

UN MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA HUMEDAD DEL SUELO BAJO DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES EN LA REGIÓN CAFETERA DE COLOMBIA

Germán Poveda¹, Jorge Mario Ramírez¹ y Alvaro Jaramillo²

¹ *Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia*

² *Centro Nacional de Investigaciones del Café, Cenicafé, Chinchiná, Colombia*
gpoveda@perseus.unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 4 Septiembre de 2002 / Aceptación: 13 de Noviembre de 2002 / Recibida versión final: 26 de Noviembre de 2002

RESUMEN

Se estudia la dinámica temporal de la humedad de suelo y su Función de Distribución de Probabilidades (FDP), mediante un modelo estocástico basado en el balance de agua en un punto. Se derivan las características cualitativas y cuantitativas de la humedad del suelo en la zona cafetera de Colombia y su variabilidad durante los ciclos anual e interanual de precipitación; y se estudian las diferencias de estas respuestas para cobertura de bosque, café al sol y café a la sombra. Se estudia el efecto de amplificación del fenómeno ENSO (El Niño 1997-98 y La Niña 1998-2000) en términos de la variabilidad de la FDP de la humedad del suelo. Se muestra la aparición de estados preferenciales de la humedad del suelo producidos por las diferencias estacionales de la precipitación. Los resultados del modelo concuerdan cualitativamente con las observaciones.

PALABRAS CLAVE: Humedad de Suelo, ENSO, Precipitación, Cobertura Vegetal, Modelo Estocástico, Función de Densidad de Probabilidades, Colombia.

ABSTRACT

Soil moisture dynamics and Probability Density Functions (PDF) are studied using a stochastic model based upon the water balance equation at a point. Qualitative and quantitative features of soil moisture are estimated with data from the coffee-production region of Colombia, including its variability during the annual and interannual cycles of precipitation, and their differences are studied for three land-cover types, namely forest, shade coffee, and sun-lit coffee. The effects of both phases of El Niño/Southern Oscillation (ENSO) are studied, for the case of El Niño 1997-98, and La Niña 1998-2000, in terms of changes of the soil moisture PDF. We show the appearance of preferential states in soil moisture dynamics associated with seasonal variations in precipitation. Our modeling results adequately represents the recorded observations.

KEY WORDS: Soil Moisture, ENSO, Precipitation, Vegetation Cover, Stochastic Model, Probability Density Function, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es un componente clave en el acoplamiento entre la tierra y la atmósfera y de gran importancia en la transferencia entre la biosfera y la atmósfera, así como en procesos biogeoquímicos y ecológicos, y en los balances hídrico y energético terrestre y atmosférico. Esta variable afecta y encadena la mayoría de los procesos fundamentales del ciclo hidrológico en todas las escalas espacio-temporales [Delworth y Manabe, 1993; D'odorico et al., 2000], y en el reciclado de la precipitación [Rodríguez-Iturbe et al., 1999a; Hong y Kalnay, 2000; Ducharme y Laval, 2000]. Los cambios de la humedad suelo reflejan en mucho el comportamiento de la precipitación. En Colombia, el ciclo anual de distribución de la precipitación es principalmente regido por la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y otros mecanismos de gran escala y de la interacción suelo-atmósfera. A escala interanual, el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es el principal modulador de la hidrología Colombiana. Durante la ocurrencia del evento El Niño, en Colombia se presentan anomalías negativas en la precipitación, en la humedad de suelo, en la actividad vegetal y en los caudales de los ríos [Poveda y Mesa, 1997; 2000; Poveda et al., 1998; 2001]. Este trabajo estudia el comportamiento de la distribución de probabilidades de la humedad del suelo bajo condiciones estacionales fijas, así como los estados preferenciales de la media de la humedad del suelo. Se usa un modelo estocástico basado en el balance de agua en un punto del suelo [Rodríguez-Iturbe et al., 1999a]. Se estudian los resultados para regiones y temporadas específicas en Colombia y se contrastan con datos históricos de humedad de suelo bajo diferente cobertura vegetal en la región cafetera de Colombia. Se describe el modelo y se presentan resultados para la distribución probabilística de la humedad del suelo en varios tipos de condiciones estacionales. Además se estudia la dinámica interanual de esta distribución a partir del comportamiento estadístico de la media de la función de distribución de probabilidades de la humedad del suelo.

2. METODOLOGÍA Y DATOS USADOS

2.1. Modelo estocástico

Usaremos el modelo propuesto por Rodríguez-Iturbe et al. [1999a], para modelar la dinámica de la humedad del suelo, en términos del balance de agua en un punto, a

nivel diario, y suponiendo que no hay aportes laterales de humedad en el suelo. La ecuación de balance de agua, para un volumen de control dado por una columna de suelo, se expresa como

$$nz \frac{ds}{dt} = I(s,t) - E(s,t) - L(s,t) \quad (2.1)$$

donde n es la porosidad del suelo; z es la profundidad del perfil; s es la humedad relativa del suelo; $I(s,t)$ es la tasa de la precipitación que se infiltra; $E(s,t)$ es la tasa de evapotranspiración; y $L(s,t)$ es la tasa de goteo o infiltración profunda. La humedad relativa s se calcula como el cociente entre la cantidad volumétrica de agua en la sección de suelo y la porosidad n .

(a) Precipitación

Se considera la infiltración como una componente estocástica que resulta de una combinación entre la precipitación que llega al suelo y el grado de saturación de éste. Para la precipitación, se asume que la distribución temporal ocurre según un proceso de Poisson de tasa I e intervalo mínimo de tiempo, que para este trabajo se supone de un día. Un evento de lluvia de profundidad r se modela como una variable aleatoria distribuida exponencialmente con media $1/a$. Ahora, la porción I de r que se infiltra al interior del volumen de control depende de la capacidad que tenga el suelo para almacenarla, esto es, $I(s,t)$ puede ser el más pequeño entre r y $(1-s)nz$. Ahora, debido a la interceptación de lluvia por parte de las plantas, no toda el agua que precipita entra en el balance. Este fenómeno se puede incluir en el modelo multiplicando la tasa de ocurrencia de precipitación I por la probabilidad de que la lluvia sea mayor que un umbral d por debajo del cual toda la precipitación es interceptada. Esto es, se utilizaría un modelo de Poisson donde la tasa de eventos de lluvia sería $I' = Ie^{-ad}$. Si se acepta el modelo de Poisson para la lluvia, se asume que todo evento de precipitación se concentra en un instante de tiempo.

(b) Evapotranspiración e infiltración profunda.

En condiciones de alta evaporación potencial, la variable limitante para la evapotranspiración es la humedad del suelo, lo cual es aceptable en regiones áridas o en temporadas secas prolongadas. A una escala temporal diaria, ésta dependencia puede ser modelada usando una

tasa de evapotranspiración $E(s)$ creciente linealmente con la humedad s hasta un punto s^* , por encima del cual $E(s)$ permanece constante e igual a E_{max} (ver Figura 2.1). Este valor máximo de la tasa de evapotranspiración depende, para unas condiciones climáticas fijas, del tipo de vegetación presente o ausente. Por otra parte, el umbral de humedad s^* depende principalmente de la vegetación y el tipo de suelo, y representa la humedad del suelo por debajo de la cual las plantas sufren de estrés por déficit de agua. La tasa de infiltración profunda o de goteo, $L(s)$, se modela como percolación vertical con un gradiente hidráulico unitario, esto es $L(s)=K(s)$, donde $K(s)$ es la conductividad hidráulica del suelo y coincide con la conductividad del suelo saturado K_s cuando s

tiende a 1.0. Una manera para modelar esta situación, expresa $K(s)$ de la forma, $K(s)=A \exp[-b/s]$ donde A y b son parámetros que dependen de la composición del suelo [Saxton et al.,1985]. Debido a que en todos los casos $b \gg 1$, la infiltración profunda, a veces denominada “pérdidas por goteo” sólo son importantes para grandes valores de la humedad del suelo, a partir de $s=s_1$. De esta manera, la expresión de $K(s)$ se puede aproximar mediante segmentos lineales entre los puntos $K(s_1)=0$ y $K(1.0)=K_s$ (Figura 1). Sumando las expresiones lineales para las tasas de evapotranspiración e infiltración profunda se obtiene la función de salidas del volumen de control, tal como se muestra en la Figura 2.1.

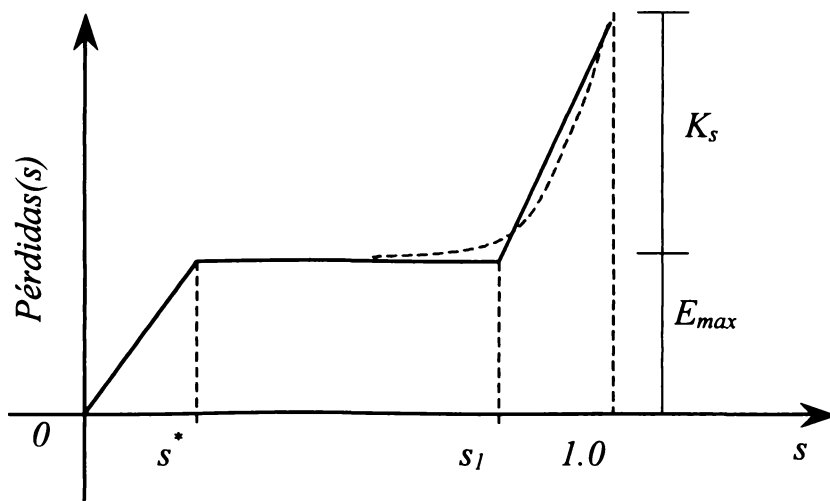


FIGURA 1.

Aproximación de la tasa de pérdidas de humedad del suelo por evapotranspiración y goteo. La línea punteada representa la expresión de Saxton para $K(s)$ con $s > s_1$.

Según este esquema, todas las variables del balance dependen de las condiciones estacionales de precipitación y de las propiedades físicas del suelo. Se pretende representar la distribución de s , determinando la probabilidad de que la humedad del suelo s tome un valor entre s y $s+ds$ en el tiempo $t+dt$, dado el estado de las variables del modelo en el tiempo t . Este planteamiento genera una ecuación diferencial parcial para la función de distribución de probabilidades $p(s,t)$ de s . Si se supone que las soluciones $p(s,t)$ de dicha ecuación tienden a un equilibrio $p(s)$ cuando $t \rightarrow \infty$, se llega a un sistema dinámico autónomo para $p(s)$; el cual se soluciona integrando sobre todos los valores de s . Debido a la forma de la función de salidas del volumen de control o pérdidas, la solución general de $p(s)$ resulta definida por tramos dependiendo de los tres regímenes posibles de evapotranspiración y goteo, de la forma [Rodríguez-Iturbe et al.,1999a] :

$$p(s) = \begin{cases} \frac{c}{\eta} \left(\frac{s}{s^*} \right)^{(\lambda s^*/\eta)-1} e^{-\gamma s}, & 0 < s \leq s^* \\ \frac{c}{\eta} \exp\left(-\frac{\lambda s^*}{\eta}\right) \exp\left[-s\left(\gamma - \frac{\lambda}{\eta}\right)\right], & s^* < s \leq s_1 \\ \frac{c}{\eta} \left[\frac{k(s-s_1)}{(1-s_1)\eta} + 1 \right]^{(\lambda(1-s_1)k)-1} \exp\left(-\gamma s + \lambda \frac{s_1 - s^*}{\eta}\right), & s_1 < s \leq 1.0 \end{cases}$$

en donde η , γ y k son parámetros normalizados usando el contenido de vacíos del suelo; $\eta = E_{max}/nz$, $\gamma = \alpha nz$ y $k = K_s/nz$. La constante c garantiza que se cumpla la condición de área unitaria bajo la curva de $p(s)$, y su expresión no se muestra aquí. Con la función de probabilidad de s , se puede calcular la expresión para \bar{s} , la media de los valores de la humedad del suelo para cada estación climática, como

$$s = \int_0^1 sp(s)ds = c \times \left\{ \left[\varphi_1 \exp\left(-\gamma s_1 + \frac{\lambda}{\eta} (s_1 - s^*) + \gamma s^*\right) - \varphi_2 e^{-\gamma s^*} \right] + \xi e^{\vartheta - \chi} \frac{1 - s_1}{k} \right. \\ \left. \left[(\gamma_1 - \gamma_2) \frac{\eta(1 - s_1) - ks_1}{k} \right] - \frac{1}{\gamma} (\gamma_4 - \gamma_5) + \frac{s^*}{\zeta \eta \gamma} \gamma_6 \right\} \quad (2.3)$$

donde los nuevos términos son:

$$\zeta = (\gamma s^*)^{\lambda s^* \eta}; \quad \vartheta = \frac{\gamma \eta (1 - s_1)}{k} + \frac{\lambda s_1}{\eta} + \gamma s^*; \quad \xi = \left[\frac{\gamma \eta (1 - s_1)}{k} \right]^{\lambda (s_1 - 1) k}$$

$$\chi = \gamma (s_1 + s^*) + \frac{\lambda s^*}{\eta}; \quad \varphi_1 = \frac{-\eta - s_1 (\gamma \eta - \lambda)}{(\gamma \eta - \lambda)^2}; \quad \varphi_2 = \frac{-\eta - s^* (\gamma \eta - \lambda)}{(\gamma \eta - \lambda)^2}$$

$$\gamma_1 = \Gamma^* [\lambda (1 - s_1) k, \gamma \eta (1 - s_1) k]; \quad \gamma_2 = \Gamma^* [\lambda (1 - s_1) k, \gamma (\eta + k) (1 - s_1) k];$$

$$\gamma_4 = \Gamma^* [1 + \lambda (1 - s_1) k, \gamma \eta (1 - s_1) k]$$

$$\gamma_5 = \Gamma^* [1 + \lambda (1 - s_1) k, \gamma (\eta + k) (1 - s_1) k]; \quad \gamma_6 = \Gamma^* [1 + \lambda s^* \eta, \gamma s^*]$$

Para las expresiones de arriba, $\Gamma^*[a, x] = \Gamma[a, x] - \Gamma[a]$ donde el primer término representa la función Gamma incompleta y el segundo, la función Gamma corriente.

2.2. Datos

Los registros de humedad del suelo fueron tomados en el Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), localizado en los Andes centrales de Colombia (05°00' Norte, 75°36' Oeste, 1425 msnm).

Los registros fueron tomados mediante probetas de medición de Reflectometría en el dominio del tiempo ("Time Domain Reflectivity o TDR). Las mediciones fueron realizadas bajo tres tipos de cobertura vegetal: arbustos de café rodeados de guamo (*Inga edulis mart*), bosque secundario de especies nativas, y arbustos de café a libre exposición solar. En adelante se referirán como café a la sombra, bosque y café al sol, respectivamente. Los tres sitio experimentales se encuentran localizados en un radio de separación de 200m entre uno y otro. La humedad volumétrica del suelo fue medida a 20cm y 40 cm de profundidad para el bosque y el café a la sombra (de aquí en adelante denominados HVS-20 y HVS-40), y a profundidades de 20 cm y 35 cm para el café al sol (HVS-35). Las tres parcelas están ubicadas en el mismo tipo de suelo perteneciente a un complejo de ceniza volcánica con alta estabilidad estructural, permeabilidad moderada, baja densidad y rico en materia orgánica, y

responde a la clasificación taxonómica de Dystrandep. La profundidad de la capa superficial es de 50 cm y tiene una porosidad total del 68%, permitiendo un almacenamiento de agua 182 mm por cada metro de profundidad. El nivel freático se encuentra muy profundo en cada uno de los tres sitios. La topografía exhibe pendientes entre moderadas y altas. La zona de estudio tiene las siguientes características anuales de clima: precipitación 2350 mm, evaporación real 1300 mm y temperatura media 20.0°C [Jaramillo y Chávez, 1999]. En la zona se ha medido una evaporación potencial diaria promedio de 3.5 mm. Las series de humedad del suelo están compuestas por promedios de diez días abarcando el período desde abril de 1997 hasta junio de 1999. En este lapso de tiempo, el Océano Pacífico tropical exhibió eventos intensos de El Niño y La Niña.

Para estimar los parámetros del modelo que involucran a la distribución de la precipitación, se usó una serie diaria de lluvia en la zona de estudio desde enero de 1990 hasta diciembre de 1999. Este intervalo contiene, tanto los períodos de los eventos El Niño y La Niña descritos arriba, como años de condiciones normales. Por otra parte, la cuantificación de la variabilidad interanual de la precipitación se efectuó usando una serie diaria de precipitación en la zona desde enero de 1942 hasta diciembre de 1999.

La interceptación se incluyó en el modelo usando

expresiones empíricas estimadas por *Jaramillo y Chávez* [1999], para la precipitación efectiva como función de la lluvia real, para cada uno de los tres tipos de cobertura vegetal. Como la precipitación se modela mediante un proceso de Poisson, es necesario calcular los estadísticos a y l de cada serie, para cada estación climática. El estadístico a es el inverso de la profundidad promedio de lluvia durante la temporada considerada, y l es la tasa a la cual se produce el fenómeno de lluvia, esto es, el cociente entre el número de días con precipitación y la longitud en días de la temporada lluviosa. La estimación de a y l se hizo calculando los promedios mensuales interanuales de precipitación entre enero de 1990 y diciembre de 1999. Con éstos promedios se determinaron las estaciones secas y húmedas anuales; y así se estimaron a y l para cada conjunto y se calcularon a y l para cada temporada seca y húmeda de cada año de la serie. Por último se estimaron a y l para el mismo intervalo en el cual se hicieron las mediciones de humedad del suelo (abril 1997 - diciembre 1999).

3. VARIABILIDAD ANUAL E INTERANUAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

El modelo se usará para condiciones climáticas promedio en régimen seco y lluvioso y se estimarán las anomalías producidas en el ciclo anual de la distribución de la humedad del suelo, por las dos fases del fenómeno ENSO. Finalmente se compararán los resultados del modelo con los histogramas de los registros históricos de campo. La variabilidad temporal de $p(s)$ se supone debida únicamente a las fluctuaciones interanuales de la precipitación. Para estimar esta variabilidad se calculó, mediante simulación Monte Carlo, la densidad de probabilidad de la media \bar{s} como resultado de evaluar muestras aleatorias provenientes de las distribuciones de l/a y l en la expresión (2.3). Las distribuciones de l/a y l se estimaron usando del registro histórico entre enero de 1942 y diciembre de 1999. En cada día de esta serie se calculó la precipitación efectiva como el promedio entre las expresiones para las tres coberturas vegetales. Luego se calcularon a y l para cada una de las temporadas secas y húmedas de cada año; esto resulta en cuatro series de 57 datos cada una, a las cuales se ajustaron distribuciones Gamma. Estos mismos ajustes se hicieron para todos los meses de la serie pero sin discriminación por estaciones.

(a) Estimación de Parámetros

El modelo supone que las propiedades del suelo y la vegetación no varían en el tiempo. Ahora, a partir de los datos de los suelos en Cenicafe se estimaron los parámetros s_p , s^* , n , K_s , z y E_{max} , y se supuso que éstos eran constantes para cualquiera de las temporadas y coberturas vegetales consideradas.

A partir de mediciones en campo se obtuvo $z=0.5$ m y $n=0.68$. La evapotranspiración máxima diaria se aproximó a la evaporación potencial media diaria, así, $E_{max}=3.5$ mm día⁻¹. Para estimar los valores de s_l y K_s se usó una aproximación por segmentos lineales a la expresión desarrollada por *Saxton et al.*, [1984],

$$K(s)=9.81 \times 10^{-3} \times \exp\{12.02 - 0.075S + (ns^{-1})[-3.89 + 0.0367S - 0.11C + 8.75 \times 10^{-4}C^2]\} \quad (3.1)$$

donde $K(s)$ es la conductividad hidráulica del suelo no saturado en mm día⁻¹, S y C son los porcentajes de arena y arcilla que componen el suelo y n es la porosidad. Para los suelos de Chinchiná se tiene que $C=17\%$ y $S=51\%$, y $K(s)$ aproximada con tramos lineales con $s_l=0.7$ y $K_s=4000$ mm día⁻¹. Para suelos francos se ha encontrado que para valores de s mayores que 0.17 , la evapotranspiración permanece constante [*Norero*, 1976], y por ello se asume $s^*=0.17$.

Como ya se indicó, los parámetros a y l se estimaron considerando tres temporadas climáticas distintas: (i) la unión de las estaciones secas y húmedas del intervalo entre E-90 y D-99; (ii) cada una de las estaciones secas y húmedas de cada año de la misma serie; y (iii) el período entre abril de 1997 y diciembre de 1999. A escala anual, las estaciones secas y húmedas en la región de Chinchiná están determinadas por la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Usando los promedios mensuales interanuales de precipitación, se identificaron los meses de diciembre a febrero, y de junio a agosto como estaciones secas; y los meses de marzo a mayo, y de septiembre a noviembre como las estaciones húmedas. Cada periodo consta de 183 días. Los resultados de los cálculos de a y l para la unión de las temporadas húmedas (H) y la secas (S) entre E-90 y D-99, bajo tres coberturas vegetales, se presentan en la Tabla 1.

Cobertura	Bosque		Café a la sombra		Café al sol	
Estación	H	S	H	S	H	S
λ [eventos día ⁻¹]	0.405	0.321	0.295	0.230	0.374	0.296
$1/\alpha$ [mm]	10.895	10.292	12.193	11.434	11.592	10.873

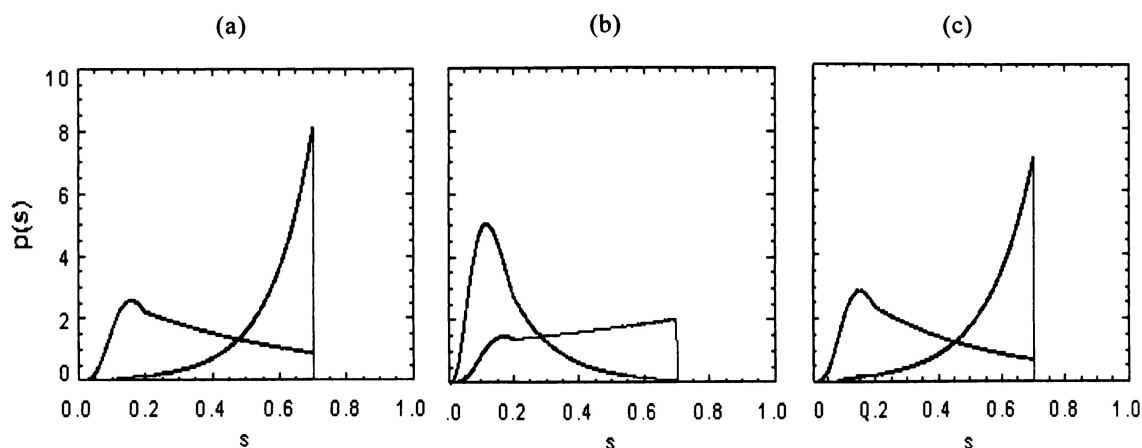
TABLA 1.

Parámetros $1/\alpha$ y λ para la unión de las temporadas húmedas (H) y la secas (S) entre E-90 y D-99, bajo tres coberturas vegetales.

(b) Resultados y análisis

En la figura 2 se muestran las distribuciones de probabilidad de la humedad del suelo, bajo condiciones húmedas y secas para los tres tipos de cobertura vegetal estudiados. Se observa que en todos los casos la probabilidad de que s se encuentre por encima del valor s_i es nula, esto es debido a que los suelos con cenizas volcánicas tienen una gran conductividad hidráulica, de tal manera que no permiten almacenamientos una vez se inicie el goteo. Las diferencias entre las distribuciones de ambas estaciones climáticas se notan en los tres tipos

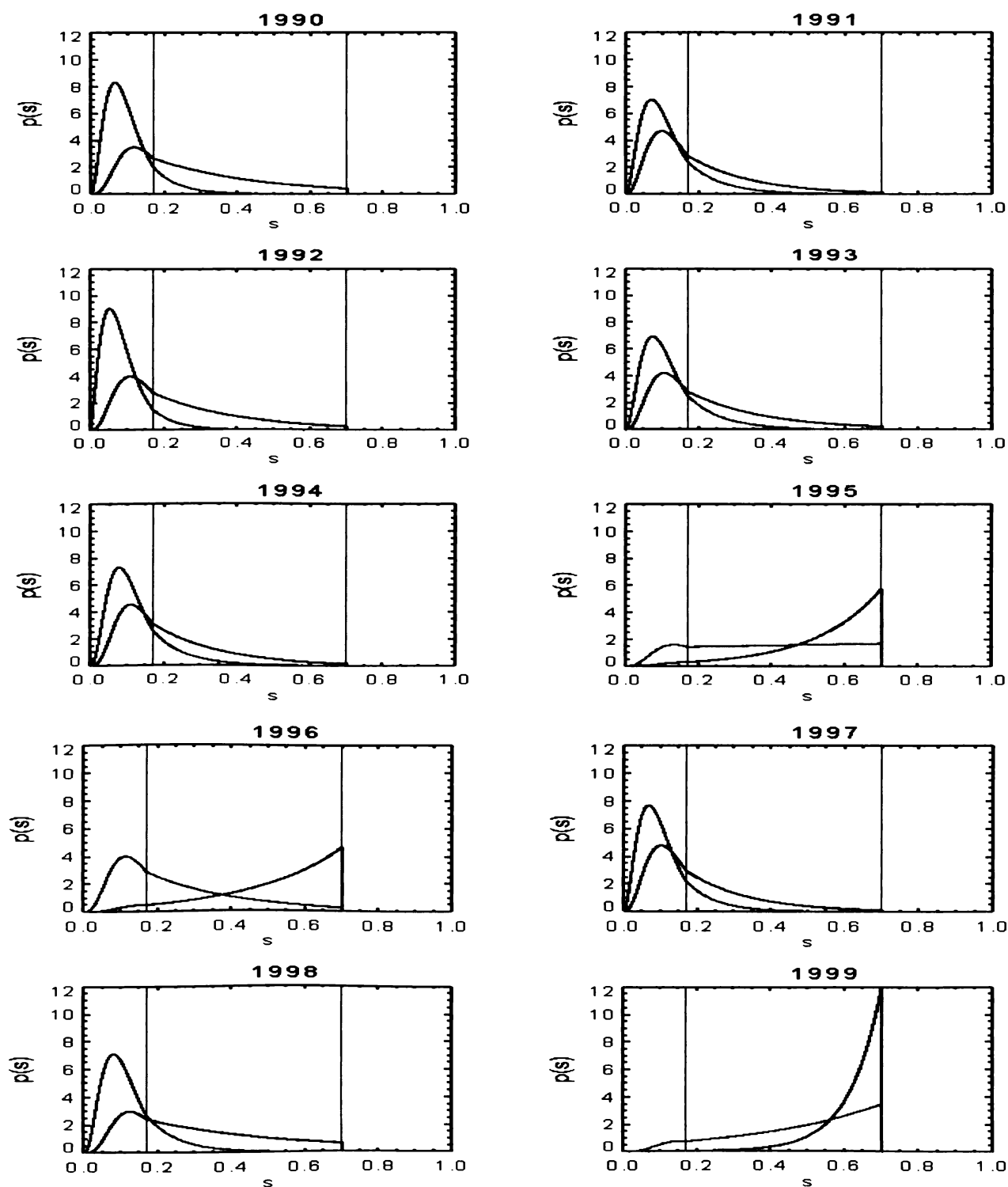
de cobertura, estas diferencias responden a un ciclo anual de precipitación muy marcado, el cual genera grandes diferencias en los valores de los estadísticos λ y $1/\alpha$ mostrados en la Tabla 1. Por último se da buena cuenta de las diferencias que de los resultados del modelo de la distribución de s bajo distintas coberturas, ante el cambio de estación. Se observa que debido a que la precipitación efectiva sobre el café a la sombra es menor que para el bosque y el café al sol, la probabilidad de que el suelo se sature durante la estación húmeda, no es alta para la primera, mientras que en los otros tipos de cobertura es inminente.

**FIGURA 2.**

Distribución de probabilidades de la humedad del suelo en estación seca (rojo) y húmeda (azul), bajo: (a) bosque, (b) café con sombra y (c) café al sol. Los parámetros de precipitación usados coinciden con los de la tabla (3.1).

Cuando se usa el modelo considerando el ciclo interanual de la precipitación en la década desde enero de 1990 hasta diciembre de 1999, para la cobertura de bosque se obtienen resultados muy similares mostrados en la Figura 3. En el lapso de tiempo considerado se presentaron los eventos El Niño 91-92, 93-94 y 97-98; y eventos La Niña en 1998 y 1999, siendo éste último de especial intensidad en la zona de Chinchiná. Se observa que durante las temporadas húmedas de los años de El Niño, la probabilidad de que el suelo presente saturación es mucho más baja que en las temporadas húmedas de los años normales, esto no permite que el suelo se recupere de condiciones críticas de sequía a la que es sometido durante las estaciones secas. Por otra

parte los años que presentaron eventos de La Niña generaron condiciones tales que, inclusive en temporada seca, fue muy probable el saturamiento del suelo. La diferencia de las respuestas del suelo en café a la sombra y las otras dos coberturas, radican en que la primera presenta unas condiciones normales con distribución más uniforme que las segundas. Los cambios más drásticos se presentaron en coberturas de café al sol y bosque; tanto en condiciones secas como en húmedas. Según los resultados del modelo, el fenómeno ENSO amplifica el comportamiento del ciclo anual de la humedad [Poveda *et al.*, 1998; 2001]. Según el modelo, los eventos de La Niña generaron cambios más notables que El Niño en la distribución de la humedad del suelo.


FIGURA 3.

Ciclo anual de $p(s)$ bajo Café al sol para la década E-90 a D-99. Las líneas rojas representan $p(s)$ en estación seca y las azules en estación húmeda. Las rectas verdes marcan los valores de s^* y s_j . Nótese los cambios durante los eventos El Niño 91-92, 93-94 y 97-98; y La Niña 99.

Considerando una temporada de condiciones climáticas homogéneas desde abril de 1997 hasta agosto de 1999, y calculando la distribución de la humedad del suelo, se encuentra que en condiciones promedios, el modelo predice que son más probables los estados de humedad baja en la cobertura de café al sol que en las otras dos. Esto ocurre porque la interceptación es mucho mayor para la primera, o por los procesos de evapotranspiración más acelerados desde las capas más altas del suelo, por los mecanismos de control de la humedad del suelo por las raíces, o por la dinámica de infiltración profunda, ya se están considerando regímenes de evapotranspiración iguales en los tres casos. Estos resultados se pueden comparar con las mediciones de humedad del suelo que se realizaron en Chinchiná durante el mismo período. Con esto en mente se hallaron los histogramas de los promedios mensuales de las mediciones para cada una de las coberturas vegetales. Los resultados se muestran en la Figura 4. Aunque se presentan tipos de gráficas diferentes, se puede observar que los resultados del modelo describen de manera aceptable la dinámica cualitativa de la humedad del suelo. Además, de las mediciones se observa que aunque el drenaje hacia el acuífero es muy rápido, el valor de la humedad al cual se presenta éste está por debajo del s_c estimado para el

modelo. Por otra parte, las diferencias cualitativas entre la distribución de s del modelo y el histograma medido para el café al sol, indican que el modelo no exhibe un buen desempeño para condiciones en las cuales la precipitación genera respuestas moderadas en la humedad del suelo; o que simplemente, para vegetación a la sombra la interacción entre las variables hidrológicas y el suelo es evidentemente mucho más compleja.

Con respecto a la respuesta global de la distribución de la humedad del suelo ante la variabilidad interanual de la precipitación, se encontraron los resultados que se presentan en la Figura 5. Allí se muestran las distribuciones encontradas para la media año cuando se consideran por separado condiciones de estación seca, húmeda y su superposición; utilizando ajustes a funciones Gamma (no se muestran). Tales resultados también confirman que, debido a las diferencias tan amplias entre las condiciones de humedad y sequía, la humedad del suelo presenta estados preferenciales diferentes bajo cada uno de los regímenes. De esta manera, cuando se integran los resultados del modelo sin discriminar por estaciones, se obtiene una distribución bimodal de la humedad del suelo (ver D'odorico *et al.* [2000]).

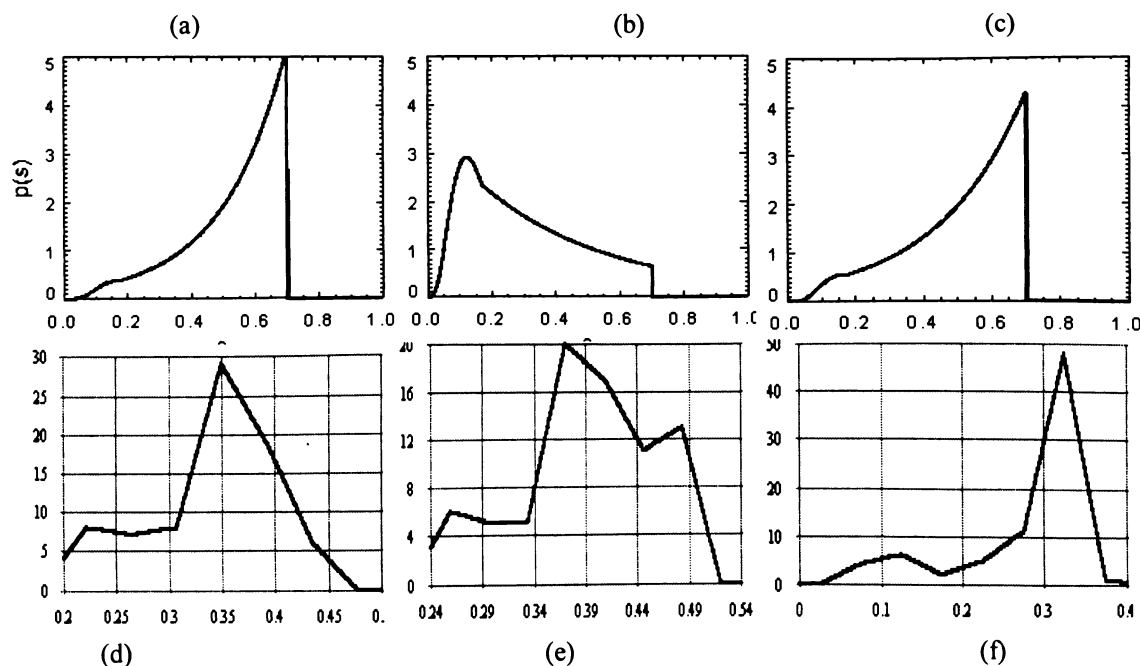
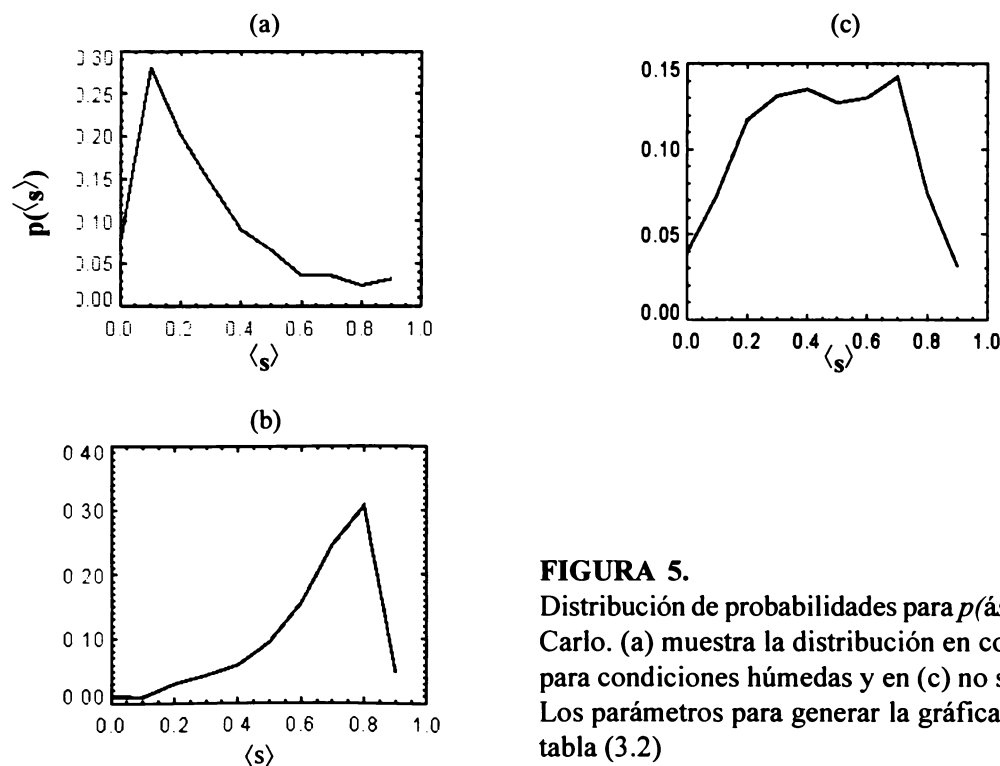


FIGURA 4.

Comparación de los resultados del modelo con las mediciones de campo. (a), (b) y (c) son las distribuciones de probabilidad de s en coberturas de bosque, café al sol y café a la sombra respectivamente. Las curvas de las figuras (d), (e) y (f) son los histogramas generados con los datos de campo.


FIGURA 5.

Distribución de probabilidades para $p(\text{ásñ})$ utilizando simulación Monte Carlo. (a) muestra la distribución en condiciones de estación seca, (b) para condiciones húmedas y en (c) no se discriminaron las estaciones. Los parámetros para generar la gráficas son los que se muestran en la tabla (3.2)

4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Se utiliza un modelo estocástico para representar la variabilidad de la humedad del suelo en un punto bajo condiciones estacionales fijas, en la zona cafetera de Colombia, para diferentes tipos de cobertura vegetal y considerando condiciones climáticas anual e interanual. En tal región, caracterizada por un definido ciclo anual de precipitación y humedad del suelo, se encontró que ésta presenta dos estados muy probables correspondientes a las estaciones seca y húmeda. Estos estados están, respectivamente, muy cerca del punto de marchitez de las plantas y del umbral de goteo. La presencia de estos estados preferenciales se corroboró al mostrar la bimodalidad de la distribución de la media de la humedad del suelo como resultado de la variabilidad de los parámetros de la precipitación del modelo. Esta bimodalidad se ha sido observada en datos de campo y reportada en *D'odorico et al.*[2000] y *Poveda et al.*[2001]. La condición de una distribución bimodal de los promedios estacionales de la humedad del suelo, hace que la medición de esta variable no tenga sentido si se hace evaluando promedios a escala temporal mayor que la de la fluctuación entre modas.

Se mostró que bajo una cobertura vegetal de café a la sombra, los cambios en la humedad del suelo debidos a la variabilidad de las condiciones climáticas, son menos drásticos que en las coberturas de café al sol y bosque. Esto trae consecuencias importantes con respecto a las condiciones de disponibilidad de agua que propician la existencia del bioma circundante, y los flujos superficiales y hacia la atmósfera. Sin embargo, los resultados encontrados deberán ser revisados teniendo en cuenta la necesidad de definir muy bien los procesos de interceptación de la lluvia y evapotranspiración propios de cada tipo de cobertura vegetal.

Durante el periodo entre 1990 y 1999 se encontró que la variabilidad interanual de la precipitación en la zona cafetera de Colombia, la cual estuvo determinada por la presencia de eventos El Niño y La Niña, es un amplificador de los efectos que el ciclo anual impone en la distribución de la humedad del suelo. Además se determinó que los eventos La Niña producen estados de saturación en el suelo más drásticos que las sequías producidas por el Niño. Por otro lado, para los suelos de Chinchiná con un alto contenido de cenizas volcánicas, la alta conductividad hidráulica no permite que la

humedad en el suelo alcance valores por encima del umbral de goteo. Si se empalman estas dos últimas afirmaciones se llega a la conclusión de que, para esta zona en particular, los eventos La Niña pueden tener consecuencias muy determinantes en las condiciones extremas del nivel de los acuíferos y la escorrentía.

En general, se mostró que para la zona cafetera de Colombia, el modelo puede ser una herramienta útil de análisis cualitativo de las variaciones y estados preferenciales de la humedad del suelo. Para que se pueda utilizar el modelo de manera más fiable, se requieren hacer ajustes en la estimación de parámetros, de manera que estos describan mejor las condiciones de la interacción suelo-planta-atmósfera propias de cada sitio y cobertura vegetal. Además, la dirección para desarrollos futuros en el modelamiento de la humedad del suelo, debe estar orientada a determinar la dinámica espacial del fenómeno, la cual es producto principalmente de la competencia entre plantas por el agua almacenada en el suelo [Rodríguez-Iturbe *et al.*, 1999a]. Este tipo de modelación deberá mejorar la estimación de los parámetros del balance en términos de abarcar más en detalle los procesos que se llevan a cabo dentro de las interacciones suelo-planta-atmósfera, particularmente en ecosistemas no áridos como el caso de los Andes Colombianos. Más concretamente, la modelación deberá incluir las variaciones que sufren los parámetros usados en la determinación de las tasas de evapotranspiración e infiltración, debido a los cambios en el régimen climático y al tipo de cobertura vegetal en el punto que se esté considerando. De esta manera se obtendrán mejores aproximaciones usando modelos que incluyan, por ejemplo, la regulación interna de la evapotranspiración en las plantas en situaciones de estrés; la presencia de hojarasca como función del régimen climático y componente importante en la interceptación; y los flujos fuera del suelo a través de las raíces.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Clapp, R. B., y G. M. Hornberger, 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 14(4), 601-604.
- Cosby, B. J., G. M. Hornberger, R. B. Clapp, y T. R. Ginn, 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources Research*, 20(6), 682-690.
- Delworth., T. y S. Manabe, 1993. Climate variability and land-surface processes. *Advances in Water Resources*, 16, 3-20.
- D'odorico, P., A. Porporato, L. Rindolfi, e I. Rodríguez-Iturbe, 2000. Preferential states of seasonal soil moisture: The impact of climate fluctuations, *Water Resources Research*, 36(8), 2209-2219.
- Ducharne, A., y K. Laval, 2000. Influence of the realistic description of soil water-holding capacity on the global cycle in a GCM. *Journal of Climate*, 13, 4393-4413.
- Hong, S.-Y., y E. Kalnay, 2000. Role of sea surface temperature and soil moisture feedback in the 1998 Oklahoma-Texas drought, *Nature*, 408, 842-844.
- Jaramillo, A., y B. Chávez, 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra, *Cenicafé*, 50(2), 97-105.
- Noreno A. S., Evaporación y Transpiración, CIDIAT, Mérida, Venezuela. 1976.
- Poveda, G., y O. J. Mesa, 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*. Vol. 27, No. 11, 1675-1678.
- Poveda, G., A. Jaramillo, M. M. Gil, N. Quiceno y R. Mantilla, 2001. Seasonality in ENSO related Precipitation, River Discharges, Soil Moisture, and Vegetation Index (NDVI) in Colombia. *Water Resources Research*, , Vol. 37, No. 8, 2169-2178.
- Poveda, G., M. M. Gil, y N. Quiceno, 1998, El ciclo anual de la hidrología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO, *Bulletin Institute Francaise d'Etudes Andines*, 27 (3), 721-731.
- Rodríguez-Iturbe, I., A. Porporato, L. Rindolfi, V. Isham, y D. R. Cox, 1999a, Probabilistic modelling of water balance at a point: The role of climate, soil and vegetation, *Proceedings Royal Society of London, Series A*, 4155, 3789-3805.
- Rodríguez-Iturbe, I., P. D'odorico, A. Porporato, y L. Rindolfi, 1999b, On the spatial and temporal links between vegetation, climate, and soil moisture, *Water Resources Research*, 35(12), 3789-3805.
- Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, y R. I. Papendick, 2000, Estimating generalized soil-water characteristics from texture. www.bsyse.wsu.edu/~saxton/grphtext.