

Modelado de balance hídrico haciendo uso del coeficiente de cultivo variable para el subproceso de evapotranspiración

Modeling water balance using variable crop coefficient for the evapotranspiration sub processes

Quintero, Carlos^{1*}; Ablan, Magdiel²; Sarmiento, Lina³

¹Departamento de Ciencias Aplicadas y Humanísticas,
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes,
Merida, Venezuela.

²Centro de Simulación y Modelos (CESIMO),
Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

³Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE),
Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.

*cgull@ula.ve

Resumen

En este trabajo se ensambló un modelo de balance hídrico, tomando en cuenta los principales subprocesos que intervienen en dicho balance tales como: evapotranspiración, escorrentía, drenaje, interceptación e infiltración. Para ello se contó con dos bases de datos provenientes de la localidad de Mixteque ubicada en el Municipio Rangel en el estado Mérida, las cuales presentan registros climáticos, edáficos y de procesos hídricos en agroecosistemas de papa. La matriz de datos es referida a un ciclo de cultivo de papa. El modelo se encuentra elaborado con el software de simulación Vensim, basado en un ambiente de dinámica de sistemas. La evaluación se hizo contrastando las series de valores simulados versus los datos, en los subprocesos de: contenido de agua en el suelo, drenaje y escorrentía, esto se hizo gracias a que se incorporó en el modelo, un módulo que permite verificar el ajuste de los valores simulados versus la serie de datos, a través del porcentaje del error cuadrático medio, teniendo como ventaja, que se pueda identificar, las posibles deficiencias para su posterior mejora. Por otro lado, el porcentaje del error cuadrático medio en el contenido de agua en el suelo arrojó un valor promedio de 12% lo cual puede ser considerado como una buena simulación. Adicionalmente este modelo tiene la autonomía de poder modificarse las ecuaciones que gobiernan los distintos subprocesos, en consecuencia, se puede adaptar a distintos escenarios al que inicialmente se encuentra diseñado.

Palabras claves: Balance hídrico, Dinámica de Sistemas, Modelos, Evapotranspiración, Simulación.

Abstract

In this work, a water balance model was assembled, taking into consideration the main subprocesses involved in the water balance such as: evapotranspiration, runoff, drainage, interception and infiltration. To do this, we have a database from Mixteque's town located in the Rangel Municipality in the state of Mérida, which has climatic, edaphic and water process records in potato agroecosystems. The dataset is referred to a potato growing cycle. The model is developed with Vensim simulation software, based on an environment of system dynamics. The evaluation was done by contrasting the series of simulated values versus the data, in the subprocesses of: water content in the soil, drainage and runoff, this was done thanks to the fact that a module was incorporated into the model, which allows verifying the adjustment of the simulated values versus the series of data, through the percentage of the mean square error, having as an advantage, that can be identified, the possible deficiencies for its subsequent improvement. On the other hand, the percentage of the mean square error in the water content in the soil yielded an average value of 12% which can be considered as a good simulation. Additionally, this model has the autonomy of being able to modify the equations that govern the different threads, consequently, it can be adapted to different scenarios to which it is initially designed.

Keywords: Water Balance, System's Dynamics, Models, Evapotranspiration, Simulation

1 Introducción

El balance hídrico puede ser visto como el estudio y la descripción de las diferentes entradas, salidas y reservorios de agua en un agroecosistema, dentro de este balance, son diversos los procesos que intervienen, dentro de los cuales destacan: infiltración, drenaje, escorrentía y evapotranspiración, siendo este último, quizás el más importante en dicho balance, puesto que, representa la unión de tres procesos, el primero de ellos es el de evaporación del agua en el suelo, el otro es el de transpiración de las plantas y el tercero se refiere al agua que es interceptada del dosel de las plantas y que se evapora a partir del mismo. Adicionalmente, se han desarrollado, estudios previos de balances hídricos en agroecosistemas andinos (Sarmiento, 2000; Díaz, 2008), donde se destaca la importancia de la evapotranspiración como un subproceso del balance hídrico, y a su vez se sientan las bases para el desarrollo de balances más específicos haciendo uso de la modelización

Por otro lado, (Allen y col., 1998) presenta una metodología para el cálculo de la evapotranspiración, la cual ha sido catalogada, como la que mejor estima la evapotranspiración para una amplia gama de localidades, ya que se calcula bajo una serie de supuestos que toman en cuenta las características predominantes del cultivo, climáticas y del suelo. Lo cual se deriva en una mejor descripción de la distribución del contenido de agua en el suelo.

En otro orden de ideas, los modelos de simulación constituyen una herramienta de gran utilidad para lograr una mejor comprensión de los procesos que forman parte de dicho balance, (Wainwright 2004). A través de estos modelos, se puede lograr el estudio de forma integrada de todos estos aspectos concernientes al balance hídrico, conformando una herramienta de utilidad para el diseño de políticas que sirvan para el manejo y la distribución del agua en la agricultura.

Hasta el día de hoy, son diversos los modelos que se han establecido para el cálculo del balance hídrico. Sin embargo cuando han sido aplicados o adaptados a los agroecosistemas andinos en cultivos de papa, los resultados no han sido los más deseados, puesto que en la mayoría de los casos los métodos utilizados en el modelado de los subprocesos, se encuentran basados en relaciones o métodos empíricos. Adicionalmente, la presentación de los modelos existentes, no ofrecen la posibilidad de conocer las estructuras de las ecuaciones de sus respectivos procesos, y menos aún de modificarlas, para ajustarlas a las condiciones particulares de un agroecosistema.

En ese sentido, en esta investigación se plantea la creación de un modelo de balance hídrico buscando el mínimo grado de complejidad que permita una buena simulación, haciendo

énfasis en el subproceso de evapotranspiración, para ello, se aplicará la metodología para el cálculo de la evapotranspiración, presentada por (Allen y col., 1998) usando un coeficiente de cultivo variable, en función a la etapa de desarrollo en la cual se encuentre el cultivo. Este modelo, tiene la ventaja de proporcionar autonomía para conocer y modificar las ecuaciones, con la finalidad de adaptarlas a las condiciones propias de los agroecosistemas donde son usados o aplicados. Además, este modelo tiene incorporado submodelos que permiten evaluar el ajuste de los datos contra los valores simulados, esto lo hace con el Porcentaje del Error Cuadrático Medio.

2 Marco Teórico

2.1 Balance hídrico

El concepto de balance hídrico se analiza a partir del concepto de balance en contabilidad, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo en un intervalo de tiempo determinado, así como la evaluación de los flujos internos dentro del ecosistema. Sintéticamente puede expresarse por la fórmula presentada en la Ecuación 1:

$$\text{Estado}_{t+1} = \text{Estado}_t + \sum_{i=1}^N \text{Entradas}_i - \sum_{i=1}^N \text{Salidas}_i$$

(Ecuación. 1)

A continuación se dará una descripción detallada del proceso del balance hídrico en un agroecosistema. Aunque es de aclarar que no todos los procesos mencionados, serán modelados. En la Figura 1 se puede observar un esquema general del balance hídrico (Suelo-Planta-Atmósfera) en un ecosistema, aclarando que sólo aquellos procesos cuyas flechas se encuentran enmarcadas con un color, son los que se modelan en este trabajo. Se observa que el agua en el ecosistema puede entrar a través de la precipitación y/o el riego. Esta entrada tiene dos formas de llegar al suelo: una es el agua que llega directamente al suelo en caída libre, y la otra es el agua que es retenida temporalmente en el dosel y luego gotea o se escurre. En este segundo caso existen a su vez tres acontecimientos. El primero de ellos se refiere al porcentaje de agua que retorna a la atmósfera a través del proceso de interceptación. Este porcentaje varía de acuerdo a la cobertura del suelo y al tipo de vegetación. (Ataroff y col., 2000) reporta para un cultivo de papa en los Andes venezolanos valores de porcentaje de agua interceptada del 27%, como promedio de un ciclo de cultivo. El segundo acontecimiento que puede suceder respecto al agua que cae en el dosel, se encuentra referido al porcentaje que retorna a la atmósfera a través del proceso de evaporación (proceso conocido como interceptación). Es de notar que este porcentaje depende de diversos factores tales como el tipo de cultivo, etapa de desarrollo y la cobertura del mismo. Y el

tercer acontecimiento se refiere al agua que llega al suelo bien sea a través del goteo o por el escurrimiento por el tallo del cultivo. Una vez que el agua llega al suelo el agua puede ser distribuida de la siguiente manera: un porcentaje de ella es captada por la hojarasca y esta se evapora bien sea directamente de la hojarasca o cuando se queda empozada dentro de la misma, otra se escurre por la superficie a través del proceso de escorrentía superficial, y por último la otra parte del agua que no es captada por la hojarasca, penetra a capas posteriores del suelo a través del sub proceso de infiltración. Luego, el agua comienza a llenar todos los espacios posibles tanto en los macroporos como microporos, para que una vez que estos se encuentren llenos, ocurre el desplazamiento del agua. Dependiendo de las condiciones topográficas y del suelo, esta agua puede moverse a ecosistemas adyacentes a través del drenaje horizontal o escorrentía sub superficial. Además también puede ocurrir que el agua atraviese otras capas más profundas del suelo a través del proceso de percolación. Por último, cuando el agua llega a la última capa del suelo puede ocurrir nuevamente el drenaje horizontal o puede llegar hasta el subsuelo a través de la percolación profunda.

2.2 Principales procesos que intervienen en el balance hídrico

Precipitación: Se define precipitación a toda forma de agua que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. (Chereque 2011). Otros flujos que forman parte de la precipitación son: La precipitación horizontal o intercepción de neblina, que por lo general estos tipos de flujos son ignorados. En los Modelos de Balance Hídrico la precipitación es considerada como una entrada de agua en el sistema. Por otro lado, cuando el balance hídrico se encuentra enmarcado en un agroecosistema, el riego que se aplica a un cultivo de manera conjunta con la precipitación, son considerados también como una entrada al sistema.

A pesar de que existen diversas características que son propias de los eventos de lluvia como lo son: la cantidad, duración, intensidad y frecuencia, para los fines de este trabajo el proceso de precipitación será considerado a nivel diario tomando en cuenta la cantidad total diaria expresada en milímetros, que será usado como una variable exógena en el modelo de balance hídrico.

Intercepción: Es el proceso que ocurre cuando una fracción de la precipitación queda en las hojas de las plantas, que luego es evaporada. Como este proceso es proporcional a la cobertura vegetal se espera entonces que a mayor cobertura vegetal mayor sea la cantidad de precipitación interceptada y a menor cobertura vegetal, menor será la cantidad de precipitación interceptada, aunque también intervienen otras características del dosel como su arqui-

tectura y propiedades de las superficies de las hojas.

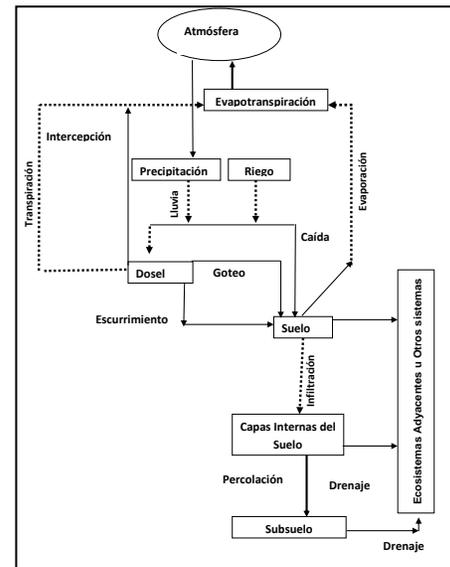


Fig. 1 Balance hídrico en un ecosistema suelo-planta-atmósfera

Infiltración: Es el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores. Muchos factores del suelo afectan el control de la infiltración, así como también gobiernan el movimiento del agua dentro del mismo y su distribución durante y después de la infiltración (Vélez y col., 2002).

Escorrentía superficial: Es el flujo superficial que se produce cuando la tasa de precipitación excede la tasa de infiltración. Los factores que afectan el proceso de escorrentía superficial en los agroecosistemas están relacionados con la precipitación (intensidad, frecuencia, duración, y cantidad), cobertura vegetal (formas de vida, arquitectura, estructura, y densidad), textura y estructura del suelo, pendiente de terreno (forma y grado y longitud) y de los efectos que en los factores antes mencionados tienen las prácticas de manejo agropecuario empleadas (Spedding 1979, Coleman y col., 1988, citado por Díaz 2007). A medida que aumenta la pendiente del terreno, el agua que se encuentra sobre la superficie tiene mayor energía potencial y disminuye la altura de la película de agua necesaria para comenzar su descenso, favoreciendo la dinámica del proceso de escorrentía superficial, aumentando su poder de arrastre y su salida del agroecosistema (Gavande 1991, citado por Díaz 2007).

Drenaje: Es definida como la salida del exceso de agua gravimétrica, hacia la napa freática o hacia un sistema de drenaje lateral, cuando el suelo se encuentra saturado. En el momento en que la humedad del suelo supera el límite de capacidad de campo se producen pérdidas de agua por drenaje, ello se debe al aumento del volumen de agua en

el suelo, ya sea por infiltración, flujo lateral o almacenamiento interno (Díaz 2007).

Evapotranspiración El proceso de evapotranspiración en este estudio es, si se quiere, el más complejo, ya que a su vez, es el producto de tres subprocesos que ocurren de manera simultánea:

- La Evaporación del suelo
- Transpiración de las Plantas.
- Intercepción del agua por parte del dosel.

La Evaporación del suelo es el proceso en la cual agua líquida es convertida a vapor de agua (vaporización) y removida de la superficie evaporativa (remoción de vapor). Los factores que intervienen en el proceso de evaporación son diversos dependiendo del tipo de suelo.

Por otro lado la Transpiración de las Plantas consiste en la vaporización de agua líquida contenida en los tejidos de las plantas a la atmósfera. Los cultivos primordialmente pierden su agua a través de los estomas. Similar al proceso de evaporación, en la transpiración son diversos los factores que intervienen desde factores ambientales tales como: presión de vapor, radiación, temperatura del aire, humedad del aire, y velocidad del viento, así como: el contenido de agua en el suelo, y la capacidad del suelo para conducir el agua a las raíces del cultivo, además de las características del cultivo. Todos ellos ejercen influencia en la estimación de las tasas de transpiración (Allen y col., 1998). En el campo agrícola, cuando el cultivo es pequeño, predomina la pérdida de agua por el proceso de evaporación del suelo, pero una vez que el cultivo se encuentra bien desarrollado, la transpiración viene siendo el factor predominante de pérdida de agua (Senthelhas y col., 2010).

Para el cálculo de la evapotranspiración suelen utilizarse dos conceptos: Evapotranspiración Potencial (ETP) es la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones ambientales existentes, cuando el suelo está abundantemente provisto de agua (ha alcanzado su capacidad de campo), y cubierto con una cobertura vegetal completa. Evapotranspiración Real (ETR) es la evapotranspiración que ocurre en condiciones reales, teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa ni el suelo se encuentra en estado de saturación. En consecuencia, la evapotranspiración real suele ser menor que la evapotranspiración potencial. Antes de entrar en detalle con el desarrollo de los métodos para el cálculo de la evapotranspiración presentados en (Allen y col., 1998), se hace pertinente explicar con detalle, el método de Penman Monteith, ya que este método servirá como punto de referencia, para explicaciones posteriores. El método de Penman Monteith es uno de los más utilizados para estimar la ETP, el cual requiere de datos de entrada tales como: ra-

diación solar, velocidad del viento, y humedad relativa. La ecuación de Penman Monteith está dada por la Ecuación 2:

$$\lambda ETP = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

(Ecuación. 2I)

Donde:

λ : Calor latente de vaporización. **MjKg⁻¹**

R_n : Radiación solar neta. **Mjm⁻²dia⁻¹**

G : Flujo de calor del suelo. **Mjm⁻²dia⁻¹**

$(e_s - e_a)$: Déficit de presión de vapor del aire. **kPa**

ρ_a : Densidad media del aire a presión constante. **Kgm⁻³**

C_p : Caloespecífico del aire
 $\approx 1.013 \times 10^{-3}$. **MjKg⁻¹°C⁻¹**

Δ : Pendiente de la relación entre presión de vapor y temperatura (Vapor de Saturación)

$$\Delta = \frac{\partial e^0}{\partial T} \cdot \text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$$

e^0 : Presión de Vapor Saturado. **kPa**

T : Temperatura **°C**

γ : Constante psicrométrica. $\gamma \approx 0.066$. **kPa°C⁻¹**

r_a : Resistencia aerodinámica. **sm⁻¹**

r_s : Resistencia de la superficie. **sm⁻¹**

El Coeficiente de cultivo (k_c), según (Allen, et al., 1998), puede ser visto como un factor de ponderación que trata de captar las demandas evaporativas del cultivo, en función a la etapa de desarrollo en la cual se encuentre el cultivo, las cuales se pueden clasificar:

Etapa Inicial: Comienza desde la plantación del cultivo hasta que el cultivo llega al 10% de cobertura.

Etapa de desarrollo: comprende entre el 10% y 70% de cobertura del cultivo.

Etapa media: Comprende el período que va desde el día en que la cobertura del cultivo alcance 0.70, ahora bien, para definir el final de este período, vale destacar que la cobertura sigue en aumento hasta lograr su máximo valor, a partir de ese momento, la cobertura comienza un proceso de disminución progresiva. El período Medio termina

cuando la cobertura llega nuevamente al 0.70 en su período de disminución.

Etapa final Va desde el momento en que la cobertura va en descenso a partir del 070 hasta que se realiza la cosecha, fin del ciclo del cultivo

Etapa terminal Se encuentra desde el fin de la cosecha hasta que termina el experimento, período en que el suelo se encuentra desnudo

Las medidas para evaluar el ajuste del modelo fueron dos: Porcentaje del Error cuadrático medio (%ECM): Expresa la diferencia porcentual entre los datos o valores observados y los valores simulados o salidas y se muestra en la Ecuación 3

$$\% ECM = \frac{\sqrt{\frac{\sum (O_i - M_i)^2}{N}}}{\bar{O}_i} * (100)$$

(Ecuación. 3)

Donde:

O_i : Valores observados.

M_i : Valores simulados

Para tener una idea de la bondad de ajuste del modelo que se plantea, (Jamieson et al., 1991) presenta en la Tabla 1 un tabulador de bondad de ajuste del Porcentaje del Error Cuadrático Medio.

Tabla 1. Valores referenciales del Porcentaje del Error Cuadrático Medio

Valor	Categoría
< 10%	Excelente
10% - 20%	Bueno
20% - 30%	Regular
> 30%	Malo

Fuente: (Jamieson et al., 1991)

2.3 Antecedentes

Hasta los momentos han sido varios los modelos de balance hídrico que han sido desarrollados a nivel mundial para describir el paso del agua tomando en cuenta la estructura del suelo. A continuación se mencionan los más resaltantes, con algunas de sus características más importantes en función a los subprocesos que involucran el balance hídrico. CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosión from agricultural Management Systems* (Knisel., 1980): fue diseñado para evaluar la contaminación de origen no puntual en unidades hidrológicas del tamaño de campos de cultivo (Bingner 1990) citado por (Silva 1995), tiene una serie de submodelos los cuales simulan algunos de los procesos del balance

hídrico como: escorrentía, y evapotranspiración. DDSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer): es un software que combina bases de datos de cultivos, suelos y clima en formatos estándares. Este software contiene 28 submodelos de simulación de cultivos, respaldado por una base de datos de programas de manejo de suelo, clima, manejo de cultivos, y datos experimentales. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial usa los métodos de Priestley-Taylor y el de Penman-Monteith FAO este último será desarrollado con detalle posteriormente. SAHEL (Soil in Semid Arids Habitats that Easily Leach). Es un modelo de balance hídrico, el perfil del suelo se divide en capas, cada una con espesores y características de retención de agua distintas, incluyendo una capa superior de hojarasca. Las ecuaciones del balance hídrico de este modelo, serán desarrolladas en detalle más adelante, ya que las mismas serán parte del modelo base que se construirá como parte de este estudio.

3 Procedimiento Experimental

3.1 Descripción de los experimentos de campo

La información que se dispone proviene de dos experimentos con cultivos de papa realizado en los Andes venezolanos. En cada uno de ellos se dispone de una base de datos que contiene registros de datos climáticos, de características del suelo y mediciones referentes al desarrollo del cultivo y su dinámica hídrica, que son de utilidad para los objetivos que persigue este estudio. Experimento 1 : Balance hídrico en Mixteque: Este experimento, que será denominado de ahora en adelante "Mixteque", corresponde a un estudio realizado en tres posiciones topográficas en la localidad de Mixteque por (Díaz 2007). Los registros van desde el 20/07/2001 hasta el 19/12/2001, correspondiendo a un ciclo completo de un cultivo de papa. Mixteque es una localidad que se encuentra en el Municipio Rangel del Estado Mérida, a 6 km al Noreste de Mucuchies, capital del Municipio a 8° 46' N y 70° 54'. El sitio donde se recolectaron los datos dentro de esta localidad, se encuentra en la vertiente izquierda del río Chama, en una ladera donde a su vez se localizaron tres posiciones topográficas que se distinguen por diferentes pendientes y elevaciones. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de las laderas de acuerdo a su pendiente y altitud, se puede observar que mantienen una relación lineal entre la pendiente y la altura, es decir, que en la medida que la ladera se encuentra en una menor altura también la pendiente disminuirá, tiende a ser más baja. Estos datos provienen del trabajo de (Díaz 2007).

La variedad de papa utilizada para la siembra fue *Solanum tuberosum* var. Granola, procedente de Alemania. (Díaz 2007). En este caso los registros climáticos provienen de una estación meteorológica que se encuentra ubicada en la ladera baja, donde se recolecto información de radiación temperatura y precipitación, mientras que la velocidad del

viento se obtuvo de la estación del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), que se encuentra muy cerca de donde se ubicó el ensayo de campo.

Tabla 2 Balance hídrico de Mixteque. Distribución de las Laderas Según Pendiente y Altitud

Ladera	Pendiente (%)	Altitud (m)
Alta	65	3047
Media	40	2952
Baja	20	2912

3.2 Elaboración del modelo de balance hídrico

El modelo estructurado, se encuentra desarrollado en el software de Dinámica de Sistemas Vensim. El cual se basa según el siguiente esquema: Se considera una sola capa del suelo de 30 cm, la misma se encuentra referenciada como C1, en esta capa se observa un flujo de entrada representado por el proceso de Infiltración y tres flujos de salida, que son los procesos de drenaje, escorrentía y la evapotranspiración ajustada a las condiciones reales del experimento (Evapo-Tran). La Figura 2 presenta un esquema conceptual de la estructura del modelo implementado en Vensim, la cual muestra todos los subprocesos que han sido tomado en cuenta en el balance hídrico.

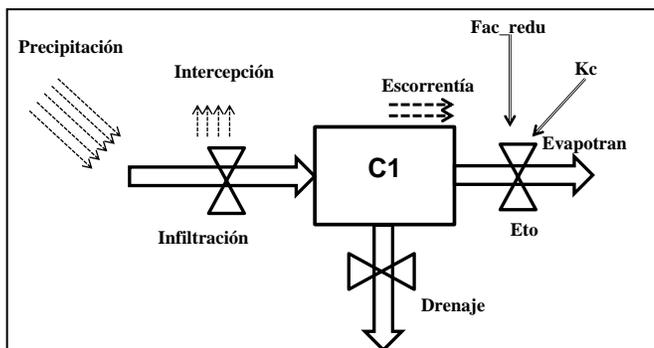


Fig. 2 Estructura del Modelo Base de Balance Hídrico desarrollado en en software de Dinámica de Sistemas Vensim

Las ecuaciones que gobiernan los subprocesos del balance hídrico en este modelo son las siguientes:

Intercepción:

$$\text{Min}(\text{Precipitación} + R; K * LAI)$$
 (Ecuación 4)

Donde:
K (adimensional): función que pondera la densidad de agua que permanece en las hojas de acuerdo al grado de inclinación que se encuentra en las mismas.
 La ecuación de este sub modelo (Ecuación 4), se deriva del

modelo de balance hídrico (SAHEL), donde, la cantidad de agua interceptada será la mínima cantidad entre las entradas de agua al sistema, producida por la precipitación más el riego, y el producto de la cantidad de agua que puede ser retenida por unidad de área foliar, este último término refleja la cantidad de agua que puede permanecer en las hojas y que luego será evaporada. Si la precipitación más el riego es menor que el producto del coeficiente por el índice de área foliar, implica que toda el agua caída sobre la hoja será interceptada, por otro lado, si el agua que cae, producto de la precipitación más el riego es mayor que la que es capaz de retener la hoja, sólo se interceptará el agua, que las hojas son capaces de retener en su superficie.

Precipitación: Cantidad de lluvia caída durante un día(mm)

R: Cantidad de riego suministrado en un día (mm)

Escorrentía:

$$\text{Max}(0; (Pn - r22) * r1)$$
 (Ecuación 5)

Donde:
r22: Umbral de la precipitación neta a partir del cual comienza la escorrentía.(mm)
r1: Proporción de la Precipitación neta que se escurre cuando comienza la escorrentía. (adimensional)

En la Ecuación 5 se considera que no hay escorrentía hasta que ya haya formado una lámina de agua sobre la superficie del suelo (*r22*) y a partir de este umbral, lo que escurre, es una proporción fija de la precipitación neta (*r1*).

Infiltración:
 Se define como la diferencia entre la Precipitación neta (*Pn*) y la Escorrentía, mostrada en la Ecuación 6:

$$\text{Infiltración} = (Pn - \text{Escorrentía})$$
 (Ecuación 6)

Drenaje:

$$\text{Si}(C1 + \text{Infiltración} - \text{EvapoTran} > cc1); \text{Entonces}(C1 + \text{Infiltración} - \text{EvapoTran} + cc1) \text{De lo contrario}(0)$$
 (Ecuación I)

Donde:
C1: Contenido de agua en el suelo en su capa única de 0 a 30 cm. (mm/día)

cc1: Contenido de agua en el suelo que es capaz de retener luego de haber sido mojado de forma abundante. ($\frac{cm^3}{cm^3}$)

El drenaje presentado en la Ecuación 7, se modelará con una función condicional, la cual puede describir de la si-

guiente manera: si la cantidad de agua que se encuentra en la capa única del suelo determinada por la variable C1, más el agua que le entra a través del sub proceso de infiltración, menos el agua que sale de la capa por el sub proceso de evapotranspiración (Evapo), es mayor que el agua que es capaz de retener el suelo determinada por la capacidad de campo cc1, entonces, la diferencia o el exceso entre el agua del compartimiento y la capacidad de campo cc1, es la que será drenada. En caso contrario no hay drenaje, ya que el agua que se entra en el compartimiento, permanece en el mismo.

Evapotranspiración de cultivos de referencia:

Existen diversas formas de modelar este componente o sub proceso de evapotranspiración, sin embargo en este modelo, éste componente se modelizará, tal y como se encuentra en (Allen y col., 1998) que se refiere a la evapotranspiración de cultivos de referencia, la cual queda expresada mediante la Ecuación 8.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.3u_2)}$$

(Ecuación 8)

Donde:

- ET₀**: Evapotranspiración de cultivo de referencia (*mm/día*)
- R_n**: Radiación Solar Neta en la superficie de referencia (*Mjm⁻² día⁻¹*)
- G**: Densidad del flujo de calor del suelo. (*Mjm⁻² día⁻¹*)
- T**: Temperatura media del aire diaria a una altura de 2 m (°C).
- u₂**: Velocidad del viento a una altura de 2 m (*ms⁻¹*).
- (e_s)**: Presión de vapor de saturación (*kPa*).
- (e_a)**: Presión de vapor Actual (*kPa*).
- (e_s - e_a)**: Déficit de presión de vapor de saturación *kPa*
- Δ**: Pendiente de la curva de presión de la temperatura. (*kPa°C⁻¹*)
- γ**: Constante psicrométrica (*kPa°C⁻¹*).

EvapoTran: Evapotranspiración ajustada con el coeficiente de cultivo **K_c**: y con el agua disponible en el suelo para evaporar. **Fac_{redu}**

Fac_{Redu}: Coeficiente que limita la evapotranspiración potencial, en función a la cantidad de agua que puede retener el suelo, y a la cantidad de agua disponible en el suelo para ser evaporada

$$Min \left(\frac{C1 - pmp1}{cc1 - pmp1}; 1 \right) \text{ (Ecuación 9)}$$

La Ecuación 9 es un factor de reducción que oscila entre cero y uno, y que multiplica, este factor se calcula en función del porcentaje de agua disponible que es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto mínimo de humedad mediante el cual, el cultivo no puede seguir extrayendo agua del suelo (Punto de marchitez permanente)

Donde:

C1: Contenido de agua en el suelo en su capa única de 0 a 30cm (*mm/día*)

pmp1: Punto de marchitez permanente. (*cm³/cm³*)

cc1: Capacidad de campo (*cm³/cm³*)

Esta ecuación limita linealmente la evapotranspiración, desde la capacidad de campo (factor=1), hasta el punto de marchitamiento (factor=0).

En lo que se refiere al cálculo del cultivo, la Tabla 3 muestra los valores del coeficiente del cultivo en función a las etapas de desarrollo en la que se encuentra el cultivo de acuerdo a las laderas.

Tabla 3. Balance hídrico de Mixteque. Valores del Coeficiente del cultivo (Dmnl) según Laderas, por Etapas

Laderas/Etapas	Inicial	Media	Final	Final 2
Baja	0,8	1,15	0,75	0,87
Media	0,96	1,15	0,75	1,03
Alta	0,9	1.15	0,75	0,95

4 Discusión y Resultados

La Figura 3 muestra el contenido de agua en el suelo para el experimento de Mixteque en cada una de sus laderas. En la ladera Baja se observa que el ajuste es bastante bueno desde que comienza el experimento hasta buena parte del desarrollo del cultivo que se corresponde al día número 53 después del inicio del experimento, y a partir de ahí comienza un pequeño desajuste entre los datos y los valores simulados, para luego volver tener un buen ajuste en la etapa final de la cosecha. En esta ladera se obtuvo un 10.41 en el error cuadrático medio, lo que la simulación según (Jamieson y col., 1991) es considerada como Buena. En la ladera media se observa que los valores simulados en general, presentan una variabilidad mayor respecto a los datos durante todo el experimento, sin embargo en general los valores promedio de las dos series parecen estar en el mismo rango. Respecto a la ladera Alta se observa un buen ajuste al principio del experimento que corresponde a la etapa inicial de desarrollo del cultivo. En la etapa intermedia del ex-

perimento hay un mayor desajuste entre los valores simulados y los datos, y el mejor ajuste se obtuvo en esta ladera en la etapa final del experimento. Cabe destacar que en general si se toma el promedio del el porcentaje del error cuadrático medio es inferior al 15%, lo cual indica que la simulación bajo esta métrica se puede considerar como Buena, según (Jamieson y col., 1991).

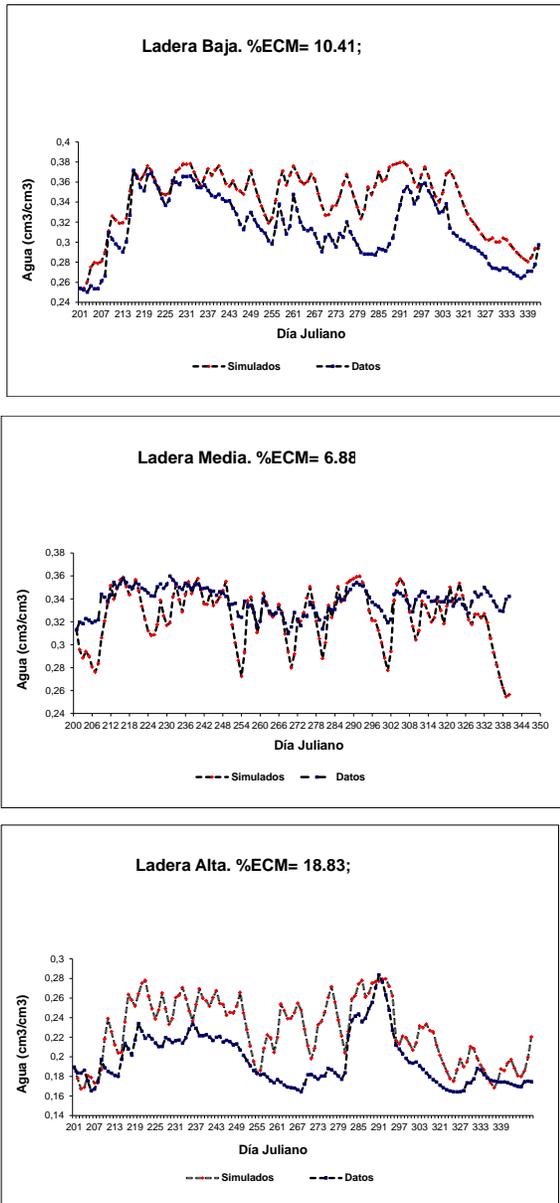


Fig. 3 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del contenido de agua en el suelo utilizando el Modelo 1 según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio.

Adicionalmente, en la Figura 4 se observa que al aplicar el análisis de regresión a los valores del contenido de agua en el suelo, el modelo explica el 82% de la variabilidad de los

datos.

Respecto al Sub proceso de Drenaje mostrado en la Figura 5 se observa que en la Ladera Baja, en la mayor parte del experimento, el modelo simula más drenaje de lo que se corresponde con los datos, en la Ladera Media fue en donde mejor ajuste se obtuvo, y en la ladera Alta se puede observar que el ajuste fue bueno desde la mitad del experimento que corresponde cuando el cultivo se encuentra en plena fase de desarrollo, hasta el final del mismo que es cuando se termina la cosecha. Viendo este proceso desde el índice del porcentaje del error cuadrático medio se muestra que en todos los casos es mayor al 75% lo cual indica que el modelo no simula bien el subproceso de Drenaje..

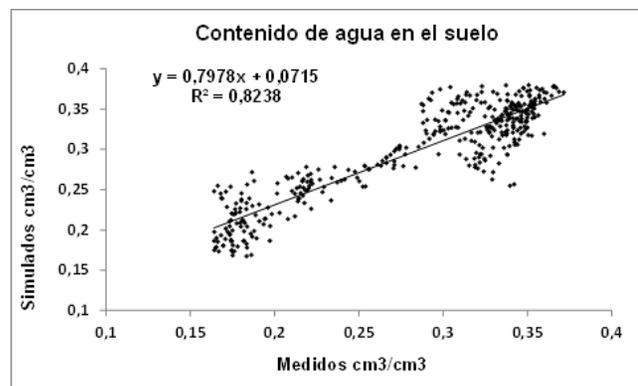


Fig. 4 Balance hídrico de Mixteque. Análisis de Regresión del contenido de agua en el suelo.

La Figura 6 muestra la distribución con respecto al sub proceso de Escorrentía, dicha figura muestra que el ajuste parece regular pero desde el punto de vista del Porcentaje del Error Cuadrático Medio los resultados no son buenos ya que en todos los casos este índice es mayor al 90.

Tabla 4 Experimento de Mixteque. Distribución de la entrada de agua al agroecosistema, y porcentaje de salida de acuerdo al los sub-procesos de drenaje escorrentía y evapotranspiración

		Baja	Media	Alta
Entrada de agua en el agroecosistema (mm)	Precipitación	267,71	282,03	296,36
	Riego	127	209	132
	Total	394,71	491,03	428,36
% de Salida de agua del agroecosistema	Drenaje	24,03	26,34	23,92
	Escorrentía	0,59	0,63	0,62
	Evapotranspiración	76,24	79,82	79,11

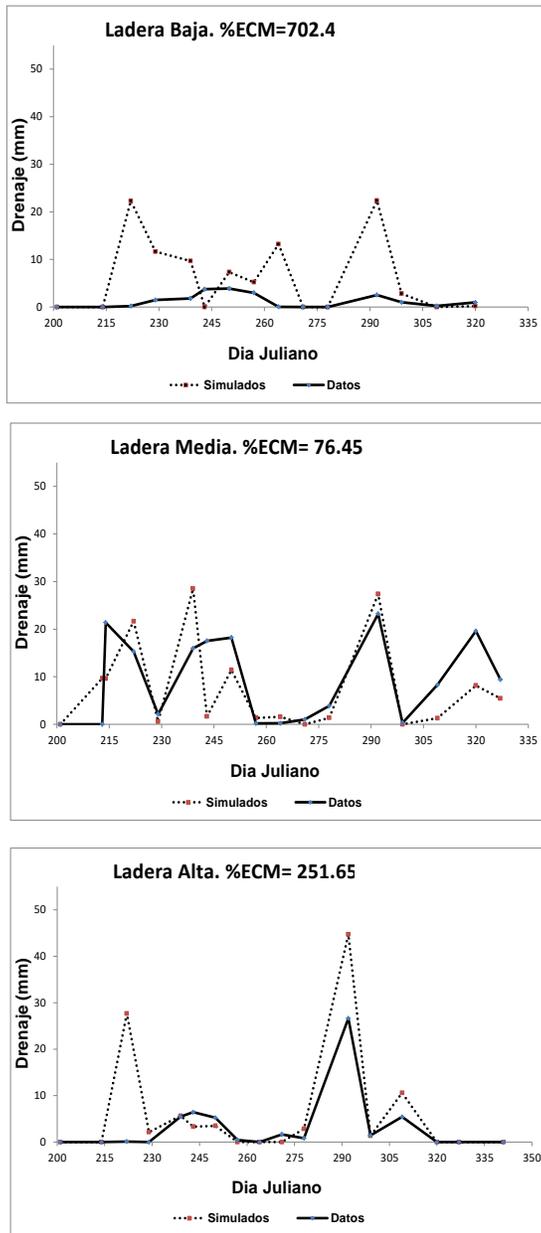


Fig. 5 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación del drenaje utilizando el Modelo 1 según laderas, indicando el porcentaje del error cuadrático medio

5 Conclusiones

Se ha elaborado en modelo de balance hídrico mediante el cual, se incluye la simulación de tres flujos que son: contenido de agua en el suelo, drenaje y escorrentía, este modelo fue evaluado haciendo el contraste de los datos medidos versus los valores simulados en los subprocesos de contenido de agua en el suelo drenaje y escorrentía, donde se puede constatar que este modelo, simula de forma adecuada el

contenido de agua en el suelo, ya que al promediar el porcentaje del error cuadrático entre las tres laderas, arroja un valor de 12,04%, que se puede considerar una simulación Buena..

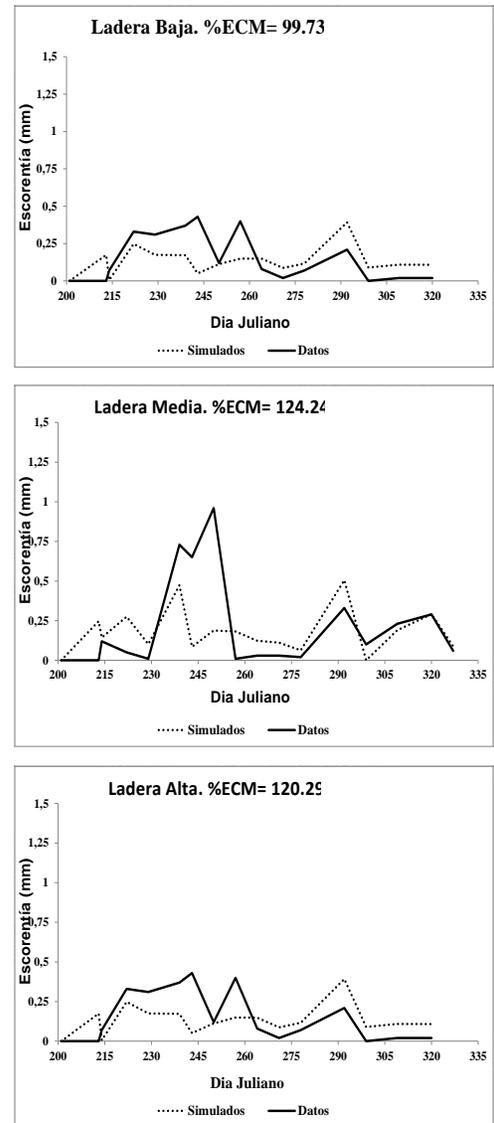


Fig. 6 Balance hídrico de Mixteque. Comparación de los resultados de la simulación de la escorrentía según laderas indicando el porcentaje del error cuadrático medio

Adicionalmente, al realizar el análisis de regresión se observa que el modelo explica el 82% de la variabilidad de los datos en lo que se refiere al contenido de agua en el suelo.

En este trabajo se realiza el cálculo del subproceso de evapotranspiración con la metodología presentada en (Allen y col., 1998), la cual consta de una versión modificada del método clásico de PenmanMonteith, que incluye el coeficiente de cultivo variable, el cual toma en cuenta las carac-

terísticas del cultivo, en este caso en particular el cultivo de papa. Dicha metodología es considerada como la que mejor estima el subproceso de evapotranspiración.

Por otro lado, en la Tabla 4 se observa la cantidad de agua (mm) que entro al agroecosistema durante el experimento, a través de la precipitación y el riego suministrado en cada ladera, ahora bien, si se toma el promedio de las tres laderas, se llega a la conclusión que entro 438,03 (mm), y observando el porcentaje de salida de agua del agroecosistema, en promedio, por el subproceso de evapotranspiración, salio del sistema el 78,39%, esto nos indica que en efecto, el subproceso de evapotranspiración es el de mayor influencia en un balance hídrico.

En lo que se refiere a los flujos de drenaje y escorrentía, la comparación entre los resultados de la simulación y los valores medidos en campo según las medidas de bondad de ajuste, no puede ser considerados como satisfactorios, y aunque esto pudiese indicar problemas potenciales en la forma en que simularon estos subprocesos, en la práctica, la contribución de éstos subprocesos, puede ser considerada como poco significativa, si se comparan, con el aporte que representa el subproceso de evapotranspiración. Esto nos lleva a concluir que incluso tomando en cuenta estos problemas referidos a la simulación de los subprocesos de drenaje y escorrentía, los resultados arrojados por el modelo, son aceptables en lo que se refiere al contenido de agua en el suelo. Y se confirma que el subproceso de evapotranspiración es el que mayor influencia tiene en el balance hídrico.

Referencias

Acevedo D, 1988, Economía hídrica de dos agroecosistemas tropicales: una pastura permanente y un cultivo de maíz. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias. Pág 3-5.

Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M, 1998, Crop Evapotranspiration Guidelines or Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Pág 1-251.

Ataroff M, Sánchez LA, 2000, Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado Táchira, Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 41(1), 11-30.

Chereque M, Hidrología para Estudiantes de Ingeniería Civil. [Consulta 10/06/2011]. Disponible en: http://biblioteca.pucp.edu.pe/docs/elibros_pucp/chereque_wendor/hidrologia_estudiantes_ing_civil.pdf

Díaz C, 2007, Balance hídrico y de nutrientes y procesos erosivos en un agroecosistema de papa bajo diferentes posiciones topográficas en los Andes Venezolanos. Postgrado en Ecología Tropical. Universidad de Los Andes. Facultad de Ciencias. Pág 1-123.

Domingo F, Villagarcía L, Were A, 2003, ¿Cómo se puede

Medir y Estimar la Evapotranspiración? Estado Actual y Evolución. Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y medio Ambiente. [Consulta: [02/08/2011]. Disponible en: http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8959/1/ECO_12%281%29_09.pdf

Jamieson P, Porter J, Wilson D, 1991, A test of the computer simulation model ARC-WHEAT on wheat crops grown in New Zealand. Cambridge University Press. Pág. 337-350.

Knisel W, 1980, CREAMS: A field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration Conservation Research Report. 26 Pág 643.

Metselaar K, 2003, Le bilan hydrique de la parcelle (modèle SAHEL). Proyecto Tropandes. Institut de Recherche pour le Développement, Natures Sciences Sociétés – Dialogues. Montpellier, France. [Consultado: 04-10-2008]. Disponible en: <http://netx.uparis10.fr/nss/atelier6.htm>.

Penning de Vries, F Jansen D, Ten Berge, H Bakema, 1989, Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Agricultural Systems, Volumen 36. Pág. 244.

Sarmiento L, 2000, Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. Mountain Research and Development, 20(3). Pág 246-253.

Vélez M., Vélez J, 2002. Capítulo 8: Infiltración. Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Hidráulica.

Silva O, 1995, Descripción General De Algunos Modelos De Simulación De Erosión. Revista de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. [Consulta 27/05/2011]. Vol 3. Pág 30-37. Disponible en http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1049/978

Wainwright J, Mulligan M, 2004, Environmental Modelling Finding Simplicity in Complexity. John Wiley & Sons, LTD. Pág 50-51

Recibido: 13 de diciembre de 2019

Aceptado: 20 de marzo de 2020

Quintero, Carlos: MSc en Modelado y Simulación de Sistemas. Licenciado en Estadística. Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes.

Ablan, Magdiel: Ph. D. Ciencias del Ambiente de la Universidad de North Texas, USA. Profesora adscrita al Centro de Simulación y Modelos (CESIMO.). [Correo electrónico: mablan@ula.ve](mailto:mablan@ula.ve)

Sarmiento, Lina: Ph.D. en Ecología - Universidad de París

XI – Francia. *Profesora adscrita al Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). Correo electrónico: lsarmien@ula.ve*

