



ARTÍCULO ORIGINAL

<http://opn.to/a/8bZXD>

Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca San Diego ante escenarios de cambio climático

Evaluation of water resources in the San Diego basin in the face of climate change scenarios

Ing. Guillermo Hervis Granda^{*}, Ing. Luis Hiran Riverol Marrero¹, Dra. Rocío del Carmen Vargas Castilleja^{II}, Dr. Gerardo Sánchez Torres Esqueda^{III}, Dr.C. Carmen Duarte Díaz¹, Dr.C. Felicita González Robaina¹, Dr.C. Julián Herrera Puebla¹

¹ Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana. Cuba.

^{II} Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería, Tampico, Tamaulipas, México.

^{III} Ingenieros Sin Fronteras México, A.C., México.

RESUMEN. Las afectaciones potenciales más relevantes del cambio climático para el desarrollo de la agricultura se centran en el cambio en la precipitación y la temperatura, repercutiendo directamente en la disponibilidad de los recursos hídricos y en la demanda climática de los cultivos. Evaluar la vulnerabilidad de cuencas agrícolas ante el cambio climático resulta importante para implementar medidas de adaptación y mitigación para enfrentar los retos futuros. El modelo hidrológico de Temez, implementado en la herramienta EvalHid del Sistema de Soporte de Decisión para la planificación y gestión de los recursos hídricos AQUATOOL, fue calibrado a partir de la información histórica de los caudales medios mensuales en el río San Diego y combinados con modelos de cambio climático y escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, permitió evaluar la disponibilidad de agua en la cuenca San Diego, ubicada en la provincia de Pinar del Río, región occidental de Cuba. Para los escenarios de emisiones de gases de efecto RCP 4.5 y 8.5 W/m², se obtuvieron reducciones en los volúmenes medios mensuales del orden de -6 a -21%, en comparación con los valores medios históricos; sin que el aumento que se proyecta en los volúmenes medios mensuales resulte significativo como para compensar los déficits proyectados. Se estima que la mayor afectación en áreas de siembra de arroz, por baja disponibilidad de agua se produzca a finales de siglo (periodo 2075-2099), para el escenario de emisiones RCP 8.5 W/m² se producen las mayores afectaciones llegando a 1668 hectáreas de arroz, valor que representa el 38% de las áreas disponibles en la cuenca para la siembra del arroz.

Palabras clave: modelo hidrológico, disponibilidad de agua, clima, agricultura.

ABSTRACT. The most relevant potential impacts of climate change for the development of agriculture are focused on the change in precipitation and temperature, directly affecting the availability of water resources and the climatic demand of crops. Assessing the vulnerability of agricultural basins to climate change is important to implement adaptation and mitigation measures to face future challenges. The hydrological model of Temez, implemented in the EvalHid tool of the Decision Support System for the planning and management of water resources AQUATOOL, was calibrated based on the historical information of the average monthly flows in the San Diego River and combined with models of climate change and scenarios of greenhouse gas emissions, allowed to assess the availability of water in the San Diego basin, located in the province of Pinar del Rio, western Cuba. For the scenarios of emissions of gases of effect RCP 4.5 and 8.5 W / m², reductions were obtained in the monthly average volumes of the order of -6 to -21%, in comparison with the historical average values; without that the increase that is projected in the average monthly volumes is significant enough to compensate the projected deficits. It is estimated that the greatest impact in rice planting areas, due to low water availability occurs at the end of the century (period 2075-2099), for the scenario of RCP emissions 8.5 W / m², the greatest impact reaching 1668 hectares of rice, a value that represents 38% of the areas available in the basin for planting rice.

Keywords: hydrological model, water availability, climate, agriculture.*

*Autor para correspondencia: Guillermo Hervis Granda, e-mail: dptoriego12@iagric.cu

Recibido: 02/09/2018.

Aprobado: 15/03/2019.

INTRODUCCIÓN

La producción mundial de alimentos depende del agua, no sólo en forma de precipitación, sino también, en forma de recursos hídricos disponibles para el riego. De hecho, las tierras de regadío, que representan sólo un 18% de las áreas cultivables en el mundo, producen 1000 millones de toneladas de cereales al año, que representan aproximadamente la mitad del suministro mundial total; ello se debe a que los cultivos de regadío producen, en promedio, entre dos y tres veces más que los cultivos dependientes de la lluvia (Martínez, 2007).

En Cuba, la amenaza del cambio climático ha causado preocupación, debido que variables climáticas claves para el crecimiento de los cultivos como precipitación y temperatura, serán severamente afectadas e impactarán en la disponibilidad de los recursos hídricos para la producción agrícola (CITMA, 2015). Lo anterior enfatiza la importancia de estudiar la vulnerabilidad de cuencas agrícolas ante el cambio climático global, para implementar medidas de adaptación y mitigación para enfrentar los retos futuros.

Las afectaciones potenciales más relevantes para el desarrollo de la agricultura se centran en las variables climáticas como la temperatura y la precipitación, a distintas escalas de tiempo y en dependencia de la región. Según los modelos de cambio climático, el calentamiento global ocasionará notables modificaciones en el ciclo hidrológico, y muestran una previsible disminución en la precipitación y los escurrimientos (Martínez, 2007b).

La evaluación del impacto potencial del cambio climático en el ciclo hidrológico es uno de los principales temas de investigación en la comunidad hidrológica mundial, entre los que se pueden citar entre otros los trabajos de: Vansteenkiste *et al.* (2014; Montoya y Sánchez (2015; Vo *et al.* (2016). En la

revisión bibliográfica no se encontraron estudios sobre esta temática en el país y aunque en la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático según CITMA (2015), se ofrecen estadísticas de la reducción de los volúmenes de escurrimiento por regiones, la forma en la que se determinaron no se ajustan a la práctica mundial para este tipo de estudios (combinación de modelos hidrológico, modelos de cambio climático y escenario de emisiones de gases de efecto invernadero).

Como parte de los trabajos desarrollados en el municipio Los Palacios, Provincia Pinar del Río, en apoyo a la toma de decisión en el sector de los recursos hídricos y la agricultura según Hervis *et al.* (2017, 2018), el presente trabajo tiene como objetivo calibrar un modelo hidrológico para la cuenca San Diego, mediante el uso de la herramienta EvalHid, para evaluar la disponibilidad del agua ante escenarios de cambio climático a nivel de cuenca y evaluar a priori las afectaciones en el agua disponible para el riego.

MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

La cuenca San Diego, territorio en el que se centra esta investigación posee un área de 441,75 km², Limita al norte con la Cordillera de Guaniguanico, de donde nace su río principal, represado por el embalse La Juventud para uso en la acuicultura y para suplir la demanda de la agricultura. El área de aporte al embalse se estima en 280,85 km², integrada por 5 subcuencas.

En el río principal aguas arriba de la presa se encuentra la estación de aforo: Los Gavilanes, ubicada en las coordenadas 317.4° Norte y 252.9° Este, con un área tributaria de 157 km². La estación registra los caudales desde 1966 hasta la fecha del presente trabajo.

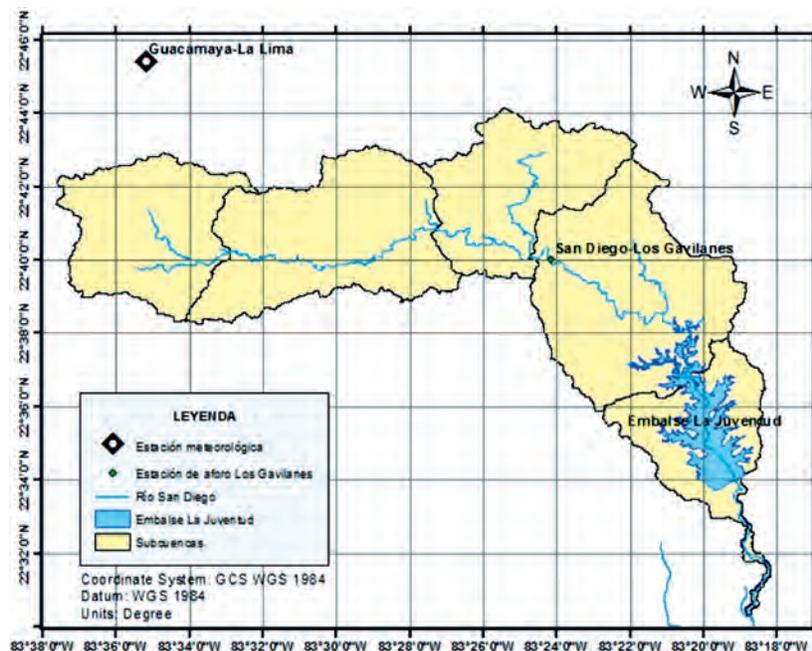


FIGURA 1. Representación de la parte superior de la cuenca San Diego, la red fluvial y el embalse La Juventud. Fuente: Elaborado a partir de la información generada por BASAL (2016).

La cuenca San Diego en su parte inferior es eminentemente agrícola, pues la mayor parte de las tierras son empleadas en la producción de alimentos, predominando el cultivo de arroz y en menor medida cultivos varios (hortalizas, granos, viandas). En la zona alta de la cuenca, predominan los bosques y vegetación natural, aunque existen pequeñas áreas dedicadas a la agricultura familiar.

Modelación hidrológica. Procedimiento en la herramienta EvalHid

El proceso de modelación hidrológica llevado a cabo con la herramienta EvalHid del Sistema de Soporte de Decisión para la planificación y gestión de los recursos hídricos AQUATOOL Solera (2015), comprende desde la construcción del esquema de la cuenca en el módulo SIMGES (Figura 2), su conexión con el módulo EvalHid, la entrada de datos (lluvia, temperatura y

evapotranspiración de referencia), la declaración de parámetros y finaliza con la calibración y validación del modelo hidrológico.

Se seleccionó como periodo de simulación los años desde 1978-2014, debido a la disponibilidad de datos para la calibración y validación del modelo hidrológico. Los procesos del ciclo hidrológico fueron simulados a nivel mensual.

La herramienta EvalHid tiene tres modelos hidrológicos que permiten evaluar la relación lluvia-escorrentimiento, de estos el modelo hidrológico implementado fue Témez (1977), que por su bajo número de parámetros es especialmente adecuado en cuencas con un número reducido de datos. El modelo hidrológico determina la escorrentía superficial realizando balances de humedad (lluvia-infiltración-evapotranspiración-escorrentimiento), para esto tiene en cuenta parámetros como: la capacidad máxima de almacenamiento del suelo y la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno en un mes. En estos parámetros se centra la calibración del modelo hidrológico.

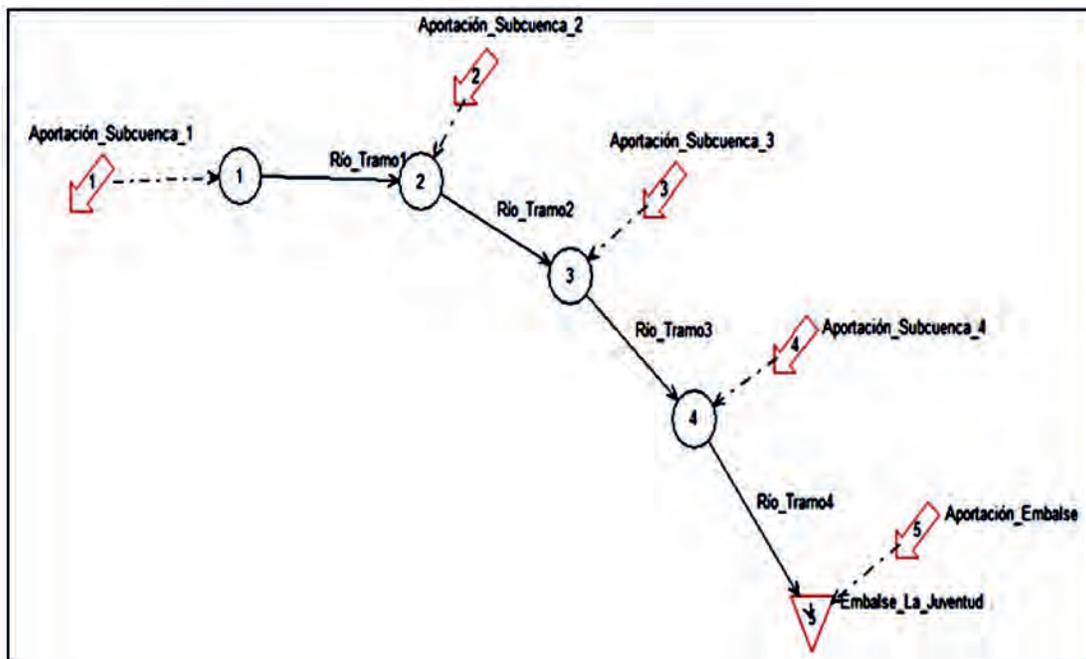


FIGURA 2. Esquema de la cuenca San Diego en el módulo SIMGES.

Calibración y validación hidrológica

La calibración del modelo se realizó para el periodo comprendido entre los años 1978-1997 y la validación del modelo se realizó para el periodo comprendido entre los años 2002-2014.

Para evaluar la bondad de ajuste de la calibración fueron calculados los indicadores estadísticos: índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y Sesgo o desviación relativa; descritos por las expresiones 1 y 2 respectivamente. El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe es un medidor estadístico, cuyo valor representa la correlación entre los datos observados y simulados, entre más cerca de 1 mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. El índice de Sesgo o desviación relativa representa la correlación entre los datos observados y simulados. Entre menor el porcentaje de Sesgo, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un Sesgo positivo indica

sobre estimación y un Sesgo negativo indica sub-estimación de caudales.

$$\text{Nash - Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Qo})^2} \quad (1)$$

$$\text{Sesgo} = 100 * [(\bar{Qs} - \bar{Qo}) / \bar{Qo}] \quad (2)$$

donde:

Q_{si} : Caudales simulados para cada paso de tiempo i ($m^3 s^{-1}$);

Q_{oi} : Caudales observados para cada paso de tiempo i ($m^3 s^{-1}$);

\bar{Qs} : Caudal medio simulado ($m^3 s^{-1}$);

\bar{Qo} : Caudal medio observado ($m^3 s^{-1}$);

n : número de pares de valores.

Para evaluar la interpretación del modelo de los procesos simulados se compararon los estadígrafos calculados con los criterios establecidos propuesto por Moriasi *et al.* (2007), presentados en la Tabla 1.

TABLA 1. Interpretación de los parámetros estadísticos para calibración y validación

Sesgo	Nash	Interpretación del modelo
Sesgo < ±10	0,75 < Nash < 1,0	Muy Bueno
±10 < Sesgo < ±15	0,65 < Nash < 0,75	Bueno
±15 < Sesgo < ±25	0,50 < Nash < 0,65	Satisfactorio
Sesgo > ±25	Nash < 0,50	No satisfactorio

Procesamiento del impacto del cambio climático en la precipitación y la temperatura

Para el procesamiento de la información de cambio climático se siguió la dinámica descrita por la Figura 3. Se emplearon los resultados del estudio de Fernández *et al.* (2015). Es importante resaltar que la climatología de referencia (variables climáticas históricas) utilizada para correr los modelos disponibles en el estudio de Fernández *et al.* (2015), se generó a partir de datos climáticos observados en el periodo 1961-2000, en más de 5000 estaciones del Servicio Meteorológico de México y para las regiones de Centroamérica y sur de Estados Unidos fue empleada la base climática estandarizada *WorldClim-Global Climate Data* (Hijmans *et al.*, 2005). Lo anterior permite el uso de la metodología para realizar predicciones que apliquen a Cuba.



FIGURA 3. Flujo de la información del impacto del cambio climático en la temperatura y la precipitación.

Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General del Océano y la Atmósfera constituyen una herramienta para explorar la posible evolución futura del clima en escenarios de cambio de las concentraciones de gases de efecto invernadero. En el presente estudio se emplearon los resultados de los modelos HADGEM2-ES, MPI-ES-LR y GFDL-CM3; modelos considerados como válidos por el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, según Camino *et al.* (2014), pues poseen un bajo error relativo.

Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero

Los escenarios son un estado probable del sistema climático ante uno o más tipos de forzamiento, según los expertos de cambio climático son el instrumento básico para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras de gases de efecto invernadero. Cualquiera que sea la forma de enfocar un escenario del clima, el lector debe entender que es simplemente la diferencia entre un clima futuro

condicionado por forzantes dadas y el clima actual o de una línea o estado base. Los escenarios empleados en este trabajo forman parte de la familia de escenarios denominada Vías de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés). El RCP 4.5 W/m² es un escenario de mitigación que considera una estabilización en las emisiones de gases de efecto invernadero a causa de la influencia de las políticas climáticas, y el RCP 8.5 W/m² es el mayor escenario radiativo que considera altas emisiones de gases de efecto invernadero en ausencia de políticas climáticas. Los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero probados permiten evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos para un comportamiento del clima futuro medio y otro extremo.

Anomalías de precipitación y temperatura

Las anomalías de precipitación y temperatura mensual (definidas como la variación de las variables respecto al clima

base) se encuentran en archivos Raster independientes, que contienen valores de reducción o de aumento de la lámina de precipitación mensual (en %) y de la temperatura máxima y mínima (en %), todas estas variables salidas de los resultados de las corridas de los Modelos de Circulación General. La información se encuentra disponible en formato espacial para los horizontes de planeación 2015-2039, 2045-2069 y 2075-2099 con resolución de 30" x 30" (aproximadamente 1 km x 1 km).

Climatología base y clima futuro

Con base en lo publicado por la Organización Meteorológica Mundial, según Williams (2014), se recomienda el uso del periodo climatológico 1981-2010 (30 años de registros), conocido como normales climáticas, esto debido a que representa el periodo donde el crecimiento de los gases de efecto invernadero se han disparado más rápidamente, por lo que permite realizar un análisis más confiable de eventos extremos y proyecciones futuras. El periodo de 30 años permite representar periodos húmedos, secos y normales. Las variables fueron afectadas

por las anomalías extraídas de cada combinación de escenario y modelo, obteniendo así el clima futuro para el periodo desde 2015-2100.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración y validación del modelo hidrológico de Témex

Al ingresarlos datos necesarios para la modelación, se realizaron corridas sucesivas del modelo ajustando parámetros hasta lograr una calibración. En este proceso se compararon los caudales medios mensuales disponibles en el río San Diego simulados por el modelo, con los registros de caudales medios mensuales observados en el periodo comprendido entre 1978 y 1997 (calibración) y 2002-2014 (validación). De este proceso se obtuvo la Figura 4 y 5 que muestra la similitud entre los caudales simulados por el modelo hidrológico de Témex (1977) y los caudales reales reportados en la estación de medición en ambos periodos de tiempo.

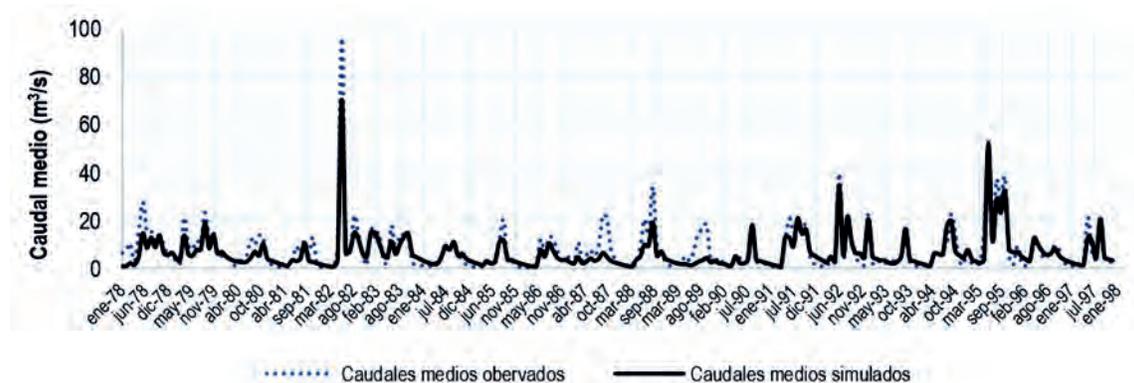


FIGURA 4. Caudales medios mensuales observados y simulados en el río San Diego en el periodo de calibración del modelo 1978-1997.

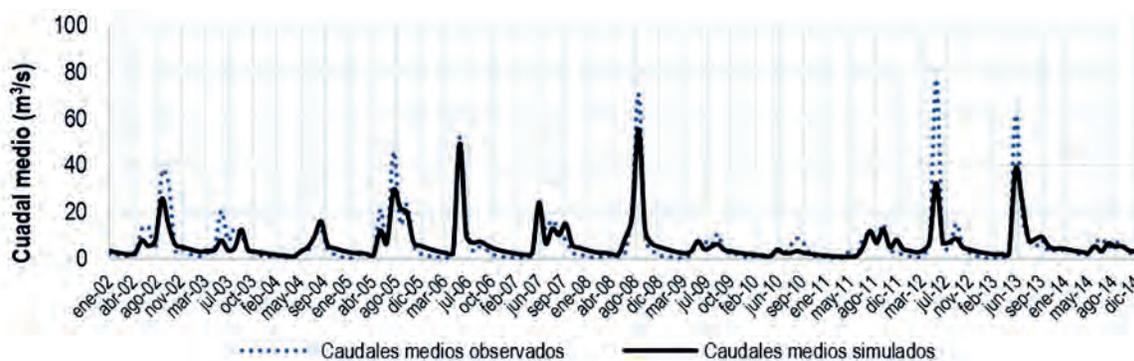


FIGURA 5. Caudales medios mensuales observados y simulados en el río San Diego en el periodo de validación del modelo 2002-2014.

El análisis estadístico entre los caudales medios mensuales simulados por el modelo hidrológico de Témex y los observados en la estación de aforo del río, permiten evaluar la bondad de ajuste del modelo a partir de los estadígrafos que se resumen en la Tabla 2 que incluyen: índice de Nash-Sutcliffe, la desviación relativa de los caudales o sesgo porcentual (BIAS) y el coeficiente de determinación de la regresión forzada al origen (R^2). Los estadígrafos calculados demuestran que la calibración del

modelo se encuentra entre muy buena y satisfactoria de acuerdo con estudios hidrológicos similares realizados en otras partes del mundo (Moriassi *et al.*, 2007).

El resultado de la regresión en ambos periodos (Figura 6) evidencia que existe una correspondencia aceptable entre caudales medios observados y simulados, la pendiente de la recta forzada al origen refleja una relación entre los valores simulados y observados de 0,77 y ajuste aproximado del 80%.

El modelo hidrológico es capaz de representar en buena medida los caudales medios mensuales en el periodo de calibración;

aunque existe una subestimación en los caudales mensuales en el orden de 12 %.

TABLA 2. Valores de los índices estadísticos del análisis del proceso de calibración y validación del modelo hidrológico del río San Diego

Índices estadísticos	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe	0,88	0,83
Sesgo	-12,34	-8,07
R ²	0,81	0,794

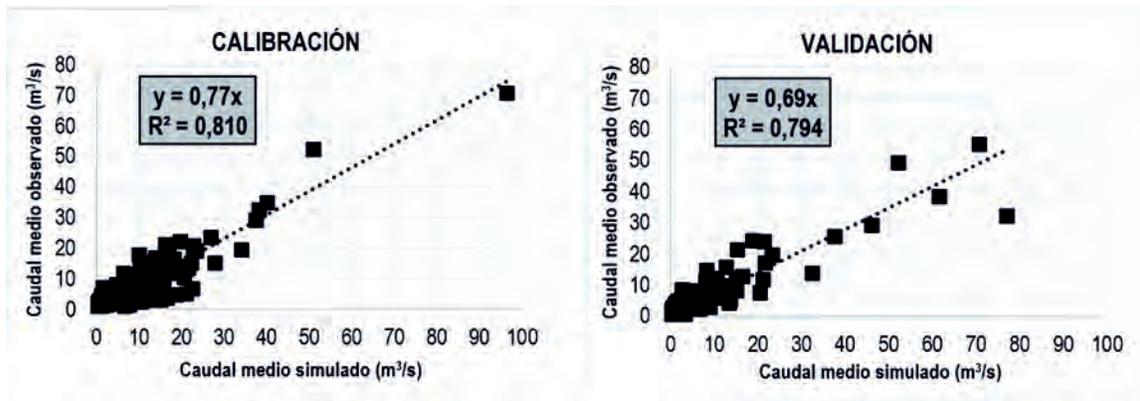


FIGURA 6. Regresión forzada al origen entre caudales medios observados y simulados en la calibración y validación del modelo hidrológico del río San Diego.

Los estadígrafos demuestran que, en el periodo de validación, el modelo hidrológico de Témez con los parámetros calibrados permite simular el 80% de los procesos hidrológicos reales que ocurren en el río San Diego, aguas arriba del embalse La Juventud; y por tanto se cuenta con un modelo que permite evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos ante escenarios de cambio climático.

Evaluación de los recursos hídricos para el escenario RCP 4.5 W/m²

En la Figura 7 se presentan la comparación entre los volúmenes medios mensuales por periodos para el clima base y para el clima futuro con un forzamiento radiativo de la atmósfera de 4.5 W/m², proyectado por los Modelos Globales de Cambio Climático (MGCC).

En el periodo 2015-2039 (Figura 7a) no existe variación significativa entre los volúmenes medios mensuales para el clima base y los obtenidos a partir de la información de los modelos HADGEM2-ES y GFDL-CM3. Sin embargo, con el modelo MPI-ESM-LR se evidencian la tendencia a la disminución significativa de los volúmenes medios mensuales disponibles para el riego en la zona de estudio.

En el periodo 2045-2065 (Figura 7b) puede observarse que entre los volúmenes medios mensuales para el clima base y los generados a partir de la información de los modelos HADGEM2-ES y GFDL-CM3, las diferencias son mínimas, manteniendo el comportamiento del periodo anterior. Sin embargo, con el modelo MPI-ESM-LR se aprecian cambios significativos de los volúmenes medios mensuales en el periodo húmedo, en los meses de julio a septiembre, respecto a los

volúmenes de igual periodo para el escenario de referencia.

En el periodo 2075-2099 (Figura 7c) puede observarse que no ocurren variaciones significativas en los volúmenes del periodo seco, sin embargo, los volúmenes medios mensuales en el periodo húmedo continúa alejándose del comportamiento medio, proyectando una considerable disminución del recurso agua. El modelo MPI-ESM-LR resulta el más severo, pues la anomalía de precipitación proyectada para el mes de Agosto (-14% respecto a la precipitación media mensual) implica una reducción de 4,72 millones de metros cúbicos en los volúmenes que están llegando al embalse La Juventud.

En la Figura 8 se presenta la variación de los volúmenes medios mensuales para el escenario RCP 4.5 W/m², tomando como criterio el promedio de los volúmenes de escurrimiento determinados con el clima futuro de los modelos HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

En el futuro cercano 2015-2039 (Figura 8a), se proyecta una variación de los volúmenes medios mensuales que recibirá el embalse entre +14,30% y -6,01%. En los meses desde julio a septiembre, claves para la regulación del escurrimiento como estrategia para compensar los déficits naturales del periodo seco del año y poder satisfacer con el agua embalsada las necesidades de riego de los cultivos de la zona, se proyectan reducciones promedio de 3,44 millones de m³, valor que representa una reducción del 5,8% del volumen medio para el clima base. A pesar de la variación de los volúmenes medios mensuales, la relativa compensación anual permite asegurar que, para el escenario y periodo analizado, la escasez o suficiencia de agua para afrontar a las necesidades del riego agrícola, estarán más condicionadas por el manejo el recurso y en menor medida por los efectos del cambio climático en la disponibilidad del recurso agua.

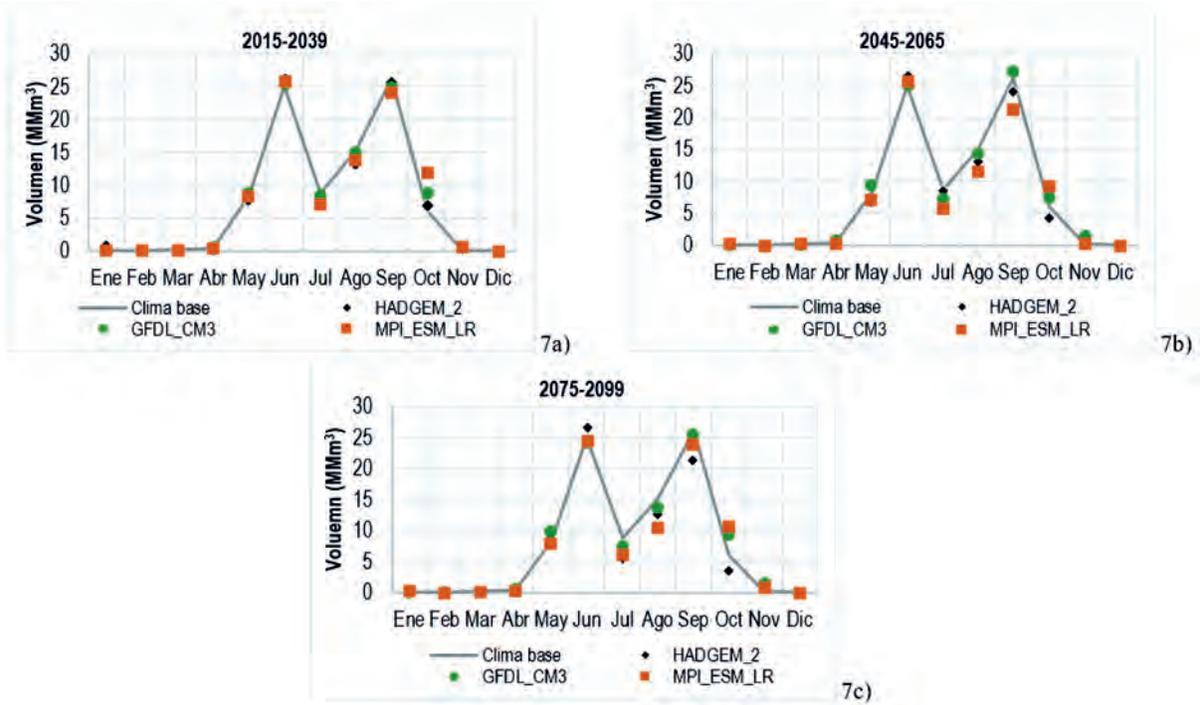


FIGURA 7. Comparación entre los volúmenes medios mensuales para el escenario de referencia y el escenario RCP 4.5 W/m² para los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR. 7a) Periodo 2015-2039, 7b) 2045-2065, 7c) 2075-2099.

En el futuro medio periodo 2045-2069 (Figura 8b), la variación de los volúmenes se proyecta entre +7,24% y -10,81%. Puede observarse que para los meses de enero a abril y en el mes de diciembre, no se aprecian diferencias significativas en la variación de los volúmenes, sin embargo, en el resto de los meses del año es evidente el incremento del impacto negativo

del clima futuro en la disponibilidad de los recursos hídricos. De acuerdo con los resultados se proyecta que se reduzcan los volúmenes medios mensuales en 6,2 millones de m³, valor que representa aproximadamente el doble en la reducción en el periodo anterior y un 10,81% del volumen medio para el clima base.

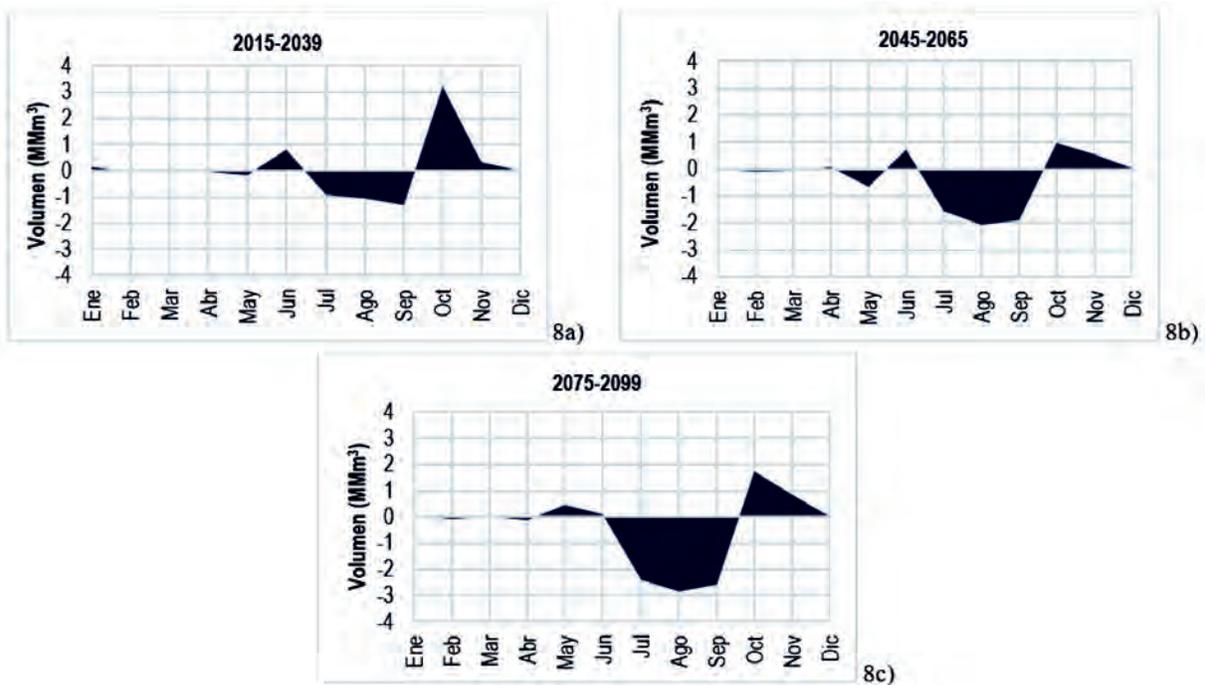


FIGURA 8. Variación de los volúmenes medios mensuales por periodos en función del escenario RCP 4.5 W/m². 8a) Periodo 2015-2039, 8b) 2045-2065, 8c) 2075-2099.

En el futuro lejano periodo 2075-2099 (Figura 8c), la variación de los volúmenes se proyecta entre +7,20% y -15,93%, tomando como criterio el promedio de los volúmenes determinados con el clima futuro dado por los tres modelos. Puede observarse que para los meses de enero a abril y en los meses de junio y diciembre, no se aprecian diferencias significativas en la variación de los volúmenes; sin embargo, se acentúa la disminución de la disponibilidad de agua en los meses desde julio a septiembre, respecto a iguales meses en los periodos 2015-2039 y 2045-2069. Las reducciones en los volúmenes medios mensuales en el periodo analizado se estiman en 7,8 millones de m³ (un 15,93% del volumen medio para el clima base).

Excepto en el periodo 2015-2039, en los periodos 2045-2065 y 2075-2099 es evidente la afectación del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos. Se observan tendencias claras a la disminución de los volúmenes de escurrimiento que llegan al embalse en el periodo húmedo y el aumento en el periodo seco; sin que se produzca una compensación de los volúmenes totales. Para este escenario de emisiones de gases de efecto invernadero es evidente la repercusión que tendría el clima futuro en la disponibilidad del agua el riego, de ahí que se imponga la necesidad de reforzar las medidas adaptativas para prever el proyectado déficit de agua.

Los resultados de las variaciones en los volúmenes medios mensuales no necesariamente deben coincidir con los que se obtendrían en futuras investigaciones de otras partes de Cuba y

el mundo, pues los procesos de escurrimientos difieren mucho incluso en la misma región climática y geográfica, sin embargo, sirven para valorar la fiabilidad y lógica de los resultados obtenidos. En este aspecto para el periodo 2015-2039 e igual escenario, Villazón *et al.* (2015), para Costa Rica, obtuvo una disminución de un 9% de los caudales medios mensuales para 2030, cercano al valor de reducción obtenido en esta investigación. De igual forma, se encuentran en el rango de -30% y 4% obtenidos por Velázquez *et al.* (2017), en una cuenca en el centro de México, mientras que Vargas *et al.* (2019), estiman un incremento en los escurrimientos del 4% considerando el modelo GFDL-CM3 para una región del noreste de Tamaulipas en México para el año 2041, fecha en que se considera alcanzar un incremento de temperatura global de 2°C. Sin embargo, al observar los escurrimientos mes a mes, los meses secos serán aún más áridos y los meses húmedos, como septiembre, el incremento es alrededor del 50%.

Evaluación de los recursos hídricos para el escenario RCP 8.5 W/m²

En la Figura 9 se presentan la comparación entre los volúmenes medios mensuales por periodos para el clima base y para el clima futuro con un forzamiento radiativo de la atmósfera de 8.5 W/m², proyectado por los Modelos Globales de Cambio Climático (MGCC).

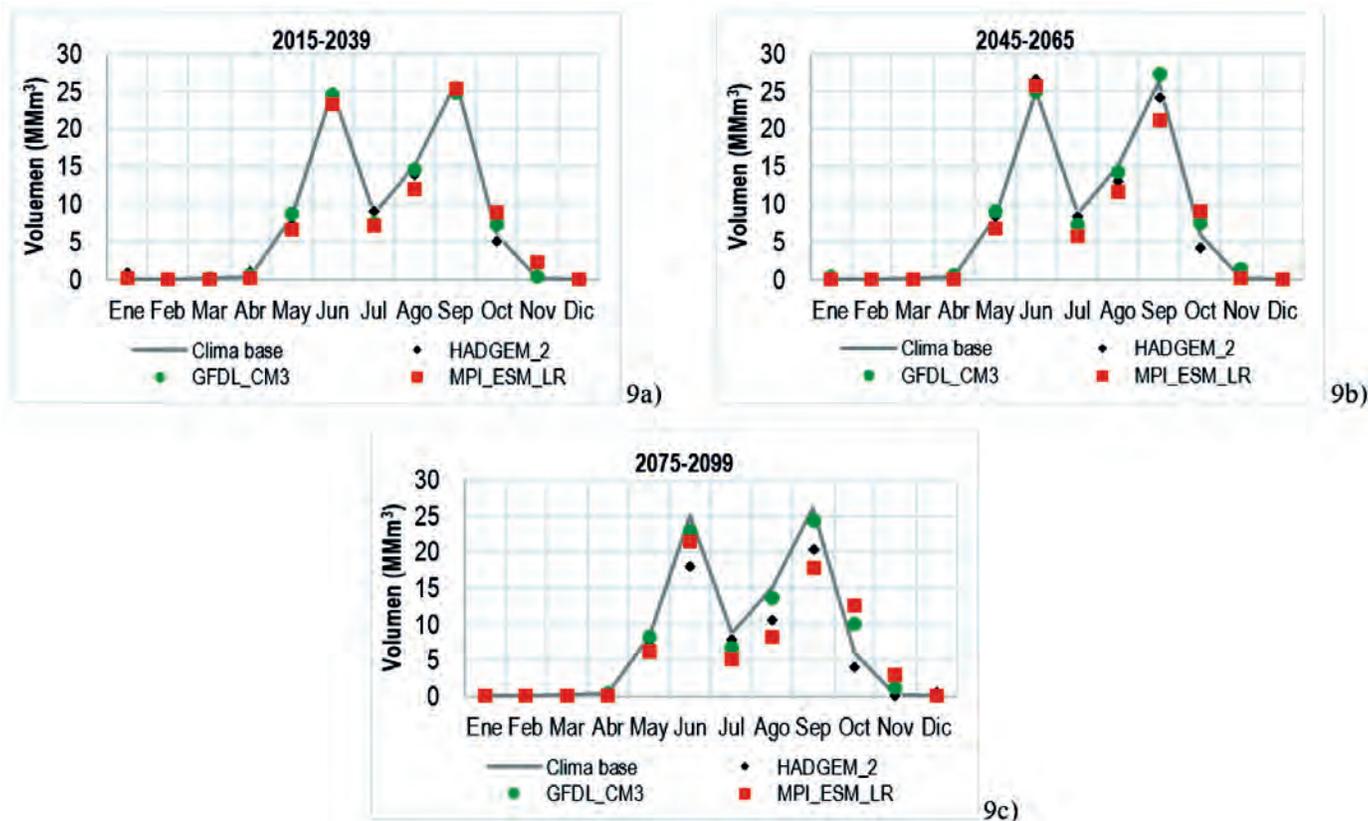


FIGURA 9. Comparación entre los volúmenes medios mensuales para el escenario de referencia y el escenario RCP 8.5 W/m² para los modelos HADGEM-2, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR. 9a) Periodo 2015-2039, 9b) 2045-2065, 9c) 2075-2099.

Similar a lo que sucede en el escenario RCP 4.5 W/m², en el escenario RCP 8.5 W/m² el modelo MPI-ESM-LR presenta una tendencia a la disminución significativa de los volúmenes medios mensuales disponibles para el riego en la zona de estudio en

comparación con los otros modelos (Figuras 9a, 9b y 9c). En el periodo 2075-2099 se presentan las mayores diferencias para este escenario, los modelos coinciden en la reducción de los volúmenes medios mensuales en el periodo desde mayo a septiembre y en el aumento significativo en el mes de octubre.

En la Figura 10 se presenta la variación de los volúmenes medios mensuales para el escenario RCP 8.5 W/m², tomando como criterio el promedio de los volúmenes de escurrimiento determinados con el clima futuro de los modelos HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

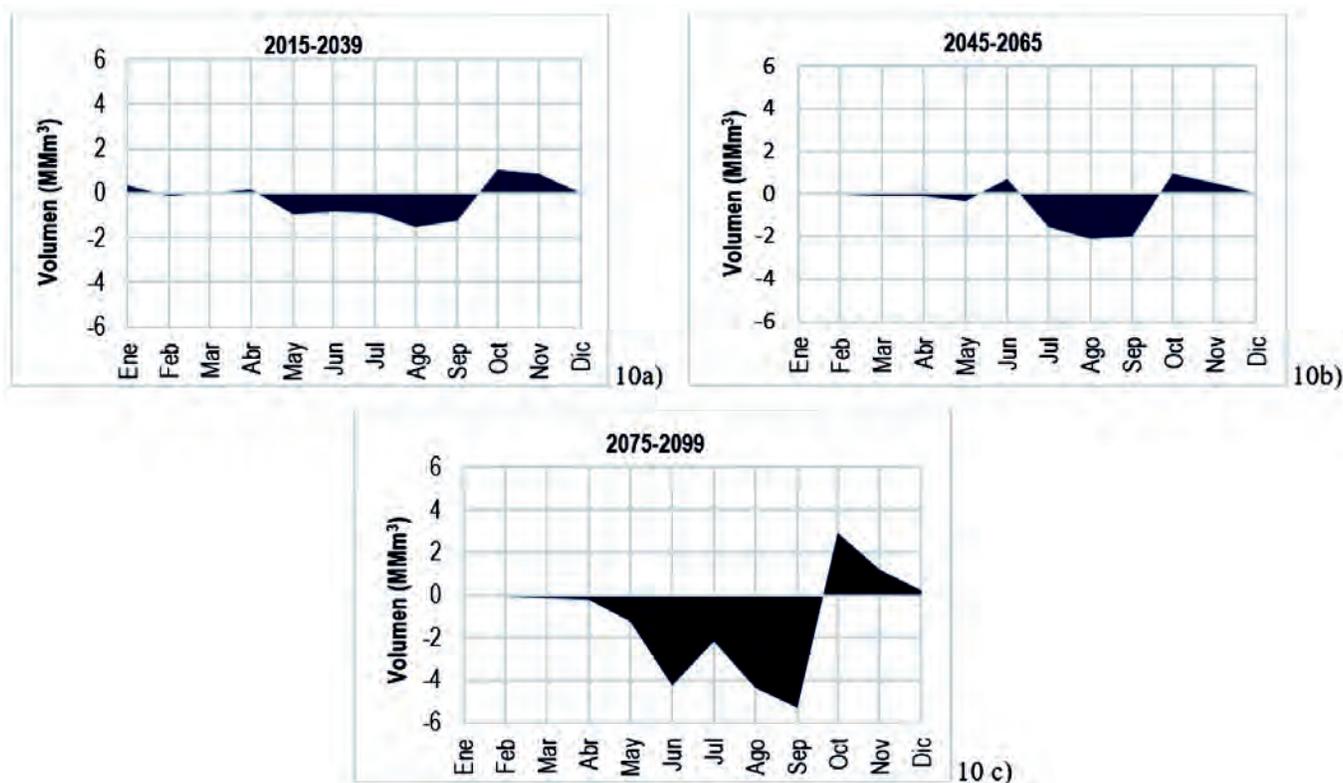


FIGURA 10. Variación de los volúmenes medios mensuales por periodos en función del escenario RCP 8.5 W/m². 10a) Periodo 2015-2039, 10b) 2045-2065, 10c) 2075-2099.

En el futuro cercano, periodo 2015-2039 (Figura 10a), se proyecta una variación de los volúmenes medios mensuales entre +1,73% y -6,48%. Para este escenario se acentúa la disminución en los volúmenes medios para todos los meses del periodo húmedo (excepto octubre), con una diferencia de 5,31 millones de m³ respecto al volumen medio para el clima base. A diferencia del escenario RCP 4.5 W/m², no se produce en esta etapa una compensación anual de los volúmenes, proyectándose un déficit medio anual de 3 millones de m³ aproximadamente. Por tanto, para un forzamiento radiativo de la atmósfera de 8.5 W/m², es probable que las afectaciones del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos no se presenten progresivamente como ocurría con el escenario RCP 4.5 W/m², sino que el cambio se produzca drásticamente.

En el futuro medio, periodo 2045-2069 (Figura 10b), la variación de los volúmenes medios se proyecta entre +7,36% y -10,43%, valores similares a los obtenidos para el escenario RCP 4.5 W/m² en igual periodo. Para ambos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero la respuesta de los modelos hidrológicos es similar, no existe una explicación precisa para esto, probablemente forme parte de las incertidumbres propias de los procesos de modelación del clima y de la relación lluvia-escurrimientos.

En el futuro lejano, periodo 2075-2099 (Figura 10c), la variación de los volúmenes se proyecta entre +70,95% y -21,28%. La reducción de los volúmenes medios asciende a 17 millones de metros cúbicos y aunque la proyección en el aumento del volumen es de 70,95% respecto al clima base, generado por el fuerte aumento de la precipitación proyectada para el mes de octubre, el déficit anual asciende a 13 millones de metros cúbicos.

Análisis de las afectaciones

En la Tabla 3 se presentan las posibles afectaciones en áreas de siembra del cultivo de arroz, a consecuencia de la disminución en la disponibilidad de agua proyectada por escenarios y periodos. Cabe aclarar que las afectaciones se calcularon a partir de la reducción en los volúmenes medios mensuales obtenidos en el estudio y que solo son valores estimados.

Se tomaron en consideración las normas netas del cultivo del INRH (2015), en las etapas de siembra del arroz, tomado este como referente debido a la importancia económica que representa para la zona de estudio y además en la importancia estratégica que el mismo tiene para la sostenibilidad alimentaria de la nación.

TABLA 3 Estimado de hectáreas afectadas en la siembra de arroz por la disminución en la disponibilidad de agua proyectadas por el escenario RCP 4.5 y 8.5 W/m²

Etapas de siembra	Calendario	RCP 4.5 W/m ²			RCP 8.5 W/m ²		
		2015-2039	2045-2065	2075-2099	2015-2039	2045-2065	2075-2099
Invierno	Dic-May	9,76	68,16	-	40,93	40,44	141,21
Pre primavera	May-Sep	253,23	526,40	704,12	509,89	502,37	1668,9
Primavera	Jul-Oct	10,17	518,43	695,83	287,34	528,77	1014,14

En sentido general puede observarse en la Tabla 3, que son significativas las áreas que pueden verse afectadas por los déficits proyectados con el conjunto de modelos y escenarios de cambio climático; principalmente en las etapas de siembra de preprimavera y primavera. Se estima que la mayor afectación se produzca a finales de siglo (2075-2099) sin que exista una gran influencia del escenario de emisiones de gases de efecto invernadero. Para el escenario de emisiones RCP 8.5 W/m² se producen las mayores afectaciones llegando a 1668 hectáreas de arroz, valor que representa el 38% de las áreas disponibles en la cuenca para la siembra del arroz.

CONCLUSIONES

- El modelo hidrológico de Témez, implementado en la herramienta EvalHid permite simular el 80% de los caudales medios mensuales en el río San Diego, aguas arriba del embalse La Juventud. El acople del modelo hidrológico con

la información de los modelos de cambio climático y los escenarios de forzamiento radiativo RCP 4.5 y 8.5 W/m², muestra reducciones en los volúmenes medios mensuales del orden de -6 a -21%, en comparación con los valores medios históricos; sin que el aumento que se proyecta en los volúmenes medios mensuales resulte significativo como para compensar los déficits proyectados. Los resultados reflejan la vulnerabilidad de esta zona a los impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos, imprescindibles para el desarrollo de la agricultura de regadío.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento Ingenieros Sin Fronteras México A.C. y al Cuerpo Académico de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable (UAT-CA-29) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Tamaulipas (FIANS-UAT) en Tampico, Tamaulipas, México.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASAL: “Proyecto Bases Ambientales para la Sostenibilidad Alimentaria Local, Informes y Resultados”, En: *Convención Ingeniería Agrícola 2016*, Ed. Memorias Convención Ingeniería Agrícola 2016- Publicaciones BASAL, vol. 37, Cuba, 2016, ISBN: 978-959-285-034-7.
- CAMINO, E.; RUGGERONI, J.; HERNÁNDEZ, F.: “Quinto informe de evaluación del IPCC: Bases físicas”, *Revista Tiempo y Clima*, 5(43), 2014.
- CITMA: *Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*, Inst. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de la República de Cuba, La Habana, Cuba, 2015.
- FERNÁNDEZ, A.; ZAVALA, Z.; ROMERO, R.; CONDE, A.; TREJO, R.: *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación, [en línea]*, Inst. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México D. F., 2015, Disponible en: <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/>, [Consulta: 10 de octubre de 2018].
- HERVIS, G. G.; GELER, R. T.; DÍAZ, G. R.; IBAN, A. E.C.: “El modelo WEAP: una herramienta de planificación hidrológica para la adaptación al cambio climático”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 8(3): 40-47, 2018, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.
- HERVIS, G. G.; LÓPEZ, S. T.; VARGAS, C. R.; ROLÓN, A. J.; SÁNCHEZ, T. G.: *Aplicación del modelo WEAP para la planificación hidrológica de la cuenca San Diego, Municipio Los Palacios, Provincia Pinar del Río, Cuba*, no. ser. No. RN3, Ed. Editorial Pearson, Investigaciones Actuales en Medio Ambiente ed., vol. III, 2017, ISBN: 978-607-32-4504-3.
- HIJMANS, R.; CAMERON, S.; PARRA, J.; JONES, P.; JARVIS, A.: “Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas”, *International Journal of Climatology*, 25(15): 1965-1978, 2005, ISSN: 1097-0088.
- INRH: *Anexo 2. ÍNDICES DE CONSUMO: Normas de Riego Netas Totales para los Cultivos Agrícolas*, Inst. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Presidencia del INRH, Resolución 287/2015, La Habana, Cuba, 2015.
- MARTÍNEZ, P.: *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México*, Ed. IMTA, Semarnat, Jiutepec, México, 2007a, ISBN: 978-607-7563-01-3.
- MARTÍNEZ, P.: *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México*, Ed. IMTA, Semarnat, Jiutepec, México, 2007b, ISBN: 978-607-7563-01-3.
- MONTOYA, A.; SÁNCHEZ, O.: “Climate change and space-time variability of precipitation in Colombia”, *Revista EIA*, 12: 131–150, 2015,

- MORIASI, D.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L.: “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations”, *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900, 2007, ISSN: 0001-2351.
- SOLERA, A.: *AQUATOOL, manual de usuario*, Ed. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2015.
- TÉMEZ, J.: *Modelo Matemático de transformación “precipitación-escorrentía”*, Inst. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica, ASINEL, Madrid, España, 39 p., 1977.
- VANSTEENKISTE, T.; TAVAKOLI, M.; NTEGEKA, V.; DE SMEDT, F.; BATELAAN, O.; PEREIRA, F.; WILLEMS, P.: “Intercomparison of hydrological model structures and calibration approaches in climate scenario impact projections”, *Journal of Hydrology*, 519: 743–750, 2014, ISSN: 0022-1694.
- VARGAS, R.; ROLÓN, J.; TOBIÁS, R.; SÁNCHEZ, T. G.: “El recurso hídrico ante el cambio climático, distrito de riego del río Soto La Marina”, *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(1): 23-29, 2019, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- VELÁZQUEZ, Z. J.A.; TROIN, M.; DÁVILA, O. R.: “Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT”, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3): 341-351, 2017, ISSN: 2594-0732.
- VILLAZÓN, G. M.F.; INTURIAS, G. D.; PARDO, P.; ZARATE, O.: “Análisis de Vulnerabilidad al Cambio Climático en Términos de Oferta Hídrica para el Proyecto Hidroeléctrico San José”, En: *VIII Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos, 22 al 25 de abril de 2015*, Santa Fe, Argentina, 2015.
- VO, N.D.; PHILIPPE, G.; MINH, T. V.; SRIVATSAN, V. R.; SHIE, Y. L.: “A deterministic hydrological approach to estimate climate change impact on river flow: Vu Gia-Thu Bon catchment, Vietnam”, *Journal of Hydro-environment Research*, 11: 59-74, 2016, ISSN: 1570-6443.
- WILLIAMS, M.: *Scientists urge more frequent updates of 30-year climate baselines to keep pace with rapid climate change*, [en línea], Inst. Press Release No.997, WMO, 2014, Disponible en: http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_997_en.html, [Consulta: 9 de julio de 2014].

Guillermo Hervis Granda, Investigador y Profesor, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana. Cuba, e-mail: dptoriego12@iagric.cu

Luis Hiran Riverol Marrero, Investigador, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana. Cuba, e-mail: dptoambiente13@iagric.cu

Rocío del Carmen Vargas Castilleja, Profesora e Investigadora, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería, Tamaulipas, México, e-mail: rocvargas@docentes.uat.edu.mx

Gerardo Sánchez Torres Esqueda, Investigador y Profesor, Ingenieros Sin Fronteras México, A.C., México, e-mail: gerardo.sanchez@isf-mexico.org

Carmen Duarte Díaz, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, e-mail: jdptoriego@iagric.cu

Felicita González Robaina, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, e-mail: dptoambiente4@iagric.cu

Julián Herrera Puebla, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, e-mail: direccioninvest1@iagric.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

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.