

J. P. LHOMME\*  
 L. GOMEZ\*\*  
 A. JARAMILLO\*\*

### Summary

*An agroclimatic model which simulates the evolution of the soil water balance under perennial crops is proposed. The model is recurrent, operates with a time step of one day and utilizes daily rainfall data, potential evapotranspiration values and a given value of the soil maximum water holding capacity. It allows to determine water storage (RH), drainage (DR) and water deficit (DH) on a daily basis. Each parameter appears in the form of a matrix which have the same dimensions as the daily rainfall matrix. Practically the model can be used to characterize drought or water excess risks and duration of dry periods.*

### Introducción

**E**n el campo de la agroclimatología, cuando se analizan las condiciones de abastecimiento hídrico de las plantas, se considera generalmente el balance potencial (lluvia – evapotranspiración potencial), sobre una base de tiempo que puede variar desde una semana hasta un mes, y se estudia estadísticamente su variabilidad interanual. Este balance potencial, constituye una manera simple de representar el balance hídrico real y no toma en cuenta el papel de reserva que desempeña el suelo, almacenando y restituyendo el agua de lluvia.

El modelo que se presenta trata de caracterizar mejor las condiciones de abastecimiento hídrico de las plantas a través de una simulación de la evolución de la reserva hídrica del suelo (1). Los datos climáticos que sirven de entrada al modelo son las precipitaciones diarias que aparecen en forma de una matriz PJ (m, 365), representando m el número de años de registro y los valores promedios interanuales de la evapotranspiración potencial colocados en la

forma de un vector de valores diarios EPJ (365). Al lado de estos datos climáticos aparecen ciertos parámetros de ajuste a las condiciones edáficas consideradas.

### Presentación del modelo

#### La reserva útil del suelo

La reserva hídrica del suelo, representada por RH, constituye la cantidad de agua almacenada en el suelo y disponible para las plantas. Es un número positivo, expresado en milímetros, que varía entre 0 y la reserva útil RU. La reserva útil representa la diferencia entre las cantidades de agua almacenadas a la capacidad de campo y al punto de marchitez permanente dentro de una capa de suelo de profundidad igual a la profundidad media de las raíces. Esta reserva útil evoluciona en función de la profundidad de las raíces, es decir, en función del estadio de desarrollo del cultivo. Para simplificar el problema considérese un cultivo perenne cuyo arraigamiento es aproximadamente constante en el transcurso del tiempo. De esta manera se puede suponer que la reserva útil es constante.

#### La lluvia eficaz

Admítase que una lluvia demasiado débil ( $P < P_n$ ) se evapora inmediatamente sin que logre contribuir a la reconstitución de la reserva hídrica. Si  $P_i$  designa

<sup>1</sup> Recibido para publicación el 3 de mayo, 1984

\* IICA, Sede Central, Coronado, San José, Costa Rica

\*\* Sección de Agroclimatología, CENICAFE, Chinchiná, Caldas, Colombia.

la lluvia registrada del día  $j$  y  $PE_j$  la lluvia eficaz, entonces:

$$PE_j = \begin{cases} P_j, & \text{si } P_j \geq P_n \\ 0, & \text{si } P_j < P_n \end{cases} \quad [1]$$

Para anular la contribución de la escorrentía, debe considerarse el suelo como horizontal

De este modo, si la intensidad de la lluvia es superior a la capacidad de infiltración del suelo, el agua que no se infiltra inmediatamente se quedará en el mismo lugar al estado libre hasta el momento que se evapore o se infiltre. Tampoco habrá transferencias laterales de agua dentro del suelo.

#### El drenaje

Si la cantidad de lluvia caída el día  $j$  es superior a la capacidad de retención del suelo, habría drenaje, es decir una pérdida de agua por salida subterránea. La capacidad de retención del suelo el día  $j$ , representada por  $CR_j$ , corresponde a la diferencia entre la reserva útil  $RU$  y la reserva hídrica del día anterior  $RH_{j-1}$

$$CR_j = RU - RH_{j-1} \quad [2]$$

La cantidad de agua perdida por drenaje se escribe:

$$DR_j = \begin{cases} P_j - CR_j, & \text{si } P_j > CR_j \\ 0, & \text{si } P_j \leq CR_j \end{cases} \quad [3]$$

#### La evapotranspiración real

La evapotranspiración máxima (ETM) evoluciona, respecto a la ETP, en función del estado de recubrimiento del suelo por el follaje. En el caso de un cultivo cuyo follaje cubre totalmente el suelo, se puede admitir que la ETM iguala a la ETP. Así, siempre para simplificar el problema, debe considerarse un cultivo perenne que cubre totalmente el suelo.

La evapotranspiración real (ETR) evoluciona, respecto a la ETM, en función del estado de la reserva hídrica del suelo. Los conceptos clásicos sobre la utilización del agua del suelo por las plantas tienen en cuenta una reserva fácilmente utilizable (RFU), que representa la fracción de la reserva útil para las plantas sin dificultad, es decir, sin que eso provoque un cierre de los estomas, y así una reducción de la evapotranspiración respecto a la ETM. Abajo de este umbral, la ETR decrece conforme el agua disponible disminuye hasta el punto de marchitez permanente don-

de se anula. El punto crítico, que constituye el umbral de regulación, varía según el tipo de suelo y el desarrollo de las raíces. Si  $RFU = c \cdot RU$ , siendo  $c$  un coeficiente de ajuste ( $0 < c < 1$ ), se encuentra definida también una reserva difícilmente utilizable (RDU) que es el complementario de la RFU respecto a la RU:  $RU = RFU + RDU$ .

Asumiendo que el cociente  $ETR/ETM$  aumenta linealmente de 0 a 1 en función de la reserva hídrica  $RH$  del suelo, cuando ella pasa del valor 0 al valor RDU, debe mantenerse en este valor cuando la reserva fluctúa entre RDU y RU. Representando  $RH_{j-1}$  el estado de la reserva hídrica al fin del día  $j-1$  y por consiguiente al inicio del día  $j$ :

$$ETR_j/ETP_j = \begin{cases} 1, & \text{si } RH_{j-1} \geq RDU \\ RH_{j-1}/RDU, & \text{si } RH_{j-1} < RDU \end{cases} \quad [4]$$

El déficit hídrico diario a nivel del cultivo se encuentra definido por la relación:

$$DH_j = ETP_j - ETR_j \quad [5]$$

A partir de eso se definirá un déficit hídrico acumulado sobre el período de cultivo o sobre una fase particular del ciclo (estado crítico por ejemplo):

$$DHC = \sum_{j=J_1}^{J_2} DH_j \quad [6]$$

#### La ecuación del balance hídrico

La ecuación que traduce el balance hídrico se escribe sobre una base diaria:

$$RH_j = RH_{j-1} + PE_j - ETR_j - D_j \quad [7]$$

Esta ecuación va a servir como relación recurrente para calcular las reservas hídricas diarias sucesivas. A menos que se tenga una manera particular de conocer la reserva hídrica al inicio del proceso recurrente ( $RH_0$ ), se puede basar en las consideraciones siguientes para iniciar el proceso: si el día 1 se encuentra en plena estación seca, se escoge  $RH_0 = 0$ , y si se encuentra en plena estación lluviosa,  $RH_0 = RU$ ; de lo contrario, se toma un valor promedio  $RH_0 = RU/2$ .

#### Aplicaciones del modelo

##### Utilización práctica del modelo

Se puede utilizar el modelo en tiempo "real" para simular y seguir la evolución de la reserva hídrica del

suelo. Para eso hay que ajustar el modelo a las condiciones específicas del caso considerado, escogiendo juiciosamente los parámetros (RU, RFU). Pero el modelo propuesto debe servir en primer lugar al análisis agroclimático, basado sobre la explotación estadística de las series de datos climáticos

El modelo se ha programado en FORTRAN IV en forma de una subrutina llamada SBH (Simulación de Balance Hídrico), cuya lista de entrada comprende dos grupos de datos:

- datos climáticos: PJ, EPM, IJ. PJ representa la matriz de las precipitaciones diarias, de dimensión  $365 \times IJ$ , siendo IJ el número de años de registro. EPM representa el vector de las evapotranspiraciones potenciales mensuales (dimensión 12) que se transformará en un vector EPJ (365) de valores diarios.
- Características edáficas: RU, C. RU es la reserva útil del suelo considerado expresada en milímetros y C el coeficiente que define la RFU. El parámetro PN que define el límite de eficacia de la lluvia varía poco. Se lo considerará como interno al modelo y no figurará en la lista de entrada.

El proceso recurrente se inicia el primero de enero del primer año de registro de la pluviosidad PJ (1,1) con un valor de la reserva hídrica del día anterior  $RH_0$ , escogido en función de su posición frente a los períodos secos y lluviosos. Los años siguientes se encadenan regularmente: el 31 de diciembre del año n con el 1° de enero del año n + 1. La matriz QJ que figura en la lista representa los "output" del modelo. Tiene las mismas dimensiones que la matriz de las lluvias PJ. Su contenido varía según el valor del indicador IN. Si IN vale 1, QJ contiene las reservas hídricas diarias. Con IN = 2, QJ contiene los déficit hídricos diarios y con IN = 3, los valores diarios del drenaje. En el Anexo se presenta el programa que fue enfocado sobre una computadora IBM 360.

#### Estudio de los riesgos de sequía y de exceso de agua

Para estudiar los riesgos de sequía con el modelo es conveniente utilizar como salida los valores diarios del déficit hídrico, ya que representan la falta de agua a nivel del cultivo. La Figura 1 da un ejemplo. La estación escogida es la de Pueblo Bello (altitud: 1000 m, latitud:  $10^{\circ}22'N$  y longitud:  $73^{\circ}38'W$ ), ubicada en la parte norte de la zona cafetera de Colombia (2), en la región de la Sierra Nevada. Cuenta con 20 años de registro de las precipitaciones (1961-80). Se consideró una reserva útil (RU) de 120 mm y una RFU de 60 mm. Se ha dividido el año en períodos elementales de 10 días y para cada período elemen-

tal se ha calculado, año tras año, el déficit hídrico acumulado  $DH_{10}$ , es decir la suma de los déficit diarios

$$(DH_{10} = \sum_{j=1}^{10} DH_j)$$

Después se ha analizado estadísticamente la repartición interanual de los déficit  $DH_{10}$  por clasificación frecuencial para calcular la mediana y el cuartil superior correspondientes a cada período elemental.

Si se quieren estudiar los riesgos de exceso de agua con el modelo, hay que utilizar como salida los valores del drenaje (IN = 3 en el programa), y después se puede estudiar este parámetro de la misma manera que el déficit hídrico. La Figura 2 muestra para la misma estación de Pueblo Bello y según el mismo procedimiento, la evolución en el transcurso del año de los valores del drenaje acumulados sobre 10 días y sobrepasados con las probabilidades 0.50 y 0.25.

#### Estudio de la duración de un período seco o lluvioso

Para estudiar con el modelo la duración de un período seco, veranillo por ejemplo, se puede proceder de la manera siguiente. Definiendo un día seco como un día con una reserva hídrica inferior a la reserva difícilmente utilizable (RDU) y la duración de un período seco como el número de días consecutivos secos, se calcula, año por año, durante los meses en que suele ocurrir el veranillo, el número de días consecutivos con una reserva inferior a la RDU. Para la estación de CENICAFE (altitud: 1310 m) en la zona cafetera de Colombia, que cuenta con veinte años de registro de la lluvia, los valores siguientes se refieren a la duración del veranillo de los meses de julio-agosto, calculada según lo indicado (RU = 120 mm, RFU = 60 mm):

17, 8, 11, 5, 6, 17, 37, 0, 26, 2,  
0, 21, 10, 1, 0, 30, 22, 3, 9, 17.

A partir de esta muestra se puede calcular la frecuencia correspondiente a una duración dada. La frecuencia de un veranillo de más de 15 días es 0.40, de más de 20 días 0.25 y de más de 25 días, 0.15.

#### Conclusión

El modelo presentado es simple y su programación fácil. No pretende ser una simulación exacta de la evolución de la reserva hídrica del suelo pues habría que utilizar una escala de tiempo aún más pequeña, del orden de una hora.

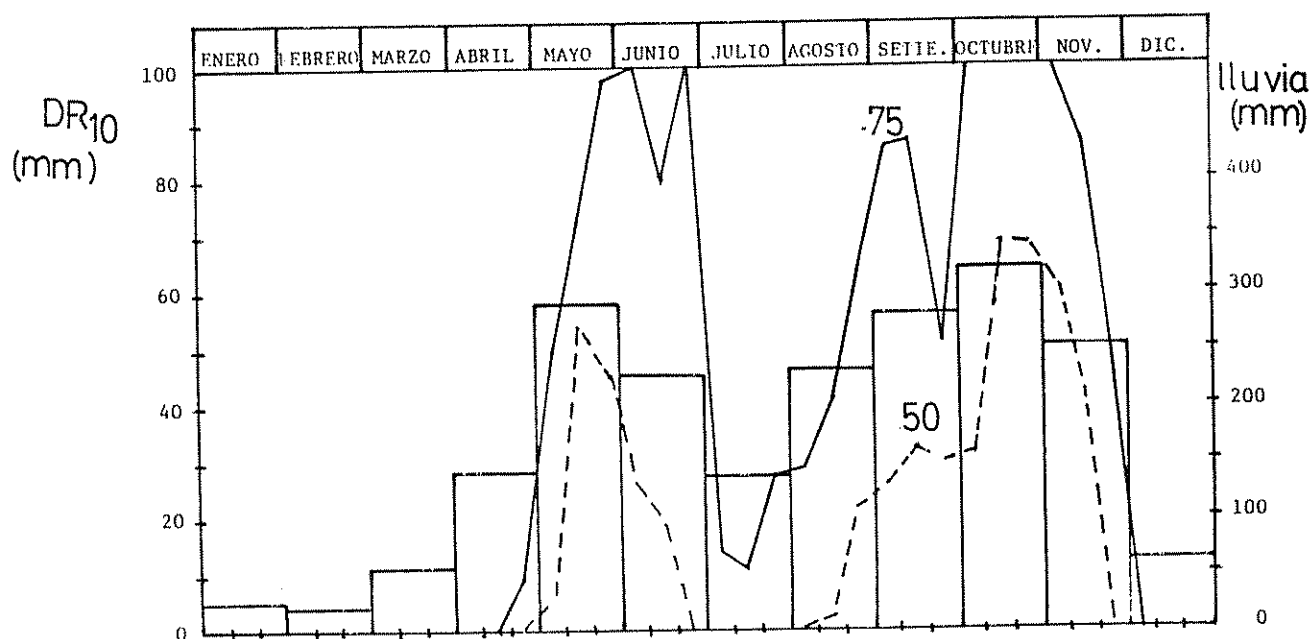


Fig 1 Estación de Pueblo Bello, Colombia. Evolución a lo largo del año de los valores del déficit hídrico acumulado sobre 10 días ( $DR_{10} = EIM - ETR$ ) que son sobrepasados 1 año cada 4 y 1 año cada 2. Se indica también la precipitación media mensual en forma de histograma.

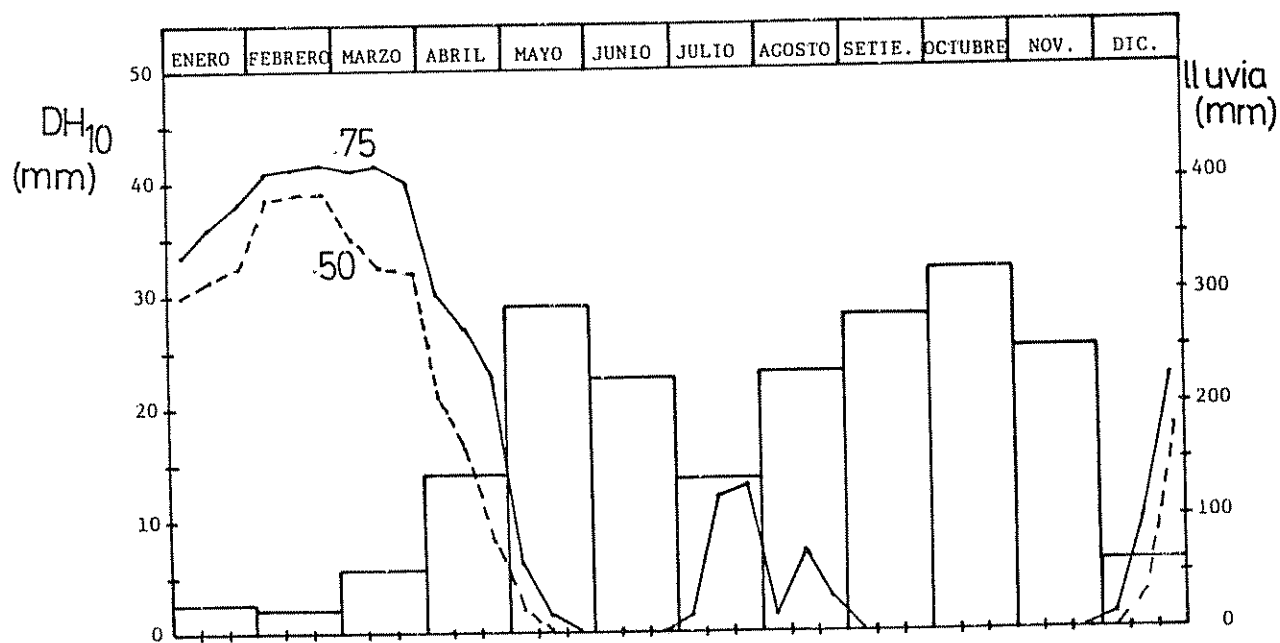


Fig 2. Estación de Pueblo Bello, Colombia. Evolución a lo largo del año de los valores del drenaje acumulado sobre 10 días que son sobrepasados 1 año cada 4 y 1 año cada 2. Precipitación media mensual en forma de histograma.

El modelo proporciona solamente un instrumento de análisis agroclimático que es más preciso y mejor adaptado a la realidad agronómica que el balance potencial (lluvia-ETP). Los datos climáticos necesarios

son los mismos (precipitaciones diarias y valores promedios de la ETP). Además intervienen dos parámetros que definen la reserva útil y la reserva fácilmente utilizable del suelo.

## Resumen

Se presenta un modelo agroclimático que simula la evolución del balance hídrico del suelo bajo un cultivo perenne. El modelo es recurrente y funciona con un paso de tiempo de un día. Los datos climáticos que sirven de entrada al modelo son los datos diarios de la lluvia y los valores de la evapotranspiración potencial. Además intervienen los valores de la reserva útil (RU) y de la reserva fácilmente utilizable (RFU). Este modelo programado permite determinar la reserva hídrica del suelo (RH), el drenaje (DR) y el déficit hídrico (DH) en una base diaria, apareciendo cada uno de estos tres parámetros en forma de una matriz que tiene las mismas dimensiones que la de la lluvia. El modelo puede ser utilizado para caracterizar estadísticamente los riesgos de sequía o de exceso de agua y la duración de un período seco, tal como el veranillo.

## Literatura citada

1. FRANQUIN, P. et FOREST, F. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agronomie Tropicale*, 32(1):7-11. 1977.
2. JARAMILLO, A. Balance hídrico de la zona cafetera colombiana. *CENICAFE* 33(1):15-34. 1982

## Anexo

## Subrutina SBH

```
SUBROUTINE SBH (PJ, EPM, IJ, RUX, C, QJ, IN)
  PN = 3
  CRHO = 5
  DIMENSION PJ (30, 366), QJ (30, 366), RU
  (366)
  DIMENSION EPM (12), EPJ (366), EMJ (366)
  INTEGER*2 PJ, QJ
```

```
CALL AAA (EPM, EPJ)
DO 5 J = 1, 365
  RU (J) = RUX
5 EMJ (J) = EPJ (J)
  RH = RU (J)*CRHO
DO 10 I = 1, IJ
  DO 10 J = 1, 365
    PR = PJ (I, J)* I
    ETM = EMJ (J)
    RDU = RU (J)* (1.-C)
    CR = RU (J) - RH
    PE = PR
    DR = 0
    IF (PR .LT. PN) PE = 0.
    IF (PR .GT. CR) DR = PR-CR
    IF (RH .GE. RDU) ETR = ETM
    IF (RH .LT. RDU) ETR = ETM*RH/RDU
    RH = RH +PE-ETR-DR
    DH = ETM-ETR
    IF (IN .EQ. 1) QJ (I,J) = INT (RH/.1)
    IF (IN .EQ. 2) QJ (I,J) = INT (DH/.1)
    IF (IN .EQ. 3) QJ (I,J) = INT (DR/.1)
10 CONTINUE
RETURN
END
```

```
SUBROUTINE AAA (EPM, EPJ)
  DIMENSION EPM (12), EPJ (366), LX(12), LY
  (12)
  DATA LX/31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31,
  30, 31/
  DATA LY/0, 31, 59, 90, 120, 151, 181, 212,
  243, 273, 304, 334/
  DO 10 K=1, 12
    L1=LX(K)
    L2=LY(K)
    DO 10 L = 1, L1
      LL=L2+L
10 EPJ(LL) = EPM(K)
RETURN
END
```

## Reseña de libros

VIZIER, J. F. Etude de phénomènes d'hydromorphie dans les sols des régions tropicales a saisons contrastées. Dynamique du fer et différenciation du profile. Travaux et Documents de l'ORSTOM No. 165. ORSTOM, Paris, 1983. 294 p.

El trabajo de Vizier versa sobre catenas en regiones del Trópico Africano con estación seca contrastante, con énfasis en la dinámica del hierro y la diferenciación de perfiles de suelos. El estudio de catenas es tan antiguo como la cartografía de suelos; sin embargo, no es sino en textos recientes en los que se enfatiza en el uso de este concepto, a veces para explicar la presencia de ciertos suelos en diferentes latitudes (Bridges Turrialba 29(4):322 1979), otras para explicar la influencia del clima en la formación de los suelos (Gerrard Turrialba 33(2):142 1983).

Quizá para ubicar a los pedólogos en el contexto del estudio, sea conveniente nombrar los principales suelos de las dos secuencias estudiadas. En el caso de Chad, la secuencia se divide en sus partes alta, media y baja; en la parte alta dominan suelos hidromórficos de profundidad, en la media solonetz solodizados y gley y en la parte baja, hidromórficos y vertisoles. En Madagascar la secuencia se divide en un plateau con suelos ferralíticos profundos, el flanco de la pendiente con suelos ferralíticos poco desarrollados, el pie de monte con suelos coluviales y la zona baja con suelos hidromórficos orgánicos o de pradera flotante.

La obra está dividida en cuatro partes que incluyen diez capítulos. El inicio incluye dos capítulos, en los que se discute la importancia del hidromorfismo co-

mo factor formador de suelos y su empleo en diferentes sistemas de clasificación de suelos (p. ej. hidromórficos, Aquepts, etc.).

La segunda parte incluye los capítulos III a V en los que se describe el medio ambiente y edáfico en que se realizó el estudio en Chad y Madagascar. Siempre se insiste en el hidromorfismo como factor dominante en ambos casos.

En los siguientes tres capítulos se describe la variación del contenido y las formas del hierro en las secuencias. En primer término se discute la metodología empleada, en seguida se presenta la información de los estudios *in situ*, y se termina con resultados experimentales sobre migración de hierro.

La cuarta sección se dedica a interpretaciones generales con una explicación fisicoquímica del fenómeno estudiado y un resumen de las consecuencias de los procesos que intervienen en la dinámica del hierro y su efecto sobre la diferenciación de los suelos que sufren un exceso de humedad. Se incluyen conclusiones generales y 197 referencias sobre el tema.

El aporte de Vizier es importante en tanto que se trata de un estudio de campo, con comprobaciones de laboratorio, tan escasos en la literatura moderna. En este caso cabe mencionar que la calidad del estudio es proporcional al tiempo que se invirtió en él, y a fe que con creces. Las secuencias estudiadas en Africa son comunes en el Trópico Americano de régimen ústico, en donde no conozco ningún estudio similar al presente. El documento puede adquirirse en el SERVICE DES PUBLICATIONS D L'ORSTOM, 70-74 route d'Aubray, 93140 Bondy, France.

ALFREDO ALVARADO  
FACULTAD DE AGRONOMIA  
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA