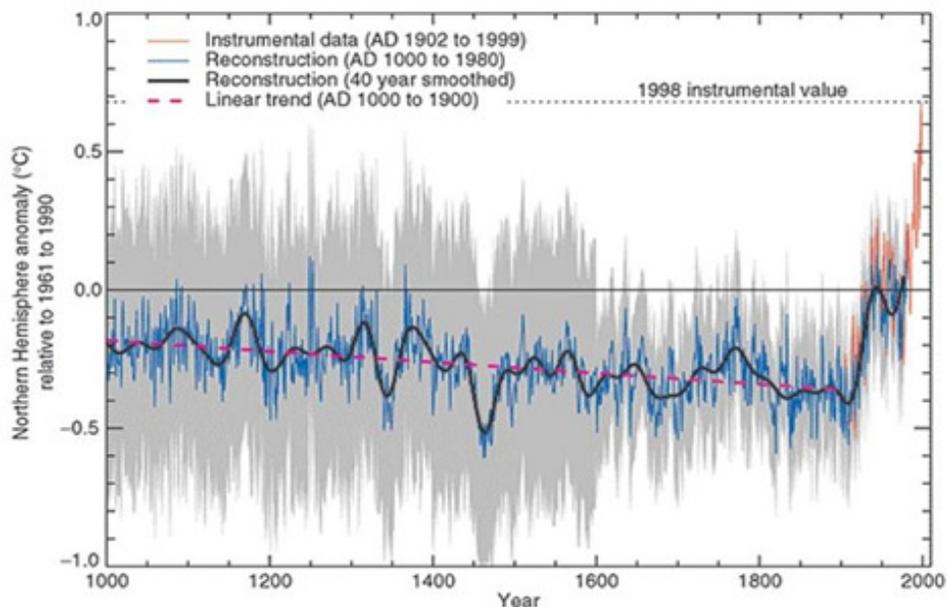


EFFECTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMATICO EN LAS ZONAS DE VIDA NATURAL Y LOS RECURSOS DE AGUA DE PUERTO RICO

Por Ferdinand Quiñones, PE

La evidencia del calentamiento global es contundente, como lo confirman los datos recientes de la NASA (NASA, 2010) resumidos en la Figura 1. Las temperaturas generales del planeta Tierra continúan aumentando a paso acelerado, alcanzando niveles no observados en los últimos 1,000 años. Aunque el aumento en la concentración de bióxido de carbono aparenta ser el factor principal en el calentamiento de la atmósfera, cosmólogos y otros científicos presentan también evidencia robusta de que procesos relacionados a la mecánica celeste de la Tierra en su rotación y translación alrededor del sol (ciclos de Milankovich), y la actividad solar, son la verdadera causa del calentamiento atmosférico (UMontana, 2006). También apuntan grupos de científicos que, al igual que hace 1,000 años y repetidas veces en el tiempo geológico, este calentamiento es temporero y cíclico, y la Tierra eventualmente se enfriará nuevamente (IPCC, 2007).

Figura 1. Cambios globales en temperatura desde el año 1,000 (NASA, 2010).



Aceptando como premisa que el planeta sufre un calentamiento global sea temporero o permanente, es importante evaluar los posibles impactos que dicho efecto tendría en Puerto Rico. En este escrito se analizan los posibles efectos de aumentos en temperatura en las zonas de vida natural de Puerto Rico así como en los recursos de agua de la Isla. No se analiza el efecto de incrementos en el nivel del mar, que es tema de abundante especulación. El análisis incluyó el desarrollo y aplicación de un modelo climático simplificado utilizando el índice Thornthwaite de precipitación (P) y Temperatura (P) (Thornthwaite, 1938). Este índice (IPET) incluye los dos parámetros de mayor importancia que serán afectados por el cambio climático global y local. Los valores de T aparentan ya haber aumentado aproximadamente 0.5 grados Centígrados, según documentado por la NASA. No existen datos estadísticos significativos sobre aumentos actuales y potenciales en los valores de lluvia en la Isla, por lo que el análisis asumen reducciones potenciales de 10 % y 20 % sobre el promedio actual, que

para toda la Isla es de aproximadamente 69 pulgadas por año, con variaciones desde 35 pulgadas en el Valle de Lajas hasta 250 pulgadas en el Yunque. Los efectos potenciales en los recursos de agua se evaluaron indirectamente de datos de escorrentía promedio anual descargada al mar por los ríos y quebradas principales de la Isla.

Trasfondo del Modelo de Temperatura y Precipitación

Thornthwaite desarrolló en 1938 un modelo simple para calcular un índice que permite evaluar cambios climáticos potenciales. El índice incluye datos promedios anuales de Precipitación (P) y Evaporación (E). Calculado para una zona o región, resulta en un valor numérico aplicable a zonas climáticas diversas. El valor de IPET se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$IPET = 10 \sum P/E, \text{ desde } n=1,12$$

donde P – Precipitación promedio mensual, en pulgadas (in)
E – Evaporación promedio mensual, en pulgadas (in)

Debido a que los datos de Evaporación no están disponibles en la mayor parte de las zonas donde se mide la Precipitación, en 1948 Thornthwaite desarrolló una ecuación empírica (validada con datos de campo) para estimar el valor de IPET usando la Precipitación (P) y la Temperatura (T), la cual está disponible en todas las áreas donde se mide P por el NWS (Thornthwaite, 1948). La ecuación empírica es como sigue:

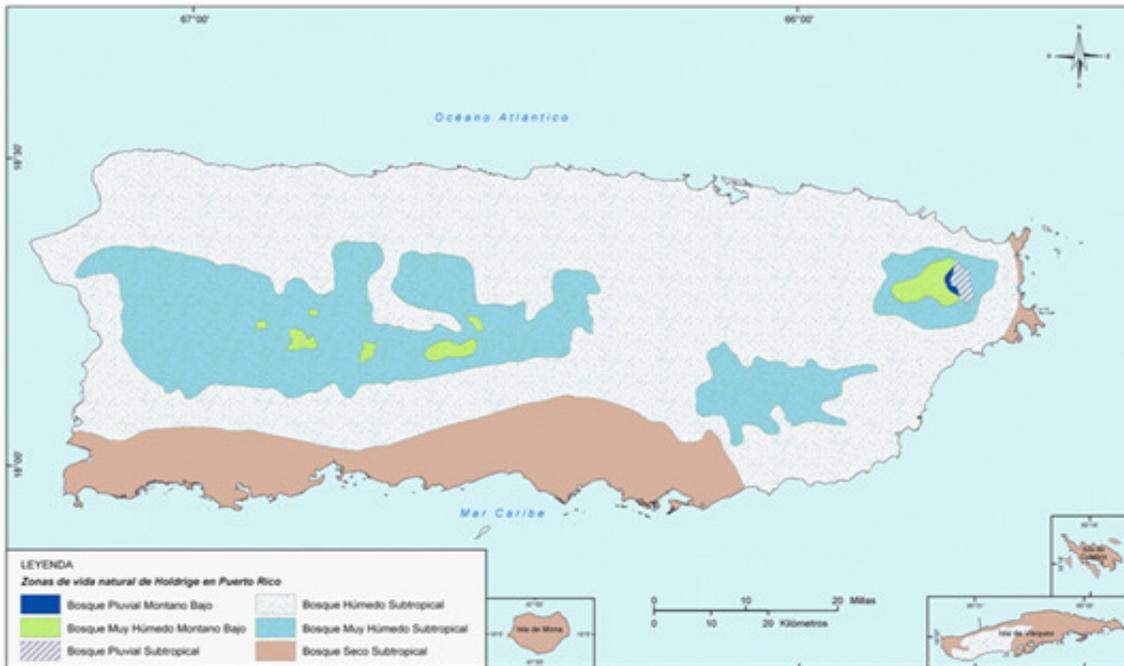
$$IPET = 115 \sum [(P)/(T-10)], \text{ desde } n=1,12$$

Thornthwaite utilizó el IPET para definir provincias de humedad y zonas de vida vegetal, según se resume en la Tabla 1. Posteriormente, Holdridge (1947) aplicó los principios de Thornthwaite para definir zonas de vida natural en una extensión territorial. Utilizando valores de Temperatura (T), Precipitación (P), y Evapotranspiración (ET). Estas zonas son divisiones climáticas que definen condiciones en ecosistemas naturales diversos, variando desde zonas áridas desérticas a bosques lluviosos húmedos. En Puerto Rico, zonas de vida natural fueron definidas por Ewel y Whitmore (1973) en base a las clasificaciones climáticas de Holdridge (1947). Estas zonas de vida en la Isla definidas utilizando los valores de Holdridge se resumen en la Tabla 1 y la Figura 2.

Tabla 1. Clasificación de Provincias de Humedad en base al índice de Thornthwaite.

ZONA	CARACTERISTICAS DE LA VEGETACION	VALOR DEL IPET
A (MOJADA)	BOSQUE LLUVIOSO	>127
C (HUMEDA)	BOSQUE LLUVIOSO SUBTROPICAL	64-127
D (SUB-HUMEDO)	BOSQUE HUMEDO	32-63
E (SEMI-ARIDO)	BOSQUE SUBTROPICAL	16-31
F (ARIDO)	BOSQUE SECO SUBTROPICAL	<16

Figura 2. Zonas de vida natural de Puerto Rico determinadas mediante el método de Holdridge (Ewel and Whitmore, 1973).



Además, estos principios de Thornthwaite fueron utilizados por Giusti y López (1967) para estimar valores de Evapotranspiración en la Isla, lo que permitió validar la definición de las zonas de vida natural de Holdridge. Estos investigadores relacionaron la escorrentía y área de captación de una cuenca a los valores de IPET, según se ilustra en la Figura 3.

Figura 3. Correlación para estimar valores de Evapotranspiración en Puerto Rico desarrollada por Giusti-López (1967).



Los estudios de Thornthwaite, Holdridge, y Giusti-López anteriormente referidos fueron utilizados para evaluar los cambios en las zonas de vida natural de Puerto Rico que el cambio climático podría ocasionar. Esto se llevó a cabo utilizando el siguiente procedimiento:

1. Se obtuvieron datos históricos de Precipitación y Temperatura del Servicio Nacional de Meteorología (NWS). Datos de aproximadamente 100 años de P diarios en 105 estaciones pluviométricas en la Isla fueron resumidos a valores promedios anuales y consolidados en un mapa digital por el Dr. Greg Morris para el DRNA (Figura 4). Los datos de T del NWS fueron igualmente consolidados en promedios anuales como se ilustra en la Figura 5.

Figura 4. Precipitación promedio en Puerto Rico de 1970-2000 (NWS, 2010)

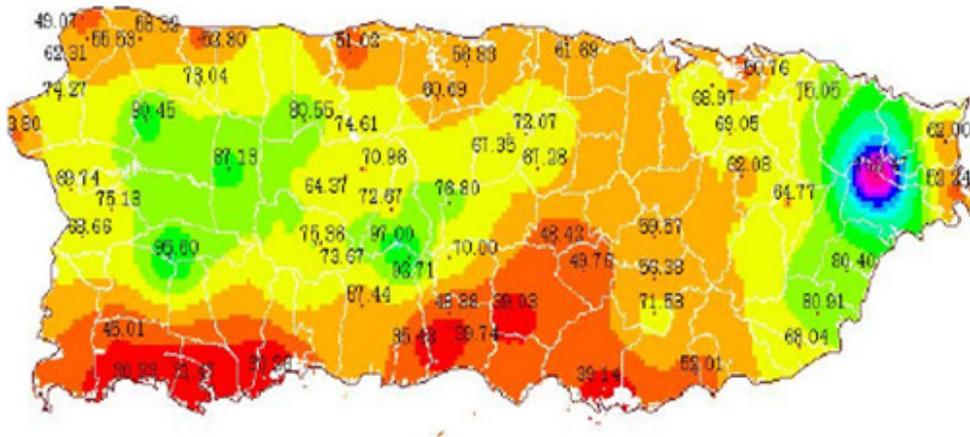
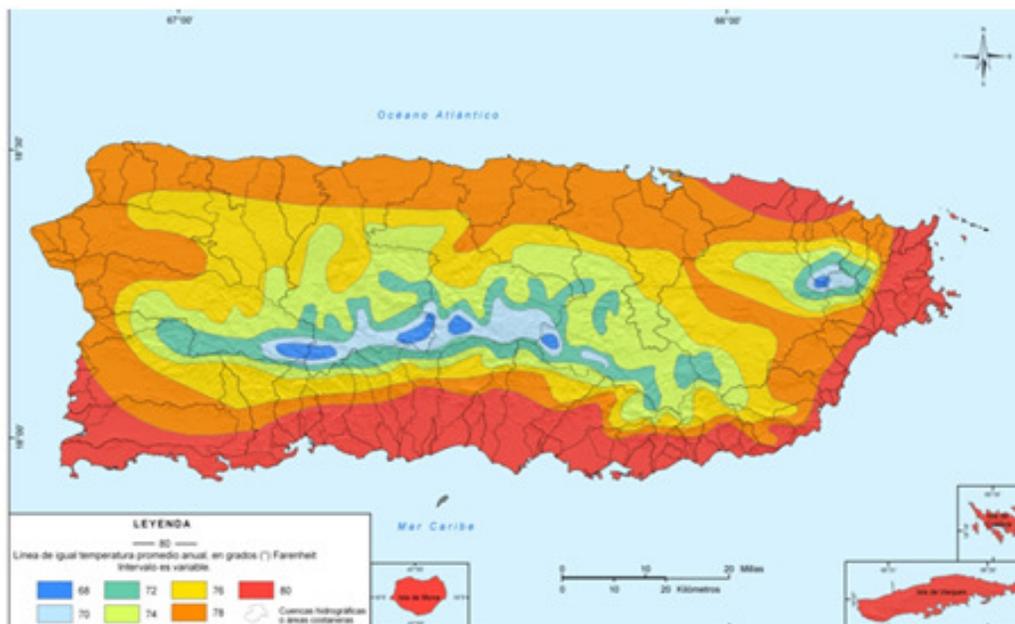
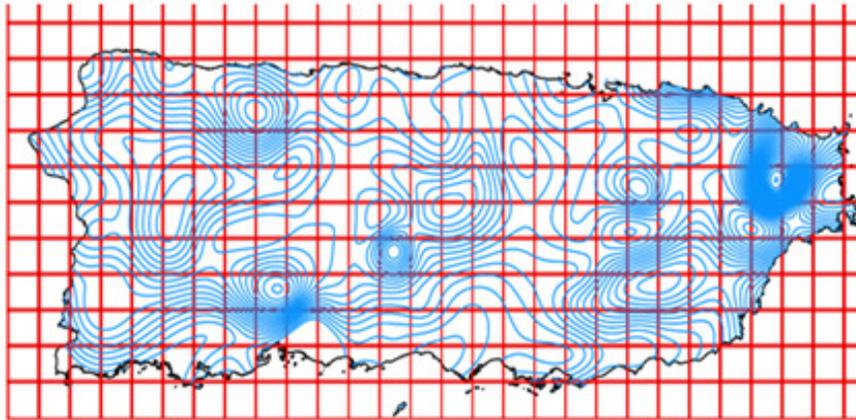


Figura 5. Temperatura promedio anual en Puerto Rico (DRNA, 2005)



2. Se diseñó una matriz de celdas sobre la extensión de la Isla donde se calcularon los valores de IPET con la fórmula 1 anterior utilizando los valores del promedio anual de P y T de los datos diarios del NWS. Esta matriz se ilustra en la Figura 6.

Figura 6. Matriz de cálculo para valores de IPET en Puerto Rico.

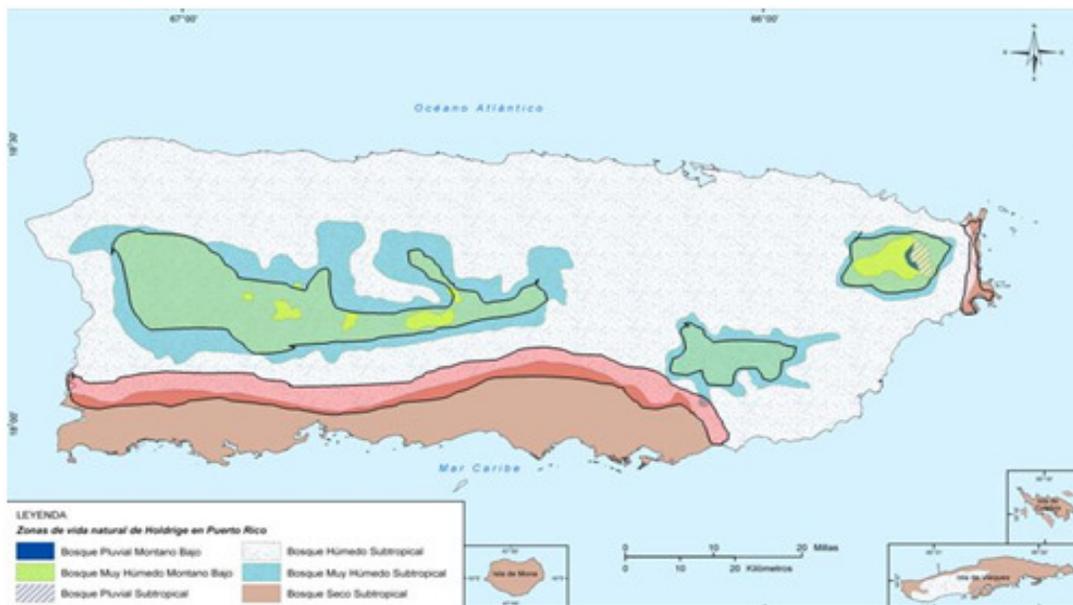


3. Se simuló cambios en los valores promedios anuales de Temperatura representando varios escenarios de incrementos en su valor desde 0.5 grados Centígrado ($^{\circ}\text{C}$) a 5 $^{\circ}\text{C}$. Con estos cambios se recalculó los valores del IPET y se comparó con las zonas de vida natural definidas por el método de Holdridge.

Los resultados de análisis de los efectos potenciales de los aumentos de temperatura indicados en las zonas de vida natural de la Isla se resumen a continuación:

1. Los efectos de aumentos de hasta dos $^{\circ}\text{C}$ en la temperatura promedio en Puerto Rico no aparentan resultar en efectos significativos en las zonas de vida natural.
2. Una vez se excede el aumento de dos $^{\circ}\text{C}$ en la Temperatura promedio, las zonas de vida secas de la Región Sur comienzan a extenderse hacia las laderas montañosas. Debido a la gran cantidad de lluvia en las zonas montañosas de las cordilleras de la Isla, no son notables cambios significativos en estas zonas hasta que no ocurren aumentos en la Temperatura promedio mayores de cuatro $^{\circ}\text{C}$.
3. El efecto de un aumento de 5 $^{\circ}\text{C}$ es significativo en las zonas secas de la Región Sur (zona rosada en la Figura 5) y las zonas lluviosas del centro de la Isla incluyendo el Bosque Nacional del Yunque (zonas verdes en la Figura 5). Estos efectos se resumen en la Figura 7, donde se comparan las zonas de vida natural vigentes con las que resultarían con el aumento de 5 $^{\circ}\text{C}$ en Temperatura.

Figura 7. Efectos de un aumento de 5 °C en la temperatura promedio anual sobre las zonas de vida natural de Puerto Rico.



EFFECTOS POTENCIALES DEL CAMBIO CLIMATICO EN LOS RECURSOS DE AGUA DE PUERTO RICO

No es posible estimar con confianza los efectos potenciales del cambio climático sobre los recursos de agua de Puerto Rico. Esto se debe a la complejidad de la climatología, geografía, geología e hidrología de la Isla. Es imposible predecir cuándo una vaguada o un huracán inducirán hasta 25 pulgadas de lluvia sobre la Isla, como ocurre con relativa frecuencia. Tampoco es posible estimar cuándo una sequía severa como las de 1967 y 1994 resultarán en reducciones drásticas en la escorrentía de los ríos y quebradas que fluyen de las cordilleras hacia el mar.

Sin embargo, existen suficientes datos hidrológicos en Puerto Rico que permiten evaluar con confianza los efectos de reducciones en escorrentía en el uso de agua en la Isla, que es el asunto de mayor importancia a la comunidad que consume el agua. No se implica que debe descartarse la importancia del agua a la vida acuática, y esto se puede analizar indirectamente con datos de flujos mínimos disponibles.

Utilizando estas premisas y los abundantes datos de escorrentía (incluyendo flujos totales anuales y flujos mínimos), así como datos históricos de uso de agua en Puerto Rico, se llevó a cabo el siguiente análisis:

1. Se recopilaron los datos históricos de escorrentía que los ríos principales de la Isla descargan al mar. Estos datos se obtuvieron de los archivos electrónicos del Servicio Geológico Federal (USGS), agencia que mantiene o ha mantenido en la Isla desde 1957 estaciones que miden la escorrentía en forma continua. La ubicación de estas estaciones se resumen en la Figura 8.

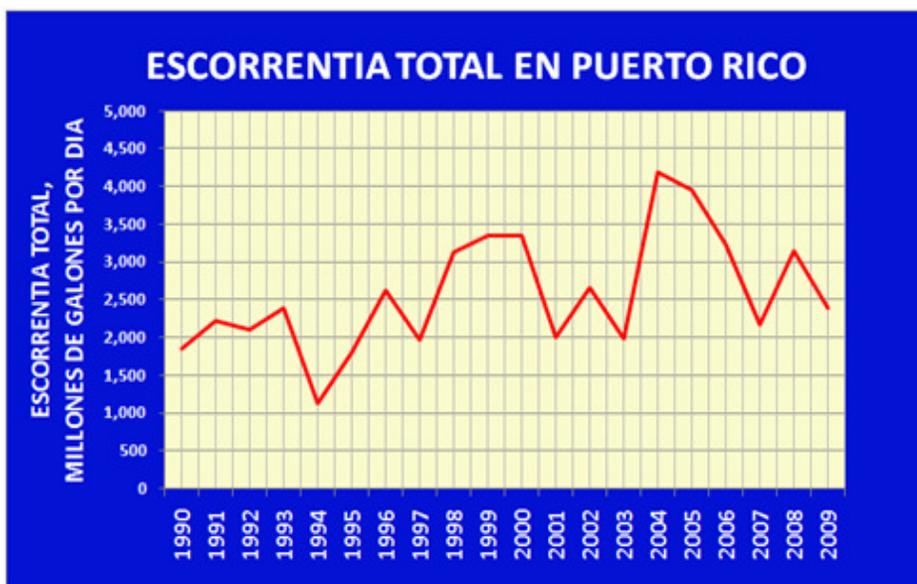
Figura 8. Estaciones actuales e históricas operadas por el USGS para medir escorrentía En los ríos y quebradas en Puerto Rico.

Fuente: USGS, 2008



2. En cada una de las estaciones más cercanas al mar se calcularon las descargas de flujo promedios anuales de 1990 al 2009. Este período representa los años de mayor cobertura del máximo del área de drenaje de todas las cuencas de la Isla. Las estaciones seleccionadas representan aproximadamente el 90 % del área total de drenaje de la Isla (aproximadamente 3,230 millas cuadradas).
3. Los promedios anuales durante el período indicado se consolidaron en un hidrograma común, resumiendo la cantidad de escorrentía total descargada de la Isla para los años de 1990 al 2009. Este hidrograma para toda la Isla se resume en la Figura 9.

Figura 9. Hidrograma de escorrentía promedio anual descargada de Puerto Rico al mar.



Este hidrograma para toda la Isla refleja los eventos de las sequías de 1994 y los huracanes Hortense (1996) y Georges (1998), así como la serie de vaguadas y huracanes cercanos que resultaron en precipitaciones intensas y escorrentía abundante en 2004 y 2005.

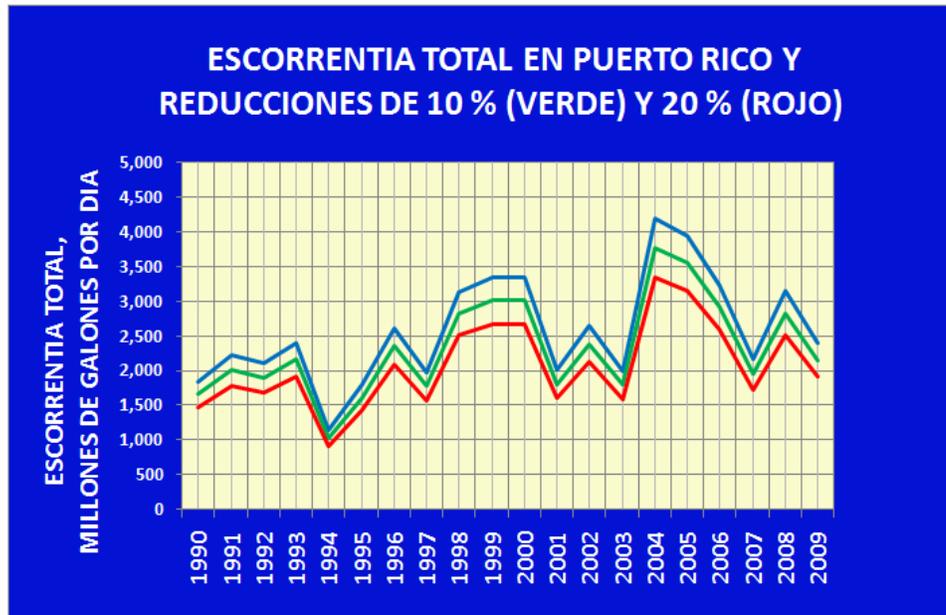
- Regionalmente, la escorrentía es abundante y adecuada para las demandas presentes y futuras previsibles, aún durante períodos de sequías. Esta comparación se ilustra en la Figura 10 donde se incluye además de la escorrentía, los promedios anuales de extracciones de agua de la AAA y los flujos mínimos representados por la escorrentía mínima durante un período consecutivo de 120 días.

Figura 10. Escorrentía promedio anual, flujos mínimos y extracciones de agua por la AAA en las tres regiones principales de Puerto Rico de 1990-2009.



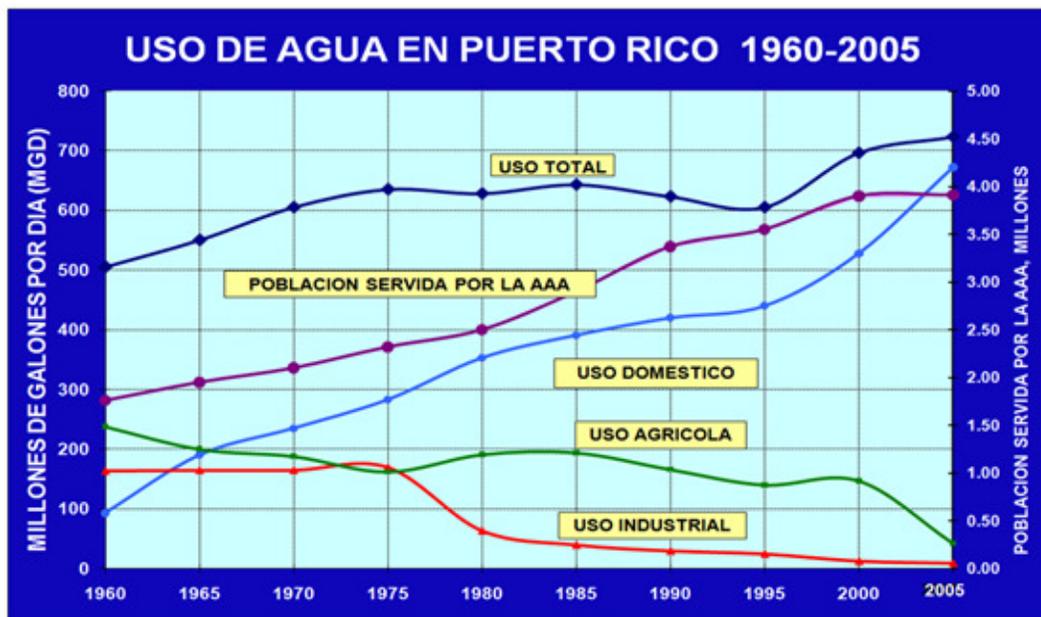
- Se asumieron dos escenarios en que el cambio climático pudiera reducir la escorrentía en un 10 % y en un 20 % de la actual. La escorrentía pudiera reducirse por reducciones en la lluvia y aumentos en la evaporación directa. En las zonas secas donde ahora ocurre menos evapotranspiración que la máxima potencial por falta de humedad en el suelo, su valor no cambiaría o se reduciría. En las zonas de humedad abundante la evapotranspiración debería permanecer igual. Esto permite comparar los promedios anuales con estos escenarios extremos. Estas reducciones se ilustran en la Figura 11

Figura 11. Escorrentía promedio anual comparada con reducciones de un 10 % (verde) y 20 % (rojo).



El uso total de agua en la Isla desde 1990 al 2009 se obtuvo de investigaciones del USGS sobre este tema, que datan de 1960. Estos datos se resumen en la Figura 12, donde se ilustra un aumento en el uso de agua total en la Isla de 500 millones de galones por día (mgd) en 1960 a 725 mgd al presente. Sin embargo, el aumento en el uso doméstico por la AAA es dramático, de menos de 100 mgd en 1960 a cerca de 675 mgd en el 2005.

Figura 12. Uso de agua en Puerto Rico de 1960 al 2005.



El uso de agua en la Isla se comparó con la escorrentía descargada al mar al presente y las reducciones que pudieran resultar del cambio climático. Estas comparaciones se resumen en la Figura 13.

Figura 13. Comparación de reducciones en escorrentía de 10 % y 20 % y demanda de agua para uso público (AAA) en Puerto Rico.



DISCUSION DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de los posibles efectos del cambio climático en las zonas de vida natural de Puerto Rico, y en la cantidad de escorrentía en los ríos de la Isla, permiten concluir lo siguiente:

1. Aumentos en la temperatura promedio en la Isla de hasta cinco grados Centígrados podrían resultar en una expansión sustancial de las zonas secas de la Región Sur y una disminución moderada de las zonas lluviosas de la Región Central incluyendo en el área del Bosque Nacional del Yunque. Estos cambios pudieran impactar la agricultura en la Región Sur y un gran número de especies en peligro de extinción o únicas en dichas zonas.
2. Disminuciones de hasta un 20 % en la escorrentía promedio anual en los ríos principales de la Isla no afectarían significativamente los abastos de agua necesarios para consumo doméstico y riego agrícola. El uso total de agua en la Isla es mucho menor que la peor condición que ocurriría aún durante períodos de sequía intensa. Afortunadamente, Puerto Rico recibe una gran cantidad de lluvia que induce un caudal extraordinario de escorrentía, y reducciones de hasta el 20 % en dicha escorrentía no impactarían significativamente el agua disponible para uso público y la agricultura. Los embalses son la clave en este balance, pues proveen hasta el 70 % del agua que la AAA utiliza almacenando una fracción de la escorrentía total, cuyo exceso fluye hacia el mar.

Estas conclusiones no implican que los funcionarios responsables en Puerto Rico del manejo y uso de agua no tengan que estar alertas a los efectos del cambio climático sobre la lluvia y escorrentía en la Isla. El mantenimiento a largo plazo de las redes de precipitación y escorrentía es esencial para obtener datos confiables que permitan el manejo adecuado de las zonas de vida natural y de los recursos de agua. Aún con la relativa abundancia de agua que la Puerto Rico disfruta, es necesario su uso juicioso y conservación estricta.

REFERENCIAS

- Ewel, J.J. y J.L. Whitmore, 1973. The Ecological Life Zones of Puerto Rico and the U.S. Virgin Islands. Institute of Tropical Forestry, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Rio Piedras, Puerto Rico.
- J. Hansen, R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo, 2010, Global Surface Temperature Change: NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, New York, USA.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.P. Tett, and P.D. Jones, Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *J. Geophys. Res.*, 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548, 2006.
- Foster, G., J.D. Annan, P.D. Jones, M.E. Mann, B. Mullan, J. Renwick, J. Salinger, G.A. Schmidt, and K.E. Trenberth, Comment on "Influence of the Southern Oscillation on tropospheric temperature" by J.D. McLean, C.R. de Freitas, and R.M. Carter, *J. Geophys. Res.*, **115**, doi:10.1029/2009JD012960.
- Milankovitch Cycles and Glaciation, 2006, <http://www.homepage.montana.edu/geol445/hyperglac/time1/milankov.htm>.
- Downscaled climate change impacts on reference evapotranspiration and rainfall deficits in Puerto Rico, 2009, Eric W. Harmsen¹, Norman L. Miller², Nicole J. Schlegel³ and J. E. Gonzalez⁴
- Giusti, E.V., and López, M.A., 1967, Climate and streamflow of Puerto Rico: *Caribbean Journal of Science*, September-December 1967, v. 7, no. 3-4, p. 87-93.
- Holdridge L.R., 1947. Determination of World Plant Formations from Simple Climatic Data: *Science* Vol. 105, No. 2727. pp. 367-368.
- Holdridge, L.R., 1967. Life zone ecology. Tropical Science Center. San José, Costa Rica.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- National Research Council (NRC), 2006. Surface Temperature Reconstructions For the Last 2,000 Years. National Academy Press, Washington, DC.
- Thornthwaite, C.W., 1931, An approach toward a rational classification of climate: *Geographical Review*, Vol. 21, 649.
- Thornthwaite, C.W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, revision: *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1, pp 55-94.
- USGS, 2009, Water Resources Data for Puerto Rico: USGS Web usgs.gov.