

CAMBIO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA FUTURA EN UN BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA DE MÉXICO

Alejandro Ismael Monterroso-Rivas, Adán Guillermo Ramírez-García, Jesús David Gómez-Díaz, Yolanda Velázquez-Juárez y Roberto Rendón-Medel

RESUMEN

Se evaluó mediante balances hídricos el potencial de recarga hídrica para el acuífero de la zona noreste del estado de Hidalgo, México, perteneciente a la cuenca del Río Moctezuma. El balance hídrico se obtuvo considerando variables que aportan humedad en las cuencas (precipitación y precipitación horizontal), así como aquellas en las que se utiliza el agua (evapotranspiración) o ésta sale del sistema (escurrimiento). No se consideró el uso humano del agua. El estudio se realizó bajo condiciones actuales promedio y considerando dos modelos de cambio climático denominados ECHAM5 y HADGEM1, según escenarios socioeconómicos A2 y B2 para el año 2050.

Los resultados muestran que actualmente la demanda evapotranspirativa de las plantas es el componente que utiliza mayor cantidad de agua; además, es el que presenta mayores variaciones con los escenarios de cambio climático. Se espera, bajo los dos modelos, que se duplique la demanda hídrica de las plantas. Se estima que actualmente el potencial de infiltración equivale a $620 \times 10^6 \text{ m}^3$, pero es posible que se reduzca desde 70% y hasta 100% para 2050. Finalmente, se esbozan algunas implicaciones sociales que pueden ayudar en el establecimiento de políticas ambientales que conlleven en la conservación del bosque mesófilo de montaña en la región.

Introducción

México posee una gran variedad de ecosistemas debido a su ubicación geográfica, topografía y diversidad climática. El bosque mesófilo de montaña (BMM) presenta una distribución limitada en el país debido a las condiciones climáticas muy particulares que requiere. Por ello, abarca menos del 1% del territorio nacional. Actualmente está presente en el estado de Hidalgo, que ocupa el tercer lugar en cuanto a superficie ocupada, después de Chiapas y Veracruz (Challenger, 1988).

Los servicios ambientales que proporciona este tipo de ecosistema son muy variados. Entre estos se ha reconocido

la provisión de agua, alimentos, medicinas y combustibles, así como la regulación climática, recreación y belleza escénica (SEMARNAT, 2004). La importancia de la conservación de éstos y otros ecosistemas se basa en los servicios ambientales que proveen, particularmente como fuente de recursos hídricos para generaciones actuales y futuras, por lo que es necesario hacer un manejo adecuado de los mismos, previendo acciones que aseguren su conservación. A pesar de la gran variedad de los servicios hidrológicos proporcionados por el bosque mesófilo, se calcula que México ya perdió “sustancialmente más de la mitad” de su cobertura original

(Rzedowski, 1994). Algunos de los factores que han provocado la disminución del bosque mesófilo han sido el cambio de uso de suelo para agricultura y ganadería, los incendios forestales, los asentamientos humanos y expansiones urbanas, la obtención de leña y la extracción maderera para la construcción.

Por otro lado, uno de los grandes problemas que se viven en la actualidad es el cambio climático. Sus efectos se ha manifestado en todo el mundo, ocasionando incrementos en el promedio de las temperaturas medias de la atmósfera y de los océanos, el derretimiento en gran escala de hielo y nieve, y el incremento en el promedio global

del nivel del mar (IPCC, 2007). Por tanto, ante la amenaza de este fenómeno es conveniente generar escenarios de su impacto futuro para conocer la vulnerabilidad que se tiene y proponer medidas de adaptación que ayuden a minimizar los impactos previstos.

En el presente trabajo se elaboró un balance hídrico en el BMM de la región noreste del estado de Hidalgo bajo condiciones actuales y con escenarios futuros de cambio climático, para conocer el impacto sobre la capacidad de almacenamiento de humedad en el BMM y la posible disponibilidad futura de agua ante el cambio climático, de tal forma que se puedan

PALABRAS CLAVE / Adaptación / Balance Hídrico / Cambio Climático / Cuencas /

Recibido: 17/05/2015. Modificado: 08/03/2016. Aceptado: 14/03/2016.

Alejandro Ismael Monterroso Rivas. Ingeniero en Planeación y Manejo de los Recursos Naturales Renovables, Universidad Autónoma Chapingo (UACHapingo), México. Maestro y Doctor en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Profesor-Investigador, UACHapingo, México. Dirección: Departamento de Suelos, UACHapingo. Km 38.5 carretera

México-Texcoco, Chapingo, Texcoco, Estado de México. 56230. México. e-mail: aimrivas@correo.chapingo.mx

Adán Guillermo Ramírez-García. Ingeniero en Agroecología, UA Chapingo, México. M.C. en Desarrollo Rural, Colegio de Posgraduados y Doctor en Geografía, UNAM, México, Profesor-Investigador, Centro Regional Universitario del Noroeste, UA Chapingo, México.

Jesús David Gómez-Díaz. Ingeniero Agrónomo especialista en Suelos, UACHapingo, México. M.Sc. en Edafología, University of Ghent, Bélgica. Doctor en Edafología, Colegio de Posgraduados (COLPOS), México. Profesor Investigador, UACHapingo, México.

Yolanda Velázquez-Juárez. Ingeniera en Recursos Naturales, UACHapingo, México. Estu-

dante de Maestría en Ciencias, COLPOS, México.

Roberto Rendón-Medel. Ingeniero Agrónomo especialista en Zootecnia, Maestro en Ciencias en Desarrollo Rural Regional y Doctor en Problemas Económico Agroindustriales, UACHapingo, México. Profesor Investigador, UACHapingo, México.

CHANGES IN FUTURE WATER AVAILABILITY IN A MESOPHYL MOUNTAIN FOREST IN MEXICO

Alejandro Ismael Monterroso-Rivas, Adán Guillermo Ramírez-García, Jesús David Gómez-Díaz, Yolanda Velázquez-Juárez and Roberto Rendón-Medel

SUMMARY

We evaluated the potential for water recharge to the aquifer in the eastern part of the state of Hidalgo, Mexico, which belongs to the Rio Moctezuma watershed. The water balance was obtained by considering the variables that contribute with moisture (rainfall and horizontal precipitation) and those that refer to water use (evapotranspiration) or that exits the system (runoff). Human use of water was not considered. The study was carried out under current conditions and also considering two climate change models named ECHAM5 and HADGEM1, in socioeconomic scenarios A2 and B2 by 2050.

Results show that the evapotranspiration demand of plants is the component that currently uses more water; in addition, it is the one with greater future variations under climate change scenarios. It is expected, according to the models, that the water demands by plants will double by 2050. Also, the potential infiltration amount, estimated actually at $620 \times 10^6 \text{ m}^3$ may be reduced from 70 to 100% by 2050. Finally, some social implications that can help in establishing environmental policy outlines that involving conservation of cloud forest in the region.

MUDANÇA NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA FUTURA EM UM BOSQUE MESÓFILO DE MONTANHA DO MÉXICO

Alejandro Ismael Monterroso-Rivas, Adán Guillermo Ramírez-García, Jesús David Gómez-Díaz, Yolanda Velázquez-Juárez e Roberto Rendón-Medel

RESUMO

Avaliou-se mediante balanços hídricos o potencial de recarga hídrica para o aquífero da área nordeste do estado de Hidalgo, México, pertencente à bacia do Rio Moctezuma. O balanço hídrico foi obtido considerando variáveis que aportam umidade nas bacias (precipitação e precipitação horizontal), assim como aquelas nas quais é utilizada a água (evapotranspiração) ou como ela sai do sistema (escoamento). Não foi considerado o uso humano da água. O estudo se realizou sob condições médias atuais e considerando dois modelos de mudança climática denominados ECHAM5 e HADGEM1, segundo cenários socioeconômicos A2 e B2 para o ano 2050.

Os resultados mostram que atualmente a demanda evapotranspirativa das plantas é o componente que utiliza maior quantidade de água; além disso, é o que apresenta maiores variações com os cenários de mudança climática. Espera-se, sob os dois modelos, que se duplique a demanda hídrica das plantas. Estima-se que atualmente o potencial de infiltração equivale a $620 \times 10^6 \text{ m}^3$, mas é possível que se reduza entre 70% e 100% até 2050. Finalmente, se esboçam algumas implicações sociais que podem ajudar no estabelecimento de políticas ambientais que levem à conservação do bosque mesófilo de montanha na região.

considerar alternativas de manejo de los recursos naturales de una forma sustentable.

Métodos

El área de estudio se encuentra en la región noreste del estado de Hidalgo, México, abarcando siete municipios: Calnali, Lolotla, Huazalingo, Tlanchinol, Tianguistengo, Xochicoatlán y Zacualtipán de Ángeles (Figura 1). El área comprende 2620 km^2 , con alturas de 400 a 2200 msnm , con media de 940 msnm . El área se encuentra en la subprovincia del Carso Huasteco, dentro de la provincia geológica y fisiográfica de la Sierra Madre Oriental. Es una sierra ubicada en la región huasteca, formada por lomeríos y sierras húmedas con buen drenaje. Los suelos dominantes presentan alto contenido de carbonatos derivados de calizas por la acción de la precipitación y temperatura (INEGI, 1992).

El grupo climático que domina en la zona según el sistema de Köppen modificado por García (2004) es el semi cálido del grupo de los templados (A) C(fm). La temperatura media anual es $>18^\circ\text{C}$ y $<22^\circ\text{C}$. La zona se ubica en la parte alta del barlovento y recibe viento cargado de humedad proveniente del Golfo de México, manifestando así el régimen más húmedo de los ecosistemas templados.

De acuerdo al conteo de población de INEGI (2006), hay 117332 habitantes en los siete municipios del área de estudio. Según los datos del SNIM (2009) la tasa de crecimiento poblacional en la zona ha disminuido, puesto que en el periodo 1990-1995 fue de 1,5%, mientras que en el periodo 1995-2000 fue de 0,7% y en el último periodo de registro (2000 al 2005) fue de 0,3%. El mismo documento señala que la población económicamente

activa en los municipios es de 37204 habitantes, que corresponde al 46% del total, siendo la población ocupada y desocupada de 36994 y 210 habitantes, respectivamente. La población económicamente inactiva es de 42862 habitantes (53%). El porcentaje restante se reporta como no especificada. El grado de marginación en los municipios es de medio a muy alto.

La zona de estudio fue dividida en 10 subcuencas, nombradas Huazalingo, Río Claro, Tlacolula, San Pedro, Contzintla, Atempa, Garcés, Yegualtintla, Calnali y Tehuetlán (Figura 1). El área total estudiada fue de 2621 km^2 , de los cuales 763 km^2 pertenecen a la subcuenca Río Claro. La vegetación predominante en el área de estudio (INEGI, 2013) es, por orden de importancia, el pastizal cultivado (28%), el bosque mesófilo de montaña (19%), la agricultura

de temporal con cultivos anuales (13%), el bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria (11%), el pastizal inducido (7%), la selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria (6%) y la agricultura de temporal con cultivos permanentes y semi-permanentes (5%). A partir de los 600 msnm comienzan a observarse manchones de BMM, los que intensifican su densidad entre 800 y 1500 msnm , alcanzando hasta los 2100 msnm . Rodeando al BMM figura el pastizal cultivado y la agricultura, que son las actividades primarias de la zona. Las áreas mejor conservadas de BMM se localizan en sitios con poca o nula accesibilidad (terrenos con pendientes pronunciadas).

Balace hídrico

De acuerdo con diversos autores (Holwerda y Bruijnzeel,

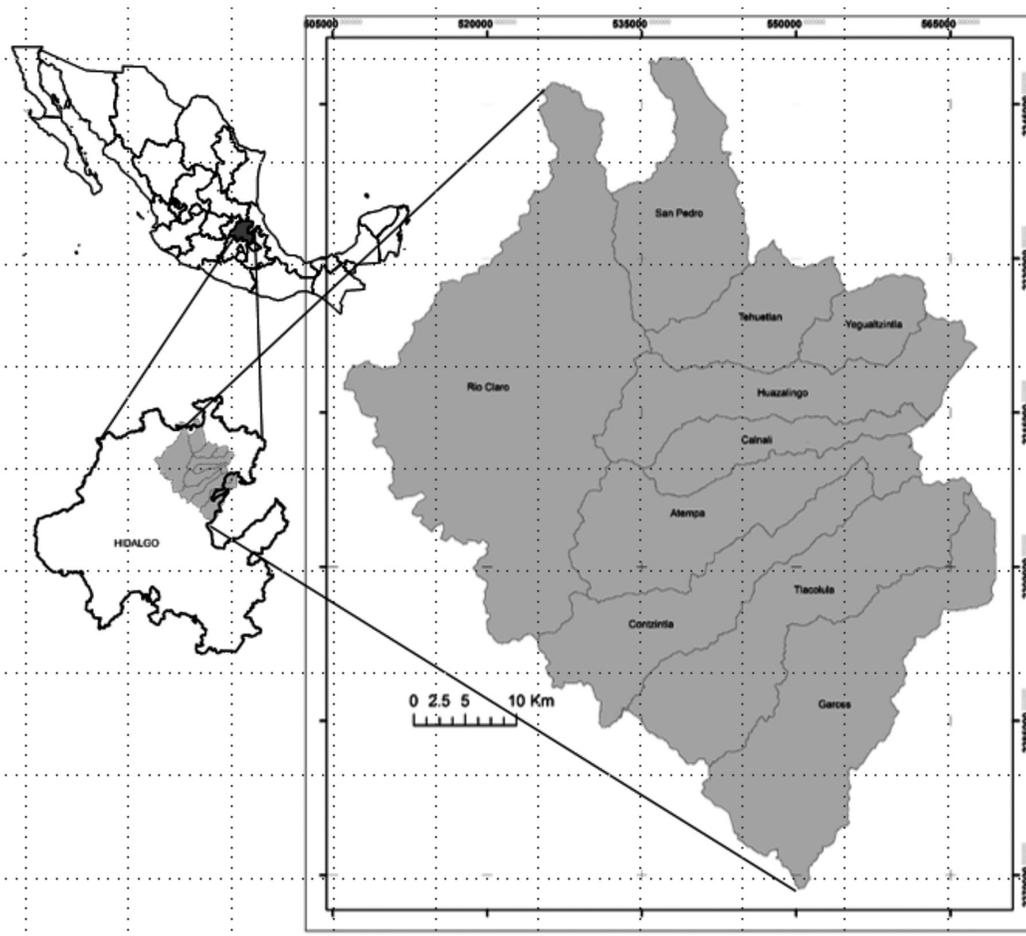


Figura 1. Área de estudio y las diez subcuencas estudiadas.

2007) el balance hídrico está determinado por las entradas y salidas de agua en un sistema dado. De existir una diferencia en el balance, será el volumen del agua que potencialmente será almacenada en el interior del sistema, en este caso, los acuíferos. La ecuación del balance está dada por: $P - (I+ET+ES) = \Delta$ Almacenamiento o Infiltración, donde P: precipitación, I: intercepción, ET: evapotranspiración, y ES: escurrimientos. A continuación se describen las variables utilizadas.

Precipitación. Comprende el total de lluvia que precipita en la zona más aquella cantidad de humedad aportada por la nubosidad, o precipitación horizontal. Se analizaron los parámetros meteorológicos: dirección del viento, altitud y fisiografía dominante, en información de 14 estaciones meteorológicas (IMTA, 2002b) distribuidas en el área de estudio.

Siguiendo a Gómez (2008), se elaboró cartografía detallada para las áreas de influencia climática definidas. La precipitación horizontal se estimó analizando precipitación, temperatura, humedad relativa y días con neblina reportados en las estaciones de estudio. Su estimación consistió en identificar los lugares y meses donde la humedad relativa calculada fuera $\geq 100\%$. Entonces, se asociaba la ocurrencia de neblina con una temperatura $\geq 13^\circ\text{C}$ en paisajes sobre 2400msnm, además de la presencia de frentes fríos o nortes. De acuerdo con Holwerda y Brujinzeel (2007), la precipitación horizontal en esos lugares se definió como el 28% de la precipitación pluvial en época de lluvias y como el 83% en época de seca.

Intercepción. Es la cantidad de humedad que es retenida por la cobertura vegetal dominante. El tipo, extensión y condición

de la vegetación influye sobre la cantidad de precipitación que llega a la superficie del terreno. Se calculó a partir de un coeficiente de intercepción según el tipo de vegetación dominante. Se consideró como nulo el coeficiente en asentamientos humanos, cuerpos de agua y áreas sin vegetación aparente. A las zonas con BMM se les asignó 16%, al BMM con vegetación secundaria 10%, a la selva alta 23% y aquellas zonas con algún tipo de agricultura 11% (Holwerda y Brujinzeel, 2007). Cabe subrayar que el agua interceptada principalmente se evapora de las hojas y tallos, incorporándose a las salidas del sistema.

Evapotranspiración potencial. Es la máxima cantidad de agua capaz de ser perdida por una capa continua de vegetación que cubra todo el terreno, cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo.

Se estimó a partir de Penman-Monteith dentro del software Cropwat (FAO, 2000) siendo necesario conocer temperatura media, altitud, duración de la insolación, presión del vapor y velocidad del viento, según la ecuación

$$ET_0 = 0.408 \Delta R_n - G + \gamma \frac{900T + 273}{u_2} (e_s - e_a) \Delta + \gamma (1 + 0.34u_2) \quad (1)$$

donde ET_0 : evapotranspiración de referencia (mm/día); R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$); R_a : radiación extraterrestre ($\text{mm}/\text{día}$); G : flujo de calor del suelo ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$); T : temperatura media del aire ($^\circ\text{C}$) a 2m de altura; u_2 : velocidad del viento (m/s) a 2m de altura; e_s : presión de vapor a saturación (kPa); e_a : presión real de vapor (kPa); $e_s - e_a$: déficit de presión de vapor; Δ : pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); γ : constante psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$).

Escurrimiento. Es la porción del volumen de la precipitación que fluye hacia los canales, arroyos, lagos y océanos, en forma de corriente superficial. Fue determinada de acuerdo al método de curvas numéricas del *Soil Conservation Service* de los EEUU (Soil Conservation, 1972), donde la retención máxima potencial (S) en una cuenca está determinada por $25400/\text{CN} - 254$, donde CN se obtiene de tablas. Para estimar los valores de la curva numérica se consideró el tipo de suelo, su potencial de escurrimiento, grupo hidrológico y cobertura; ésta última en función del tratamiento o práctica mecánica y su condición hidrológica (buena, regular y mala).

Infiltración. La infiltración fue resultado de la diferencia de la precipitación que ingresa al sistema y la pérdida por otros componentes (intercepción, evapotranspiración potencial y escurrimiento).

Escenarios de cambio climático

Para simular escenarios de cambio climático se utilizaron

los modelos *European Centre Hamburg Model*, en adelante referido como ECHAM5 y el modelo *Hadley Centre Global Environmental Model* en adelante HADGEM1 (Monterroso-Rivas *et al.*, 2013). Los dos modelos se usaron dado que ya han sido aplicados en estudios anteriores en México, mostrando resultados aceptables (INE, 2006, 2009). Para cada modelo los escenarios socioeconómicos seleccionados fueron A2 y B2 para el horizonte de tiempo 2050. La familia de escenarios A2 supone un mundo muy heterogéneo, con la población global en constante aumento y el crecimiento económico orientado regionalmente; éste es más lento y fragmentado que en las otras líneas evolutivas. Por su parte, la familia B2 plantea un mundo en donde el énfasis se concentra en soluciones locales para la sustentabilidad económica, social y ambiental. Asume una población en continuo crecimiento (menor al de la familia A2) y un nivel de desarrollo económico intermedio. La información referente a los cambios en temperatura y precipitación mensual y anual se obtuvo de UNIATMOS (Fernández *et al.*, 2009).

Precipitación horizontal futura. Se consideró el cambio en la nubosidad como el detonante de cambio en la cantidad de humedad aportada por la neblina, de modo que se aplicaron los cambios previstos sobre ésta en la precipitación horizontal. La fuente de información fue el *Pacific Climate Impacts Consortium* (PCIC; University of Victoria, 2009) para los escenarios y modelos antes señalados.

Evapotranspiración futura. Integrando los cambios previstos se volvió a estimar con el software Cropwat (FAO, 2000), conociendo los cambios futuros sobre temperatura media, insolación, presión de vapor o humedad relativa. Se obtuvieron las razones de cambio (%) sobre las últimas variables del PCIC. Toda vez que se tuvieron las variables futuras modeladas se volvió a correr el

balance hídrico según los modelos y escenarios de cambio climático.

Calibración del balance hídrico

Se obtuvo la información de escurrimientos mensuales de la estación hidrométrica dentro del área de estudio IMTA (2002a) con un periodo de observación de 50 años (1952-2002). La estación hidrométrica Temamatla, con clave 26293, se ubica en los límites de la subcuenca Río Claro en las coordenadas 21,23N y 98,751O, y cubre un área drenada de 6884km². Se comparó el volumen de escurrimiento mensual observado en la estación hidrométrica contra el estimado según el presente estudio.

Resultados y Discusión

Componentes del balance hídrico

Los meses más fríos en la zona son de diciembre a febrero, con temperaturas medias mensuales que van de 10 a 19°C. Los meses más calurosos son de mayo a agosto, teniendo temperaturas medias mensuales de 12 a 28°C. El mayor número de horas de insolación mensual se presenta en las partes bajas, donde es baja la nubosidad y la neblina, lo que favorece en su mayoría a la radiación directa. El menor número de horas de insolación mensual se da en las partes altas, en las cuales hay más nubosidad en el cielo y hay presencia de neblina. El promedio diario de insolación mensual distribuida en la zona para los meses de noviembre, diciembre y enero oscila entre 3 y 7h, mientras que en febrero, marzo, julio y agosto las horas de insolación oscilan entre 4 y 7h. Abril, mayo y junio son los meses en que se presenta el mayor número de horas de insolación, de 5 a 8h, siendo los meses más calurosos como consecuencia de la mayor radiación directa que recibe la superficie terrestre y propicia un mayor calentamiento del aire. Las zonas altas tienen una

evapotranspiración potencial anual más baja (900 a 1100mm), debido a una mayor humedad relativa, baja velocidad del viento y menor número de horas de insolación, lo que favorece que no exista una pérdida de agua por este componente. En el área de estudio se observan evapotranspiraciones potenciales entre 900 y 1700mm anuales.

La precipitación en el área va desde 1200 hasta 2400mm anuales. En mayor proporción se presentan valores entre 1800 y 2000mm anuales. La precipitación horizontal está directamente relacionada con la humedad relativa, ya que cuando existe elevada humedad ambiental se condensan las partículas de agua (neblina y llovizna) al chocar con la vegetación dominante en el BMM. De acuerdo a la elevación se presenta desde los 200msnm, aumentando con la altura y se concentra principalmente a 1200-2200msnm, que corresponde al intervalo vertical de 1000m. Al exceder los 2200msnm disminuye la precipitación horizontal por neblina, puesto que la humedad relativa máxima también desciende al sobrepasar esta altura, y esto se debe a que las condiciones de temperatura del sitio no permiten la condensación. Se captan desde 240 y hasta 870mm anuales por precipitación horizontal en la zona, dependiendo de la concentración de humedad que traen los vientos. En el BMM se pueden retener de 800 a 1500mm. Los intervalos de humedad relativa mensual presentes son 60-80% en enero y febrero, 60-75% de marzo a mayo, 60-85% de junio a agosto y 70-86% de septiembre a diciembre. A mayor precipitación mayor humedad relativa observada en los registros, debido a la mayor cantidad de humedad presente.

En lo que se refiere a intercepción de humedad, el intervalo mayor es de 490 a 612mm anuales y se localiza en la subcuenca Río Claro. Sin embargo, el intervalo de 122 a 246mm cubre mayor superficie en la región. En las áreas donde la precipitación es mayor y

las pendientes son pronunciadas se presentan mayores escurrimientos de agua; por el contrario, en las zonas bajas hay menor volumen de escurrimiento. El escurrimiento en el área puede ir desde los 400mm hasta los 2020mm anuales.

Balance hídrico actual

Aplicando la fórmula de balance hídrico se obtuvo el valor promedio estimado para infiltración en la región de estudio. En 75% de la superficie se estimó un potencial de infiltración <300 mm anuales. En 21% la infiltración va de 300 a 900mm anuales y en 6% es >900mm. De manera general, esto se debe principalmente a la topografía muy pronunciada (>30%), a los tipos de suelo con textura media y fina que propician mayores escurrimientos, y a las necesidades hídricas de las plantas, estimadas en la evapotranspiración potencial. La mayor infiltración se observa en la parte alta de las subcuencas de Tehuetlán, San Pedro y en poca proporción en la subcuenca Río Claro, con valores entre 1200 y 1500mm anuales. Los resultados del balance hídrico por subcuenca se presentan en la Tabla I.

En la subcuenca Atempa, por ejemplo, anualmente entran 502×10⁶m³ de agua, de los cuales 442×10⁶m³ son por precipitación y 59×10⁶m³ por precipitación horizontal, donde esta última representa el 12% del total de precipitación. La superficie que ocupa el BMM en la subcuenca es el 40%. Las salidas de agua son: evapotranspiración potencial con 260×10⁶m³ anuales (52%); 25% se escurre y 10% es interceptada por la vegetación. A partir de lo anterior se estimó que el 13% tiene potencial de infiltrarse al subsuelo. Esto se debe a que la vegetación existente en ciertas áreas de la subcuenca no intercepta mucho agua; además, la infiltración es favorecida por condiciones edáficas y topográficas existentes en el lugar (Miralles *et al.*, 2002).

En resumen, para toda el área estudiada el total de agua anual estimado es de

TABLA I
VOLUMEN HÍDRICO ESTIMADO (%) POR SUBCUENCA EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Subcuenca	Volumen de agua (%)					
	Precipitación	Precipitación horizontal	Intercepción	Evapotranspiración	Escurrimiento	Infiltración
Atempa	88	12	10	52	25	13
Calnali	96	4	5	56	34	5
Contzintla	91	9	11	53	24	12
Garcés	92	8	12	55	25	8
Huazalingo	95	5	11	63	20	6
Rio Claro	92	8	11	47	28	14
San Pedro	89	11	11	60	13	16
Tehuacán	90	10	11	52	22	15
Tlacolula	88	12	10	54	24	12
Yegualtzingo	100	0	11	71	17	1

5161×10⁶m³, del cual 91% es por precipitación y 9% por precipitación horizontal. El 53% de agua lo usan las plantas, 24% se escurre, 12% se infiltra y 11% es interceptada por la vegetación. Sobre esta última cifra cabe señalar que después de ser interceptada el agua por la plantas puede liberarse lentamente al suelo o bien ser absorbida y evaporarse después, cumpliendo con un servicio ambiental de liberación lenta al ecosistema. La importancia de valorar el agua interceptada en los bosques (a diferencia de las zonas de cultivo o pastizales), son los procesos por los que la mayor parte de esta agua llega al suelo y se infiltra finalmente.

Validación con datos observados

La comparación de los valores de escurrimientos medios

mensuales reportados en la estación hidrométrica Temamatla con los valores estimados en la subcuenca Rio Claro se presentan en la Tabla II. Se observa que el método aquí utilizado para el cálculo del escurrimiento subestima esta variable en los meses de invierno y la sobreestima en la época de lluvias. Sin embargo, al obtener un error de subestimación de 18% anual se consideró que era suficiente para los objetivos del estudio y se continuó con los escenarios de cambio climático.

Balances hídricos futuros

La intercepción (dada por la vegetación) y el coeficiente de escurrimiento (dado por la pendiente y el tipo de suelo) fueron las variables que se mantuvieron fijas y no fueron modeladas al futuro respecto a sus condiciones actuales. Los modelos coinciden en que la

precipitación horizontal aumentará en 51,8%, lo cual se explica porque los modelos de cambio climático sugieren que habrá una temperatura más alta en el planeta, provocando mayor evaporación en los océanos y por ende, mayor nubosidad. Dado que la zona de estudio se encuentra de cara al Golfo de México, recibe masas de aire cargadas de humedad que al chocar con la barrera montañosa suben y se enfrían, condensándose en forma de nubes.

Escenario ECHAM-A2 al año 2050. Como se presenta en la Tabla III en la zona de estudio el modelo prevé que la precipitación incremente en 0,5%. Las pérdidas por evapotranspiración potencial se incrementan en 70% y la infiltración se reducirá en el 100%.

Escenario ECHAM- B2 al año 2050. La precipitación pluvial presentará un incremento del

4,5% respecto al escenario actual. Las pérdidas por evapotranspiración potencial se incrementan en un 68,8% y la infiltración se reducirá en 100%.

Escenario HADGEM-A2 al año 2050. En la zona de estudio la precipitación pluvial presentará un incremento del 13,5% con respecto al escenario actual. Las pérdidas por evapotranspiración potencial se incrementan en un 69,1% y la infiltración se reducirá en el 88,6%.

Escenario HADGEM-B2 al año 2050. De acuerdo con este escenario la precipitación pluvial presentará un incremento del 19,5% con respecto al escenario actual. Las pérdidas por evapotranspiración potencial se incrementan en un 67,4% y la infiltración tendrá una disminución del 71,2%.

Los aumentos previstos en las demandas evapotranspirativas de las plantas van de 67 a 70% más respecto a las condiciones actuales, lo que se explica por los aumentos de temperatura previstos por todos los modelos de cambio climático globales. Al preverse mayor temperatura en el planeta se espera que exista más evaporación y más transpiración en las plantas. Los modelos sugieren que la evapotranspiración continuará siendo el mayor uso de agua que se tendrá en las subcuencas, duplicándose los valores del escenario base. Sin embargo, el modelo futuro menos favorable lo sugiere el modelo ECHAM-5, dado que pronostica incrementos mayores en temperatura y una disminución considerable en la precipitación futura.

Actualmente la subcuenca llamada Rio Claro es la que aporta el mayor volumen de lluvia precipitada y en consecuencia

TABLA II
VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO OBSERVADO Y ESTIMADO (×10⁶m³) EN LA CUENCA DEL RIO CLARO

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Observado	60,1	45,8	42,0	40,1	45,3	115	177	184	409	277	128,3	82,3	1605
Estimado	11,6	11,6	16,1	21,4	112,1	232	232	189	270	108	38,6	21,3	1264
Error %	-80,7	-74,7	-61,7	-46,6	147,2	101,7	31,1	2,7	-34,0	-61,0	-69,8	-74,5	-18,3

TABLA III
VOLUMEN (×10⁶m³) SEGÚN VARIABLE DE BALANCE HÍDRICO EN ESCENARIO ACTUAL Y CAMBIO PORCENTUAL EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA EL AÑO 2050

	Actual volumen	ECHAM A2 volumen	Δ%	ECHAM B2 volumen	Δ%	HADGEM A2 volumen	Δ%	HADGEM B2 volumen	Δ%
Precipitación	4702,6	4724,3	+0,5	4916,3	+4,5	5337,8	+13,5	5618,5	+19,5
Precipitación Horizontal	458,8	696,6	+51,8	696,6	+51,8	696,6	+51,8	696,6	+51,8
Intercepción	552,9	552,9		552,9		552,9		552,9	
Evapotranspiración	2718,5	4620,4	+70,0	4587,6	+68,8	4596,3	+69,1	4550,3	+67,4
Escurrimiento	1269,5	1269,5		1269,5		1269,5		1269,5	
Infiltración	620,5	0,0	-100	0,0	-100	70,6	-88,6	178,7	-71,2

mayor volumen con potencial de recarga hídrica del acuífero. Lo anterior se debe a que la mayoría de su superficie se encuentra cubierta con bosque mesófilo de montaña, a su extensión territorial y al número de cauces que tiene. Sin embargo, este volumen de infiltración tendrá una variación importante en el futuro (Tabla IV). Los modelos futuros concuerdan que en esta cuenca no se tendrá disponibilidad de agua para recarga hídrica. Actualmente, el 39% del volumen total de agua se encuentra disponible para infiltrarse y, dadas las condiciones futuras previstas, el volumen hídrico será utilizado para mantener la mayor demanda de agua por la cobertura vegetal. Esta situación se repite en la mayoría de las cuencas estudiadas. Sin embargo, hay tres subcuencas que mantendrán o aumentarán la disponibilidad de agua actual; ellas son Huazalingo, Calnali y Atempa. Según el modelo HADGEM.

Aquellas zonas con mayor potencial de infiltración pueden definirse como zonas potenciales de recarga de acuíferos. En la parte baja y centro del municipio de Tlanchinol es donde se presenta la zona con más potencial para la recarga. Corresponde a la parte alta de las subcuencas Tehuetlán, San Pedro y Río Claro, donde es posible que se disponga de más de 1000mm anuales para alimentar los acuíferos de Xochitlán-Huejutla, Atotonilco-Jaltocan y Orizatlán (CONAGUA, 2007, 2009). Estas regiones con potencial para ser conservadas para la recarga hídrica

coinciden con aquellas regiones mejor conservadas de BMM.

Los resultados se suman a los obtenidos previamente (Monterroso-Rivas *et al.*, 2013), donde los autores analizaron las diferencias en hábitat potencial para las condiciones actuales y aquellas previstas por cambio climático. Encontraron que es posible que la superficie óptima de crecimiento para seis especies se reduzca. Las especies identificadas como amenazadas por el cambio climático son *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Alnus arguta* Schl., *Carpinus caroliniana* Walt, *Clethra mexicana* DC, *Pinus patula* Schiede&Deppe y *Nectandra sanguinea* Rottb. Estas especies componen principalmente el estrato arbóreo alto del bosque mesófilo, por lo que concluyen que el ecosistema puede verse seriamente afectado como consecuencia del cambio climático.

En otro sentido, dado que el agua es un elemento fundamental en el progreso de la sociedad y contribuye de manera importante en el desarrollo de cada uno de los sectores productivos y sociales, su adecuada administración permitirá no poner en riesgo el desarrollo económico y social, por lo que este tipo de estudios cobran relevancia en una cuenca como la del río Moctezuma, donde de acuerdo con el INEGI (2010), la población total que habita en los siete municipios es de 129760 habitantes, lo que representa 5% de la población estatal. La

agricultura de temporal tiene gran importancia dada la extensión que ocupa, así por la alta diversidad de cultivos que se producen (frijol, chile, ajonjolí, caña de azúcar, maíz, haba nopal, café, papa, calabaza, aguacate, mango, cacahuate, garbanzo, alfalfa, cártamo y naranja). En lo que respecta a la actividad pecuaria, aunque se caracteriza por una explotación de ganado corriente, principalmente cruza de criollo con cebú de bajo rendimiento de carne y leche, esta actividad representa un valor especial en cuanto a producción, ya que se dispone de pastizales con elevados rendimientos, lo que se traduce en empleo y fuente de ingreso económico para los pobladores. Las implicaciones sociales de una mala administración, no considerando los efectos del cambio climático, pueden traer grandes riesgos de vulnerabilidad. Asimismo, se requiere trabajar en torno a obras y prácticas de restauración de suelos (Asencio *et al.*, 2015) y captación de agua de lluvia, producción de planta y reforestación, actividades de mantenimiento, protección y conservación, así como formular el plan de manejo integral de la cuenca. Otro aspecto a considerar es el monitoreo para evaluar la calidad del agua y conocer el comportamiento de los organismos acuáticos y relacionarlo con los parámetros fisicoquímicos, lo que abre ventanas para realizar investigaciones futuras.

Conclusiones

Una vez estimados los volúmenes aproximados de agua por subcuenca para cada uno de los componentes del balance hídrico, se concluye que los bosques mesófilos de montaña son de elevada importancia por la extraordinaria biodiversidad y endemismos que albergan y a los servicios hidrológicos que proveen. El aumento de la temperatura y la variación de la precipitación tendrán como efecto la disminución en la disponibilidad del recurso hídrico, lo que representa una

alta vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático.

Dado que se prevé que las demandas hídricas de las plantas se dupliquen de no adoptarse medidas de adaptación, estará en riesgo la desaparición de este importante ecosistema.

Para lidiar con estos y otros efectos del cambio climático es necesario seguir desarrollando modelos basados en escenarios de cambio climático que permitan diseñar y priorizar acciones de adaptación más acordes a las características de este vulnerable ecosistema. Igualmente se requiere crear foros de discusión y difusión de los efectos del cambio climático a fin de concientizar a los actores tomadores de decisiones sobre los posibles riesgos de vulnerabilidad para entonces generar alternativas de adaptación.

Por último, es importante actualizar los estudios a las más recientes salidas de los escenarios de cambio climático denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del fondo mixto de investigación CONACYT - Gobierno del Estado de Hidalgo (2009-98157) y del Programa de Investigación en Recursos Naturales y del Centro de Investigación en Medio Ambiente y Recursos Naturales, CIRENAM, de la Universidad Autónoma Chapingo.

REFERENCIAS

- Asencio C, Lozano F, Ortega E, Kikvidze Z (2015) Study on the effectiveness of an agricultural technique based on aeolian deposition in a semiarid environment. *Environ. Eng. Manag. J.* 14: 1143-1150
- Challenger A (1988) *Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México: Pasado, presente y futuro*. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad, Instituto de Biología de la UNAM y Agrupación Sierra Madre. México. 847 pp.
- CONAGUA (2007) *Regiones Hidrológicas de México*. Escala 1:1,000,000. Comisión Nacional de Agua.

TABLA IV
PORCENTAJE DE AGUA CON POTENCIAL DE INFILTRARSE Y RECARGAR ACUÍFEROS, POR SUBCUENCA BAJO CONDICIONES ACTUALES Y FUTURAS DE CAMBIO CLIMÁTICO AL AÑO 2050

Subcuenca	Actual	ECHAM A2	ECHAM B2	HADGEM A2	HADGEM B2
Atempa	10,8	0,0	0,0	5,6	10,4
Calnali	1,6	0,0	0,0	4,1	9,2
Contzintla	7,8	0,0	0,0	0,0	2,3
Garcés	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Huazalingo	2,7	0,0	0,0	3,4	10,1
Río Claro	39,1	0,0	0,0	0,0	0,0
San Pedro	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Tehuetlán	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Tlacolula	11,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Yegualtintla	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

- CONAGUA (2009) *Usos del Agua por Región Hidrológico-Administrativa, Cubo de Usos del Agua 2005*. Comisión Nacional de Agua. México.
- FAO (2000) CROPWAT. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. www.fao.org
- Fernández EA, Zavala HJ, Romero CR (2009) *Atlas Climático Digital de México*. <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx>
- García E (2004) *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Serie Libros 6. Instituto de Geografía, UNAM. México. 90 pp.
- SNIM (2009) *Sistema Nacional de Información Municipal*. www.snim.gob.mx
- Gobierno del Estado de Hidalgo (2011) *Programa Institucional de Desarrollo Hidrico 2011-2016*. Pachuca, México.
- Gómez DJD, Etchevers BJ, Monterroso RAI, Gay GC, Campos J, Martínez MM (2008) Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera* 21: 35-56.
- Holwerda F, Bruijnzeel LA (2007) Intercepción pluvial y de neblina en un bosque secundario de niebla montano en el Centro de Veracruz, México. En *Reporte Técnico Final del proyecto INE/ A 1-064/2007*. Instituto de Ecología, A.C., Vrije Universiteit Amsterdam, Xalapa, México.
- IMTA (2002a) *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.
- IMTA (2002b) *Extractor Rápido de Información Meteorológica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.
- INE (2006) *México: Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 211 pp.
- INE (2009) *México: Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 274 pp.
- INE (s/a) *Estudio de la Calidad del Agua en la Cuenca del Río Moctezuma*. Instituto Nacional de Ecología. México DF. repositorio.inecc.gob.mx/ae3/AE_002368/ae_002368.pdf
- INEGI (1992) *Síntesis Geográfica de Hidalgo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. 38 pp.
- INEGI (2006) *Resultados del Censo de Población y Vivienda 2005*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI (2010) *Censo de Población y Vivienda 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI (2013) *Mapa de Uso de Suelos y Vegetación Serie V*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- IPCC (2007) Summary for policymakers. En Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, Linden PJ, Hanson CE (Eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, RU.
- Miralles I, Ortega R, Cantón Y, Asencio C (2002) Soil degradation from excess salt and its relation to the topography on an area of Southern Spain. *Agrochimica* 46: 270-279
- Monterroso RA, Gómez DJD, Tinoco RJA (2013) Bosque mesófilo de montaña y escenarios de cambio climático: una evaluación en Hidalgo, México. *Rev. Chapingo Ser. Cs. Forest. Amb.* 19: 29-43.
- Rzedowski J (1994) *Vegetación de México*. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional y Editorial Limusa. México. 432 pp.
- SAGARPA (2011) *Resultados del Estudio de Diagnóstico Sectorial en el Estado de Hidalgo*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. 20 pp.
- SEMARNAT (2004) *Introducción a los Servicios Ambientales*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 71 pp.
- Soil Conservation (1972) *Soil Conservation Service National Engineering Handbook*. Section 4. Hydrology. US Department of Agriculture. Washington, DC, EE.UU.
- University of Victoria (2009) *Regional Analysis Tool*. <http://pacificclimate.org> (Cons. 09/09/2014). Victoria, BC, Canadá.