

Determinación del balance hídrico superficial en el suelo, cuenca río Atulapa, modelo de Thornthwaite desarrollado en Python, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala

Determination of surface water balance in the soil, Atulapa river basin, Thornthwaite model developed in Python, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala

Guillermo Santos^{1*}, Jorge Faustino², Ruperto Quezada², Juan M. Indekiu-Rivas³

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala,

² Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (Docinade), Costa Rica, y

³ Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

*Autor al que se dirige la correspondencia: santos.guillermo@usac.edu.gt

Recibido: 26 de octubre 2016 / 1era. Revisión: 05 de septiembre 2017 / 2da. Revisión: 20 de febrero 2018 / Aceptado: 23 de noviembre 2017

Resumen

En la región centroamericana, Guatemala comparte junto a Costa Rica, el tercer lugar en lo concerniente a la disponibilidad o volumen de agua. La cuenca del río Atulapa de 42.72 km² de longitud, localizado en la parte alta del río Lempa, constituye un recurso hídrico de interés trinacional para las repúblicas de El Salvador, Honduras y Guatemala. La cuenca forma parte de la reserva Biosfera Transfronteriza Trifinio Fraternidad; declarada como reserva de biosfera en junio del 2011, por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Debido a los efectos del cambio climático y utilización de la tierra en la cuenca, ha disminuido la capacidad de retención de agua del suelo, por lo que en el presente estudio se evaluó el balance hídrico del suelo con el modelo de Thornthwaite y Mather. Los métodos y técnicas aplicados permitieron generar y evaluar registros hidrometeorológicos con estaciones digitales instaladas; así como también, la utilización de estaciones locales. Posteriormente, se utilizó un Sistema de Información Geográfica para programar el modelo de balance hídrico en el suelo con Python, simulando la distribución espacial de la precipitación, evapotranspiración potencial y real, contenido de humedad en el suelo, almacenamiento y escorrentía superficial. La textura del suelo y su cobertura permitió determinar la capacidad de retención de humedad. El 85% del territorio de la cuenca posee texturas franco arcillo-arenosas de origen volcánico y cultivo de café. El caudal medio anual en el río Atulapa es 0.59 m³/seg, la precipitación potencial media es 1,916 mm/año, la evapotranspiración real media es 873.08 mm/año, el déficit de disponibilidad de agua del suelo es de 465 mm/año. La variabilidad biofísica de la cuenca del río Atulapa, determinó la dinámica del balance hídrico del suelo.

Palabras claves: Ciclo hidrológico, precipitación, evapotranspiración, retención de humedad, excedentes de humedad, almacenamiento en el suelo.

Abstract

In the Central American region, Guatemala shares the third place with Costa Rica in water availability or volume. The Atulapa River basin of 42.72 km² is located in the upper part of the Lempa River, of Trinational interest for Guatemala, El Salvador and Honduras, within "La Fraternidad" Biosphere Reserve, of the Trifinio Plan declared by Unesco in June 2011. The effects of climate change and land use in the basin diminish the water retention capacity in the soil, the study evaluated the soil water balance with the Thornthwaite and Mather model. The methods and techniques included generating hydro meteorological records with installed digital stations, as well as the use of local stations. Later, a Geographic Information System was used to program the Python water balance model simulating the spatial distribution of precipitation, potential and actual evapotranspiration, soil moisture content, storage and surface runoff. The texture of the soil and its coverage allowed determining the capacity of moisture retention, 85% of the territory has clay-sandy franco textures of volcanic origin with coffee plantations. The mean annual rainfall in the Atulapa River is 0.59 m³/sec, the mean potential rainfall is 1.916 mm/year, the average real evapotranspiration is 873.08 mm/year, and the water availability deficit in the soil is 465 mm/year. The biophysical variability of the Atulapa river basin determined the dynamics of the soil water balance.

Keywords: Surface water balance of soil, precipitation, evapotranspiration, moisture retention, surplus moisture, storage in the soil.

Introducción

La región centroamericana posee diversas fuentes de agua superficiales y subterráneas, que contribuyen al desarrollo socioeconómico y ambiental de la región. Sin embargo, la falta de agua en el corredor seco centroamericano, se debe a los siguientes factores: gradientes altitudinales, diversos microclimas; irregularidades en los eventos lluviosos y ubicación de las poblaciones en zonas vulnerables a desastres naturales. Guatemala es el país más poblado de Centroamérica y, consecuentemente, requiere una creciente demanda de recursos naturales. Costa Rica y Guatemala comparten el tercer lugar en cuanto a disponibilidad de agua superficial; sin embargo, no se conoce con exactitud la disponibilidad del recurso hídrico superficial en el suelo, lo cual dificulta la planificación del aprovechamiento del agua (Asociación Mundial para el Agua, 2011).

La presente investigación se realizó en la cuenca del río Atulapa, localizado en el municipio de Esquipulas, zona Sur Oriente del departamento de Chiquimula, en la República de Guatemala (Instituto Geográfico Nacional [IGN], 2009a). La cuenca en estudio se ubica en el corazón de la región centroamericana, dentro del Corredor Seco y debido a sus diferencias altitudinales y biofísicas es una de las principales fuentes de agua, que tributa al río Olopa en la República de Guatemala. Además, conforma la parte alta de la cuenca del río Lempa, de gran importancia para la República de El Salvador y también de la parte Sur Oeste de la República de Honduras. La cuenca es de interés Trinacional para El Salvador, Honduras y Guatemala, dentro de la Reserva de la Biosfera “La Fraternidad” (García, 2010).

Para evaluar la cantidad de agua disponible en la cuenca del río Atulapa, y optimizar su uso sostenible en beneficio de la población dentro de la zona del Trifinio, es necesario conocer la dinámica del recurso hídrico durante un año hidrológico, a través de técnicas que determinen el balance hídrico superficial (BHS) del suelo con los siguientes parámetros hidrológicos: precipitación, evapotranspiración (potencial y real), contenido de humedad del suelo y escorrentía superficial (Thorntwaite & Mather, 1957).

Existen modelos determinísticos que representan el BHS del suelo en cuencas hidrográficas, simulan el ciclo hidrológico y su respuesta a cambios climáticos. En su mayoría, estos modelos son sistemas unidimensionales y los resultados se representan por medio de tablas y gráficos (Chow, Maidment, & Mays, 1994; Olivera, 1999).

El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (2005) realizó el estudio del balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador, se utilizó un modelo de correlación lineal, solamente para obtener la distribución espacial de la evapotranspiración con respecto a la altitud, debido a que es un parámetro sensible a la temperatura atmosférica.

Algunos modelos hidrológicos requieren extensos registros climáticos y representaciones a detalle de aspectos biofísicos, lamentablemente, en las diversas zonas geográficas de Centroamérica no se cuenta con suficiente información (Lobaton, 2009), por esta razón, la selección de modelos a utilizar para simular el BHS del suelo, depende de la información disponible en una cuenca hidrográfica (Carmona, 2003).

Carmona (2003) en su investigación realizada sobre el balance hídrico y clasificación climática para el departamento de Caldas, mostró resultados satisfactorios mediante un modelo bidimensional, desarrollado en el lenguaje de programación llamado Avenue propio de Arcview (sistema de información geográfica). Se obtuvieron escenarios de la dinámica hídrica anual a través de la simulación de BHS, sin embargo este lenguaje de programación no se utiliza actualmente en los sistemas de información geográfica (Ochoa, 2003).

En la presente investigación se aplicó el algoritmo de Thorntwaite y Mather (1955) para el análisis del BHS. Se programó mediante un *script* (archivo de órdenes de programación) en lenguaje Python, utilizado como aplicación en un sistema de información geográfica, convirtiendo el algoritmo unidimensional en un análisis geoespacial tridimensional. El algoritmo se ejecuta en cada pixel de la cuenca, utiliza registros meteorológicos mensuales con tres parámetros de entrada: retención de humedad en el suelo, precipitación y evapotranspiración potencial (Carmona, 2003; Palacios, 1974).

El modelo evalúa escenarios prospectivos, con variables de respuesta sobre el comportamiento del balance hídrico del suelo, tales como: evapotranspiración real, almacenamientos, excedentes y déficit de humedad en el suelo (Alley, 1984). Los resultados de la simulación se representan con periodicidad mensual, con mapas raster, gráficos estadísticos y tablas.

El modelo BHS del suelo puede ser utilizado a partir de datos base de fácil obtención: precipitación, evapotranspiración y retención de humedad. Se pretende que el *Script* se convierta en una herramienta importante para simular escenarios en diferentes zonas del país, donde se cuente con la información necesaria. A la vez, el modelo BHS del suelo puede simular escenarios

a nivel nacional y/o regional, con datos meteorológicos satelitales y mapas a escalas generales, obteniendo resultados satisfactorios.

El objetivo de la presente investigación es determinar el BHS del suelo, en la cuenca del río Atulapa, a través de un modelo desarrollado en Python, herramienta que puede ser utilizada para simular escenarios que permitan planificar adecuadamente, el uso del recurso hídrico en beneficio de las poblaciones que se ubican en el Corredor Seco de la zona del Trifinio.

En la Cumbre sobre Desarrollo Sostenible, llevada a cabo en septiembre de 2015, los Estados Miembros de la ONU aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), con el fin de erradicar la pobreza, luchar contra la desigualdad, la injusticia y hacer frente al cambio climático. El sexto objetivo plantea garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el

saneamiento para todos. Para cumplir dicho objetivo, es necesaria la aplicación de métodos y técnicas que permitan conocer con precisión, la cantidad de agua en las cuencas hidrográficas, a través de modelos que simulen el balance hídrico superficial del suelo, como en el presente caso.

Materiales y métodos

La cuenca del río Atulapa se ubica geográficamente en $14^{\circ}34'12''$ a $14^{\circ}28'48''$ Latitud Norte y $89^{\circ}17'24''$ a $89^{\circ}23'24''$ Longitud Oeste, en el Cerro Montecristo del municipio de Esquipulas parte Sur-Oriental del departamento de Chiquimula, Guatemala, Centro América (Figura 1) (Instituto Geográfico Nacional [IGN], 2009a). La cuenca del río Atulapa pertenece a la cuenca del río Olopa, parte alta de la cuenca del río Lempa que

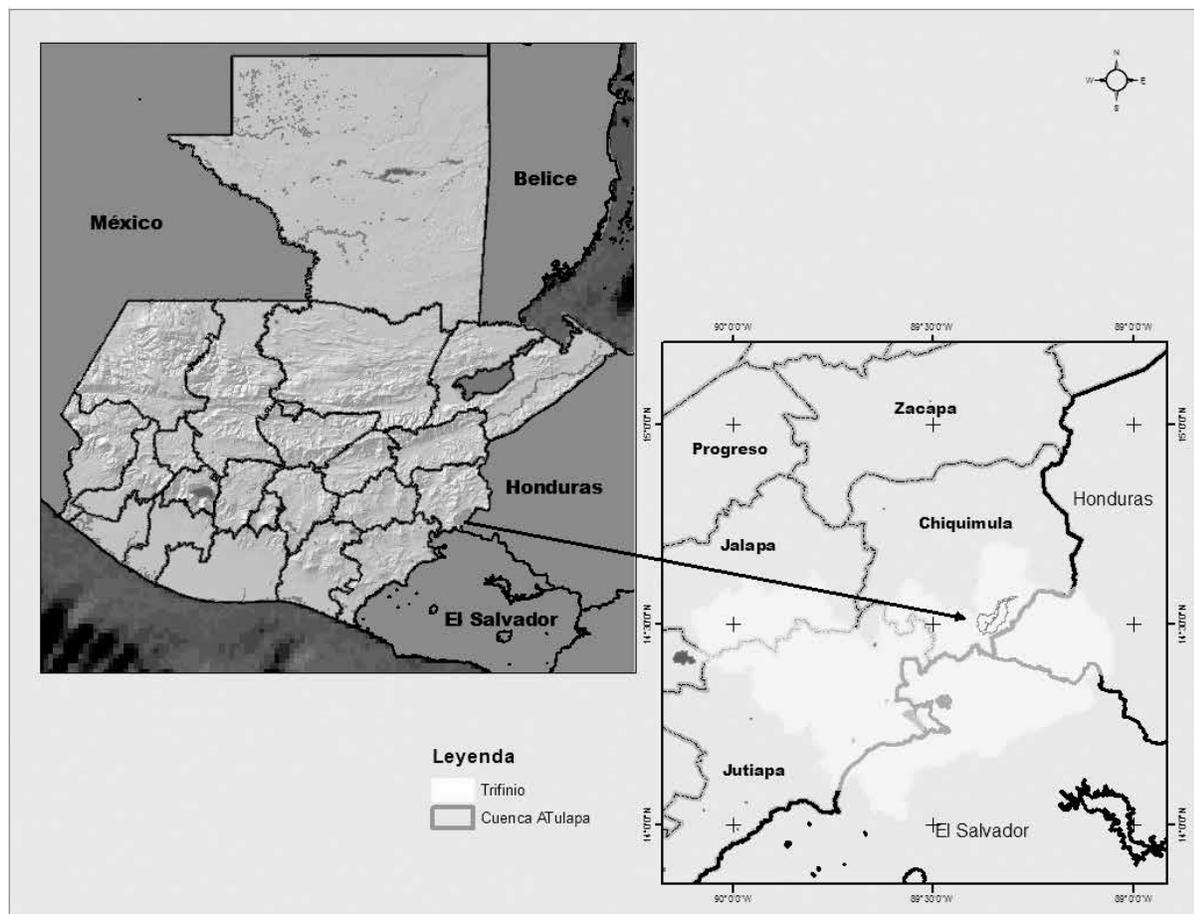


Figura 1. Ubicación geográfica cuenca Río Atulapa.

$$a = 0.000000675 \times I^3 + 0.0000771 \times I^2 + 0.0774 \times I + 0.49239 \quad (1)$$

ingresa a Honduras por el departamento de Ocotepeque, hacia la frontera con El Salvador, en el departamento de Chalatenango, desembocando en el Océano Pacífico, en los departamentos de San Vicente y Usulután en El Salvador.

Según De la Cruz (1982), la cuenca del río Atulapa posee tres zonas de vida: Bosque Húmedo Subtropical (templado) con 46% del área total, Bosque Muy Húmedo Subtropical (frío) con 50% y Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical con 4% (Comisión Trinacional Trifinio, 2007). El uso y cobertura de la tierra en la cuenca del río Atulapa consiste en lo siguiente: cultivo de café con 81.23% del área total, bosque con 11.38%, zonas de cultivos anuales con 6.00%; el resto se utiliza para pastos y centros poblados (García, 2010). Sus características geológicas se originan de la Placa del Caribe, los diferentes procesos conformaron la sierra volcánica de Chiquimula, con depósitos coluviales y aluviales recientes, así como también, tobas volcánicas del terciario, dando origen a suelos volcánicos con texturas franco arcillo-arenosas.

Se actualizaron los mapas temáticos de la cuenca del río Atulapa siguientes: uso y cobertura del suelo, tipos de suelo y zonas bioclimáticas (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, 2001; Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, 2016).

Se instalaron dos estaciones hidrometeorológicas para generar registros del año 2012 al 2016 en El Limón, Plan de la Arada y El Puente del municipio de Esquipulas, Guatemala. Se recopilieron los registros meteorológicos de los años 1971 a 2016 de la estación Esquipulas perteneciente al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), Guatemala y los registros de la estación Montecristo del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) en El Salvador (Insivumeh, 2016; Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2016). El análisis de consistencia para los registros climáticos, se realizó a través del método Doblemente Acumulativo (Linsley, 1967).

Los valores medios de la temperatura, precipitación y evapotranspiración, de la cuenca del río Atulapa se determinaron a través del análisis distribuido de las variables meteorológicas y la altitud.

La evapotranspiración potencial (etp), se calculó con el método de Thornthwaite, que constituye una técnica apropiada para estaciones meteorológicas tipo

B, que generan escasos parámetros meteorológicos. A la vez la etp presenta la pérdida de agua en el suelo y la vegetación para el cálculo del balance hídrico con el método de Thornthwaite y Mather (1955). La ecuación es la siguiente:

$$i = (t/5)^{1.514} \quad (2)$$

Donde: i = índice térmico mensual, t = temperatura mensual °C

$$I = \sum i \quad (3)$$

Donde: I = índice térmico anual, i = índice térmico mensual

Donde: a = constante, I = índice térmico anual

$$E = 16 \left(10 \times \frac{t}{I} \right)^a \quad (4)$$

Donde: E = Evapotranspiración potencial sin ajustar, t = temperatura mensual, I = índice térmico anual.

La temperatura mensual determina el índice térmico mensual y la suma es el índice térmico anual. (Thornthwaite y Mather, 1955)

$$Etp = K \times E \quad (5)$$

Etp = Evapotranspiración potencial, el valor de K es la duración horas luz por la latitud geográfica de la estación meteorológica.

El método de Thornthwaite y Mather (1955), se utilizó para determinar el balance hídrico del suelo. El modelo analiza la existencia y deficiencia de agua del suelo mensualmente. Sus variables de entrada en mm mensual son: la precipitación, la evapotranspiración potencial y la capacidad de retención de humedad de los suelos según su textura. Las salidas del modelo consisten en mapas mensuales tipo raster de evapotranspiración real, déficit de agua del suelo y el exceso de agua del suelo (escurrimiento o escorrentía superficial).

La generación del modelo para la simulación de escenarios del BHS del suelo en la cuenca del río Atulapa, se realizó a través de la programación en lenguaje Python en Arcgis. En el cálculo se utilizaron mapas raster, con resolución espacial de 30 x 30 m o sea 900 m², cada mapa raster mensual de la cuenca posee 427,259 píxeles, se deduce que el modelo corre, para cada mes, el número de píxeles que posee la cuenca.

La Tabla 1 describe las variables de entrada y salida para el modelo BHS, con su respectivo acrónimo en el modelo.

La descripción del modelo para el BHS del suelo inicia con el ingreso de los registros en milímetros de la precipitación y evapotranspiración potencial para cada mes; así como también, la reserva inicial del suelo del mes anterior y reserva máxima de humedad del suelo.

La evapotranspiración real es la pérdida de agua por transpiración de las plantas y evaporación de agua disponible en el suelo de la cuenca del río Atulapa. El cálculo mensual depende de la evapotranspiración potencial y la precipitación, también la reserva inicial de agua en el suelo del mes anterior. Cuando la evapotranspiración potencial es menor que la precipitación para cada mes, más la reserva inicial del mes anterior, el valor de la evapotranspiración real es la evapotranspiración potencial, cuando no se cumple la condición, el valor será: la precipitación mensual más la reserva inicial del mes anterior (Figura 2).

El déficit de humedad del suelo depende de la evapotranspiración real menos la evapotranspiración potencial para el mes que corresponda. La reserva de humedad en el suelo se calculó con base en: la precipitación, reserva inicial del mes anterior y la evapotranspiración real para el mes que corresponda, así como la reserva máxima del suelo (capacidad de retención de humedad). En el supuesto de que la precipitación, menos la evapotranspiración real para cada mes, más la reserva inicial del mes anterior, sea mayor que la reserva máxima, el resultado es la reserva máxima. Al no cumplirse la condición, el resultado es la precipitación menos la evapotranspiración real para cada mes, más la reserva inicial del mes anterior (Figura 2).

El excedente de humedad en el suelo se calculó con la reserva inicial del mes anterior, la precipitación y evapotranspiración real para cada mes que corresponda y la reserva máxima del suelo. Si se cumple con la condición de que la precipitación sea menor que la evapotranspiración real para cada mes más, la reserva inicial del mes anterior es mayor que la reserva máxima, el resultado es la reserva máxima y en caso de que no se cumpla, es la precipitación menos la evapotranspiración real más la reserva inicial, para cada mes que corresponda (Figura 2).

Resultados

El análisis del BHS del suelo con el modelo programado en Python para la cuenca del río Atulapa, está

constituido por 47,471 pixeles de 30 x 30 m equivalente a 900 m², que multiplicado por el número de pixeles de la superficie de la cuenca dan como resultado 42.72 km².

La Figura 3 representa la dinámica de la precipitación de cada mes en la cuenca del río Atulapa, la precipitación media anual es 1,917 mm. Los meses de mayor precipitación se presentan, de mayo a octubre, con un acumulado de 1,744 mm, correspondiendo al 91% de la precipitación media anual en la cuenca. Los meses de menor precipitación son diciembre y enero con 0.99 y 1.74 mm respectivamente, correspondientes al 1.59% del total. La desviación estándar espacial del mapa raster para los valores de precipitación mensual, aumenta de forma directamente proporcional con relación al valor medio de precipitación mensual. En los meses lluviosos de junio y septiembre la precipitación es de 36 mm y 34 mm respectivamente.

La evapotranspiración potencial media anual de la cuenca es 1,339 mm. La mayor evapotranspiración potencial se presenta a lo largo de cuatro meses: mayo - agosto, con un acumulado de 491 mm, correspondiendo al 37% del total. La menor evapotranspiración potencial se presenta a lo largo de cinco meses: noviembre - marzo, correspondiendo a un acumulado de 506 mm equivalente al 38% de la evapotranspiración media anual. La desviación estándar espacial promedio anual del mapa raster es de 24 mm. En los meses secos, el valor de la desviación estándar disminuye y en los meses lluviosos aumenta sustancialmente (Figura 4).

La Figura 5, presenta la evapotranspiración real en la cuenca del río Atulapa con 874 mm/año, el acumulado de mayo a octubre es de 702 mm, correspondiendo al 80% del total. La menor evapotranspiración real se presenta de noviembre a mayo, con un acumulado de 171 mm, equivalente a 20% de la evapotranspiración real anual debida a la falta de humedad en el suelo. La desviación estándar promedio anual espacial para el mapa raster posee un valor de 14 mm. En los meses secos, el valor de la desviación estándar disminuye y en los meses lluviosos aumenta sustancialmente.

La Figura 6 presenta el BHS del suelo. Como puede observarse, de noviembre a mayo se experimenta un déficit de humedad con un valor acumulado de 452 mm. La desviación estándar espacial es baja, excepto en las partes altas de la cuenca donde la incidencia de la precipitación se debe a los frentes fríos que se presentan de diciembre a marzo.

El excedente de humedad del suelo se presenta de mayo a octubre, saturando los suelos de la cuenca con

Tabla 1
 Variables del modelo para el Balance Hídrico Superficial con su acrónimo

Variable del modelo	Entrada	Salida	Símbolo
Precipitación mensual	pp_mes		p
Evapotranspiración potencial mensual	etp_mes		etp
Reserva máxima de agua en el suelo	reserva_max		res
Evapotranspiración real mensual		etr_mes	etr
Déficit mensual		deficit_mes	D
Reserva inicial de agua en el suelo	reserva_ini	reserva_mes	r
Balance Hídrico		pp-etp_mes	p-etp
Excedente		excedente_mes	E

Nota. El script del modelo estará a disposición del usuario en Github

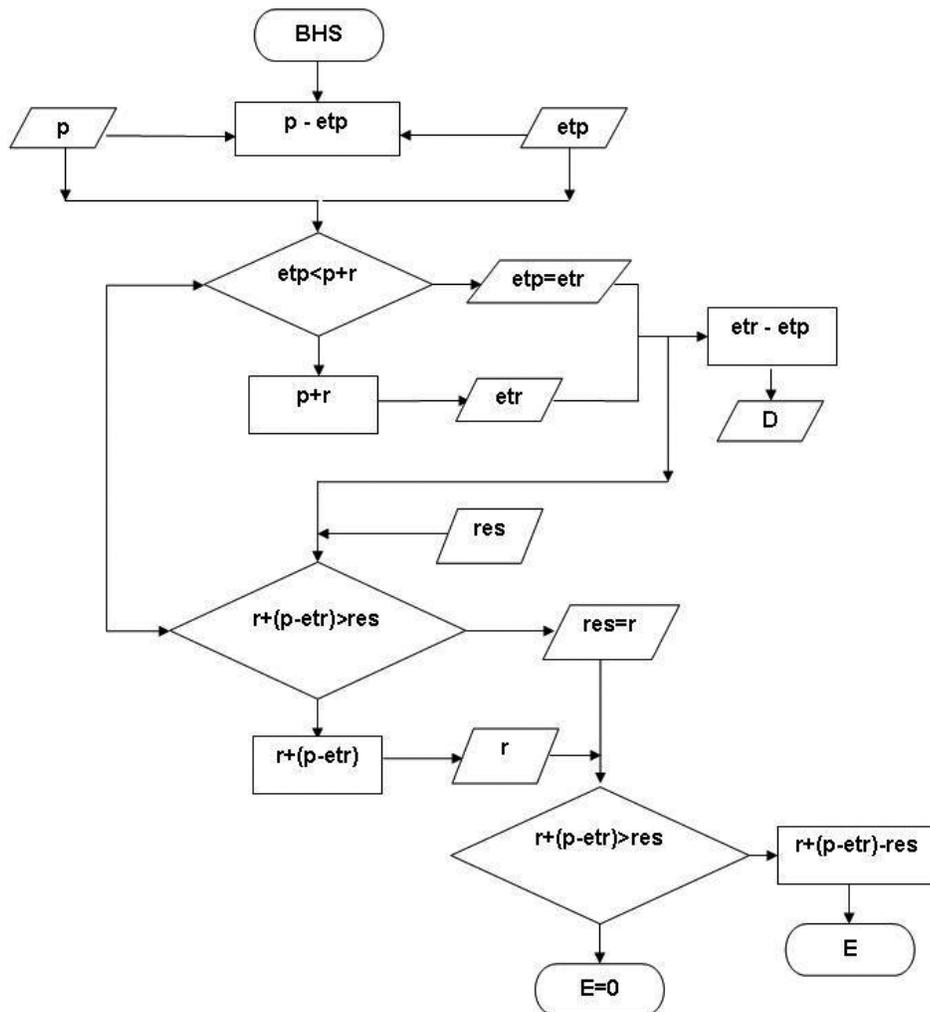


Figura 2. Diagrama del modelo Balance Hídrico Superficial del Suelo, Thornthwaite y Mather.

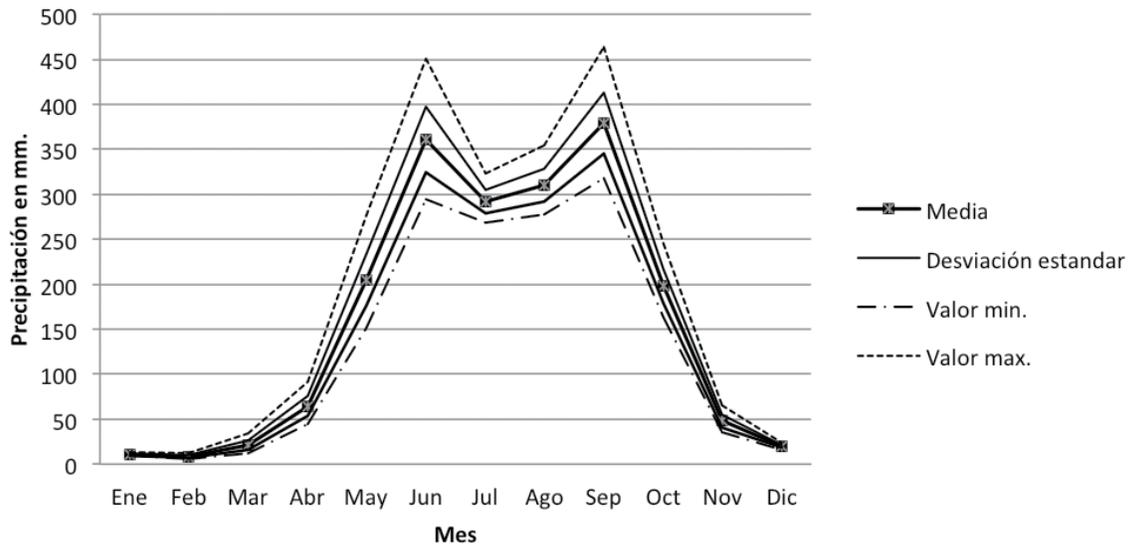


Figura 3. Precipitación media mensual cuenca Río Atulapa.

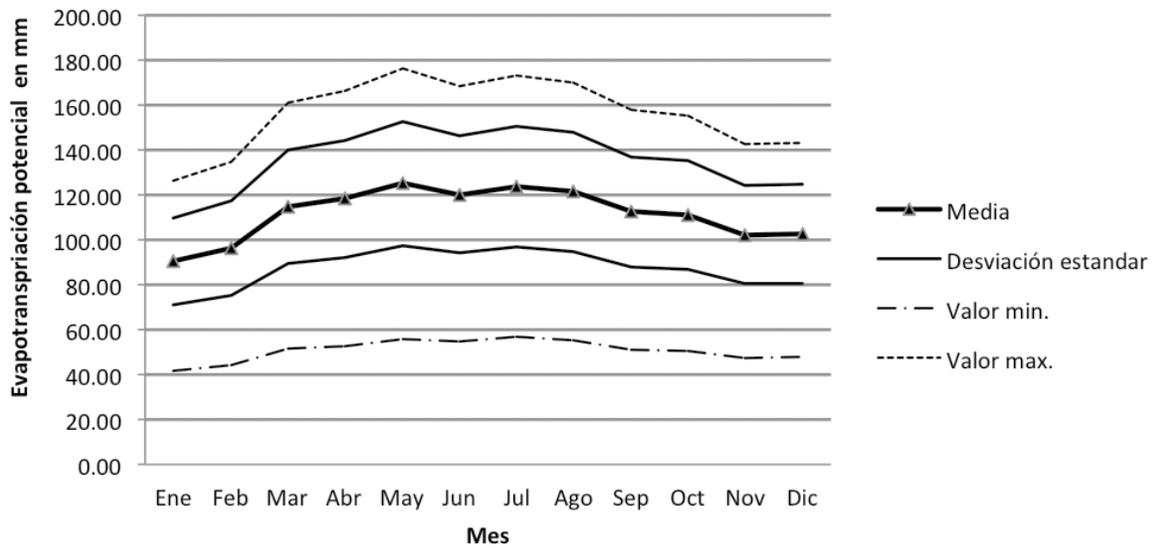


Figura 4. Evapotranspiración potencial cuenca del Río Atulapa.

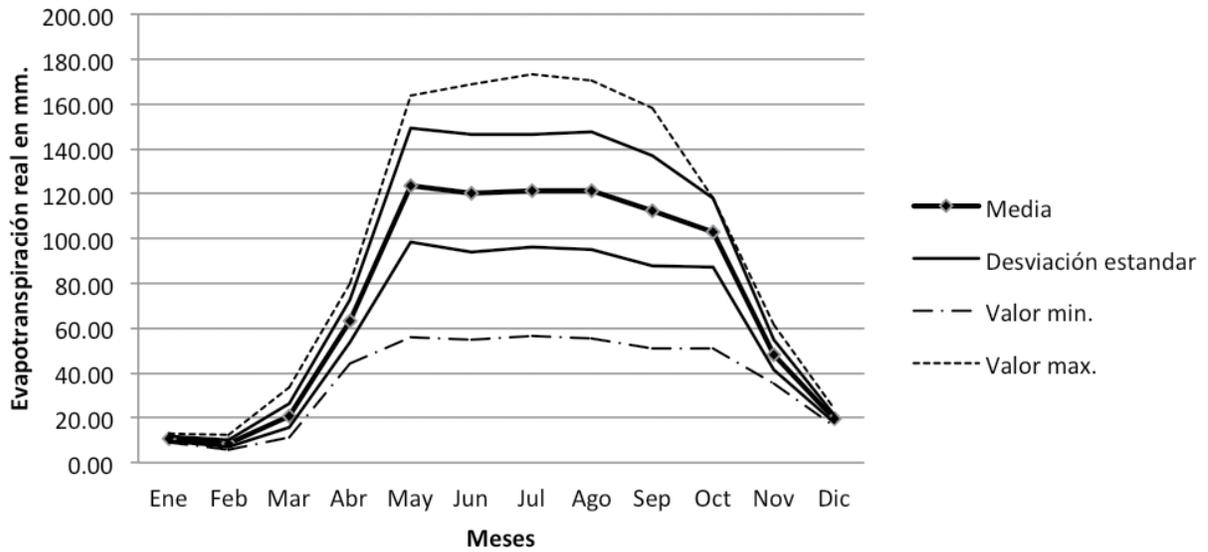


Figura 5. Evapotranspiración real cuenca del Río Atulapa.

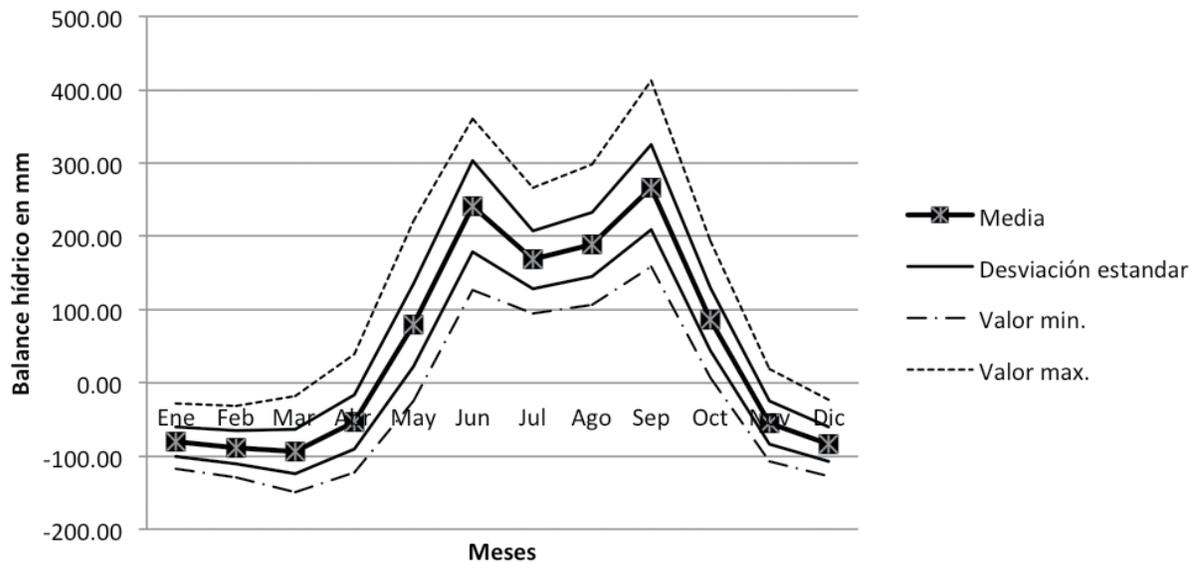


Figura 6. Balance hídrico, cuenca del Río Atulapa.

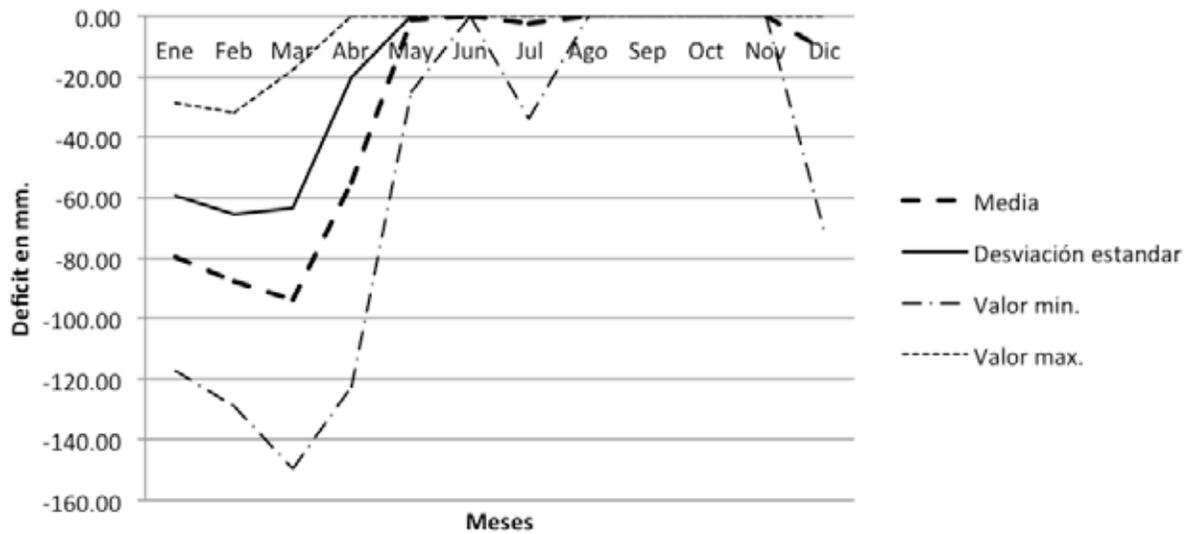


Figura 7. Deficit medio mensual de humedad en el suelo, cuenca del Río Atulapa.

un valor promedio de 1,030 mm/año. El balance hídrico general es de 578 mm/r año, por consiguiente, la cuenca posee un exceso de humedad que genera escorrentía sub superficial y superficial.

La reserva máxima de los suelos en la cuenca del río Atulapa, varía entre 200 a 163 mm dependiendo de la clase de suelo (textura) y el uso de la tierra. La Figura 7, muestra que en el período enero-marzo existe un déficit de humedad en el suelo con valor de 0 mm. La falta de precipitación generalizada y las altas temperaturas de la época seca provocan que las precipitaciones se presenten en la parte alta de la cuenca, por efectos de los frentes fríos, por lo que el suelo mantiene una reserva baja. La reserva máxima del suelo se presenta de mayo a octubre, con un promedio mensual de 177 mm, valor que se reduce progresivamente en noviembre y diciembre. La variabilidad espacial del mapa raster, para la reserva de humedad del suelo de junio a septiembre es baja, con una desviación estándar promedio de 15 mm y cuando la precipitación disminuye en noviembre y diciembre, la misma es de 50 mm.

Los meses con mayor déficit de humedad en los suelos de la cuenca del río Atulapa, se presentan de enero a abril, presentando un valor acumulado de -318 mm; a la vez, en marzo se presenta la mayor pérdida de humedad en el suelo con -94 mm, por la falta de precipitación y altas temperaturas. El modelo es

sensible a la canícula que se presenta en julio, con un déficit de -2.57 mm mostrando un valor disminuido. Asimismo, en mayo, cuando se atrasa el invierno, el modelo presenta un déficit promedio mensual de -1.33 mm (Figura 8).

El total acumulado del déficit de humedad del suelo durante un año promedio es de 331 mm para siete meses del año. La desviación estándar media espacial para el mapa raster en los meses con déficit de humedad en el suelo es de 23 mm. En los meses secos el valor de la desviación estándar aumenta sustancialmente y en los meses lluviosos es cero (Figura 8).

El excedente de humedad en el suelo para la cuenca del río Atulapa posee un valor total anual de 903 mm. En septiembre se observa el mayor excedente de humedad del suelo por el aumento de precipitación y debido a que los suelos están en período de recarga máxima de humedad.

La Figura 9, presenta el período diciembre-abril, en donde la precipitación mensual, menos la evapotranspiración real mensual, más la reserva inicial es menor que la reserva máxima; por lo tanto, el exceso de humedad en el suelo equivale a cero, debido a la falta de precipitación en la cuenca. El análisis de la variabilidad espacial del mapa raster de excedente de humedad del suelo, en la cuenca del río Atulapa, de mayo a octubre presenta una desviación estándar media de 54 mm.

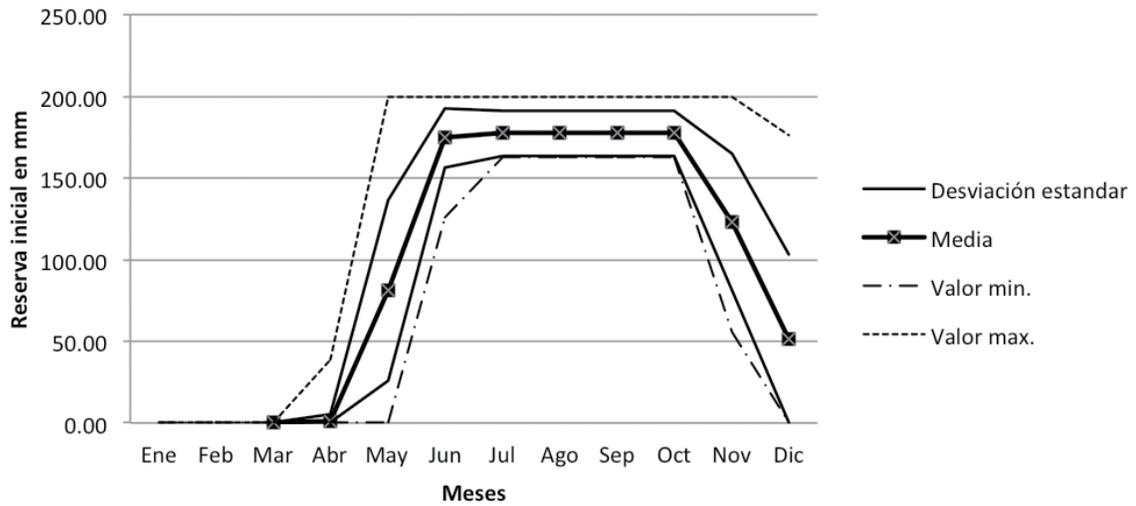


Figura 8. Reserva de humedad en el suelo, cuenca del Río Atulapa.

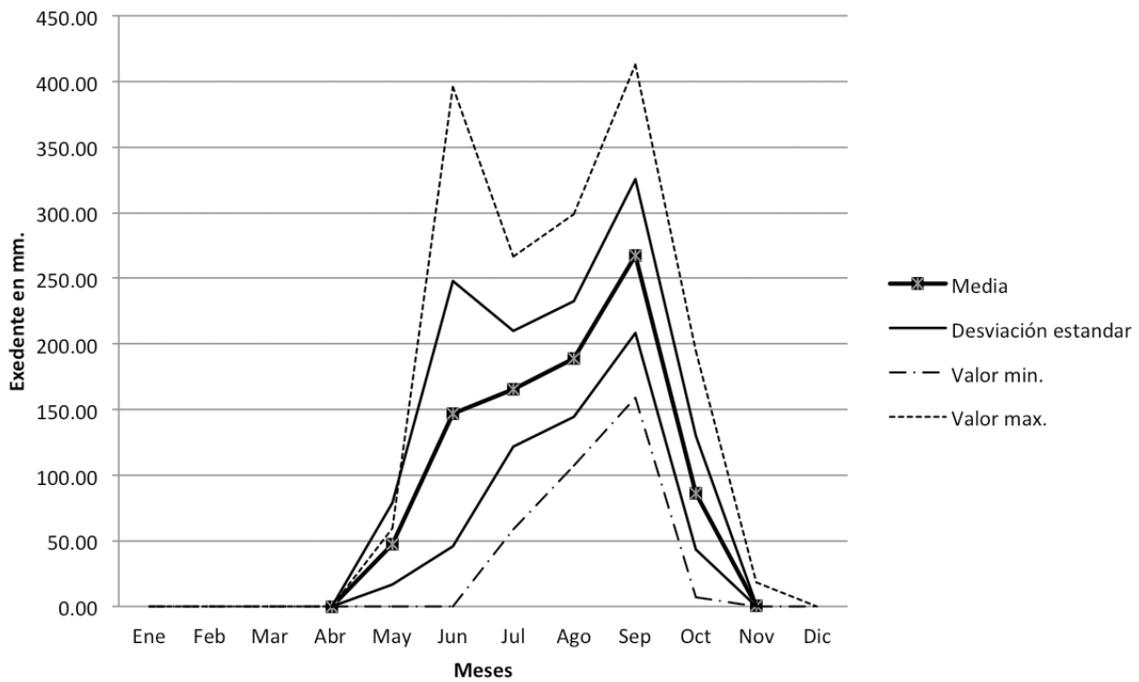


Figura 9. Excedente de humedad en el suelo, cuenca del Río Atulapa

Discusión

La Figura 10 presenta la variabilidad espacial de la precipitación media mensual en la cuenca de mayo a septiembre. En la parte alta de la cuenca se localiza la mayor parte de la precipitación; sin embargo, el efecto de la canícula en julio permite disminuir la variación espacial de la precipitación mensual. En respuesta a los frentes fríos provenientes del norte del Continente Americano, se presentan bajas temperaturas en las partes altas de las montañas de la cuenca, provocando la presencia de lluvias frecuentes de diciembre a abril.

El fenómeno del Niño aumenta la variabilidad espacial de la precipitación de la cuenca del río Atulapa. Por ejemplo, en el 2016 la precipitación disminuyó en promedio de 9%, de manera similar al 2002. Los efectos inmediatos de la disminución en la precipitación se presentan con un atraso en la saturación de humedad del suelo. La falta de humedad en los suelos disminuye las corrientes intermitentes del río, provocando la reducción de la escorrentía superficial en la cuenca (Instituto de Incidencia Ambiental, 2003).

La Figura 11, presenta la variabilidad espacial de la evapotranspiración potencial en la cuenca. En los meses lluviosos de mayo a octubre se muestran aumentos sustanciales de la distribución espacial en la evapotranspiración potencial. En la parte alta de la cuenca no se presenta variación sustantiva en los valores de evapotranspiración potencial, debido a que se mantienen las temperaturas bajas a lo largo del año en el Bosque Muy Húmedo Subtropical Frío y Bosque Muy Húmedo Montano Bajo (Cruz De la, 1982).

Los balances hídricos del suelo permiten evaluar como las fisiologías de las plantas, utilizan el agua para su crecimiento. Además, muestra los efectos que el clima ejerce en los cambios de vegetación en un área geográfica (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar [Iarna], 2015; Torrero, 2011).

La variación de evapotranspiración potencial por efectos del cambio de temperatura en la cuenca y el relieve, determinan diferencias entre la parte media baja y parte alta de la cuenca. En la parte media baja de la cuenca del río Atulapa, durante la última quincena de febrero a junio, aumenta considerablemente la evapotranspiración potencial. Los cambios se deben en gran parte a los cambios altitudinales, a la mayor altura, la baja temperatura y por consiguiente a la evapotranspiración. En el estudio realizado por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales, (2005) sobre el Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador, se analizó la relación existente entre altitud y evapotranspiración de referencia, calculada por medio del método de Hargreaves, además se determinaron ecuaciones de correlación mensual entre las dos variables, obteniéndose muy buenos coeficientes de correlación. De manera similar, en el estudio realizado por el Programa Hidrológico Internacional (2007) sobre el BHS de Costa Rica se puede observar que, a nivel espacial, se presenta amplia variabilidad en la precipitación, causada por una pronunciada orografía y la interacción de ésta con el flujo.

En la Figura 12, se observa la distribución espacial y temporal de la evapotranspiración real de la cuenca del río Atulapa, la evapotranspiración real depende de la disponibilidad de precipitación y la orografía de la cuenca, la cual define la variabilidad de la temperatura y humedad disponible en el suelo, requerimientos de la vegetación principalmente en el cultivo de café (Alley, 1984).

La cuenca del río Atulapa en los meses lluviosos de mayo a octubre, muestra el aumento sustancial de la distribución espacial para la evapotranspiración real en la parte alta de la cuenca. La disponibilidad de humedad en el suelo satisface la necesidad de agua en la vegetación. Las zonas bioclimáticas de la cuenca en todos los meses del año muestran diferencias en valores promedios de evapotranspiración real, principalmente, en el Bosque Húmedo Subtropical templado, donde se presentan los valores más altos del año.

En la parte alta de la cuenca, en términos generales, no se presenta variación sustantiva en los valores de evapotranspiración real, debido a la presencia de humedad en el suelo. Las temperaturas bajas a lo largo del año en un Bosque Muy Húmedo Subtropical Frío y Bosque Muy Húmedo Montano Bajo (Thorntwaite & Mather 1957).

En la Figura 13, se observa la variabilidad espacial del BHS del suelo en la cuenca del río Atulapa. En mayo se presenta el déficit de humedad de la parte baja de la cuenca, donde la incidencia de precipitación es menor y la evapotranspiración es alta, por lo tanto, la disponibilidad de agua en el suelo disminuye.

De junio a septiembre la disponibilidad de agua del suelo, según el balance hídrico, satisface la demanda de humedad de la vegetación; sin embargo, existe variación entre la parte alta, media y baja de la cuenca. El déficit de humedad se presenta desde noviembre ubicado en la parte media alta y baja de la cuenca y el déficit de humedad se generaliza para el 93% del territorio de la cuenca de diciembre a abril.

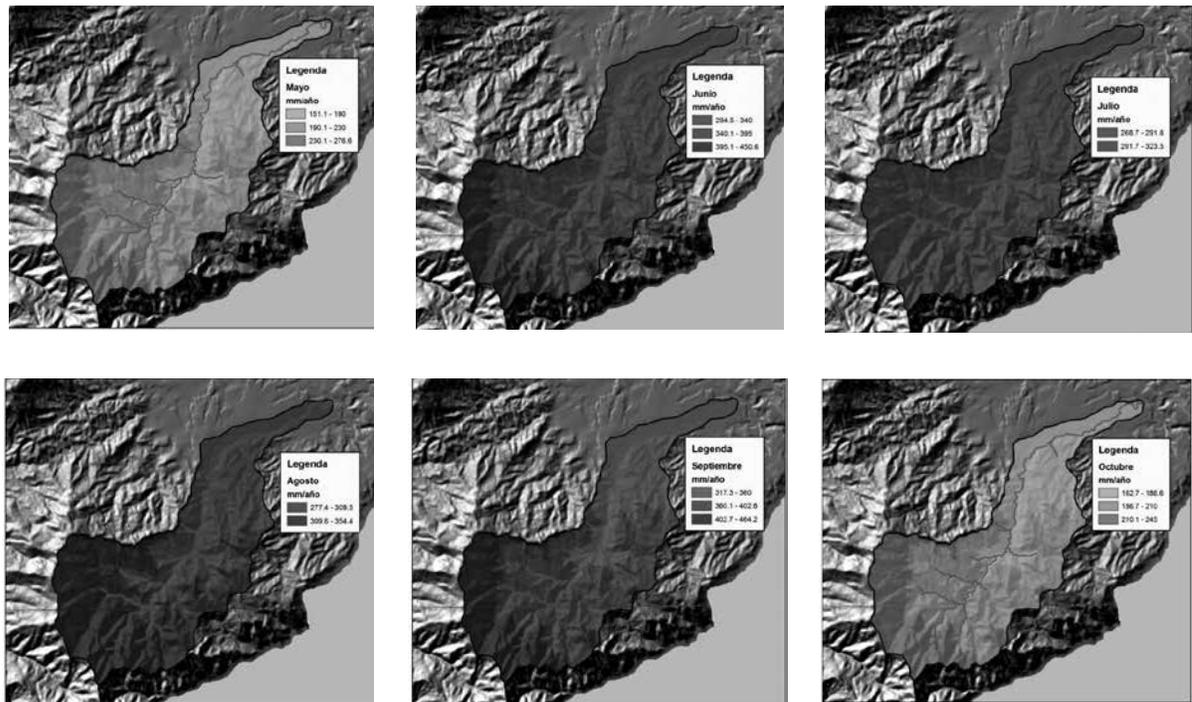


Figura 10. Distribución espacial y temporal de la precipitación, cuenca del Río Atulapa

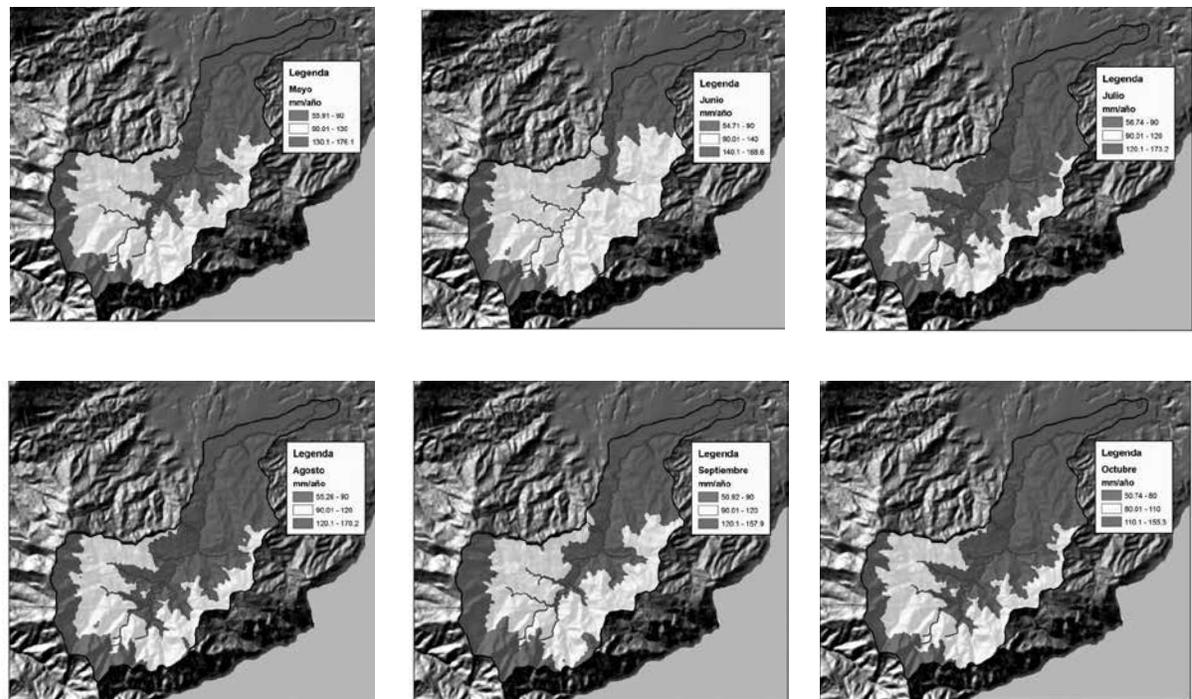


Figura 11. Distribución espacial y temporal evapotranspiración potencial, cuenca del Río Atulapa.

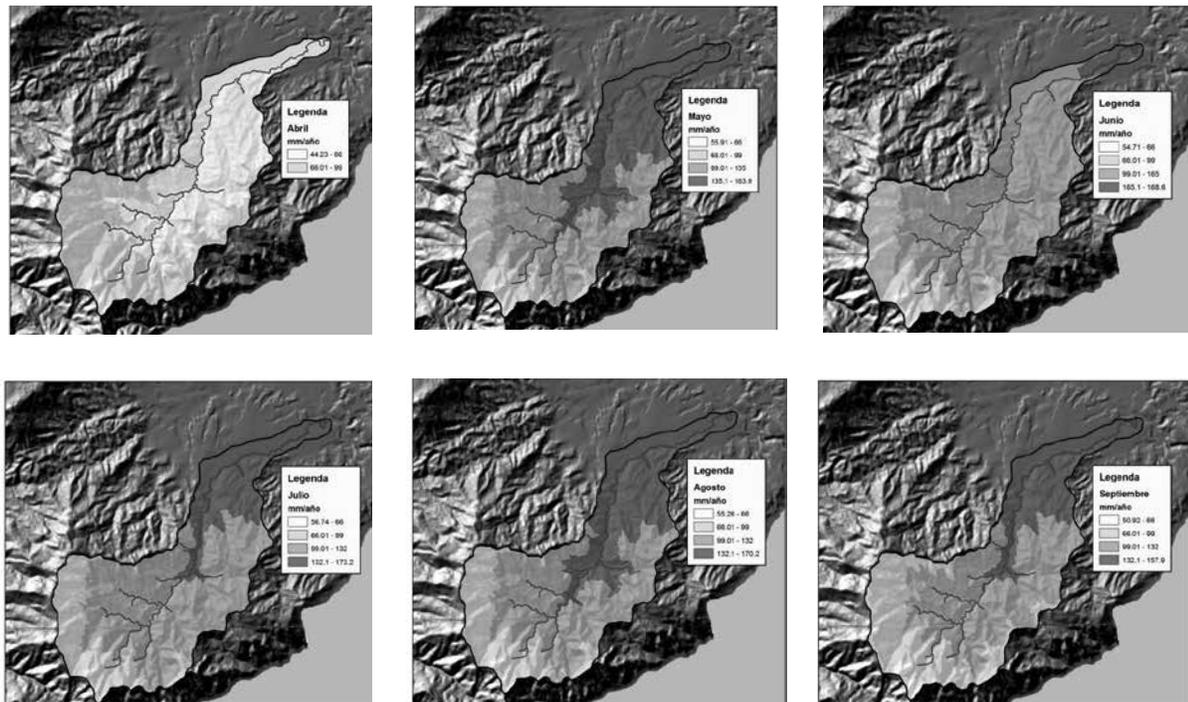


Figura 12. Distribución espacial y temporal de la evapotranspiración real, cuenca del Río Atulapa

En la Figura 14, se presenta el comportamiento espacial y temporal para la reserva máxima del suelo en la cuenca del río Atulapa. Se observa su variabilidad espacial en valores promedios para los meses de mayor precipitación: mayo a septiembre. La reserva máxima se mantiene de mayo a octubre, con valores máximos de 200 mm y mínimos de 165 mm. La reserva inicia su disminución en el suelo principalmente en el Bosque Húmedo Subtropical Templado en noviembre y diciembre. En la parte media y baja de la cuenca hay suelos que no poseen reserva alguna en diciembre.

La precipitación se inicia en mayo y conforme se incrementa la cantidad de lluvia, se acumula la humedad del suelo hasta octubre, cuando llega a su saturación. Lo que no se retiene de humedad en el suelo, se convierte en escorrentía superficial o escorrentía hipodérmica (Linsley, 1967).

En noviembre y diciembre se reduce la precipitación y el suelo inicia a perder su reserva hasta llegar a cero. En la Figura 15, se observa la variabilidad espacial del déficit de humedad del suelo en la cuenca del río Atulapa. En el período enero - abril se muestran diferencias en valores promedios de déficit de humedad del

suelo, principalmente en el Bosque Húmedo Subtropical templado, donde se presentan los valores más altos durante los diferentes meses del año. En la parte alta de la cuenca no se presenta variación sustantiva en el déficit de humedad del suelo, debido a que, de diciembre a marzo los frentes fríos provocan lluvias, así como también, temperaturas bajas en el Bosque Muy Húmedo Subtropical Frío y Bosque Muy Húmedo Montano Bajo (García, 2010).

En la Figura 16, se observa la variabilidad espacial del excedente de humedad del suelo en la cuenca del río Atulapa. Se presenta de junio a octubre con un valor acumulado de 902.55 mm. En junio y septiembre se observa el mayor excedente de humedad del suelo, debido al aumento de precipitación y a que los suelos están saturados de humedad, por lo que se presentan escorrentías superficiales y sub superficial, principalmente en la parte alta de la cuenca.

El modelo de balances hídricos del suelo de Thornthwaite y Mather, se programó en lenguaje Python para utilizarlo en un sistema de información geográfica. Este sistema posee tres parámetros de entrada: retención de humedad del suelo, precipitación

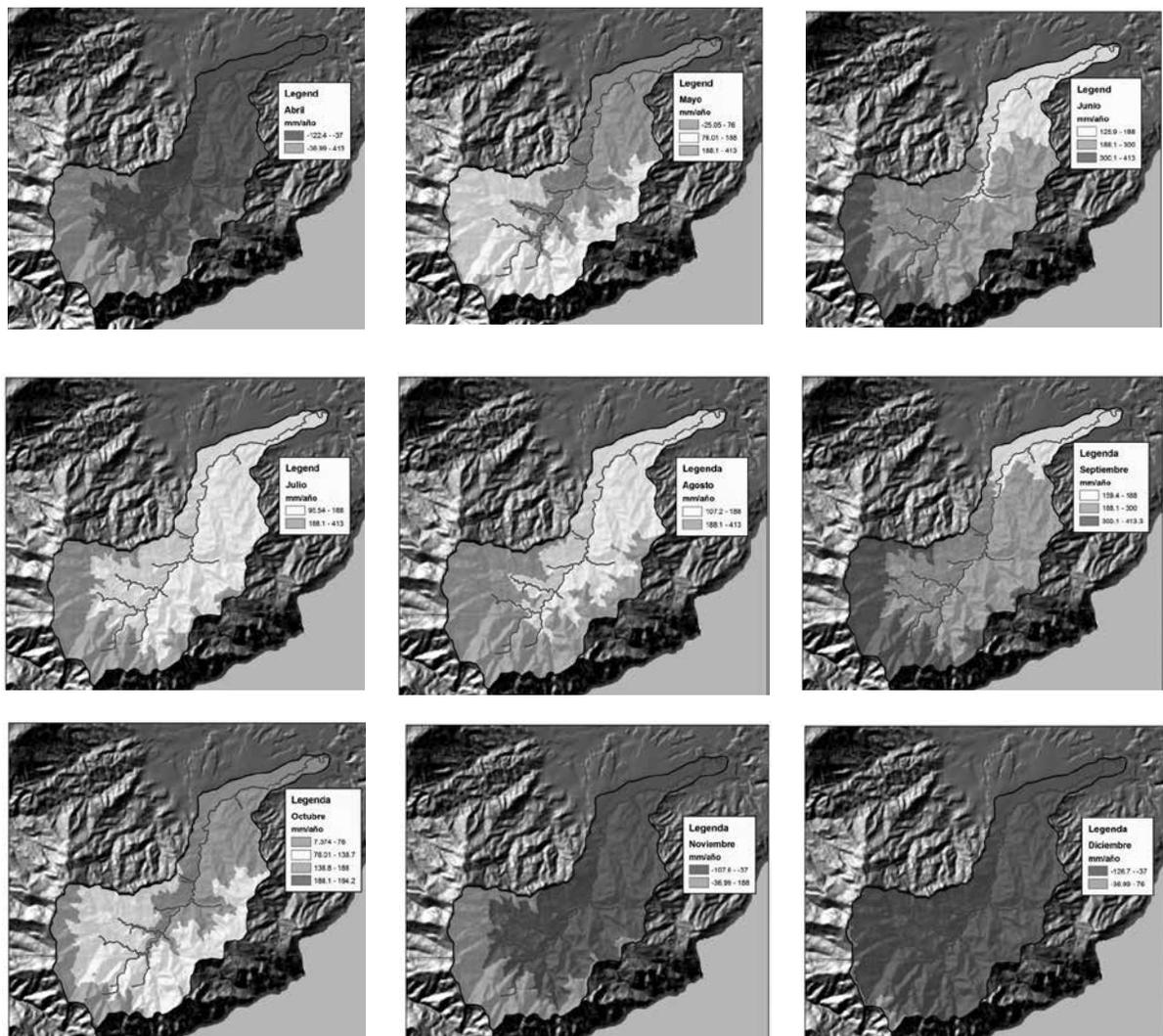


Figura 13. Distribución espacial y temporal del balance hídrico, cuenca Río Atulapa.

y evapotranspiración potencial. Además, el sistema permite evaluar y simular diferentes escenarios prospectivos de la dinámica espacial para cada mes de la evapotranspiración real, almacenamientos, excedentes y déficit de humedad del suelo. Los escenarios mensuales permiten la gestión integral de los recursos hídricos, pudiendo implementarse medidas de mitigación para afrontar los efectos del cambio climático y mejorar los beneficios ambientales globales.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado en el proyecto de investigación FODECYT-47. A la Comisión Trinacional Plan Trifinio, por su apoyo institucional.

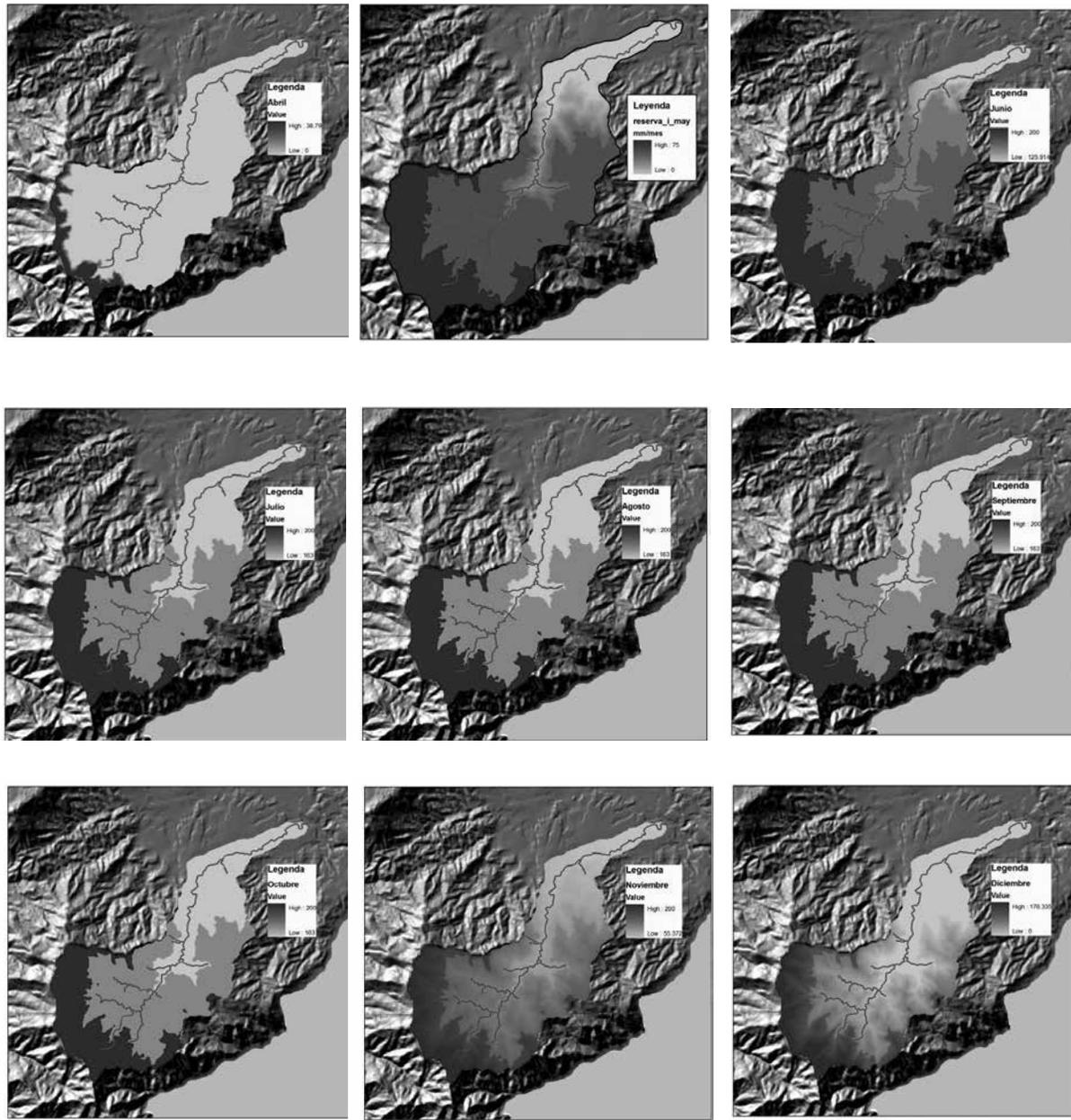


Figura 14. Distribución espacial y temporal reserva de humedad en el suelo, cuenca del Río Atulapa.

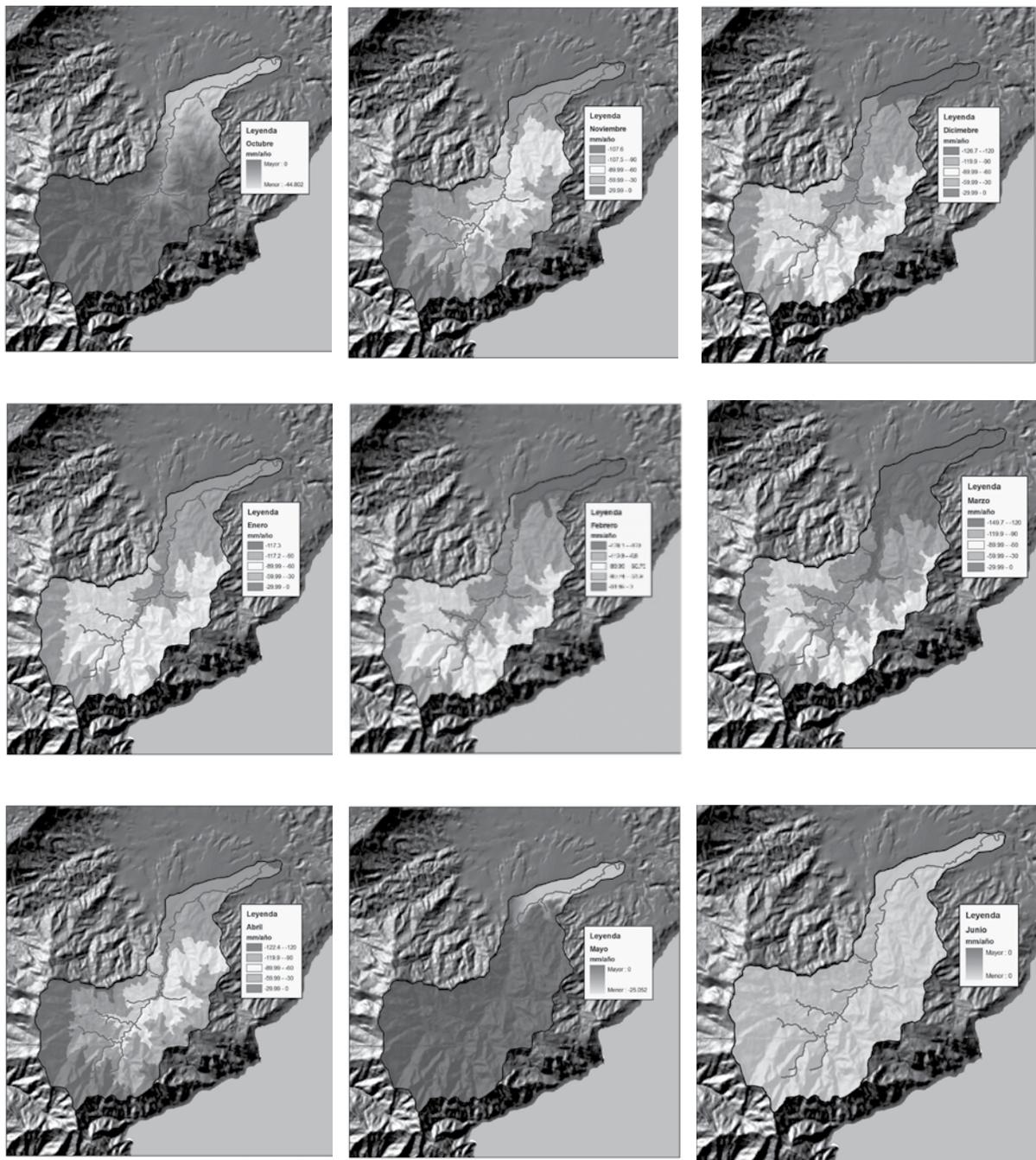


Figura 15. Distribución espacial y temporal del déficit de humedad en el suelo, cuenca Río Atulapa.

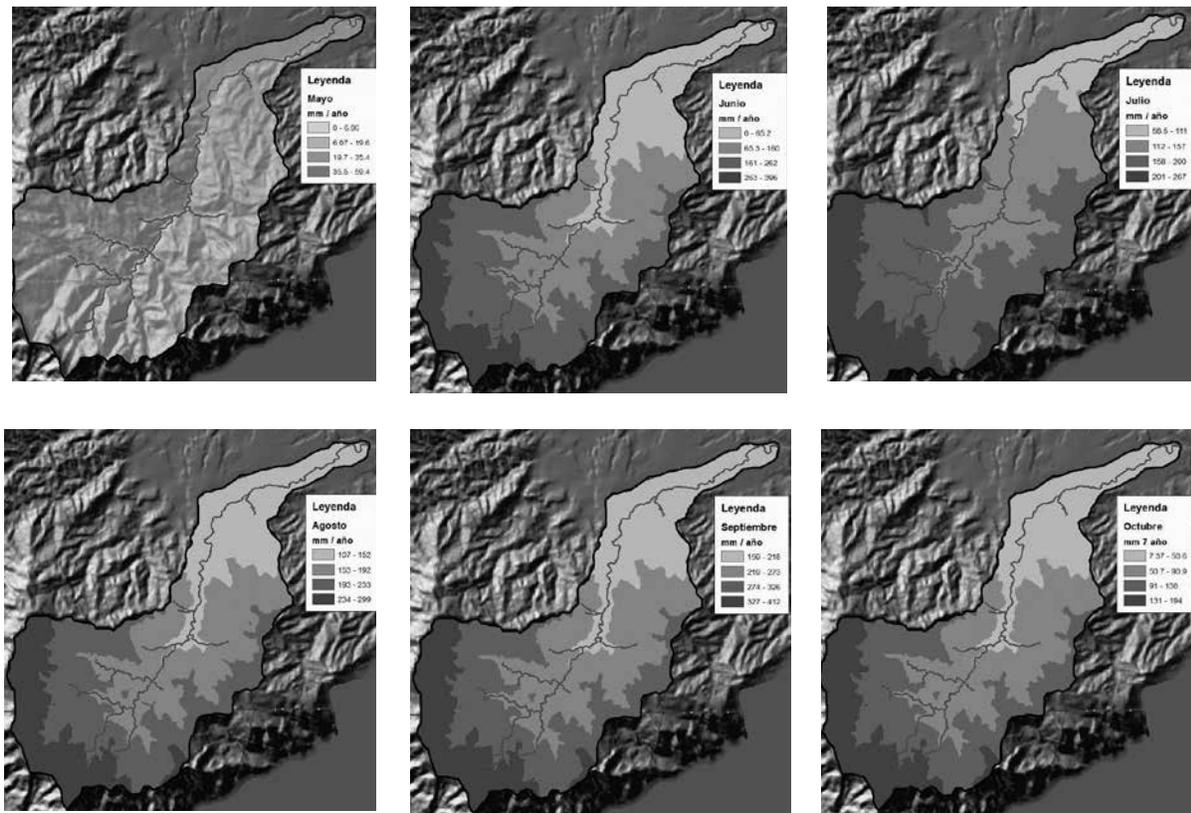


Figura 16. Distribución espacial y temporal del excedente de humedad en el suelo, cuenca Río Atulapa.

Referencias

- Alley, W. M. (1984). On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resources Research*, 2, 1-17. doi: 10.1029/WR020i008p01137
- Asociación Mundial para el Agua. (2011). *Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: Hacia una gestión integrada*. Tegucigalpa: Autor.
- Carmona, J. H. (2003). *Balace hídrico y clasificación climática para el departamento de Caldas, Modelo desarrollado en el lenguaje de programación Avenue de ArcView*. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales, Facultad de Ingeniería.
- Chow, V. T, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Cruz De la, J. R. (1982). *Clasificación de reconocimiento de las zonas de vida de la República de Guatemala*. Guatemala: Instituto Nacional Forestal.
- García, M. A. (2010). Proyecto Sinrem, cuenca del Río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Comisión Tri-nacional del Plan Trifinio y Universidad de San Carlos de Guatemala (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra. (2016). *Mapa de bosques y uso de la tierra 2016*. Guatemala: Autor. Recuperado <http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/cea/investigacion/monitoreo-boscosa.html>
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar. (2015). *Balace hidrológico de las cuencas de la República de Guatemala. Bases fundamentales para la gestión*

- del agua con visión a largo plazo* (Serie para la educación y el cuidado de la vida; 6). Guatemala: Autor.
- Instituto de Incidencia Ambiental. (2003). *Estado actual de los recursos hídricos de Guatemala*. Guatemala: Universidad Rafael Landívar.
- Instituto Geográfico Nacional. (2009a). Hoja cartográfica Cerro Montecristo (2359-III, Escala 1/50,000). Guatemala: Autor.
- Instituto Geográfico Nacional. (2009b). Hoja Cartográfica de Esquipulas (2359-IV Escala 1/50,000). Guatemala: Autor.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. (2016). *Registros históricos mensuales*. Estación Meteorológica Esquipulas, Esquipulas, Chiquimula. Recuperado de http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=1671
- Linsley, R. K. (1967). The relation between rainfall and runoff. *Journal of Hydrology*, 5, 152-160. doi: 10.1016/S0022-1694(67)80128-8
- Lobaton, L. S. (2009). *Estimación de variables hidrometeorológicas y balance hídrico en zonas con información climática escasa, caso cuenca Quebrada Grande estado Yaracuy*. Yaracuy, Venezuela: Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, Instituto Nacional de Investigación Agrícola.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2001). Mapas temáticos digitales de la República de Guatemala. Guatemala: Autor. Recuperado de <http://web.maga.gob.gt/mapas/>
- Ochoa, L. R. (2003). *Sistemas de Información Geográfica, ventajas y desventajas de su utilización en Guatemala* (Tesis de licenciatura). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería.
- Olivera, D. M. (1999). *Geographic Information Systems (GIS) based spatially distributed model for runoff routing*. Austin, Texas: University of Texas at Austin, Center for Research in Water Resources.
- Palacios, J. L. (1974). *Validez del Índice de Thortwaite en el balance hídrico de la provincia de Logroño* (Documento de Investigación Hidrológica). Zaragoza, España: Universidad Zaragoza, Facultad de Filosofía y Letras.
- Programa Hidrológico Internacional. (2007). *Balance hídrico superficial de Costa Rica, período 1970 - 2002*. San José, Costa Rica: Autor.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2005). *Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Autor.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2016). *Registros históricos mensuales. Estación Meteorológica Monte Cristo, El Salvador*. Recuperado de: <http://www.snet.gob.sv/ver/meteorología>
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1955). The water balance. Publication in *Climatology*, 8(1), 1-23.
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance* (Publications in climatology; vol. 10, no. 3). Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology.
- Torrero, M. P. (2011). Análisis del balance hídrico para el río Cataratas, Chubut, Argentina: Pontificia Universidad Católica, Geografía.