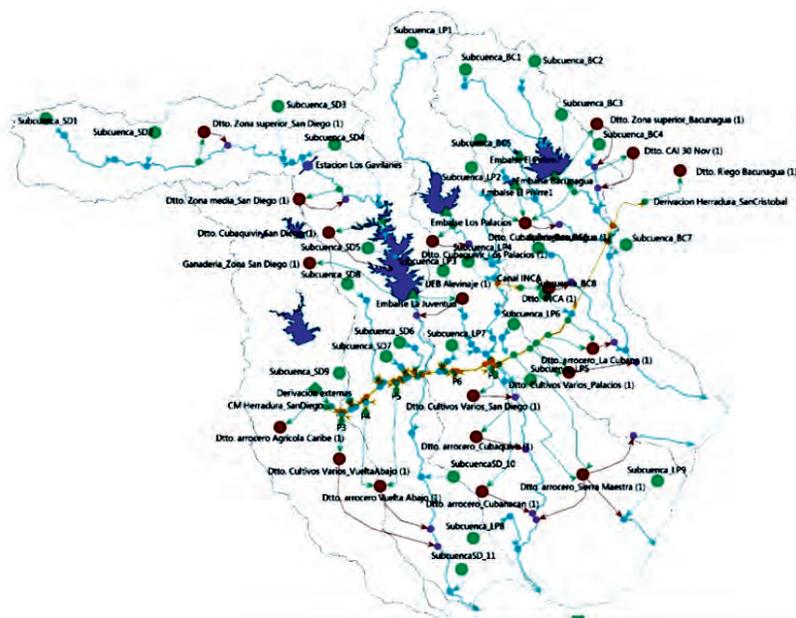


FIGURA 5. Modelo conceptual de la gestión del agua de Los Palacios creado en WEAP bajo el enfoque de Modelo para el planeamiento hidrológico.

Entre las particularidades que tiene este enfoque de modelo, puede resaltarse:

- Empleo de las normas netas de los cultivos según la *Norma 287/2015* (INRH, 2015) aprobada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- Variación de la demanda a nivel mensual, pudiendo describir los calendarios de siembra de los distintos cultivos y las prácticas particulares de los productores.
- El análisis detallado del escurrimiento por subcuencas permite estimar los escurrimientos no regulados, un reclamo de los planificadores del recurso en el país.
- Tiene en cuenta las pérdidas de agua por conducción y por la eficiencia de los sistemas de riego de cada una de las áreas agrícolas irrigadas.
- Tiene en cuenta el reuso de agua como medida de ahorro de agua dentro de las zonas de riego.

Implicaciones de los resultados en la toma de decisión

Son muchas las potencialidades de los resultados de WEAP como herramienta de planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático del sector agropecuario. Como modelo enfocado en escenarios, estas potencialidades pueden ser empleadas para analizar desde las situaciones más sencillas hasta las más complejas. A continuación, se hacen referencia a un grupo de implicaciones de los resultados potenciales de la herramienta en la toma de decisión (Adaptado de: Hervis *et al.*, 2017a, b).

- Los datos de entrada al modelo y los resultados generados en los procedimientos de cálculo, permiten contar con una base de datos de las demandas de agua, asignaciones del recurso y estado de las fuentes en un período histórico.
- WEAP permite confeccionar los balances de agua por usuarios, por cultivo agrícola y el balance general de la cuenca; identificando demanda neta y bruta, déficit en el suministro y nivel de cobertura de la demanda.

- El modelo permite estimar la disponibilidad del recurso agua actual y frente a escenarios climáticos diversos.
- WEAP permite optimizar y evaluar alternativas de la gestión del agua dentro de la cuenca, por solo citar algunos ejemplos: trasvases de agua, uso de fuentes alternativas, restricción de uso de fuentes o infraestructura de aprovechamiento en épocas del año, prácticas de ahorro, entre otros.
- La implementación del modelo permite evaluar y trazar las proyecciones de demanda teniendo información de cómo impactan en el estado de las fuentes, revisando su recuperación y analizando distintas variantes de manejo del agua disponible.
- En el modelo pueden evaluarse diferentes reglas de operación de los embalses, que permitan apoyar la adaptación y resiliencia ante situaciones de estrés hídrico como la sequía hidrológica. El análisis de los resultados de WEAP permiten la anticipación, seguimiento y evaluación de la sequía hidrológica.
- En zonas agrícolas afectadas por baja disponibilidad, los resultados del modelo permitirían tomar decisiones como el aplazamiento del inicio de la siembra cultivo a la espera de una situación más favorable en la disponibilidad de los recursos hídricos, y en casos extremos decidir no sembrar o sembrar cultivos menos consumidores.
- Analizar calendarios de siembra de cultivos agrícolas y analizar estrategias de rotación de cultivos, todo en base a la sostenibilidad de éstos(as) en función de la disponibilidad de agua.
- Evaluar si los recursos hídricos disponibles en cualquier horizonte de planeación, permitirán sostener los niveles de demanda actual de la agricultura, su crecimiento e incluso cuestionar, en muchos casos, la permanencia de ciertos cultivos o en general de la agricultura como actividad económica a futuro.
- Las evaluaciones en WEAP permiten tener un estimado de los volúmenes de las fuentes en diferentes períodos de

planeamiento y su relación con el gráfico de explotación; además permiten evaluar la efectividad para garantizar la entrega de agua a los usuarios.

- A partir de los datos de índices de pérdidas en los sistemas de conducción y de riego, pueden estimarse las pérdidas de agua por campaña de siembra, y al estar declaradas espacialmente puede conocerse donde se producen. Esta información resulta útil para trazar estrategias para reducción de pérdidas en sistemas de riego, evaluar la influencia de una nueva tecnología en el balance de agua e identificar donde resulta más conveniente acometer labores de mantenimiento en sistemas de conducción.

Integración de los resultados de la modelación en WEAP con otros modelos

La integración de WEAP con otras herramientas de modelación permite complementar los análisis de la gestión del agua, a continuación se declaran algunas de las posibles integraciones y sus potencialidades.

Integración con modelo de corte agronómico, por ejemplo:

- Modelo CROPWAT (Smith *et al.*, 2002): La integración con este modelo permitiría evaluar el balance disponibilidad-demanda para la variación las normas netas de los cultivos esperados por los efectos del cambio climático, principalmente el aumento de la temperatura.
- Modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, Jones *et al.*, 2003): La integración con este modelo permitiría simular las necesidades de riego de un cultivo agrícola y al mismo tiempo conocer si desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso es posible suplir esta demanda.
- Plataforma BioMa (Biophysical Modelling Framework, BioMa, 2012): La integración con este modelo permitiría evaluar el rendimiento potencial de cultivos agrícolas bajo riego ante diferentes escenarios climáticos y estimar los volúmenes de agua disponibles para suplir las necesidades de estos cultivos.
- Integración con modelos de agua subterránea, por ejemplo:
- Modelo Modflow (Guigue y Franz, 1996): La integración con este modelo permite el análisis de la interacción del agua superficial y subterránea, además de mejorar los resultados del balance de aguas subterráneas en la gestión del agua.
- Integración con modelos de calidad del agua, por ejemplo:
- Modelo QUAL2K (Chapra *et al.*, 2003): La integración con este modelo permite analizar la calidad del agua en la gestión de los recursos hídricos, su implicación para otros usuarios y el rastreo de contaminantes en el área. Una aplicación de gran valor práctico de la integración de estos modelos resulta la repercusión que tienen las aguas residuales de las labores agrícolas en los ecosistemas acuáticos (por ejemplo: manglares) o en otros usuarios aguas debajo de éstas.
- Integración con otros modelos hidrológicos y de gestión de los recursos hídricos, por ejemplo:
- Modelo hidrológico SWAT (Arnold *et al.*, 1994): Aunque ambos modelos se emplean para el planeamiento de los recursos hídricos, SWAT posee mayor fortaleza como modelo espacial y permite simular mejor la relación lluvia-escurrimiento a nivel de subcuencas que el modelo hidrológico de WEAP.

Sin embargo, SWAT no tiene en cuenta la gestión del agua, pues no es un modelo de optimización, por tanto, la integración permite emplear las fortalezas de este y emplearlas en WEAP de forma indirecta.

- Modelo de gestión HEC-PRM (Wurbs, 1993): Este posee altas prestaciones para la optimización de la operación de embalses simples con la posterior simulación de la operación en el modelo HEC-ResSIM. Aunque WEAP de igual forma permite analizar la operación de embalses simples, el modelo HEC-PRM es más completo en este tipo de análisis por ser un modelo especializado en estos temas. Los resultados del modelo HEC-PRM pueden ser integrados en WEAP de forma indirecta.

CONCLUSIONES

- Son grandes los riesgos que sufre la sostenibilidad de la agricultura cubana ante la disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos y la creciente demanda del recurso agua para el incremento de las producciones. Los cambios esperados en el comportamiento de las precipitaciones, es una situación que agravará las tensiones en torno al agua en el municipio Los Palacios, por tanto el diseño de estrategias de adaptación es primordial para hacer de esta región vulnerable, una región cada vez más resilientes.
- En el logro de este propósito, el modelo WEAP se inserta como una excelente herramienta para el apoyo a la toma de decisión en la gestión integral de los recursos hídricos ante los desafíos del clima futuro. Las potencialidades de su uso para el trazado de estrategias de adaptación del sector agropecuario al cambio climático, apuntan a su robustez para resolver problemas concretos de la planificación de los recursos hídricos y la posibilidad de su implementación en otras cuencas del país.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto internacional "Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local", BASAL, que se ejecuta en Cuba desde el año 2013, con el financiamiento de la Unión Europea y la Agencia Suiza COSUDE, con el PNUD como Agencia Implementadora y con la participación de diversas instituciones nacionales del CITMA y el MINAG. Muchas gracias por el valioso apoyo a la investigación. También a los investigadores y especialistas siguientes: M.Sc. Elieser Mármol Fundora del Instituto de Geografía Tropical, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana, Cuba; Dra. Felicita González Robaina, Dra. Yoima Chaterlán Durruti, Dra. Teresa López Seijas, del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba; Dra. Rocio Vargas Castillejas del Cuerpo académico en Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable (UAT-CA-29), Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Tamaulipas (FIANS-UAT), Tampico, México y al Dr. Gerardo Sánchez-Torres Esqueda de la Asociación Ingenieros sin Fronteras México, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tampico, México, por la participación en la conformación de este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNOLD, J.; WILLIAMS, J.; SRINIVASAN, R.; KING, K. & GRIGGS, R. SWAT: *Soil and water assessment tool*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX. 1994. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf> [Consulta: 5 de abril de 2017].
- BASAL: *Proyecto BASAL. Informes y Resultados*, Publicado en Memorias Convención Ingeniería Agrícola 2016- Publicaciones BASAL, pp. 37, La Habana, Cuba, 2016, ISBN 978-959-285-034-7.
- BIOMA: *Biophysical Models Applications [en línea] 2012*, Disponible en: <http://bioma.jrc.ec.europa.eu/bioma/help/> [Consulta: mayo 15, 2012]
- CHAPRA, S.; PELLETIER, G. & TAO, H. QUAL2K: *A modeling framework for simulating river and stream water quality: Documentation and user's manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA. 2003. Disponible en: www.scrip.org/.../reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID [Consulta: 5 de abril de 2017].
- CITMA: Plan Nacional de Enfrentamiento al Cambio Climático. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. 2017. Disponible en: www.citma.gob.cu/ [Consulta: 5 de abril de 2017].
- GUIGUER, N. & FRANZ, T.: Visual Modflow (software). Waterloo Hydrogeologic Inc. Waterloo, Ontario, Canada. 1996. Disponible en: <https://www.waterloohydrogeologic.com/visual-modflow-flex/> [Consulta: 5 de abril de 2017].
- HERVIS, G. G.; T. LÓPEZ; R. VARGAS; J.C. ROLÓN; B.P. RUBIO; G. SÁNCHEZ: *Aplicación del modelo WEAP para la planificación hidrológica de la cuenca San Diego, Municipio Los Palacios, Provincia Pinar del Río, Cuba*, Investigaciones Actuales en Medio Ambiente, Vol. III, No. RN3, Editorial Pearson, México. 2017.
- HERVIS, G. G.; T. GELER; E. MÁRMOL; T. LÓPEZ; G. SÁNCHEZ: Reporte: Avances en la aplicación del modelo WEAP, como herramienta para la gestión integrada de los recursos hidráulicos. Ponencia en Congreso Internacional CUBAGUA 2017, I Taller de Gestión de Cuencas Hidrográficas, Editora Obras, La Habana, Cuba. 2017, ISBN: 978-959-247-156-6.
- INRH: *Boletín Hidrológico, Instituto Nacional de los Recursos Hidráulicos [en línea] 2015*, Disponible en: <http://www2.hidro.cu/documentos/boletines/> [Consulta: 5 de abril de 2017].
- INRH: Índices de consumo: Normas de riego netas totales para cultivos agrícolas, Anexos 1 y 2 [en línea] 2015, Disponible en: <http://www2.hidro.cu/documentos/boletines/> [Consulta: 5 de abril de 2017].
- JONES, J.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.; BOOTE, K.; BATCHELOR, W.; HUNT, L. & RITCHIE, J.: "The DSSAT cropping system model", *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265. 2003, ISSN: 1161-0301.
- SIEBER J. & D. PURKEY: *WEAP. Water Evaluation and Planning System user guide for WEAP21*. Stockholm Environment Institute, 219pp, U.S. Center. 2007. Disponible en: www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf [Consulta: 5 de abril de 2017].
- SMITH, M.; KIVUMBI, D. & HENG, L.: Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. In Deficit irrigation practices. 2002. Disponible en: <https://inis.iaea.org/Search/search> [Consulta: 5 de abril de 2017].
- Pardo, D. *Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo WEAP*. Tesis en opción al título de Ingeniero Civil, Departamento de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile 2009.. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2009/> [Consulta: 5 de abril de 2017].
- PLANOS, E. O.: *Síntesis Informativa sobre Impactos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba*, 26pp., Sello Editorial AMA, La Habana, Cuba, 2014, ISBN: 978-959-300-044-4.
- WURBS, R. A.: "Reservoir-system simulation and optimization models", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(4): 455-472. 1993, ISSN: 0733-9496.



Recibido: 27/11/2017.

Aprobado: 04/05/2018.

Guillermo Hervis Granda, Profesor, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Marianao, La Habana, Cuba,

Correo electrónico: ghervisg@cih.cujae.edu.cu

Tatiana Geler Roffe, Correo electrónico: ghervisg@cih.cujae.edu.cu

Rosmely Díaz García, Correo electrónico: ghervisg@cih.cujae.edu.cu

Iban Amestoy, Correo electrónico: ghervisg@cih.cujae.edu.cu

Ezio Cretaz, Correo electrónico: ghervisg@cih.cujae.edu.cu

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.