

COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN CUENCAS FORESTALES

Comparison of Methods to Estimate Water Availability on Forest Watersheds

Carlos Rodrigo Martín Clemente¹, Joaquín Sosa Ramírez^{2‡}, Manuel Maass Moreno³, José de Jesús Luna Ruiz², Antonio de Jesús Meráz Jiménez² y Ernesto Flores Ancira²

¹ SEMARNAT, Delegación Federal en Aguascalientes. Av. Francisco I. Madero no. 344 Zona Centro. 20000 Aguascalientes, Ags., México.

² Universidad Autónoma de Aguascalientes. Depto. de Disciplinas Agrícolas. Av. Universidad no. 940, Cd. Universitaria. 20131 Aguascalientes, Ags., México.

‡ Autor responsable (jsosar@correo.uaa.mx)

³ CIEco UNAM Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro no. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. 58190 Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

La cuenca de la Presa Calles se ubica dentro de la Sierra Fría, en el estado de Aguascalientes, México. Pese a ser la principal fuente de agua del acuífero interestatal “Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación” no existen estudios sobre la dinámica hídrica en este ecosistema. Este trabajo compara la disponibilidad hídrica de la cuenca de la Presa Calles, estimada a partir del modelo de balance hídrico de Thornthwaite y Mather (B.H.), corregido en función de la latitud y ponderado mediante polígonos de Thiessen, asociado a las fórmulas para el cálculo de evapotranspiración potencial de Thornthwaite, Blaney-Criddle y Hargreaves-Samani. La comparación se realizó aplicando la prueba de diferencia significativa honesta de Tukey (Tukey DSH), con $\alpha = 0.05$. Como referente se calculó la disponibilidad hídrica de la cuenca con el Método directo registros hidrométricos (MDRH) propuesto por la NOM-011-CNA-2000. La disponibilidad hídrica se estimó en 28.52 Mm³ (B.H. + Thornthwaite), 51.30 Mm³ (B.H. + Hargreaves-Samani), 133.92 Mm³ (B.H. + Blaney-Criddle) y 50.66 Mm³ (MDRH). La prueba de Tukey DHS indicó que no existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos mediante el MDHR y el B.H. + Hargreaves-Samani ($P = 0.999031$), en oposición a la diferencia significativa encontrada para los otros dos métodos ($P = 0.000164$, $P = 0.000335$). La mejor estimación de la disponibilidad hídrica de la cuenca se obtuvo usando el método B.H. + Hargreaves-Samani, por lo que este puede ser utilizado en sitios donde no puedan obtenerse mediciones directas, para recabar información base para el establecimiento de acciones primarias de manejo.

Palabras claves: *Blaney-Criddle, escorrentía, Hargreaves-Samani, Thornthwaite y Mather.*

SUMMARY

The Calles watershed is located in Sierra Fría, Aguascalientes, Mexico. Although it is the main water resource of the interstate aquifer “Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación”, there are no studies on the water dynamics of this ecosystem. This work compares the water availability of the Calles watershed estimated through the Thornthwaite & Mather water balance model (W.B.), latitude adjusted and weighted by Thiessen polygons, associated to the potential evapotranspiration formulas of Thornthwaite, Blaney-Criddle and Hargreaves-Samani. The comparison was done through the Tukey HSD (Honest Significant Difference) test, with alpha = 0.05. The watershed's water availability was calculated through the Hydrometric records direct method (HRDM) proposed by the NOM-011-CNA-2000 as a reference. Water availability was estimated at 28.52 Mm³ (W.B. + Thornthwaite), 51.30 Mm³ (W.B. + Hargreaves-Samani), 133.92 Mm³ (W.B. + Blaney-Criddle) and 50.66 Mm³ (HRDM). The Tukey HSD test results shows that there was no significant difference between the values obtained through the HRDM and the W.B. + Hargreaves-Samani ($P = 0.999031$), contrasting with the significant differences found between the other pairs of methods ($P = 0.000164$, $P = 0.000335$). Therefore, the W.B. + Hargreaves-Samani produced the best watershed water availability value. It can thus be used to obtain basic information to establish primary management actions in places where direct measurements cannot be obtained.

Index words: *Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, runoff, Thornthwaite and Mather.*

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas son unidades territoriales donde se combinan procesos ecológicos, como el ciclo del agua y se producen bienes y servicios (Maldonado-De León *et al.*, 2001). Históricamente las sociedades humanas se han establecido en sitios próximos a cuerpos de agua, lo que les ha permitido sostener sus necesidades básicas, así como sus actividades productivas (Baron *et al.*, 2003). Es por eso que el agua es un recurso indispensable para el desarrollo social y económico (Barkin y King, 1970).

En los últimos años, los problemas ambientales se han agudizado debido a alteraciones estructurales y funcionales de los ecosistemas, repercutiendo en los sistemas económicos y sociales (Folke *et al.*, 2002) y disminuyendo tanto la biodiversidad como la provisión de servicios ecosistémicos (Costanza *et al.*, 1997), entre ellos los hidrológicos. De ahí la necesidad de establecer políticas que aseguren la conservación, restauración y uso sustentable de los ecosistemas (Meyerson *et al.*, 2005; Millennium Ecosystem Assessment, 2005), ya que un manejo sustentable del mismo redundaría en un manejo sustentable del agua (Maass, 2003). Es más, un manejo adaptativo y colaborativo basado en procesos científico-políticos permitirá realizar esfuerzos proactivos para mantener a los ecosistemas dentro de los límites de la seguridad hídrica (Scott *et al.*, 2013).

Grey y Sadoff (2007) definen la seguridad hídrica como la disponibilidad de agua en una cantidad y calidad aceptable para la salud, satisfacción de necesidades, ecosistemas y producción, asociada con un aceptable nivel de riesgo hídrico para las personas, el ambiente y la economía. La seguridad hídrica puede entenderse como la capacidad de la sociedad para garantizar: a) una adecuada cantidad y calidad de agua para el funcionamiento de los ecosistemas, b) la producción y autosuficiencia alimentaria, c) la satisfacción de las necesidades básicas de la población, d) la reducción y el manejo adecuado de los conflictos y disputas por el agua; y e) la capacidad para prevenir y enfrentar desastres como sequías, inundaciones y epidemias asociadas con enfermedades hídricas como el cólera (Ávila-García, 2008).

El modelo de balance hidrológico propuesto por Thornthwaite y Mather (1957) y reportado por Dunney Leopold (1978), pese a ser de los primeros desarrollados, sigue siendo ampliamente utilizado donde se carece de información detallada, como es el caso en nuestra zona de estudio y en muchas partes del país. Este considera la precipitación como entrada de agua al sistema y la evapotranspiración y la escorrentía como salidas; así, el diferencial entre la precipitación y la evapotranspiración resulta ser la disponibilidad hídrica, equiparada con el escurrimiento natural superficial y subsuperficial de la cuenca. El modelo también considera los cambios en la humedad del suelo a través del tiempo en función de la evapotranspiración.

Se han desarrollado diferentes métodos para el cálculo empírico de la evapotranspiración, entre los que se encuentran los de temperatura como los de Thornthwaite (1948), Blaney-Criddle (citado por Dunne y Leopold, 1978), Turc (1961), Hargreaves-Samani (1985), y los de radiación como el Penman modificado (Doorenbois y Pruitt, 1977). Para su cálculo, todos ellos se basan en diferentes variables climáticas, algunas coincidentes por lo que permiten su comparación.

Si bien el método de Penman-Monteith es el más recomendado por la FAO, para su utilización se requiere gran cantidad de información, la cual no siempre está disponible, así como la resolución de ecuaciones complejas (Kelso-Bucio *et al.*, 2012), por lo que resulta complicada su aplicación en muchas de las cuencas del país. Los métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración, que requieren de información más fácil de conseguir como lo es la temperatura y la precipitación, pueden proporcionar valores aceptables de ésta y así poder estimar de manera indirecta pero confiable, la disponibilidad hídrica de la cuenca forestal. Estos métodos empíricos, sin embargo, requieren ser validados para las condiciones particulares en las que se quieren utilizar.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) a fin de tener un marco claro para determinar la disponibilidad hídrica de una cuenca y establecer políticas sobre el uso de este recurso, publicó en 2002 la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 Conservación del recurso agua, la cual establece, en su Apéndice A, el Método directo registros hidrométricos 'MDRH'.

La comparación de estos métodos permitirá determinar cuál de ellos proporciona valores de evapotranspiración más cercanos a la realidad y de esta manera validar su capacidad para estimar la disponibilidad hídrica en cuencas donde no pueden realizarse mediciones directas de la misma, y así tener elementos para hacer la evaluación de los diferentes elementos que componen la seguridad hídrica en ellas.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar tres métodos empíricos para el cálculo de la disponibilidad hídrica en una cuenca forestal, y determinar cuál de ellos proporciona datos que se ajusten mejor a la realidad de la misma. Estos tres métodos fueron comparados con los valores reales de la disponibilidad hídrica de la cuenca obtenidos de la medición directa del escurrimiento a través del MDRH, propuesto por la NOM-011-CNA-2000.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del Área de Estudio

La cuenca comprende una superficie de 596.80 Km² al noroeste del estado de Aguascalientes, México, entre los 22° 11' N y 102° 31' O, con altitudes entre 2100 y 2500 m. Se encuentra en el macizo conocido como Sierra Fría, el cual es un ecosistema de suma importancia para la recarga del Acuífero del Valle de Aguascalientes (COTAS, 2006), al ser un área natural protegida (DOF 1949; DOF, 2002; POEA, 1994). Pese a ello, no existen estudios formales sobre su hidrología y funcionamiento (Hernández-Dueñas y Maciel-Pérez, 2004).

En el área de drenaje existen arroyos intermitentes, bordos de abrevadero y las presas “La Araña”, “50 Aniversario” y “Calles”, 41.06% de la superficie de la cuenca está representada por bosques de *Quercus* spp., asociados con *Pinus* spp., *Juniperus* spp. y *Arctostaphylos* spp. (Siqueiros-Delgado, 2008; De la Cerdá-Lemus, 2008; Sosa-Ramírez *et al.*, 2011; Díaz *et al.*, 2012), 48.4% la ocupan pastizales con abundantes elementos arbustivos de *Arctostaphylos* spp. en la parte alta (probablemente producto de disturbios) y *Acacia* spp. en la parte baja, utilizados para ganadería, 6.86% agricultura, 3.37% cuerpos de agua y 0.31% asentamientos humanos. De acuerdo con el INEGI (2008), los suelos son someros con menos de 40 cm de profundidad, de color gris rojizo y gris oscuro con texturas franco arcillosas de moderada

pedregosidad superficial (Villalobos-Sánchez, 1998).

Cálculo de la Disponibilidad Hídrica Anual

La disponibilidad hídrica fue estimada a partir del modelo de balance hídrico propuesto por Thornthwaite y Mather (1957), con base en el diferencial entre la precipitación pluvial, la evapotranspiración actual y la retención de humedad en el suelo. Los valores de la lámina en mm fueron transformados en millones de metros cúbicos (Mm³) refiriéndolos a la superficie de la cuenca, para facilitar su manejo posterior. Los métodos empleados fueron asociaciones del método de balance hídrico de Thornthwaite y Mather con tres métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial, siendo éstas B.H. + Thornthwaite, B.H. + Blaney-Criddle y B.H. + Hargreaves-Samani.

La medición directa realizada a fin de contar con valores de referencia que sirvieran para seleccionar el método para calcular la disponibilidad hídrica que mejor se ajuste a la realidad de la cuenca, se empleó el método directo de registros hidrométricos ‘MDRH’ establecido en la NOM-011-CNA-2000. Para esto se utilizaron los registros de almacenamiento y extracciones de la Presa Presidente Plutarco E. Calles correspondientes al periodo 1980-2006, información proporcionada por CONAGUA. Los datos fueron medidos el día 1 de cada mes. El escurrimiento hacia aguas abajo fue tomado a partir del diferencial del almacenamiento anual en la presa; no existen importaciones, exportaciones, retornos, ni aportación de otras cuencas.

Cálculo de los balances hídricos. Los balances hídricos fueron obtenidos utilizando el modelo propuesto por Thornthwaite y Mather (1957), considerando: la precipitación pluvial (P_p), la evapotranspiración potencial (ETP), la evapotranspiración actual (ETA), la escorrentía (E) y el cambio en la humedad en el suelo (HS), medidas o estimadas mensualmente. La fórmula propuesta es la siguiente:

$$P_p = ETA + E + HS$$

Todos los valores se expresan en mm.

Dado que las fórmulas empleadas para la estimación de la ETP no hacen distinción entre tipos de cobertura vegetal, se consideró que no existe diferencia entre ellas, realizando las estimaciones para la totalidad de la cuenca.

Precipitación pluvial. Se obtuvo a partir de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (Cuadro 1) con registros diarios para el periodo 1980-2006, ponderadas mediante polígonos de Thiessen definidos mediante el programa ArcView 3.3 (Environmental Systems Research Institute, ESRI) y ajustadas en función de la topografía (Figura 1).

Temperatura del aire. Se obtuvo a partir de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (Cuadro 1) con registros para el periodo 1980-2006. Se obtuvieron las temperaturas máxima, mínima y media diarias.

Cambio en la humedad del suelo. Consiste en el diferencial entre la humedad del suelo del mes de estimación y la del mes anterior. La humedad del suelo para cada mes se obtuvo a partir de la curva “75 mm” presentada por Thornthwaite y Mather (1957), en función de la perdida potencial de agua dada por el diferencial entre la *Pp* y la *ETP* del mes de estimación, cuando este resulta negativo; los diferenciales positivos se igualan a 0. La curva “75 mm” se seleccionó con base en la tabla propuesta por Dunne y Leopold (1978) y a las características edafológicas reportadas para la zona, considerando 40 cm de profundidad promedio, una textura franco arcillosa y una retención de

Cuadro 1. Estaciones termopluviométricas utilizadas para el modelo.

Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud
		Norte	Oeste	m
00001047	Agua Zarca	22°01'30"'	102°34'22"'	2300
00001089	Presa 50 Aniversario	22°11'19"'	102°28'01"'	2050
00001010	La Tinaja	22°09'55"'	102°33'21"'	2425
00001018	La Presa Calles	22°08'32"'	102°24'56"'	2020
00001021	Rancho Viejo	22°07'30"'	102°30'47"'	2090

Todas las estaciones se ubican en el municipio de San José de Gracias, Ags.

humedad del 20%.

Evapotranspiración potencial según Thornthwaite (1948). Esta fórmula considera la temperatura media del aire y un índice de calor anual. Se encuentra definida por las siguientes ecuaciones:

$$ETP = 1.6 \left[\frac{10T_a}{I} \right]^a \quad I = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_{aj}}{5} \right]^{1.5}$$

$$a = 0.49 + 0.01791 - 0.00000771I^2 + 0.000000675I^3$$

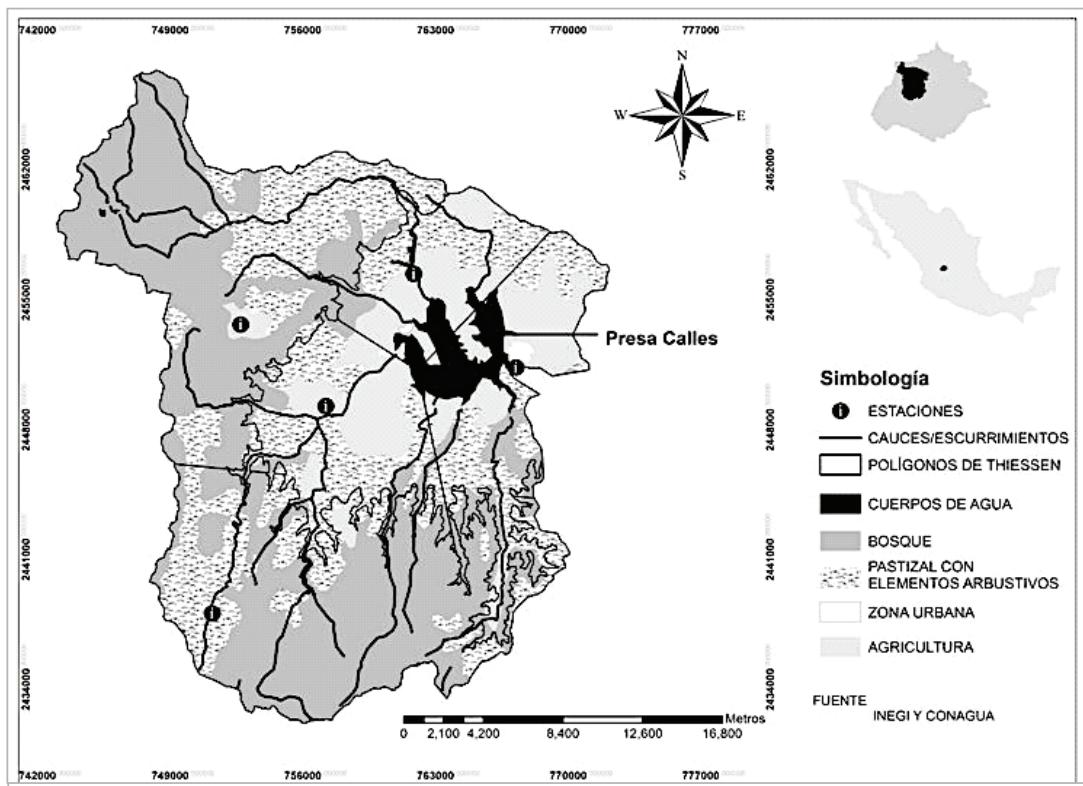


Figura 1. Distribución de estaciones termopluviométricas, polígonos de Thiessen y su relación con la cobertura de la cuenca.

donde: ETP = evaporación potencial en cm mes⁻¹; T_a = temperatura media mensual del aire (°C); I = índice anual de calor.

Evapotranspiración de referencia según Blaney-Criddle (citado por Dunne y Leopold 1978). Esta fórmula considera el fotoperíodo y la temperatura promedio del aire. Se define por la siguiente ecuación:

$$ETP = p((0.46 \cdot T_{med}) + 8)$$

donde: T_{med} = temperatura promedio del aire (°C); p = porcentaje diario de horas de luz del mes, con respecto al total anual.

Evapotranspiración de referencia según Hargreaves-Samani (1985). Esta fórmula considera la radiación solar extraterrestre y la temperatura máxima, mínima y media. En su forma simplificada se encuentra definida por la ecuación (Samani, 2000):

$$ETP = 0.0135KT \cdot R_a(TD + 17.8)(TC)^{HE}$$

donde: TD = promedio diario de la temperatura del aire (°C); TC = diferencial entre la temperatura máxima y mínima diaria (°C); R_a = radiación extraterrestre (mm día⁻¹); KT = coeficiente empírico; HE = exponente empírico.

El valor de KT fue establecido originalmente en 0.17 para regiones interiores (continentales) y el de HE, en 0.5 (Samani, 2000); sin embargo, dado que esta fórmula tiende a sobreestimar la evapotranspiración bajo condiciones climáticas extremas se optó por utilizar las calibraciones propuestas por Allen (1995) para KT y por Kelso-Bucio *et al.* (2012) para HE. La calibración propuesta por Allen (1995) está definida por la ecuación:

$$KT = 0.17 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.5}$$

donde: P = promedio mensual de la presión atmosférica en el sitio; P₀ = promedio mensual de la presión atmosférica a nivel del mar.

La calibración propuesta por Kelso-Bucio *et al.* (2012) está definida por la expresión:

$$HE = \frac{\log \left[\frac{PM}{0.0023R_a \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.8 \right)} \right]}{\log [T_{max} - T_{min}]}$$

donde: T_{min} = temperatura mínima del aire (°C); T_{max} = temperatura máxima del aire (°C); R_a = radiación extraterrestre; PM = evapotranspiración de referencia según el método Penman Monteith (mm día⁻¹).

Los valores de la radiación extraterrestre y de la presión atmosférica fueron obtenidos de las tablas meteorológicas de la FAO (disponibles en www.fao.org). Dado que la premisa es que en la cuenca de estudio se carece de información suficiente para utilizar el método Penman Monteith, el valor de PM puede obtenerse a partir de los datos de una cuenca cercana con características similares, ya sea a través del método Penman Monteith o del de evaporímetro tipo A. Para este estudio, el valor de PM se obtuvo a través de la aplicación en línea 'Cálculo de ETo (Método Penman-Monteith)' del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), utilizando como referencia la información de la estación Piletas para el periodo 2002-2006, al ser la más representativa y con mayor información dentro del área de estudio (se ubica en las coordenadas 22° 12' 56.4" N y 102° 36' 13.2" O).

Para la calibración de la fórmula de Hargreaves-Samani se calcularon los coeficientes de calibración KT y HE. El valor obtenido para KT empleando la ecuación propuesta por Allen (1995) fue de 0.14, resultando más bajo que el valor propuesto originalmente por Hargreaves (0.17). Para el caso de la calibración de HE propuesta por Kelso-Bucio *et al.* (2012), se obtuvo el valor de PM = 2.9 mm día⁻¹ y HE = 0.34. El valor de HE también resultó menor al propuesto originalmente por Hargreaves (0.5).

Evapotranspiración Actual. Se siguieron dos vías para su obtención: a) para aquellos meses en los cuales la P_p supera la ETP, la ETA asumió el mismo valor que la ETP; b) para aquellos meses en los cuales la P_p es menor a la ETP, la ETA se obtuvo a partir del diferencial entre la P_p y el cambio en la humedad del suelo en el propio mes (Thorntwaite y Mather 1957).

$$Pp > ETP \rightarrow ETA = ETP$$

$$Pp > ETP \rightarrow ETA = Pp - ETP - HS$$

donde: HS = cambio en la humedad del suelo.

Escorrentía. Se estimó a partir del modelo de Thorntwaite y Mather con base en el diferencial entre la P_p y la ETA y HS. Solo se considera el escorrentamiento superficial y subsuperficial, ya que dadas las características del suelo y el material parental

de la cuenca no hay escurrimientos subterráneos. Así mismo no se considera la presencia de bordos y represas que interfieran el flujo.

$$E = Pp - ETA - HS$$

Análisis de la Variación en la Estimación de la ETP

A fin de analizar la variación de los valores de evapotranspiración estimados por los tres métodos y determinar que tan similares son se realizó un análisis de varianza utilizando la prueba diferencia mínima significativa (LSD) de a un nivel de confianza $\alpha = 0.05$, empleando el programa STATISTICA 10 (StatSoft, Inc.).

Comparación de la Disponibilidad Hídrica Anual

La comparación de los valores de disponibilidad hídrica calculados con los tres métodos empíricos y el método directo, se realizó a través de la prueba de diferencia honestamente significativa de Tukey (Tukey DSH) a un nivel de confianza $\alpha = 0.05$, empleando el programa STATISTICA 10 (Stat Soft, Inc.). Se calcularon ocho valores de disponibilidad hídrica para cada uno de los métodos, correspondiendo estos a promedios de 20 años de la información recabada, siendo los periodos utilizados: 1980-1999, 1981-2000, 1982-2001, 1983-2002, 1984-2003, 1985-2004, 1986-2005, 1987-2006. El utilizar promedios que comparten entre sí más de la mitad de las observaciones reduce el sesgo por años atípicos, ya sean secos o lluviosos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la Variación en la Estimación de la ETP

Los valores de la evapotranspiración estimados se muestran en el Cuadro 2. A través de su análisis visual se aprecia similitud entre los obtenidos con las fórmulas de Thornwaite y Hargreaves-Samani mientras que los obtenidos con la de Blaney-Criddle muestran una clara diferencia. Los valores de la prueba LSD se muestran en el Cuadro 3. Los valores p obtenidos para los tres contrastes son inferiores a 0.001 lo que indica que en todos los casos se rechaza la H_0 por lo cual se determina que existe suficiente evidencia para afirmar que prevalece una diferencia significativa entre los valores obtenidos por los distintos métodos.

Cálculo de la Disponibilidad Hídrica Anual

Los valores de la disponibilidad hídrica anual calculados se muestran en el Cuadro 4. De su simple observación puede inferirse que los obtenidos del balance hídrico asociado a las fórmulas de Thornwaite y Blaney-Criddle, difieren enormemente de los obtenidos mediante el MDRH y el balance hídrico asociado a la fórmula de Hargreaves-Samani.

Los resultados presentados en el Cuadro 4, sugieren que para el caso particular de la cuenca, el método B.H. + Thornwaite subestima la disponibilidad hídrica, mientras que el B.H. + Blaney-Criddle la sobreestima. Esta situación podría presentarse de manera similar en otras cuencas o zonas forestales con características parecidas de latitud, altitud, suelo y cubierta vegetal, por lo que deben usarse de manera restringida. Por el contrario, el método B.H. + Hargreaves-Samani calibrado según lo propuesto por Kelso-Bucio *et al.* (2012) resultó ser el que más se ajusta a la disponibilidad hídrica del sistema obtenida a partir del almacenamiento registrado en la Presa Calles (MDRH).

Comparación de la Disponibilidad Hídrica Anual

El valor $P > 0.999$ obtenido para B.H. + Hargreaves-Samani-(MDRH) (Cuadro 5), indica que no puede rechazarse la H_0 por lo cual se determina que no existe suficiente evidencia para afirmar que existe una diferencia significativa entre los valores obtenidos por ambos métodos.

Cuadro 2. Valores de la evapotranspiración potencial anual de la cuenca de la Presa Calles para el periodo 1980-2006.

Periodo	Métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial		
	Thornthwaite	Hargreaves-Samani	Blaney-Criddle
1980-1999	752.3	724.7	475.0
1981-2000	756.4	730.6	475.9
1982-2001	762.9	744.3	477.2
1983-2002	767.5	735.8	478.0
1984-2003	773.6	737.7	479.1
1985-2004	779.4	748.8	480.2
1986-2005	781.5	756.8	480.6
1987-2006	783.3	766.2	480.9

Valores expresados en mm.

Cuadro 3. Diferencia honestamente significativa de Tukey. Probabilidades aproximadas para pruebas de Post Hoc. $\alpha = 0.05$, Error: MS = 110.99, df = 21.

Modelo	Thornthwaite	Blaney-Criddle	Hargreaves-Samani
Thornthwaite		0.00014	0.00028
Blaney-Criddle			0.00014

El diferencial entre los escurrimientos estimados y medidos en función de lo establecido por la Norma (Cuadro 4), 8 Mm³ en promedio, puede explicarse a partir de la intercepción del flujo hídrico realizada por los bordos de captación de aguas pluviales que se encuentran distribuidos en toda el área de la Cuenca. Los bordos representan los principales disturbios antrópicos que modifican la dinámica hidrológica de la Cuenca. Con base en estimaciones realizadas previamente, la bordería distribuida en la cuenca tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 4.4 Mm³, que podría captar parte del volumen de agua estimado que no está siendo almacenado en el vaso de la presa. Aguas arriba, dentro de la misma cuenca, se encuentra la Presa 50 Aniversario, la cual también participa de la intercepción del agua captada en el vaso de la Presa Calles. Este reservorio tiene una capacidad de almacenamiento de 4.1 Mm³ de acuerdo a datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua. Otro fenómeno que puede abonar a esta diferencia son las extracciones irregulares que pudieran presentarse y de las cuales no se tiene registro.

La similitud entre los valores medidos directamente y los estimados a partir del método B.H. + Hargreaves-

Samani permite afirmar que éste puede emplearse para estimar la disponibilidad hídrica del resto de las cuencas presentes dentro del macizo de Sierra Fría, donde no existen reservorios para hacer una medición directa. Así también, éste método podría emplearse en otras cuencas y ecosistemas forestales con características afines.

Campos-Aranda (2005) al comparar los métodos para estimar la evapotranspiración potencial de Makkink, Turc y Hargreaves-Samani, encontró que el más recomendable para la República Mexicana es este último, toda vez que el coeficiente de correlación (r) entre los valores obtenidos con el del método de Hargreaves-Samani ($ETP = 1575$ mm) y los obtenidos a través del método de Penman ($ETP = 1492$), usado como referencia, fue superior a 0.96. Al ser el valor de r cercano a 1 establece que hay una alta correlación positiva (o similitud) entre ellos. El hecho de que el método de Hargreaves-Samani sea el más recomendable para la República Mexicana es coincidente con nuestros resultados. Por otro lado, Rodríguez-Zayas (2001) a partir de la evaluación de los métodos propuestos por la FAO, indica que la evapotranspiración de referencia estimada por el de Penman-Monteith es el que mejor comportamiento presenta debido a que solo sobre estima la ETo en 16% al compararlo con valores obtenidos a partir del evaporímetro tipo A, teniendo un índice de concordancia de 17. En este mismo sentido, González-Cervantes *et al.* (2011) en su comparación de métodos para estimar la evapotranspiración de referencia, sitúa en último lugar al de Hargreaves-Samani frente a los de Penman-Monteith y Doorembos-Pruitt, esto en virtud de que al correlacionar los distintos métodos

Cuadro 4. Valores promedio de la disponibilidad hídrica anual de la cuenca de la Presa Calles para el periodo 1980-2006.

Periodo	Métodos para el cálculo de la disponibilidad hídrica			
	B.H.+ Thornthwaite	B.H+ Hargreaves-Samani	B.H.+ Blaney-Criddle	MDRH
1980-1999	17.66	37.48	120.02	47.59
1981-2000	18.08	38.26	120.73	47.58
1982-2001	21.54	42.44	124.73	48.15
1983-2002	27.99	50.55	132.07	50.31
1984-2003	33.54	56.82	139.17	51.71
1985-2004	41.18	65.59	148.96	55.24
1986-2005	35.57	61.05	143.17	53.79
1987-2006	32.59	58.19	142.52	50.9
Promedio	28.52	51.3	133.92	50.66

Valores expresados en Mm³.

Cuadro 5. Diferencia honestamente significativa de Tukey. Probabilidades aproximadas para pruebas Post Hoc $\alpha = 0.05$, Error: MS = 81.92, df = 28.

Modelo	B.H.+Thornthwaite	B.H.+Blaney-Criddle	B.H.+Hargreaves-Samani
MDRH	< 0.001	< 0.001	> 0.999

con los valores del tanque evaporímetro tipo A, se obtuvieron los coeficientes de correlación 0.72, 0.93 y 0.89, respectivamente. Cabe señalar que al revisar las curvas de ETo por González-Cervantes *et al.* (2011), los valores obtenidos por el método de Doorembos-Pruit resultan por encima de los obtenidos a través de los de Penman-Monteith y Hargreaves-Samani, siendo estos dos aparentemente más similares.

Si bien los trabajos de Campos-Aranda (2005), González-Cervantes *et al.* (2011) y Rodríguez-Zayas (2001), se centraron en el cálculo de la evapotranspiración, ya sea potencial o de referencia y, el presente estudio en el de la disponibilidad hídrica, el hecho de que la variación entre los métodos propuestos estribara en las fórmulas para obtener la evapotranspiración permite su comparación.

Hay que tener presente que en los trabajos de González-Cervantes *et al.* (2011) y Rodríguez-Zayas (2001), se utilizaron métodos de distinta naturaleza (radiación y temperatura del aire), mientras que en el de Campos-Aranda (2005) y el presente estudio se utilizaron métodos basados en temperatura del aire. Se considera que el uso del método de Penman-Monteith para el cálculo de la ETo en los otros trabajos es lo que determina que la fórmula Hargreaves-Samani sea el mejor indicador de la ETP o ETo. Esto dado que el método de Penman-Monteith, más complicado para su aplicación por los parámetros involucrados, resulta más robusto y es reconocido mundialmente por la FAO como el que mejor estima la evapotranspiración.

Ahora bien, retomando los datos obtenidos en el presente estudio y lo señalado por Campos-Aranda (2005), y considerando que González-Cervantes *et al.* (2011) no desestima la utilidad del método de Hargreaves-Samani, éste resulta un buen estimador de la evapotranspiración y a su vez, de la disponibilidad hídrica.

Kelso-Bucio *et al.* (2012), retomando a Campos-Aranda (2005), que sugiere que el método más recomendado para estimar la evapotranspiración potencial, cuando no existe suficiente información para

utilizar el de Penman-Monteith, es el de Hargreaves-Samani. Sin embargo, señala que para mejorar su precisión es necesario hacer la calibración de HE. Esto dado que los valores obtenidos de la aplicación de la fórmula original tienden a sobreestimar los valores de la evapotranspiración. En trabajos previos realizados para la cuenca de la Presa Calles, encontramos que la aplicación de la fórmula de Hargreaves-Samani en su forma original sobreestimaba la evapotranspiración de la zona, a tal grado que ésta sobrepasaba en todos los meses la precipitación pluvial. Con esto se obtuvo una nula escorrentía la cual no correspondía con la realidad ya que se contaba con agua dentro de los diferentes reservorios, confirmando que el modelo puede sobreestimar la evapotranspiración.

Pese a la sobreestimación que puede presentar la aplicación de la fórmula de Hargreaves-Samani en su forma original, al realizar la calibración de KT y HE , los valores obtenidos son muy apegados a lo observado según el presente trabajo y el realizado por Kelso-Bucio *et al.* (2012).

Si bien, existen variaciones entre la disponibilidad hídrica calculada a partir de la Norma (con base en el almacenamiento dentro de la presa Calles) y los datos obtenidos mediante el método B.H. + Hargreaves-Samani, éste nos permite conocer la disponibilidad hídrica y de una manera general el comportamiento del ciclo hidrológico de la cuenca. Al ser relativamente sencillo, e involucrar pocas variables cuya información puede ser recopilada sin mucho problema, resulta una buena opción para el conocimiento hidrológico básico en cuencas con poca o virtualmente nula información, pudiendo estimar la disponibilidad hídrica en cuencas donde no se cuente con reservorios que permitan la medición directa.

El 29 de noviembre de 2010, la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, (DOF, 2010) publicó un Acuerdo en el cual se actualiza la disponibilidad media anual de aguas superficiales de diversas cuencas hidrológicas, entre ellas, la cuenca hidrológica Presa Calles. Éste señala que el volumen anual medio

estimado de escurrimiento de la cuenca (disponibilidad hídrica) es de 57.63 millones de metros cúbicos, valor muy similar al de 51.3 millones de metros cúbicos, calculado mediante B.H. + Hargreaves-Samani. La semejanza aumenta si se le adiciona el volumen retenido en los reservorios de la parte alta de la cuenca, quedando en 58.8 millones de metros cúbicos. Si bien la CONAGUA señala que la estimación se realizó conforme a la NOM-011-CNA-2000, no establece cuál de los métodos ni la serie de datos climáticos, en su caso, que fueron utilizados. Pese a esto, hay coincidencia en los resultados obtenidos, y se puede afirmar que se está estimando de manera correcta la disponibilidad hídrica de la cuenca.

CONCLUSIONES

- El método para calcular los balances hídricos basado en el modelo de Thornthwaite y Mather junto con la estimación de la evapotranspiración potencial mediante la ecuación de Hargreaves-Samani, a su vez esta última calibrada con los coeficientes *KT* y *HE*, proporciona una estimación confiable de la disponibilidad hídrica de las cuencas de la Sierra Fría, brindando información muy útil para el establecimiento de acciones primarias de manejo, así como para la caracterización de la seguridad hídrica de la zona. Este método es particularmente útil y seguro para estimar la disponibilidad hídrica en cuencas de carácter similar a las de la zona de estudio, y en las que no puedan realizarse mediciones directas.

- Las fórmulas de Thornwaite y de Blaney-Criddle, para el cálculo de la evapotranspiración potencial, dado a que tienden a subestimar y sobreestimar, respectivamente, los valores de la evapotranspiración real, no presentan un adecuado comportamiento en cuencas con las características de la zona de estudio, por lo que no se recomienda su uso.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G. 1995. Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. Report submitted to the United Nations Food and Agricultural Organization (FAO). Rome, Italy.
- Ávila-García, P. 2008. Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México. Ciencias 90: 46-57.
- Barkin, D. y T. King. 1970. Desarrollo económico regional (enfoque por cuencas hidrológicas de México). Siglo XXI. México, D. F.
- Baron, J. S., N. L. Poff, P. L. Angermeier, C. N. Dahm, P. H. Gleick, N. G. Hairston, Jr., R. B. Jackson, C. A. Johnston, B. D. Richter, and A. D. Steinman. Sustaining healthy freshwater ecosystems. *Issues Ecol.* 10: 1-16.
- Campos-Aranda, D. F. 2005. Estimación empírica de la ETP en la república mexicana. *Ing. Hidrául.* Méx. 20: 99-110.
- COTAS (Comité Técnico de Aguas Subterráneas del acuífero interestatal de Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación, A.C.) 2006. Escenarios del agua 2015 y 2030 en el acuífero interestatal de Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación: acciones para un desarrollo con sostenibilidad ambiental. Informe final. México, D. F.
- Costanza, R., R. D'Arge, R. Groot, S. Farberk, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Suttonkk, and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*: 387: 253-260.
- De la Cerdá-Lemus, M. E. 2008. Biodiversidad: 3.4. Pastizal. pp. 92-96. In: CONABIO, IMAE, UAA (eds.). La biodiversidad en Aguascalientes: estudio de estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto del Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes. México.
- Diario Oficial de la Federación. 1949. Decreto que declara zonas protectoras forestales y de repoblación las cuencas de alimentación de las obras de irrigación de los Distritos Nacionales de Riego, y se establece una veda total e indefinida en los montes ubicados dentro de dichas cuencas. Primera Sección, miércoles 3 de agosto de 1949. pp. 2-4. México, D. F.
- Diario Oficial de la Federación. 2002. Acuerdo por el que se recategorizan como áreas de protección de recursos naturales, los territorios a que se refiere el Decreto Presidencial de fecha 8 de junio de 1949, publicado el 3 de agosto del mismo año. Primera Sección, miércoles 7 de noviembre de 2002. pp. 8-9. México, D. F.
- Diario Oficial de la Federación. 2010. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Río San Pedro, Presa Calles, Presa El Niágara, Presa El Cuarenta, Río de Lagos, Presa Ajojucar, Río Grande, Río Encarnación, Río Aguascalientes, Río San Miguel, Río del Valle, Río Verde 1, Río Verde 2, Río Palomas, Presa El Chique, Río Juchipila 1, Río Juchipila 2, Río Santiago 1, Río Santiago 2, Presa Santa Rosa, Río Santiago 3, Río Tepetongo, Río Tlaltenango, Arroyo Lobatos, Río Bolaños 1, Río Bolaños 2, Río San Juan, Río Atengo, Río Jesús María, Río Huaynamota, Río Santiago 4, Río Santiago 5 y Río Santiago 6, mismas que forman parte de la subregión hidrológica Río Santiago de la región hidrológica número 12 Lerma-Santiago, y su ubicación geográfica. Tercera Sección, lunes 29 de noviembre de 2010. pp. 1-128. México, D. F.
- Díaz-Nuñez, V., J. Sosa-Ramírez y D. R. Pérez-Salicrup. 2012. Distribución y abundancia de las especies arbóreas y arbustivas en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Polibotánica* 34: 99-126.
- Doorenbos, J. y W. O. Pruitt. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje no. 24. FAO. Roma, Italia.
- Dunne, T. and L. B. Leopold. 1978. Water in environmental planning. W. H. Freeman Co. San Francisco, CA, USA.

- Folke, C., S. Carpenter, T. Elmqvist, L. Gunderson, C. S. Holling, and B. Walker. 2002. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformations. *Ambio* 31: 437-440.
- González-Cervantes, G., E. Chávez-Ramírez, J. L. González-Barrios, A. Dzul-López, I. Sánchez-Cohen y M. C. Potisek-Talavera. 2011. Comparación de métodos para determinar la evapotranspiración y oportunidad de riego en nogal pecanero. *Terra Latinoamericana* 30: 29-38.
- Grey, D. and C. W. Sadoff. 2007. Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Pol.* 9: 545-71.
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1: 96-99.
- Hernández-Dueñas, F. J. y L. H. Maciel-Pérez. 2004. Guía de riego superficial para el distrito 01 Pabellón, Aguascalientes, México. Folleto técnico núm. 22. Gobierno del estado de Aguascalientes, CONCYTEA, Universidad Autónoma de Aguascalientes, INIFAP, Fundación PRODUCE. Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2008. 1.4 Suelos. pp. 82-84. In: CONABIO, IMAE, UAA (eds.). La biodiversidad en Aguascalientes: Estudio de estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto del Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes (IMAE), Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). México.
- Kelso-Bucio, H. A., K. M. Bâ, S. Sánchez-Morales y D. Reyes-López. 2012. Calibración del exponente de la ecuación Hargreaves-ETo en los estados de Chiapas, Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. *Agrociencia* 46: 221-229.
- Maldonado de León, O. A., O. L. Palacios Velez, R. Springall Galindo y D. S. Fernández Reynoso. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo de la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35: 335-345.
- Maass, J. M. 2003. El agua como elemento indicador de los procesos funcionales del ecosistema. pp. 109-116. In: P. Ávila (ed.). *El agua, medio ambiente y desarrollo en el Siglo XXI*. El Colegio de Michoacán, A. C. México.
- Meyerson, L. A., J. Baron, J. M. Melillo, R. J. Naiman, R. I. O'Malley, G. Orians, M. A. Palmer, A. S. P. Pfaff, S. W. Running, and O. E. Sala. 2005. Aggregate measures of ecosystem services: Can we take the pulse of nature? *Front. Ecol. Environ.* 3: 56-59.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press. Washington, DC, USA.
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. Conservación del recurso agua- que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación, primera sección. México, D. F.
- Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes. 1994. Decreto Núm. 88 por el que se declara área natural protegida con el carácter de zona sujet a conservación ecológica, la región de "Sierra Fría", ubicada en los municipios de San José de Gracia, Rincón de Romos, Pabellón de Arteaga, Jesús maría y Calvillo, en el estado de Aguascalientes, con una superficie de 112,090 hectáreas. Tomo LVII, Núm. 5. pp. 27. Aguascalientes, Ags., México.
- Rodríguez-Zayas, T. E. 2001. Comparación de métodos propuestos por la FAO para estimar la evapotranspiración de referencia. *Ing. Hidrául. Amb.* 22: 17-21.
- Samani, Z. 2000. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 126: 265-267.
- Scott, C. A., F. J. Meza, R. G. Varady, H. Tiessen, J. McEvoy, G. M. Garfin, M. Wilder, L. M. Farfán, N. Pineda-Pablos, and E. Montaña. 2013. Water security and adaptive management in the arid americas. *Ann. Assoc. American Geogr.* 103: 280-289.
- Siqueiros-Delgado, M. E. 2008. 3.1. Bosque. pp. 82-84. In: CONABIO, IMAE, UAA (eds.). La biodiversidad en Aguascalientes: Estudio de estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto del Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes (IMAE), Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). México.
- Sosa-Ramírez, J., O. Moreno-Rico, G. Sánchez-Martínez, M. E Siqueiros-Delgado y V. Díaz- Núñez. 2011. Ecología y fitosanidad de los encinos (*Quercus spp.*) en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera Bosques* 17: 49-63.
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55-94.
- Thornthwaite, C. W. and J. R. Mather. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Laboratory of Climatology*. Centertown, NJ, USA.
- Turc, L. 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* 12: 13-49.
- Villalobos-Sánchez, V. 1998. El venado cola blanca en la Sierra Fría de Aguascalientes. Cuaderno de trabajo. Agricultura y Recursos Naturales. Núm. 89. Gobierno del Estado de Aguascalientes. Aguascalientes, Ags., México.
- <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/aplicaciones/eto.aspx>
- <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0j.htm#annex. 2. meteorologicaltables>