

Aproximación a los recursos hídricos potenciales en Cuba al 2030

Eduardo O. Planos Gutiérrez email: eduardo.planos@insmet.cu
Unidad Técnica de Cambio Climático, Centro del Clima, Instituto de Meteorología

RESUMEN

El objetivo del artículo es presentar una aproximación a los escenarios potenciales de agua en Cuba en el año 2030; acompañada con una reflexión del estado de los principales factores que intervienen en el sector hidráulico y sus compromisos con las metas de desarrollo. Basado en métodos hidrológicos tradicionales, se realiza un balance hídrico climático a escala de país, utilizando el modelo de Budyko para la línea base 1961-1990 y los escenarios climáticos obtenidos con el modelo regional "PRECIS". Se demuestra la validez del método de Budyko y que en Cuba se está produciendo una reducción de los recursos hídricos potenciales, que se incrementará al futuro.

Palabras claves: balance hídrico, cambio climático, evapotranspiración, recursos hídricos, precipitación.

Approach to potential water resources in Cuba by 2030

ABSTRACT

The objective of the article is to present an approximation to the potential water scenarios in Cuba in the year 2030; accompanied by a reflection on the status of the main factors involved in the hydraulic sector and their commitments to development goals. Based on traditional hydrological methods and on the results obtained with geospatial information systems, a climatic water balance is carried out at the country scale, using the Budyko model, for the 1961-1990 baseline and the climatic scenarios obtained through the regional climate model "PRECIS". The validity of the method is demonstrated Budyko and that Cuba is producing a reduction of potential water resources will be increased to the future.

Keywords: water balance, climate change, evapotranspiration, water resources, precipitation.

INTRODUCCIÓN

La última evaluación detallada de los recursos hídricos del país, fue la realizada en el marco del “Esquema Regional Precisado para el Uso de los Recursos Hídricos y los Suelos de Cuba” (INRH, 1986). La cifra 38,1 km³ de recursos potenciales, que aún se presenta como referencia histórica por dicha institución, se atribuye al mencionado resultado. Pero, en otras evaluaciones realizadas en fechas posteriores, se demuestra que el potencial de agua se ha reducido y que, como consecuencia del impacto del cambio climático, se manifiesta un proceso de disminución progresiva de la disponibilidad de agua.

Las proyecciones climáticas para Cuba predicen un clima más extremo, más cálido y con déficits de agua, que regionalmente pueden ser acentuados (CITMA 2015 y 2020). La reducción de la riqueza hídrica es, principalmente, consecuencia del incremento de los procesos de pérdida de agua que se están produciendo, ocasionados por el aumento de la temperatura del aire y de la radiación solar, por cambios en el régimen de precipitación y los impactos que se producen en la cobertura boscosa, junto con otros que vienen ocurriendo en el sistema hidrológico (CITMA 2020). Las afectaciones a la disponibilidad de agua se acentúan por el impacto de la intrusión marina en los acuíferos costeros, resultante del ascenso del nivel medio del mar y por la influencia del cambio climático, aun no bien determinada, en la recarga de los acuíferos.

Teniendo en cuenta los planes de desarrollo económico y social del país, en particular en el sector agropecuario, se deduce la importancia de evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos, poniendo énfasis en la necesidad de agua que demandarán las proyecciones al 2030. Para contribuir a la comprensión de este complejo problema, el objetivo del artículo es presentar una estimación de los recursos hídricos potenciales, basada en los escenarios de cambio climático desarrollados por el Instituto de Meteorología de Cuba, mediante un balance hídrico climático, utilizando la metodología de Budyko. Como resultado se muestran y analizan los escenarios generales de los recursos potenciales de agua en Cuba en el año 2030 y se reflexiona integrando los principales aspectos relacionados con la disponibilidad de agua y sus usos.

ANTECEDENTES

En Cuba se han publicado varias evaluaciones de los recursos hídricos a escala de país; de las cuales, el INRH refrenda en su página web la resultante del ya mencionado esquema regional precisado (<https://www.hidro.gob.cu/es>). La tabla 1 contiene un resumen de los balances hídricos que han sido publicados.

El esquema regional precisado (INRH 1986) se reconoce como la más rigurosa de las evaluaciones hechas de los recursos hídricos en Cuba a escala de país, regiones y cuencas, donde se abarcaron aspectos naturales y humanos relacionados con el desarrollo hidráulico. Los resultados, materiales y métodos utilizados no fueron publicados de manera libremente accesible. No obstante, a este trabajo se atribuye la determinación de los recursos hídricos potenciales en 38,1 km³ y, por tanto, esta es una cifra de referencia para comparar la evolución temporal del clima y la hidrología. La principal limitante que puede señalarse a este esfuerzo, no achacable a sus autores, es la imposibilidad que se tuvo de prever el cambio climático en las proyecciones de desarrollo propuestas, dado que no era un tema de trabajo reconocido en esos años.

Batista (2016), también realizó un análisis detallado del escurrimiento promedio en 58 cuencas hidrológicas superficiales, con un período común comprendido entre 1964-1988. Como resultado, los recursos hídricos potenciales se estimaron en 31,9 km³. Para esto, este autor determinó el módulo de escurrimiento en las regiones occidental, central y oriental, teniendo en

cuenta la precipitación y la altitud, como criterios de regionalización; y estableció el modelo siguiente:

$$M_o = aP^b 10^{-14} \quad (1), \text{ donde } a \text{ y } b \text{ son parámetros de ajustes y } P \text{ la precipitación}$$

Las otras estimaciones conocidas fueron a escala de país, basadas en balances hídricos climáticos. Estas fueron realizadas por el INRH para las comunicaciones nacionales a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CITMA 2001 y 2015).

Tabla 1. Evaluaciones realizadas de los recursos hídricos en Cuba

Recursos hídricos potenciales (km ³)	Autor	Período de referencia	Observaciones
38,1	INRH 1986	No existe información verificable	31,7 km ³ son aguas superficiales y 6,4 subterráneas. El máximo aprovechable es 23,9 km ³ .
32,0	INRH 2000	1961-1990	Publicada en la Primera Comunicación Nacional Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CITMA 2001)
31,9	Batista 2016	1964-1988	25,45 km ³ son aguas superficiales y 6,45 km ³ subterráneas.
32,4	INRH 2015	1961-1990	Publicada en la Segunda Comunicación Nacional Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CITMA 2015)

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se basa en la metodología de balance hídrico climático desarrollada por Budyko (Rivero 2008), para analizar las diferencias regionales en el balance anual de agua a largo plazo. Du et al. (2016) demuestran que este método es eficaz para investigar la influencia del cambio climático en la escorrentía media anual y la evapotranspiración. Con este modelo se reflejan los principales factores que controlan el promedio a largo plazo de la evapotranspiración (*ETP*), los cuales están dados por la disponibilidad de agua en la atmósfera, representada por la precipitación (*P*) y la evapotranspiración potencial (*E_o*). Este es un procedimiento estrictamente climático, que no permite separar las contribuciones al flujo hídrico del cambio climático y de otros factores; así como tampoco considerar, de manera específica, otros procesos que influyen en la producción de agua aprovechable, ya a nivel de la superficie terrestre. Pero el modelo ofrece un balance hídrico adecuado para el objetivo fundamental de este artículo.

El modelo Budyko representa una simplificación de la fórmula general de balance hídrico, mediante la ecuación 2 (Rivero 2008):

$$S = P - E - w \quad (2), \text{ donde } S: \text{ lámina de escurrimiento (mm); } P: \text{ precipitación (mm); y } E: \text{ evapotranspiración real (mm) y } w: \text{ agua retenida en el suelo.}$$

La solución de esta ecuación utiliza variables físicas intermedias, que se estiman de la manera siguiente:

- Balance anual de radiación (*R_o*) en Kcal / cm² – año a partir de la expresión:

$$R_o = 3.65T \quad (3), \text{ donde } T: \text{ temperatura anual en } ^\circ\text{C}$$

- Índice radiativo de aridez (*B*):

$$B = 10 \frac{R_o}{LP}, \quad (4), \text{ donde } P: \text{ precipitación anual en mm y } L: \text{ calor latente igual a } 0.585 \text{ kcal/g}$$

(c) Evaporación potencial (E_o):

$$E_o = 10^{R_o/L} \quad (5), \text{ donde } E_o: \text{ evapotranspiración potencial en mm}$$

(d) Evapotranspiración real (E),

$$E = P(B[1 - \cosh B + \sinh B] \tanh 1/B)^{0.5} \quad (6)$$

Para el análisis de la precipitación y la temperatura histórica se utilizaron datos observados en las redes de estaciones del Instituto de Meteorología (Insmet) y del Instituto Nacional de Recursos Hidráulico (INRH). Las series utilizadas corresponden al período 1961-2020 y 1901-2020, esta última reconstruida para los fines de este trabajo, basado en Rodríguez (2005). Los resultados se presentan a escala de país.

No se requirió analizar la calidad de los datos con los métodos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial; dado que las series seleccionadas fueron empleadas y analizadas en los estudios para la “Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático” (CITMA 2020), donde fueron rigurosamente estudiadas con este fin. No obstante, los resultados obtenidos a partir de estos datos fueron ajustados, en correspondencia con la escala de los mapas y la densidad de las redes utilizadas; eliminando las estaciones que no aportaban información significativa para el propósito de mostrar la distribución espacial de las variables del balance hídrico seleccionadas.

En el caso de las tendencias, habiendo sido determinado su nivel de significación en los estudios antes mencionados, se empleó el reconocimiento visual; como criterio suficiente para el propósito del artículo. Pero, como elemento de apoyo al análisis de las tendencias y de la caracterización de las series, se utilizó el criterio de medias móviles para períodos de 30 años, aplicada al valor promedio de las variables del balance hídrico y al coeficiente de variación de las series (Cv).

Con el fin de demostrar la competencia del modelo de Budyko en la estimación de los recursos hídricos potenciales, se utilizó el índice de eficiencia de Kling-Gupta (Gupta et al. 2009 y Kling et al. 2012) para determinar la eficiencia del mencionado modelo. Este índice se define de acuerdo a la ecuación:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{y}_{sim}}{\bar{y}_{obs}} - 1\right)^2} \quad (7),$$

donde r es el coeficiente de correlación de Pearson, σ la desviación estándar y \bar{y} la media de los valores simulados u observados, según corresponda. Cuando $KGE = 1$, se infiere una coincidencia perfecta, mientras que valores negativos son “malas” simulaciones.

Por el papel que en el modelo de balance aplicado tiene la relación entre la energía (representada por la E_o) y la disponibilidad de agua (simbolizada por la P), y también porque se utilizó como apoyo conceptual para la caracterizar la transición climática que viene sucediendo en el país, se estimó el “Índice de aridez” (K). Este índice se expresa mediante la ecuación 8

$$K = P/E_o \quad (8), \text{ donde } P: \text{ precipitación y } E_o: \text{ evaporación potencial}$$

Adicionalmente se ajustó el método del “Soil Conservation Service” (SCS) a las series de datos utilizadas en el trabajo, para modelar la relación precipitación caudal (Ven Te Chow 1988), con el fin de corroborar los resultados obtenidos a través de Budyko. Los parámetros “curva número” (CN) y “coeficiente de escurrimiento” (n) se obtuvieron por ajuste gráfico. Teniendo en cuenta que el uso de este método fue un recurso empleado para comprobar los resultados, a continuación se presentan, simplifícadamente, sus procedimientos.

Se calcula le retención potencial (S) mediante

$S = 25.4 * [(1000 / CN) - 10]$ (9), donde CN : curva número determinada por ajuste gráfico

El caudal (Q) con

$Q = [P - (n * S)]^2 / P + [(1 - n) * S]$ (10), donde P : precipitación del período que se analiza y n : parámetro del modelo asociado al suelo determinado por ajuste gráfico

Las estimaciones del clima futuro fueron obtenidas con el modelo climático regional “PRECIS” (Providing REgional Climates for Impacts Studies), para los escenarios de “Rutas de Concentración Representativas” (RCP, por sus siglas en inglés): RCP 2,6; 4,5 y 8,5 (CITMA 2020). En el *downscaling* dinámico de los RCP se utilizó el modelo global HadGEM2-ES (Collins et al. 2008) y, al respecto, es oportuno mencionar que los resultados con otros modelos que funcionan en el ambiente del PRECIS muestran tendencias concordantes con las descritas en este trabajo. El período de referencia para examinar el impacto del cambio climático fue el 1961-1990 y la proyección al futuro fue para el año 2030.

Los mapas que se presentan tienen una resolución de 25 km (625 km²), en correspondencia con la resolución de las actuales salidas del modelo “PRECIS”. Como resultado, se muestran los siguientes mapas anuales: escurrimiento potencial para el período de referencia y el año 2030, y diferencia entre los mapas de escurrimiento en el 2030 respecto al período histórico. Del mismo modo se exponen gráficos combinados para exponer las tendencias de las variables trabajadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variaciones y cambios en componentes del balance hídrico

La precipitación desempeña un rol protagónico en los procesos hidrológicos que se desarrollan en Cuba. Para dar una visión detallada del comportamiento de esta variable, se aprovecha el trabajo de Rodríguez (2005), donde se construyen series que comprenden el período 1901-2004, para extender la serie anual aquí utilizada hasta el año 2020, mediante la relación lineal con una serie obtenida del “*Sistema de Vigilancia del Clima*” del INSMET. La correlación entre ambas series es muy alta, con un coeficiente de $r=0,96$. La figura 1 muestra la serie reconstruida para el período 1901-2020 y la media móvil de 30 años del valor promedio de la precipitación y del Cv de la serie.

El valor promedio de precipitación a escala de país en el período 1901-2020 es 1314 mm, con un Cv de 0,10 (figura 1). La variabilidad de este elemento en los últimos 120 años, visualmente demuestra que, de 1901 al 1960, la tendencia es acentuadamente creciente, con un promedio de 1323 mm y un Cv de 0,08; y desde el 1960 hasta el 2020, el sentido predominante es decreciente y el promedio 1307 mm, con un Cv de 0,12. En el período comprendido entre 1960 al 2020 se distinguen dos sub-períodos, con las características siguientes: (a) 1960 al 1990 con tendencia claramente negativa, y promedio de 1292 mm y Cv de 0,13 y (b) 1991 al 2020, donde no se observa una tendencia claramente definida, y promedio de 1322 mm y un Cv de 0,11.

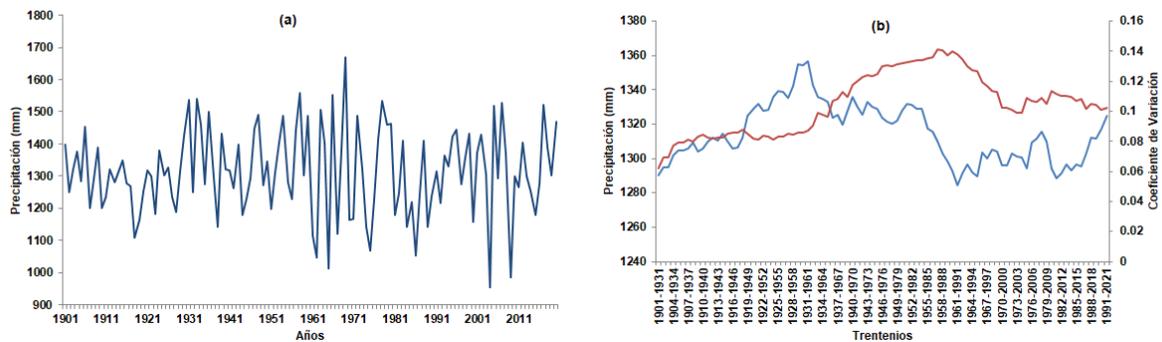


Figura 1. (a) Precipitación anual y (b) Medias móviles (línea azul) y Cv (línea roja).

La evapotranspiración es el otro componente del balance hídrico que actúa como un modulador de la transformación de la precipitación en agua potencial. Los resultados obtenidos demuestran que los procesos de pérdida que ocurren por esta vía son elevados (figura 2). Existen un conjunto de factores atmosféricos que favorecen este fenómeno, entre los más importantes: el incremento de la temperatura del aire, la disminución de la cobertura nubosa y el incremento de la radiación solar (CITMA 2020); elementos que se combinan con los procesos del sistema hidrológico a nivel terrestre, como las variaciones en la cobertura vegetal, el mantenimiento de la humedad en el suelo y el intercambio de agua entre la superficie y las aguas subterráneas, para determinar el agua aprovechable.

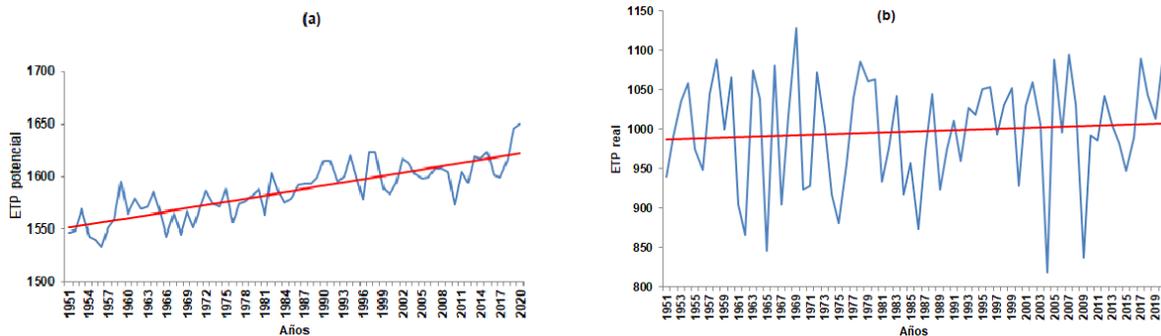


Figura 2. (a) Evaporación potencial a la izquierda y (b) Evaporación real a la derecha. Estimadas por modelo de Budyko (Rivero, 2008)

El Índice de aridez suministra información relevante para analizar los procesos climáticos e hidrológicos. La figura 3 representa las anomalías del índice con respecto al valor que marca el límite entre las condiciones de clima húmedo y sub-húmedo. Existe una tendencia negativa, como consecuencia del predominio de la evapotranspiración con relación a la precipitación. Lo anterior se refleja en los procesos hidrológicos, explicando las tendencia que en ellos se verifica. Es importante llamar la atención a que la reducción de los recursos hídricos a la escala hidrológica debe ser mayor, como consecuencia de la intervención de otros factores terrestres ya mencionados y, además, por el impacto de la intrusión marina y las afectaciones en la recarga de los acuíferos, entre otros. Basado en este índice, se ratifica la conclusión de que se viene produciendo un cambio de un clima húmedo a uno sub-húmedo, que se acentúa a partir del inicio de la década de los años 60 (CITMA 2015).

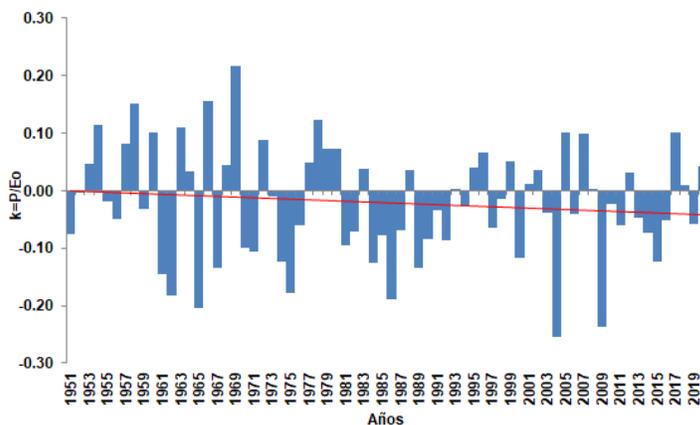


Figura 3. Anomalía del Índice de aridez respecto al valor $K=0.85$, límite entre las condiciones climáticas húmeda y sub húmeda. Tendencia (línea roja)

Para el análisis del escurrimiento se tomaron en cuenta las variables siguientes: lámina (mm); volumen (km^3) y módulo (l/s/km^2), y se puso atención a la comprobación de la efectividad del modelo de Budyko en la determinación de los mencionados componentes. La tabla 2 compara, de forma satisfactoria, los recursos hídricos potenciales calculados en otros estudios con el resultado obtenido utilizando el modelo de Budyko. Con idéntico objetivo se seleccionaron un grupo de estaciones hidrométricas con observaciones de caudal entre 1961-1990 y, en estas, se estimó en volumen de escurrimiento promedio del período con la metodología adoptada (tabla 3). En la figura 4 se integran, en una serie única, los resultados de Batista (2016) en 58 estaciones hidrométricas con la estimación a través del método de balance que aquí se utiliza, obteniéndose una buena relación, con un coeficiente de correlación $r=0,93$.

Tabla 2. Resultados del cálculo de balances hídricos con Budyko y balances precedentes

Período	Fuente	Recursos potenciales (km^3)	Recursos potenciales por Budyko (km^3)
1961-1990	CITMA. 2001. Primera Comunicación Nacional	32,0	32,9
1961-1990	CITMA. 2015. Segunda Comunicación Nacional	32,4	32,9
1964-1988	Batista 2016	31,9	33,8

Tabla 3. Balances hídricos con Budyko y con registros hidrométricos. Período 1961-1990

Río/Estación	T ($^{\circ}\text{C}$)	P (mm)	W obs (Hm^3)	WB yudiko (Hm^3)	Error relativo (%)
Toa/El Toro II	24,6	1763	205,9	204,7	-0,58
Toa/Aguacate	24,6	1763	927,2	933,6	0,69
Yaguarana I	23,8	1141	111,9	118,5	5,90
Cautillo/La Virgen	19,6	1780	123,6	113,5	-8,17
Cautillo/La Fuente	25,1	1096	44,2	40,0	-9,50
Cauto/Salto Travesía	25,0	1500	362,7	354,0	-2,40
Zaza/Paso Ventura	24,0	1387	298,3	327,7	9,86
Sta Cruz/Sta Ana	25,1	1420	36,6	37,8	3,28

T, temperatura media del aire; P, precipitación media anual; Wobs, volumen promedio anual de escurrimiento observado; W_{Budyko} , volumen promedio anual de escurrimiento estimado mediante metodología de Budyko

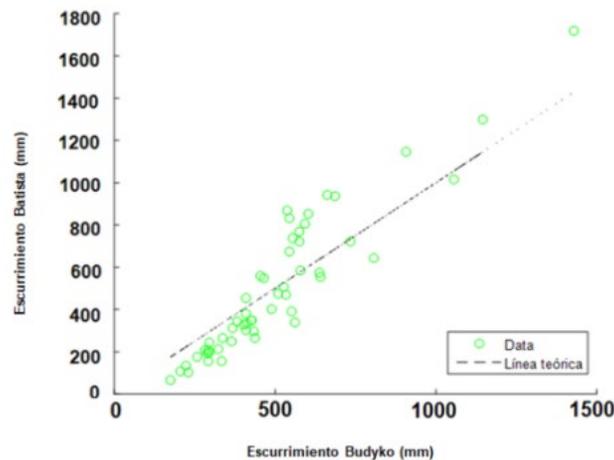


Figura 4. Relación entre escurrimientos estimados por Budyko y observado en estaciones hidrométricas. Coeficiente de correlación $r=0.93$. Período 1964-1988

Para comprobar la eficiencia de la formulación de Budyko, se ajustó el modelo del *SCS* a la relación entre la precipitación y la lámina de escurrimiento (figura 5), en una serie construida con el ensamble de los datos obtenidos mediante Budyko y los observados en las estaciones hidrométricas utilizadas por Batista (2016). Teniendo en cuenta que el ajuste del mencionado modelo se empleó en un conjunto de estaciones hidrológicas distribuidas en el país, la curva número (*CN*) se determinó por ajuste gráfico. Los valores de *CN* obtenidos y los coeficientes de escurrimiento derivados del empleo de este método, reflejan correctamente el ambiente hidrológico cubano, caracterizado por el predominio de los procesos de infiltración y coeficientes de escurrimiento que, como promedio, varían entre 0,2 y 0,3. La tabla 4 contiene los parámetros obtenidos del método del *SCS*, comparados con las estimaciones hechas con Budyko. Los resultados demuestran la validez de Budyko, con un coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,93$ y la eficiencia de Kling-Gupta, $KGE = 0,73$.

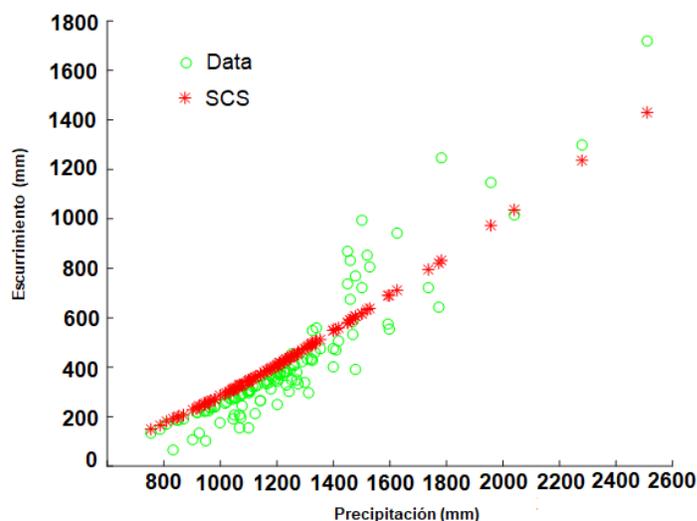
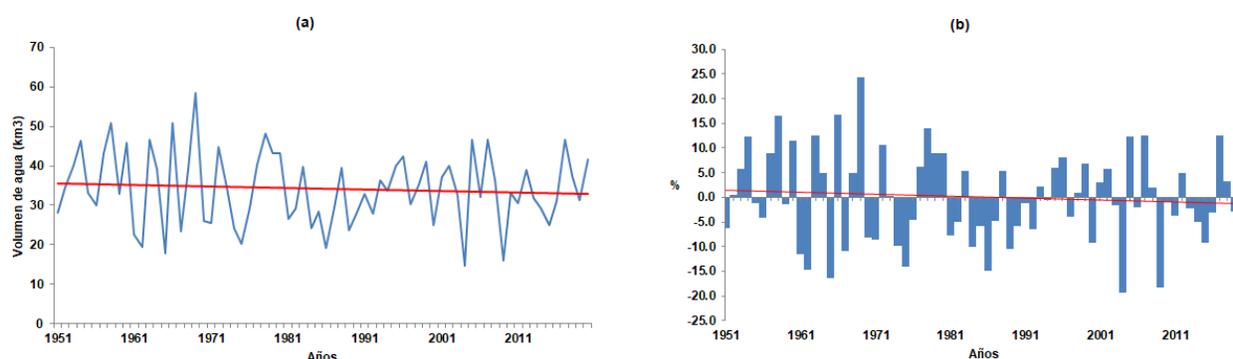


Figura 5. Ajuste del modelo SCS a los datos ensamblados Budyko-Batista. Parámetros del modelo $n = 0,299$ y $CN = 15,498$. Coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,9313$ y la eficiencia de Kling-Gupta $KGE = 0,7323$

Tabla 4. Resultados del ajuste del Método del Soils Conservation Service y del método de Budyko

Aplicación	Métodos del Soil Conservatio Service			Método de Budyko
	CN	n	Q _{SCS} (km ³)	Q _{Budyko} (km ³)
Serie 1961-1990	12.512	0.2367	35.9	33.8
RCP 2.6 2030	13.212	0.2192	29.9	30.6
RCP 4.5 2030	14.196	0.2078	30.7	31.3
RCP 8.5 2030	14.090	0.2121	29.1	30.3

Se puede resumir que las condiciones hidrológicas en el país se corresponden con el escenario climático antes descrito. En los últimos años está ocurriendo una ligera disminución de la disponibilidad potencial de agua, como se observa en la figura 6. En la tabla 5 se resumen los valores correspondientes a tres períodos representativos de uso común en los estudios de cambio climático. Los recursos hídricos potenciales en la actualidad son aproximadamente 33 km³.

**Figura 6. (a) Esgurrimiento anual estimado por Budyko y (b) Anomalía del escurrimiento anual respecto a la línea base 1961-1990****Tabla 5. Recursos hídricos potenciales. Períodos representativos**

Período	Recursos hídricos potenciales (km ³)	Observaciones
1951-2020	34,2	Serie más extensa con datos certificados
1986-2010	32,8	Período recomendado por la OMM
1961-1990	32,9	Línea base utilizada en Cuba en estudios de cambio climático

RECURSOS HÍDRICOS POTENCIALES EN EL 2030

El nivel de desarrollo alcanzado en la modelación del clima en Cuba y, en particular, su resolución espacial (25 km - 625 km²), combinado con la eficacia demostrada por el “Sistema de Vigilancia del Clima” del INSMET, constituyen herramientas de trabajo útiles para incorporar la evaluación del estado del clima y las proyecciones climáticas a las decisiones de desarrollo. El balance hídrico climático se puede emplear usando los datos e informaciones que brinda el mencionado sistema de vigilancia, con lo cual es posible estimar los recursos hídricos potenciales a escala de país, región y cuencas, con un nivel de detalle adecuado para la toma de decisiones estratégicas.

A continuación se presentan y analizan los resultados del balance hídrico para el año 2030 en los escenarios RCP 2,6; 4,5 y 8,5; así como también se muestran las tendencias climáticas e hidrológicas a más largo plazo, basado en los resultados de la modelación del clima. La figura 7 contiene las tendencias obtenidas para la precipitación y la temperatura del aire mediante el

modelo PRECIS para el territorio cubano. En estos gráficos visualmente se aprecia que en el escenario *RCP 2,6*; la precipitación tiene una débil tendencia al incremento y un sentido decreciente en los escenarios *RCP 4,5* y *8,5*; mientras que se manifiesta un incremento notable de la temperatura del aire en todos los escenarios, magnitud que oscila entre 1,3 y 2,0 °C respecto al período de referencia 1961-1990. Estos resultados concuerdan con los presentados por CITMA (2020) y CEPAL/CAC-SIC (2020), quienes determinaron una tendencia mayoritaria negativa en los porcentajes anuales de precipitación y claramente positiva en la temperatura del aire, en los resultados de modelos de circulación global bajo *RCP* en la región de Centroamérica y el Caribe.

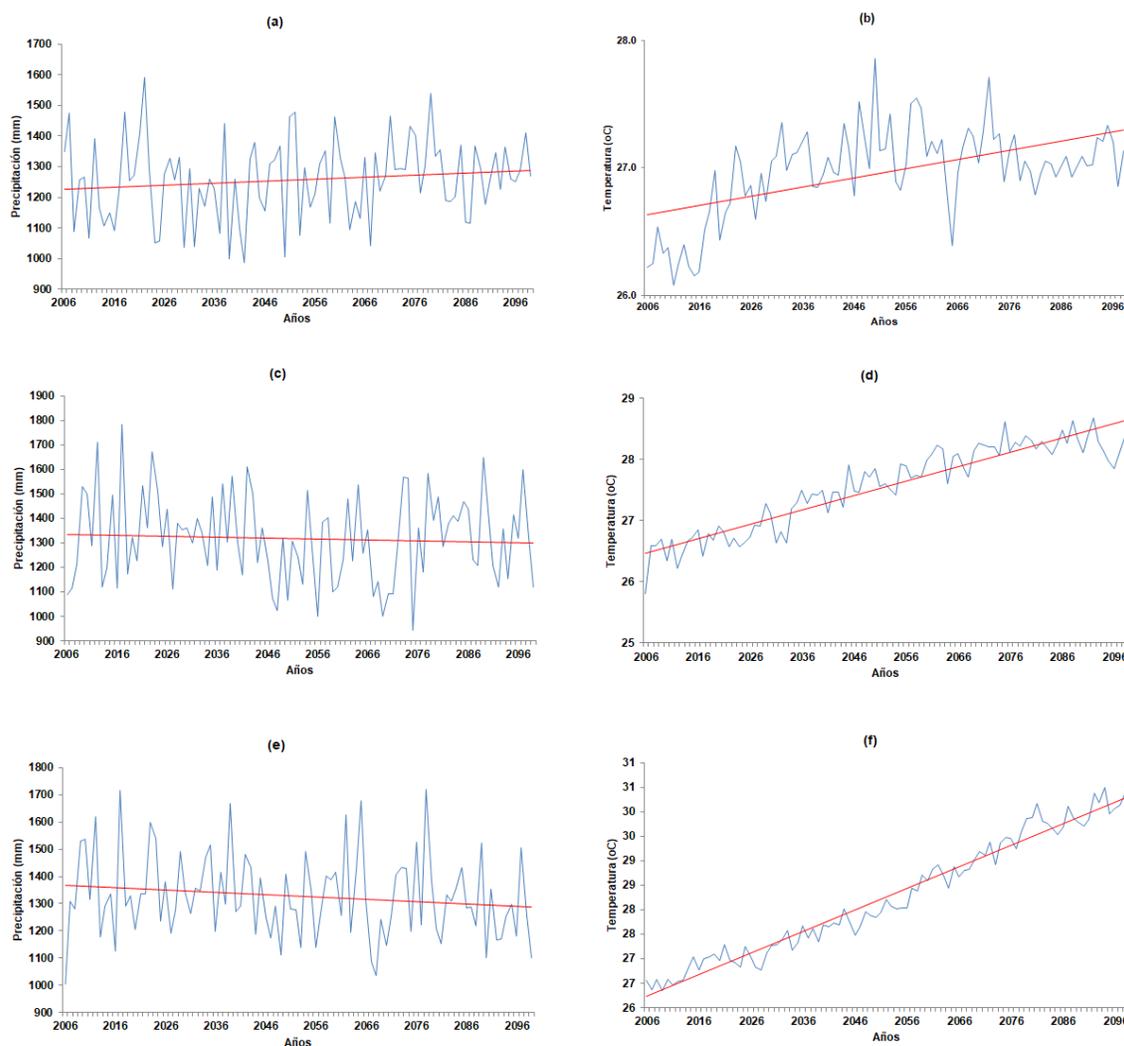


Figura 7. Precipitación anual (mm) y temperatura anual promedio del aire (°C): (a) Precipitación RCP 2,6, (b) Temperatura RCP 2,6; (c) Precipitación RCP 4,5; (d) Temperatura RCP 4,5; (e) Precipitación RCP 8,5; (f) Temperatura RCP 8,5. Fuente: CITMA, 2020

Los resultados del balance hídrico en el 2030 reflejan una reducción del volumen potencial de agua con respecto a la línea base, que comparado con la cifra histórica que se maneja en el país (38,1 km³) representan una disminución que oscila entre el 18 y 21% (figura 8). En la tabla 5 se presentan las variables del balance hídrico para el año 2030, correspondiente a cada *RCP*. Como

se ha descrito, la combinación de los incrementos de temperatura y evapotranspiración, combinado con una ligera reducción de la precipitación, determinan una disminución de los recursos hídricos potenciales. Comparado con los recursos hídricos estimados para la línea base 1961-1990, la reducción máxima de agua es del orden del 11%.

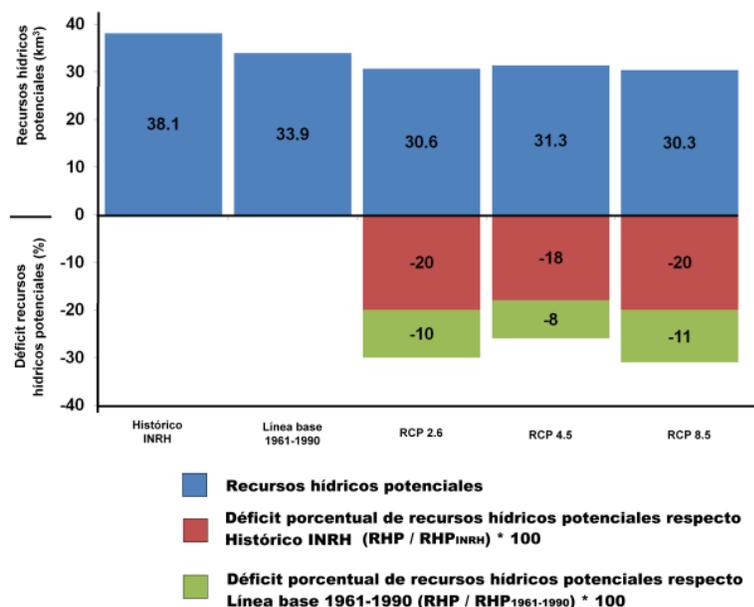


Figura 8. Recursos hídricos potenciales al 2030 para cada escenario RCP y su relación porcentual con las referencias históricas 1961-1990 y referencia del INRH

Tabla 5. Resultado del balance hídrico por la formulación de Budyko

Variables	Línea Base	Escenarios 2030		
	1961-1990	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Precipitación (mm)	1271,1	1258,2	1269,8	1253,9
Temperatura (°C)	24,9	26,5	26,5	26,6
ETP potencial (mm)	1561,1	1641,7	1789,1	1669,8
ETP real (mm)	957,4	969,1	1008,2	973,3
Esguerrimiento (km³)	33,8	30,6	31,3	30,3

Para dar una visión del comportamiento espacial de los recursos hídricos potenciales, en la figura 9 se expone la distribución espacial de la lámina de esguerrimiento bajo los escenarios climáticos considerados para este trabajo y, en la figura 10, se muestra el previsible déficit de esguerrimiento en cada RCP con respecto al período de referencia. En esta última figura se aprecia que en el RCP 8,5 el déficit puede ser significativo en las principales zonas montañosas del país y especialmente en el sistema montañoso Sagua Baracoa. En la tabla 6, se resume la diferencia regional de esguerrimiento en cada escenario respecto a la línea base 1961-1990; observándose que, de manera general, espacialmente se producirá una reducción del volumen de esguerrimiento en todo el país, siendo la Región oriental la más afectada.

Tabla 6. Diferencia regional entre el esguerrimiento para cada RCP respecto a la línea base 1961-1990

RCP	Región Occidental (%)	Región Central (%)	Región Oriental (%)
RCP 2.6	-20,9	-25,8	-31,0
RCP 4.5	-25,2	-20,0	-23,4
RCP 8.5	-25,8	-21,1	-29,0

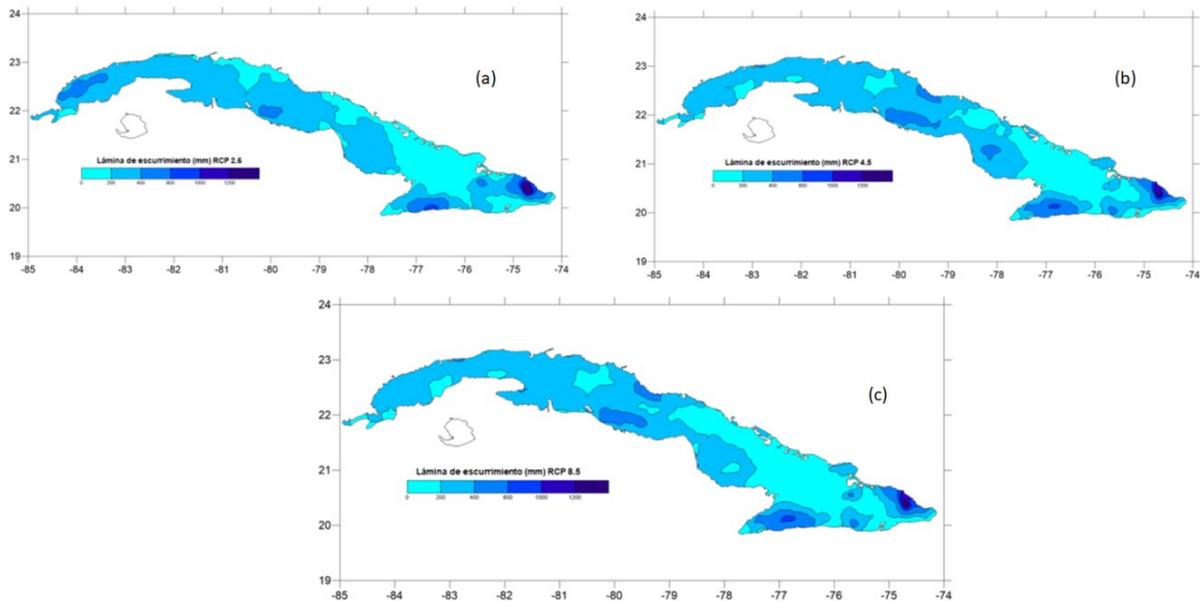


Figura 9. Distribución espacial de la lámina de escurrimiento (mm) para los escenarios climáticos futuros: (a) RCP 2,6; (b) RCP 4,5 y (c) RCP 8,5. Nota: la Isla de la Juventud no fue procesada

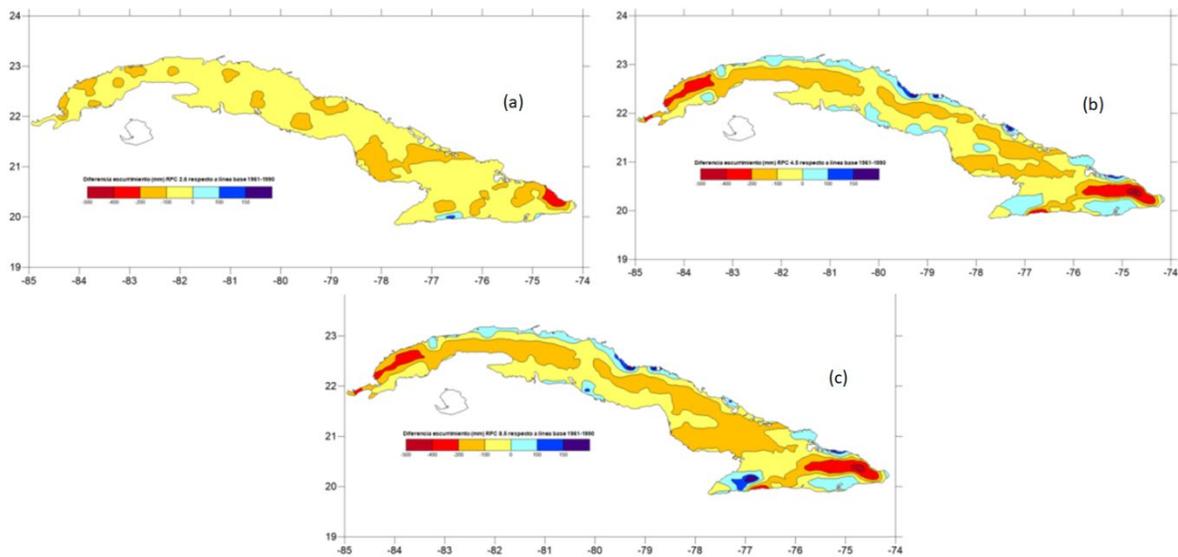


Figura 10. Diferencia escurrimiento (mm) RCP respecto a la línea base 1961-1990 (a) RCP 2,6; (b) RCP 4,5 y (c) RCP 8,5. Nota: la Isla de la Juventud no fue procesada

RETOS ACTUALES Y FUTUROS

Cuba cuenta con una poderosa infraestructura hidráulica que ha garantizado las necesidades hídricas del país desde el surgimiento de la “Voluntad Hidráulica” en 1963. Pero este sistema es muy vulnerable al impacto del cambio climático. “El 57 % de nuestras presas (casi todas de tierra) fueron construidas antes del año 1980 o durante ese año, cuando el cambio climático aún no tenía un peso apreciable en las series hidrológicas en que se sustentaron sus diseños, y que esto incluye, en números redondos, alrededor de 80 % de los 21 embalses que cuentan con

volúmenes de almacenamiento de 100 hm³ o más” (Velazco 2016). Debido a esto, los parámetros de diseño de las obras ya construidas responden a una hidrología que ha cambiado y que continuará cambiando, con implicaciones más severas que las actuales en su funcionamiento. A la vez que, como consecuencia de la intensidad de los procesos de erosión y sedimentación que tienen lugar en el país, se han reducido las capacidades de embalses, afectando el índice de agua disponible; según Laiz y Flores (2010), en un estudio que comprendió ocho embalses, la reducción de su capacidad de almacenamiento por esta causa, es del 17%.

Por otra parte, la intrusión marina; una consecuencia inevitable del cambio climático, limita directamente a la cuantía de recursos hídricos potenciales y aprovechables. En este sentido, los esfuerzos han estado concentrados en determinar la posición de la intrusión salina dependiente del ascenso del nivel del mar. Sin embargo, los cambios que se verifican en el régimen pluvial y en la generación de recursos hídricos, deben influir desfavorablemente en la recarga de los acuíferos y la relación de este recurso con los ecosistemas que yacen en la superficie y, como consecuencia, en el régimen hidrológico de los ríos y de los servicios ambientales que de ello depende.

El sistema hidráulico, además de trabajar con las vulnerabilidades descritas en el párrafo precedente, funciona bajo una condición de “estrés hídrico extremo”. Este indicador, visto en función de los recursos potenciales en la década de los años 80 era de un 35%, actualmente del 42% y en el 2030, sin incluir la ampliación de las capacidades de agua disponible, superará el 55%. La capacidad natural de reponer el agua usada es baja; condición que se agravará en el mediano plazo. Lo anteriormente expresado tiene una influencia significativa en la planificación de los usos del agua, y son vulnerabilidades que deben ser debidamente valoradas.

Dado el peso del sector agropecuario en el consumo de agua; si se consideran las normas de riego como un indicador de uso de este recurso, es importante referir que en la actualidad “*excepto en el caso de la papa, el rendimiento de los cultivos en Cuba por metros cúbicos de agua es muy bajo si se compara con indicadores internacionales*” (Herrera et. al, 2011). Mientras que resultados obtenidos en el Programa Nacional de Ciencia sobre Cambio Climático demuestran que ocurrirá un incremento de las normas de riego, como consecuencia del impacto del cambio climático (Planos et al. 2018), lo cual también tendrá un efecto negativo sobre la disponibilidad de agua.

El incremento de la producción agrícola es una meta que tiene como objetivos alcanzar la soberanía alimentaria y la sustitución de importaciones, y para que esto se cumpla, la disponibilidad de agua es indispensable. En los análisis más recientes sobre la política agrícola, publicados en Cubadebate (2021), se ha señalado que **en Cuba existen** reservas productivas de tierra para la producción agrícola. Al mismo tiempo, se afirmó que apenas el 7% del área cultivada tiene riego, y que esto es un elemento que afecta el despegue de la agricultura, porque, si no hay riego no se logra los rendimientos necesarios. Sin embargo, para tales propósitos, debe considerarse las perspectivas que existen con la disponibilidad de agua en el país.

La esencia del problema que se debe atender, desde el punto de vista de las políticas públicas, son claramente señaladas en un informe de UN-Water (2019), donde se indica que “... *debido a la crisis mundial del cambio climático, aumenta la variabilidad del ciclo del agua, lo que dificulta la previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, disminuye la calidad del agua, exacerba aún más su escasez y constituye una amenaza al desarrollo sostenible...*”. El “*aumento del estrés hídrico y la satisfacción de la demanda futura exigirán tomar decisiones cada vez más difíciles sobre la distribución de los recursos hídricos entre los diferentes usos posibles del*

agua” (UN-Water 2019). Lo señalado por dicha agencia internacional de Naciones Unidas es perfectamente aplicable al caso cubano.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados presentados en este trabajo demuestran que se está produciendo una reducción de los recursos hídricos potenciales. Como resultado se estima que los recursos hídricos potenciales actuales del país son 33 km³, un 15% menos de los 38,1 km³ que se consideran existen, y en el año 2030, serán 30 km³, lo que representaría un déficit superior al 21%, con respecto a la cifra refrendada por el INRH. Pero el escenario actual y futuro de agua aprovechable debe ser más crítico, porque además de que no todos los recursos hídricos potenciales son aprovechables, adicionalmente, los recursos de agua subterránea sufrirán afectaciones por el impacto de la intrusión marina y por los cambios previsibles que ocurren y que se intensificarán en la recarga natural y en el nivel estático de los acuíferos.

La distribución espacial del déficit de escurrimiento al 2030 indica que, en cualquiera de los escenarios climáticos del futuro, la reducción de agua se manifestará en todo el país, con mayor incidencia en las regiones occidental y oriental, aunque las diferencias regionales no son notables. Por otra parte, aunque no ha sido tratado en este artículo, las proyecciones hechas al futuro también demuestran que, hacia finales del siglo, la reducción de los recursos hídricos potenciales continuará acentuándose.

Los resultados obtenidos aconsejan a dar una mirada más profunda en las proyecciones, actuales y futuras, de la relación demanda - suministro, para garantizar los planes que dependan de la disponibilidad de agua, incluyendo las necesidades hídricas de los ecosistemas naturales. Es impostergable la reevaluación detallada de los recursos hídricos del país a todas las escalas; así como de todas las obras hidráulicas existentes, para considerar adecuadamente los cambios que se han producido y están ocurriendo en el régimen hidrológico.

Se requiere integrar la gestión sectorial en las políticas climáticas y fortalecer la investigación científica sobre los impactos del cambio climático y la adaptación en la gestión sectorial y social. Como parte de esto, los sistemas de vigilancia climática e hidrológica también deben ser fortalecidos e integrados, preferiblemente en un sistema unificado, como soporte de las decisiones de adaptación al cambio climático

REFERENCIAS

- Batista J. L.** (2016). “Evaluación de los recursos hídricos de Cuba”, Revista geográfica 157, pp 73-83, ISSN 2663-399X, Instituto Panamericano, extraído de: <http://repositorio.geotech.cu/jspui/handle/1234/1675>, en marzo del 2021
- CITMA.** (2001). “Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático”, extraído de: <https://unfccc.int/gcse?q=Cuba> en marzo del 2010. Cuba
- CITMA.** (2015). Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático”, extraído de: <https://unfccc.int/documents/104917> en julio del 2020.Cuba
- CITMA.** (2020). “Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático”, extraído de: <https://unfccc.int/documents/266604>, en diciembre del 2020.Cuba
- Collins W.J., Bellouin M. Doutriaux-Boucher N., Gedney T., Hinton C. D., Jones S., Liddicoat G., Martin F., O'Connor J., Rae C. , Senior I., Totterdell,S. , Woodward T.**

- and Reichler J.** (2008). Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note no. HCTN 74, available from Met Office, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB
- CEPAL/CAC-SIC.** (2020). “Análisis espacial de datos históricos y escenarios de cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana”, LC/MEX/TS.2020/43, Ciudad de México.
- Cubadebate.** (2021). “Para tener más arroz cubano en la mesa”. extraído de: <http://mesaredonda.cubadebate.cu/mesa-redonda/2021/04/14/medidas-para-el-fortalecimiento-de-la-agricultura-cubana-video/> en septiembre del 2020.
- Du C., Sun J., Yu F., Liu X. and Chen Y.** (2016). “New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions”. *Hydrology and Earth System Sciences.*, 393–409, ISSN 1027-5606, extraído de: <https://hess.copernicus.org/articles/20/393/2016/> en marzo 2021.
- Gupta H., Bastidas L., Sorooshian S., Shuttleworth W., Yang Z.** (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377, 80–91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- Herrera J, López T. y González F.** (2011). “El uso del agua en la agricultura en Cuba. Ingeniería Agrícola”, Ingeniería Agrícola, ISSN-2227-8761, vol. 1, No. 2, pp. 1-7. Cuba.
- INRH** (1986). “Esquema regional precisado para la utilización de los recursos hídricos y de suelos de las provincias cubanas”. Informe Técnico. INRH, La Habana. Cuba.
- Kling H., Fuchs M. and Paulin M.** (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424, 264–277. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.011.
- Laiz O y Flores E.** (2010). “Pérdida de capacidades almacenaje en embalses cubanos”, Aqua-LAC, Vol. 2, No 2, pp. 12 – 21, ISSN 1688-2873. Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe, Unesco.
- Planos E, Gutiérrez T., Capote R., Barranco G., Salabarría D. y Vales M.** (2018). “Aportes del Programa Nacional de Ciencia Cambio Climático en Cuba: Impactos, Adaptación y Mitigación”. Agencia de Medio Ambiente. Editorial AMA. Cuba.
- Rodríguez F.** (2005). “Estudio pluvial de Cuba. Período principal 1961-2000”, Informe técnico INRH, 2005, 65 pp. Cuba
- Rivero R.** (2008). “Workbook on climate change impact assessment in agriculture basic knowledge, methodologies and tools”. ISBN 978-976-95260-1, Institute of Meteorology and Caribbean Community Climate Change Center.
- UN-Water.** (2019). “Informe de políticas de AGUA-ONU sobre el cambio climático y el agua”. UN-Water Technical Advisory Unit, extraído de: https://www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf en mayo del 2021.
- Velazco E.** (2016). “Un acercamiento a los aliviaderos en Cuba (parte 1)”, *Voluntad Hidráulica* 116, abril-junio 1961, ISSN 0505-9461, pp 4-19, La Habana, Cuba.
- Ven Te Chow.** (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-010810-2. New York

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Eduardo O. Planos Gutiérrez

<https://orcid.org/0000-0002-1794-7327>

Realizó el artículo en su totalidad.