

# BALANCE HÍDRICO BAJO TRES COBERTURAS VEGETALES CONTRASTANTES EN LA CUENCA DEL RÍO SAN CRISTÓBAL, BOGOTÁ

por

Gonzalo De las Salas<sup>1</sup> & Carlos García Olmos<sup>1</sup>

## Resumen

**De las Salas, G. & C. García Olmos:** Balance hídrico bajo tres coberturas vegetales contrastantes en la Cuenca del río San Cristóbal, Bogotá. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **24**(91): 205-218, 2000. ISSN: 0370-3908.

Se estimó el balance hídrico bajo tres coberturas vegetales en la Cuenca hidrográfica del río San Cristóbal. Se registró la precipitación en períodos semanales durante un año bajo cada cobertura vegetal, junto con mediciones de la variación del caudal en tres microcuencas adyacentes. Se evaluaron los parámetros siguientes: evapotranspiración, precipitación interna, interceptación, infiltración y almacenamiento de agua, los cuales se discuten críticamente.

**Palabras clave:** Balance hídrico, cuencas hidrográficas, ciprés, eucalipto, bosque nativo, uso del suelo.

## Abstract

A hydrological balance under three forest covers in the San Cristobal River watershed was done. Records of precipitation during one year under each canopy were registered along with measurements on the river stream of three microwatersheds adjacent to the forest canopies. The following parameters were evaluated: evapotranspiration, troughfall, interception, infiltration and water storage, which are discussed critically.

**Key words:** Water balance, watersheds, cypress, eucalyptus, native forest, land use.

## 1. Antecedentes

La cuenca hidrográfica del río San Cristóbal es una zona de reserva desde su adquisición por la Empresa de

Acueducto y Alcantarillado de Bogotá en 1917. Desde esa fecha se han realizado estudios de caracterización biofísica (Venegas, 1958, Corredor, 1967, Villamizar, 1967), de fauna y flora (Hernández & Rodríguez 1992) y

<sup>1</sup> Profesores Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

reconocimientos geológicos (**van der Hammen & González, 1963**).

Existe un plan de aprovechamiento de las plantaciones de Ciprés y Eucalipto en esta cuenca (DELSA LTDA., 1986) el cual no se implementó debido al carácter netamente protector de la misma.

Un estudio sobre los caudales y su relación con la cobertura vegetal fue realizado por **Castillo & López (1983)**. Este estudio es preliminar y todavía muy general. Los autores concluyen que la vegetación natural ejerce un efecto positivo sobre la disponibilidad de agua de la cuenca y que el balance hídrico es favorable teniendo en cuenta que la precipitación es mayor que la evapotranspiración.

Estudios puntuales sobre la influencia de coberturas vegetales contrastantes en el balance hídrico y en las tasas de escorrentía de esta cuenca no se han realizado hasta el momento.

La presente investigación pretende evaluar dicho balance y establecer la magnitud del almacenamiento o déficit de agua bajo las coberturas vegetales seleccionadas.

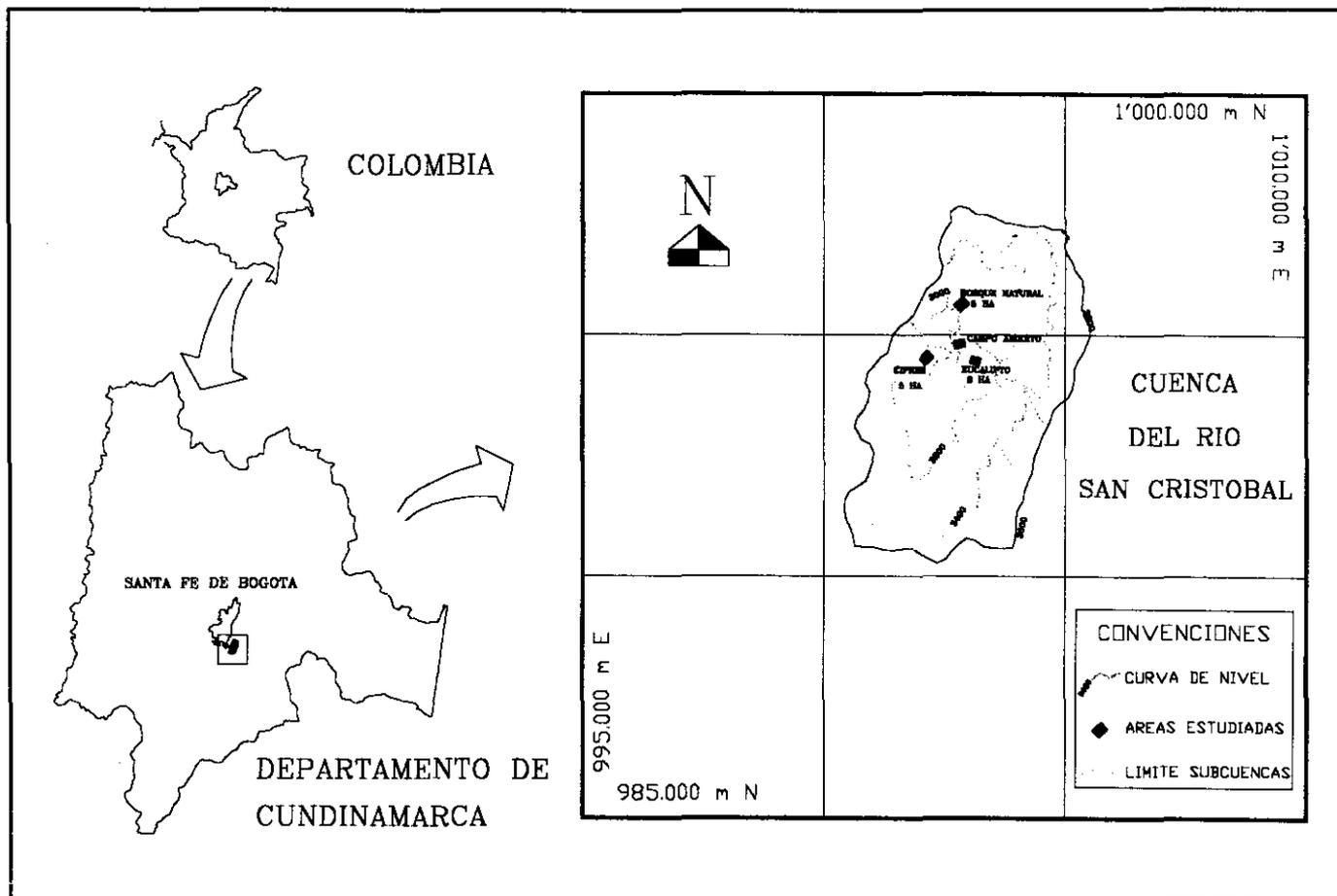
## 2. Objetivo general

Evaluar el comportamiento hídrico de tres sitios de la cuenca alta del río San Cristóbal cubiertos con tres tipos de vegetación (ciprés, eucalipto y bosque nativo).

## 3. Caracterización de la Cuenca

### 3.1. Localización Geográfica

La zona de estudio se halla situada en el departamento de Cundinamarca. Comprende la cuenca hidrográfica del río San Cristóbal en jurisdicción del municipio de Santa Fe de Bogotá. Su localización geográfica se obtuvo con base en el mapa del Plan de Ordenación de las Cuenas de los ríos San Francisco y San



Ubicación Geográfica de la Cuenca del río San Cristóbal

Cristóbal realizados por DELSA (1982), el cual se basa en las planchas N°: 247-1-A1 1.948, 247-1-A-3 1.965, 147-1-A-1 1.965, 147-1-A 1.978 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Las coordenadas geográficas correspondientes son:

X = 74°01'41" Longitud Oeste

Y = 04° 30' 42" Latitud Norte

### 3.2 Límites y superficie

Los límites naturales de la cuenca según el mapa del Plan de Ordenamiento de las cuencas de los ríos San Francisco y San Cristóbal (1982) son:

**Por el oriente:** Del alto de la Viga hasta el alto de Cruz Verde pasando por el boquerón de las Cruces. Alto de los Tunjos y alto del Buitre.

**Por el sur:** Del alto de Cruz Verde hasta el alto de la Teta, pasando por los altos de la Horqueta y de las Mirlas.

**Por el occidente:** Del alto de la Teta hasta el alto de Diego Largo pasando por el boquerón de Chingaza, serranía de Zuque, Contrafuerte de Sucre y Contrafuerte de Diego Largo.

La cuenca del río San Cristóbal limita políticamente así: por el norte: Hoya del río San Francisco y parte de la cuenca del río Barro Blanco perteneciente al municipio de Santafé de Bogotá. Por el oriente: veredas Sabanilla y Belén, del municipio de Ubaque. Por el sur: con el municipio de Usme. Por el occidente: Con el municipio de Usme y el municipio de Santa Fe de Bogotá.

### Vías de acceso

La cuenca hidrográfica del río San Cristóbal, cuenta con una vía carretable que, de Santa Fe de Bogotá, partiendo del barrio Aguas Blancas y a lo largo de la margen izquierda del río San Cristóbal, bordea la cordillera hasta llegar a la casa El Delirio; a partir de allí, se bifurcan dos caminos; uno que se dirige por el oriente hasta pasar por el alto de la Horqueta, cerca del alto de Cruz Verde y continúa bajando hasta llegar a Ubaque; tiene una bifurcación más arriba del sitio Buena Vista que va hacia el alto del Buitre para dirigirse a la vereda Sabanilla. El otro camino de herradura va hacia el norte; es el mismo de la Humea que se divide a la altura del punto medio entre el alto de San Diego y la Viga en un ramal que se dirige hacia este último punto, que a su vez se subdivide en dos caminos: uno que pasa por el boquerón de las Cruces y se dirige a Choachí y el otro que se interna en la hoya del río Barro Blanco.

### 3.3 Clima

Los parámetros de precipitación, temperatura y altitud, obtenidos con base en las estaciones meteorológicas de Vitelma, el Delirio, Palo Blanco y el Verjón de propiedad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, colocan la cuenca dentro de las siguientes formaciones vegetales del sistema de Zonas de Vida de Holdridge: Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB) de 3200-3400m, y Bosque Muy Húmedo Montano (bmh-M) de 3400 a 3600m.

Durante el año se presentan dos períodos secos y dos húmedos correspondientes a un régimen de lluvias orográficas. Los meses más secos son enero - febrero y julio - agosto. La precipitación promedio anual es de 1.336 mm. (Figura 1).

El movimiento de los vientos está determinado por dos grandes fenómenos atmosféricos: los vientos continentales del este y las brisas Valle - Montaña del Oeste; los primeros predominan en junio, julio, agosto y diciembre en los que soplan con velocidad moderada. En los otros meses la velocidad es más baja, de 1-2 m/seg., y predominan los vientos Valle - Montaña Oeste.

### 3.4 Geología

Los estratos que afloran en el área conforman las denominadas Formación Guadalupe, Guaduas, Cacho, Bogotá, y acumulaciones Cuaternarias, las cuales van desde el Cretáceo superior al reciente (**Van der Hammen & González, 1963**).

Los depósitos cuaternarios corresponden a materiales no consolidados que incluyen terrazas, derrubios de ladera y aluviones.

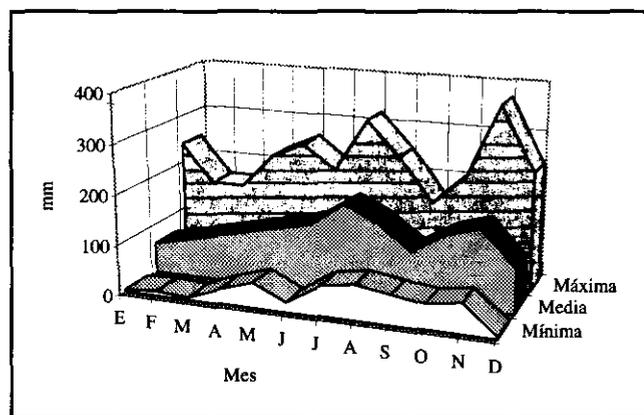


Figura 1. Régimen de lluvias mensuales multianuales. Cuenca del río San Cristóbal - Estación El Delirio. (1933-1994).

Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

### 3.5 Hidrografía

El río San Cristóbal nace en la laguna de Los Patos en la parte suroriental de la cordillera que rodea la ciudad de Santa Fe de Bogotá a una altura de 3.450 m.s.n.m.; inicia su recorrido en dirección norte y entrega sus aguas al sur del Acueducto Municipal de Vitelma. Tiene una longitud aproximada de 5 Km.

En ese recorrido se le unen el río Palo Blanco, cuyos afluentes son las quebradas Corralejas, Fotoga y la Upata que provienen de la parte sororiental de la cuenca y recoge las aguas de la ladera; y la quebrada la Hoja que recibe las aguas de las quebradas La Osa, La Calera, Lagunilla, los Laureles y los Tunjos, las cuales vienen de la parte noroccidental, forman, a partir del sitio denominado El Delirio, el cauce del río San Cristóbal. Desde El Delirio, a los 3.100 m.s.n.m. hacia la parte alta se consideran las microcuencas para esta investigación.

La red natural de drenaje del río San Cristóbal es asimétrica, presentando mayor amplitud en la vertiente derecha del río.

Los valores hidrológicos medios anuales del río San Cristóbal de acuerdo con la información obtenida de la estación limnográfica de El Delirio, a los 3.100 m.s.n.m. son:

Caudal medio anual (m<sup>3</sup>/seg.)  
0.653 m<sup>3</sup>/seg.      S = 0.167

Caudal máximo medio anual (m<sup>3</sup>/seg.)  
0.576 m<sup>3</sup>/seg.      S = 1.009

Caudal mínimo medio anual (m<sup>3</sup>/seg.)  
0.257 m<sup>3</sup>/seg.      S = 0.070

Estas fuentes se caracterizan por tener aguas cristalinas y medianamente tranquilas.

El régimen hidrológico presenta un amplio margen de variación (Figura 2). Sin embargo, de acuerdo con la información de las lluvias y caudales registrada históricamente se ha observado una correspondencia entre los valores mensuales.

### 3.6 Vegetación

La vegetación natural de más ocurrencia y alta distribución está representada por las especies siguientes: Ají (*Drimys granatensis*), Encenillo (*Weinmannia tomentosa*), Arrayán Blanco (*Myrcianthes leucoxylla*), Hayuelo (*Myrsine sp.*), Aliso (*Alnus acuminata*), Arboloco (*Smalanthus pyramidalis*), Cucharo (*Geissanthus andinus*), Chite

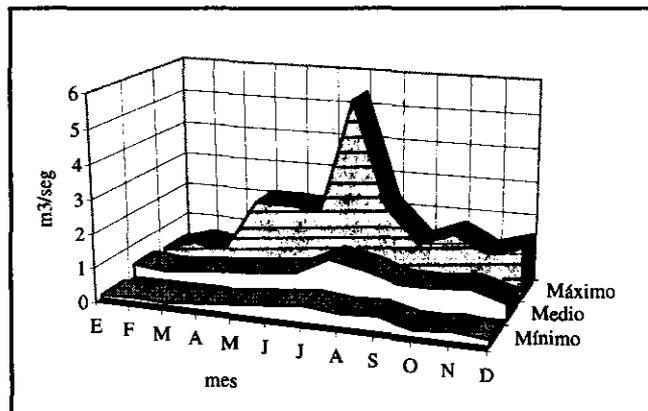


Figura 2. Régimen de caudales mensuales multianuales. Cuenca del Río San Cristóbal - Estación "El Delirio". (1927-1990)  
Fuente: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

(*Hypericum sp.*), Chusque (*Chusquea sp.*), Doradilla (*Tibouchina grossa*), Frailejón (*Espeletia argentea*), Gaque (*Clusia multiflora*), Laurel de cera (*Myrica parvifolia*), Raque (*Vallea stipularis*), Tuno (*Miconia sp.*), Tagua (*Geiadendron punctatum*), Uva Camarona (*Maclea-nia rupestris*).

Se presentan asociaciones puras de chusque entre rastrojos y las plantaciones. El estudio de DELSA (1986) registra 166 especies.

La parcela del bosque natural (BN) corresponde a una asociación dominada por Encenillo, Hayuelo, Chite, Cucharo y Chusque (en el sotobosque). Se nota abundante epifitismo (Bromeliáceas y Hepáticas).

El estrato arbóreo superior no sobrepasa los 17 m. Y los diámetros oscilan entre 8 y 27 cm. El Chusque ha invadido prácticamente al estrato inferior, lo que indica un estado sucesional de la vegetación.

El sitio de eucalipto corresponde a una vieja plantación de árboles muy espaciados. Esta circunstancia favoreció la invasión de chusque y otras especies heliófitas. Los eucaliptos presentan copas muy grandes (diámetros entre 7 y 12 m.) y ralas (debido a un proceso periódico de caducifolia). La altura promedio oscila alrededor de los 22 metros. Los ejemplares promedio exhiben diámetros entre 36 y 70 cm.

La parcela de ciprés se caracteriza por poseer árboles corpulentos espaciados en promedio 3 metros entre sí. Las copas no llegan a juntarse pero dejan pasar poca luz. El suelo está permanentemente cubierto con una gruesa

capa de musgo, el cual influye decisivamente en el proceso de infiltración (paso del agua a los horizontes inferiores del suelo). Los ejemplares promedio alcanzan diámetros entre 42 y 57 cm.

### 3.7 Suelos

Los suelos de los sitios investigados corresponden al grupo Inceptisol (Typic Umitropepts). Su densidad aparente baja (0.30 - 0.70) presume su origen volcánico; la roca madre es una arenisca con diferentes grados de meteorización. Tanto la porosidad total (70 - 82%) como la humedad aprovechable promedio para los perfiles del suelo en los tres sitios estudiados (BN: 46%, E: 43%, C: 36%) es similar. El almacenamiento de agua del suelo en los tres balances hídricos (Cuadros 1, 2 y 3) gira en torno de 28%. Las clases texturales hasta una profundidad de 40 cm., son similares y van de Arcillo-limoso a Franco-arcillo-limoso. Se advierten ligeras variaciones en los contenidos de arena, limo y arcilla. Esta última fracción es, con 43 y 47%, más alta en los suelos bajo eucalipto y ciprés respectivamente que bajo el suelo mineral cubierto con vegetación nativa (28%). Sin embargo, esta diferencia no se refleja en las tasas de infiltración, las cuales tendieron a cero en los tres sitios estudiados y no influyeron el balance hídrico. Los puntos de saturación sí son algo más bajos en los dos horizontes más arcillosos bajo eucalipto y ciprés (104 - 107%) que bajo bosque nativo (114 - 125%). No obstante, este dato debe tomarse en el estudio como una simple referencia.

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Selección de microcuencas

Para el estudio del balance hídrico se seleccionaron tres (3) microcuencas: Quebrada Osa (cobertura de bosque nativo, 6.3 Km<sup>2</sup>), Quebrada Palo Blanco (cobertura ciprés, 9.7 Km<sup>2</sup>) y Quebrada Upata (cobertura de eucalipto, 3.0 Km<sup>2</sup>). El criterio de selección fue el de identificar cuencas semejantes en todas sus características siendo la cobertura vegetal la variable por evaluar. De acuerdo con este criterio, la selección obedeció a la proximidad de las tres microcuencas entre sí, minimizando las diferencias de precipitación y suelos por una parte, y a la existencia de tres coberturas vegetales mencionadas. No obstante, se seleccionó un sitio descubierto (bajo cobertura de gramíneas) con el objeto de estimar la precipitación sin el efecto de retención por las copas de los árboles.

### 4.2 Instrumentación de microcuencas

Cada uno de los sitios seleccionados se dotó con:

- \* Un pluviómetro estándar tipo Hellmann de aluminio galvanizado, instalado sobre un bastidor a 1 metro sobre el piso. Seis pluviómetros de plástico instalados a 60 cm. sobre el piso.
- \* Tres (3) lisímetros de aluminio de tensión cero de 186 cm<sup>2</sup> de superficie, conectados a una manguera acoplada con un recipiente plástico a fin de estimar el volumen de agua infiltrada.
- \* Los tensiómetros se instalaron a 20, 40 y 80 cm., de profundidad respectivamente, en cada uno de los cuatro sitios seleccionados, para un total de doce.
- \* Cuatro (4) collarines adosados alrededor de los troncos de los árboles en cada uno de los tres tipos de cobertura para estimar el lavado de tallos.
- \* Tres (3) parcelas de escorrentía de 1 m. x 2 m. Bajo cada una de las coberturas vegetales, acopladas con un recipiente (balde) por medio de una boca de caucho. El balde se cubrió con una tapa horadada para coleccionar el agua.

### 4.3 Medición de los Flujos Hidrológicos

Los datos se sometieron a los análisis estadísticos de rigor: promedios, coeficientes de variación, desviación y error estándar y análisis de varianza. Las lecturas y registros dudosos se desecharon.

El balance hídrico se calculó por diferencia entre ganancias y pérdidas del agua del ecosistema según la ecuación:

$$AR = P - I - Es - EVT - S$$

$$P = PI + Et + I$$

- AR = Almacenamiento ó déficit
- P = Precipitación
- I = Interceptación
- Es = Escorrentía superficial
- EVT = Evapotranspiración
- S = Infiltración
- PI = Precipitación interna (que atraviesa la cubierta vegetal) o precipitación efectiva
- Et = Escurrimiento a lo largo de los troncos.

**Precipitación total:** Se registró mediante el pluviómetro instalado a campo abierto.

**Precipitación interna:** Mediante la lectura de pluviómetros instalados en el interior de las coberturas vegetales seleccionadas.

**Escurrecimiento por el tronco (Et):** Mediante la instalación de collarines adosados a cuatro árboles promedio. Para el cálculo del volumen de agua recogido se tuvo en cuenta la proyección del área de la copa; esto permitió convertir volúmenes de escurrecimiento a lámina de agua debajo de la muestra de árboles mediante la fórmula:

$$hEt = \frac{VR}{Ac}$$

En la cual:

hEt = Lámina de agua en mm.

VR = Volumen de agua recogida (m<sup>3</sup>)

Ac = Área de proyección de la copa (m<sup>2</sup>)

La lluvia bajo el bosque, equivalente a ingreso de agua al suelo, se calculó como la suma de la precipitación interna y el escurrecimiento por los troncos:

**Interceptación:** Equiparable a la evaporación desde las copas, se calculó como la diferencia entre la lluvia y la suma de la precipitación interna y el escurrecimiento de los troncos.

**Escurrecimiento superficial:** Mediante tres parcelas de escorrentía de 2 m<sup>2</sup> de superficie por sitio.

**Evapotranspiración real:** Se calculó mediante la fórmula dinámica de Thornthwaite y Matter (1967) que rela-

ciona la evapotranspiración potencial y las características físicas del suelo:

$$EVT_r = EVTP \frac{cc}{PMP}$$

Donde:

EVT<sub>r</sub> = Evapotranspiración real

EVTP = Evapotranspiración potencial\*

cc = Capacidad de campo (método de succión de humedad con muestras de suelo en laboratorio a 0.33 bars)

PMP = Punto de marchitez permanente (método de succión con muestras de suelo en laboratorio a 15 bars)

\* Según Thornthwaite:

$$EVTP = 1.6 \left\langle \frac{10t^a}{I} \right\rangle \text{ donde:}$$

$$a = \frac{1.6}{150} I + 0.5 \quad I = \sum_{n=1}^{12} i_n \quad i_n = \left\langle \frac{t}{5} \right\rangle^{1.514}$$

t = temperatura ambiente en °C

i = interceptación en mm

**Cuadro 1.** Balance hídrico mensual para el bosque nativo (mm)

|   | Año                            | 1995   |       |        |       | 1996  |       |        |       |       |       |         |        | Total   | Prom. |
|---|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|-------|
|   |                                | Mes    | Sep   | Oct    | Nov   | Dic   | Ene   | Feb    | Mar   | Abr   | May   | Jun     | Jul    |         |       |
| 1 | Precipitación                  | 62     | 94    | 59     | 78    | 87    | 129   | 163    | 168   | 96.5  | 81.3  | 243     | 132.4  | 1393.2  |       |
| 2 | Precipitación interna (PI)     | 31     | 72    | 50     | 67    | 64    | 97    | 122    | 131   | 69.5  | 30    | 164.4   | 107.8  | 1005.7  |       |
| 3 | Escurrecimiento por tallo (Et) | -      | 1.03* | 0.41*  | 0.55* | 0.74* | 1.03  | 1.22   | 1.23  | 1.25  | 0.67  | 2.14 bj | 1.06   | 11.33   |       |
|   | %                              | 0      | 1.1   | 0.69   | 0.71  | 0.85  | 0.8   | 0.75   | 0.73  | 1.3   | 0.83  | 0.88    | 0.8    |         | 0.79  |
| 4 | Ingreso suelo (2+3)            | 31     | 73.03 | 50.41  | 67.55 | 64.74 | 98.03 | 123.22 | 132.2 | 70.75 | 30.67 | 166.54  | 108.86 | 1017.03 |       |
| 5 | Interceptación (I)             | 31     | 20.97 | 8.59   | 10.45 | 22.26 | 30.97 | 39.78  | 35.77 | 25.75 | 50.63 | 76.46   | 23.54  | 376.17  |       |
|   | %                              | 50     | 22    | 15     | 13    | 26    | 24    | 24     | 21    | 27    | 62    | 31      | 18     |         | 28    |
| 6 | Evapotranspiración             | 76.75  | 86.41 | 87.41  | 81.08 | 79.5  | 73.92 | 90.93  | 90.06 | 93.58 | 81.89 | 80.55   | 79.79  | 1001.87 |       |
| 7 | Transpiración (6-5)            | 45.75  | 65.44 | 78.82  | 70.63 | 57.24 | 42.95 | 51.15  | 54.29 | 67.83 | 31.26 | 4.09    | 56.25  | 625.7   |       |
| 8 | Almacenamiento o déficit       | -14.75 | 7.59  | -28.41 | -3.08 | 7.5   | 55.08 | 72.07  | 77.94 | 2.92  | 0.59  | 162.45  | 52.61  | 391.33  |       |

No registrado

\* Dato ajustado a las tendencias entre Enero y Agosto de 1996

bj Dato incompleto

Porcentaje transpiración 44.91%

Porcentaje almacenamiento 28.09%

**Transpiración del rodal:** Equivalente a la absorción de agua a partir del suelo, se calculó como la diferencia entre la evapotranspiración y la interceptación.

**Almacenamiento o déficit:** Se estimó como la diferencia entre la precipitación total y la evapotranspiración.

## 5. Resultados

### 5.1 Balance hídrico en coberturas vegetales

El balance hídrico para las tres (3) coberturas vegetales bosque nativo (BN), eucalipto (E), ciprés (C), se presenta en los cuadros 1, 2 y 3 respectivamente.

#### Precipitación total (P):

Los datos del Centro de Investigaciones Hidrológicas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, sitúan la precipitación multianual promedio en 1.190 mm para un récord de 28 años (1968 - 1995). Los resultados experimentales de la presente investigación arrojan una precipitación de 1.393 mm anuales a campo abierto.

#### Precipitación interna (PI):

Este parámetro ha sido denominado en otros estudios como lavaje foliar para significar la precipitación efectiva que llega el suelo a través de las copas de los árboles. En las coberturas estudiadas este valor corresponde a 72% (BN), 80% (E), y 46% (C).

Contrario a lo esperado, no existe una diferencia marcada entre la PI del bosque nativo y la del eucalipto. Sin embargo, la regresión lineal entre la precipitación total (P) y la precipitación interna (PI) fue altamente significativa según los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para las coberturas de eucalipto (E) y bosque nativo (BN); no así para ciprés (C), Figura 3.

Resultados similares para precipitación interna (77%) obtuvo **Franken** (1982) en la reserva forestal de Manaos, Brasil, mientras **Bruijnzeel** (1990), informa sobre una variación entre 75 y 86% para bosques montanos.

#### Escurrimiento por el tronco (Et):

Esta fracción de la lluvia total que ingresa al sistema alcanzó valores anuales de 11 mm (0.8%) para BN, 10 mm (0.7%) para E, y 8 mm (0.55%) para C.

Valores igualmente bajos fueron registrados por **Fassbender & Grimm** (1981) en un bosque nativo de *Decussocarpus rospigliosii* en Venezuela. Cifras algo mayores encontraron **Ballesteros et. al.** (1987) en ambientes contrastantes de bosque nativo, eucalipto y pino del municipio de San Francisco en la Sabana de Bogotá. Un valor excepcionalmente alto (8%) fue encontrado por **Franken et. al.** (1982) y **Jordán** (1978) para un bosque amazónico en Brasil y Venezuela respectivamente. En general esta fracción de lluvia aporta muy poco al balance.

**Cuadro 2.** Balance hídrico mensual para el bosque de eucalipto (mm)

|   | Año                          | 1995   |       |        |       | 1996  |       |        |       |       |       |        |       |         |       |
|---|------------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|-------|
|   |                              | Mes    | Sep   | Oct    | Nov   | Dic   | Ene   | Feb    | Mar   | Abr   | May   | Jun    | Jul   | Ago     | Total |
| 1 | Precipitación                | 62     | 94    | 59     | 78    | 87    | 129   | 163    | 168   | 96.5  | 81.3  | 243    | 132.4 | 1393.2  |       |
| 2 | Precipitación interna (PI)   | 46.5   | 72    | 53     | 61    | 79    | 97    | 131    | 145   | 72.6  | 54.5  | 216.7  | 92.1  | 1120.4  |       |
| 3 | Escurrimiento por tallo (Et) | -      | 1.03* | 0.29*  | 0.51* | 0.7*  | 0.9   | 0.98   | 1.26  | 0.97  | 0.58  | 1.86bj | 1.02  | 10.2    |       |
|   | %                            | 0      | 1.2   | 0.49   | 0.65  | 0.8   | 0.7   | 0.6    | 0.75  | 1.01  | 0.71  | 0.77   | 0.77  |         | 0.7   |
| 4 | Ingreso suelo (2+3)          | 46.5   | 73.13 | 53.29  | 61.51 | 79.7  | 97.9  | 131.98 | 146.3 | 73.57 | 55.08 | 218.56 | 93.12 | 1130.6  |       |
| 5 | Interceptación (I)           | 15.5   | 20.87 | 5.71   | 16.49 | 7.3   | 31.1  | 31.02  | 21.74 | 22.93 | 26.22 | 24.44  | 39.28 | 262.6   |       |
|   | %                            | 25     | 22    | 10     | 21    | 8     | 24    | 19     | 13    | 24    | 32    | 10     | 30    |         | 20    |
| 6 | Evapotranspiración           | 78.09  | 87.92 | 88.93  | 82.49 | 80.88 | 75.21 | 92.52  | 91.63 | 95.21 | 83.31 | 81.95  | 81.18 | 1019.32 |       |
| 7 | Transpiración (6-5)          | 62.59  | 67.05 | 83.22  | 66    | 73.58 | 44.11 | 61.5   | 69.89 | 72.28 | 57.09 | 57.51  | 41.9  | 756.72  |       |
| 8 | Almacenamiento o déficit     | -16.09 | 6.08  | -29.93 | -4.49 | 6.12  | 53.79 | 70.48  | 76.37 | 1.29  | -2.01 | 161.05 | 51.22 | 373.88  |       |

----- No registrado

\* Dato ajustado a las tendencias entre Enero y Agosto de 1996

bj Dato incompleto

Porcentaje transpiración 54.32%

Porcentaje almacenamiento 26.84%

Cuadro 3. Balance hídrico mensual para la plantación de ciprés (mm)

|   | Año                           | 1995   |       |        |       | 1996  |       |        |       |       |       |        |       | Total  | Prom. |
|---|-------------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
|   | Mes                           | Sep    | Oct   | Nov    | Dic   | Ene   | Feb   | Mar    | Abr   | May   | Jun   | Jul    | Ago   |        |       |
| 1 | Precipitación                 | 62     | 94    | 59     | 78    | 87    | 129   | 163    | 168   | 96.5  | 81.3  | 243    | 132.4 | 1393.2 |       |
| 2 | Precipitación interna (PI)    | 35     | 31    | 10     | 28    | 36    | 58    | 56     | 59    | 28.9  | 48.8  | 179    | 67.5  | 637.2  |       |
| 3 | Escurecimiento por tallo (Et) | -      | 0.56* | 0.24*  | 0.39* | 0.52* | 0.65  | 1.1    | 1.17  | 0.58  | 0.65  | 1.6 bj | 0.75  | 8.21   |       |
|   | %                             | 0      | 0.6   | 0.41   | 0.5   | 0.6   | 0.5   | 0.67   | 0.7   | 0.6   | 0.8   | 0.66   | 0.57  |        | 0.55  |
| 4 | Ingreso suelo (2+3)           | 35     | 31.56 | 10.24  | 28.39 | 36.52 | 58.65 | 57.1   | 60.17 | 29.48 | 49.45 | 180.6  | 68.25 | 645.41 |       |
| 5 | Interceptación (I)            | 27     | 62.44 | 48.76  | 49.61 | 50.48 | 70.35 | 105.9  | 107.8 | 67.02 | 31.85 | 62.4   | 64.15 | 747.79 |       |
|   | %                             | 44     | 66    | 83     | 64    | 58    | 55    | 65     | 64    | 69    | 39    | 26     | 48    |        | 57    |
| 6 | Evapotranspiración            | 78.98  | 88.92 | 88.95  | 83.43 | 81.9  | 76.07 | 93.57  | 92.67 | 96.3  | 84.26 | 82.89  | 82.11 | 1031   |       |
| 7 | Transpiración (6-5)           | 51.98  | 26.48 | 41.19  | 33.82 | 31.32 | 5.72  | -12.33 | -15.2 | 29.28 | 52.41 | 20.49  | 17.96 | 283.21 |       |
| 8 | Almacenamiento o déficit      | -16.98 | 5.08  | -29.95 | -5.43 | 5.1   | 52.93 | 69.43  | 75.33 | 0.2   | -2.96 | 160.11 | 50.29 | 362.2  |       |

No registrado

\* Dato ajustado a las tendencias entre Enero y Agosto de 1996

bj Dato incompleto

Porcentaje transpiración 20.32 %

Porcentaje almacenamiento 26.00 %

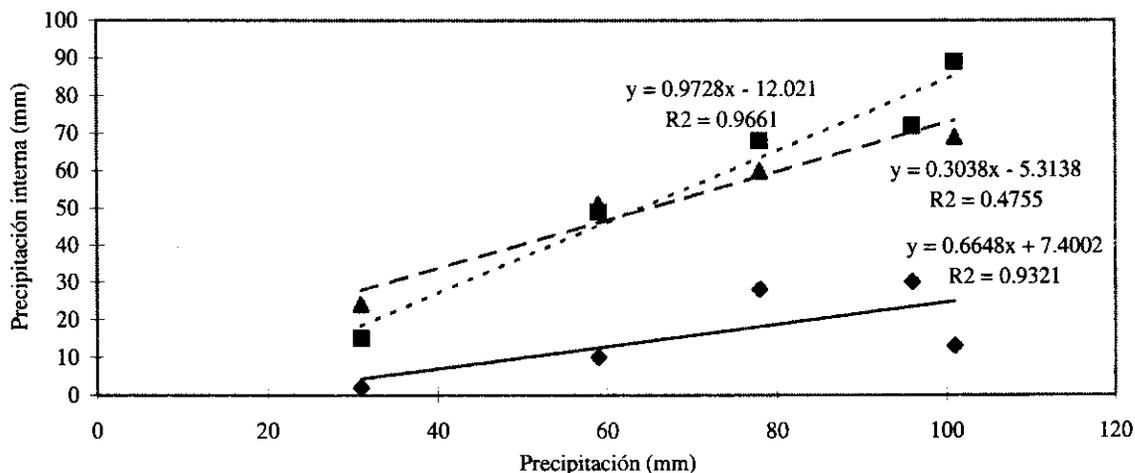


Figura 3. Curvas de regresión lineal para la relación precipitación (mm) - precipitación interna (mm) en tres coberturas vegetales de la Cuenca del río San Cristóbal.

**Cuadro 4.** Interceptación de la precipitación en diferentes tipos de cobertura vegetal

| Interceptación (%) | Sitio                            | Cobertura                      | Autor                      |
|--------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 19                 | Venezuela (2200 m)               | <i>Podocarpus rospigliosii</i> | Fassbender & Grimm, 1981   |
| 36                 | Colombia, Neusa (3200 m)         | Bosque natural                 | Ballesteros et al, 1989    |
| 28                 | Colombia                         | Bosque nativo                  | De las Salas, este estudio |
| 24                 | Cuencía río                      | <i>Eucaliptus globulus</i>     | De las Salas, este estudio |
| 47                 | San Cristóbal                    | Ciprés                         | De las Salas, este estudio |
| 45                 | Colombia (Neusa)                 | Pino                           | Ballesteros, 1983          |
| 35                 | Colombia, Piedras Blancas (Ant.) | Pino                           | Giraldo, 1989              |
| 13 Rango (4,5-22)  | Trópico bajo                     | Bosque natural                 | Bruijnzeel, L.A., 1990     |
| 18 Rango (10-24)   | Trópico                          | Bosque montano                 | Bruijnzeel, L.A., 1990     |
| 12-18              | Caldas (Colombia)                | Bosque montañoso               | Veneklaas & Van Ek, 1990   |

**Interceptación (I):**

Este componente contribuyó al balance con 376 mm., 263 mm., y 747 mm. Bajo cobertura de bosque nativo, eucalipto y ciprés respectivamente; estos valores corresponden a los siguientes porcentajes: BN 28%, E 20%, y C 57%. El cuadro 4 compara estos resultados con los obtenidos por otros investigadores. En el grupo de coníferas se destaca el ciprés de San Cristóbal por registrar la tasa más alta de interceptación frente a los datos de **Ballesteros et. al.** (1987) y **Giraldo** (1989). Este resultado es explicable por poseer el ciprés una mayor área foliar. **Lima** (1986), concluye después de la revisión de muchos estudios, que los bosques de coníferas interceptan más agua que los de hoja ancha. También comprobó que las pérdidas por interceptación tienden a aumentar con la edad de la plantación. **Bruijnzeel** (1990) comenta que los valores de interceptación para bosques montañosos se sitúan entre 10 y 24%. **Veneklaas & Van EK** (1990) encuentran rangos similares (12 a 18%) en los bosques montañosos lluviosos de la Cordillera Central de Colombia.

Para estimar la relación entre la precipitación total y la interceptación se elaboraron curvas de regresión lineal para cada una de las coberturas vegetales. Tal relación se ilustra en la figura 4. El coeficiente de determinación  $R^2$  para ciprés resultó altamente significativo y solo significativo para BN y E. Teniendo en cuenta que las pérdidas por interceptación de superficies arboladas dependen de factores como la resistencia aerodinámica y estomática, el tamaño de las hojas, la evaporación, la duración del aguacero, el agua antecedente y los vientos entre otros (**Giraldo**, 1989), las relaciones de regresión obtenidas en la presente investigación merecen mayor escrutinio y deben considerarse preliminarmente válidas sólo para las coberturas y los sitios estudiados.

**Escurrimiento superficial:**

La cantidad de agua registrada en lisímetros instalados a 20 y 40 cm. bajo la superficie tendió a cero en las muestras seleccionadas como válidas. Por lo tanto, esta fracción no fue considerada en el balance. No obstante, para comparar las tres coberturas, los datos de escorrentía superficial en parcelas de 1 x 2 m se sometieron a un análisis de varianza.

No hubo diferencia significativa entre los tratamientos (coberturas), según la prueba de comparaciones múltiples de Duncan. Estudios realizados en bosques tropicales demostraron que el escurrimiento superficial fue generalmente menor del 1% de la precipitación (**Bruijnzeel**, 1990).

**Evapotranspiración (EVT):**

Este componente del balance alcanzó valores de 1.001 mm, 1.019, y 1.031 mm para BN, E y C respectivamente. Las tasas de transpiración ascienden a 626 mm (45% de la precipitación), 756 mm (54% de la precipitación) y 283 mm (20% de la precipitación) para las tres coberturas mencionadas en el mismo orden. La baja tasa de transpiración del Ciprés no obstante su gran superficie foliar, sugiere por un lado, una alta saturación de agua en el suelo y una mayor cantidad de energía solar disponible para evaporar un volumen mayor de agua (748 mm). **Lima** (1986) comenta que en condiciones semejantes de sistema radical y de desarrollo, el consumo de agua por diferentes bosques es prácticamente el mismo.

La alta tasa de transpiración del eucalipto puede explicarse por el tamaño de sus hojas (20 - 40 cm<sup>2</sup>) y el alto número de estomas (4.880/cm<sup>2</sup>) que están permanentemente abiertos frente al del bosque nativo (1.700/cm<sup>2</sup>), característica comprobada en la región del Neusa, Cundina-

marca (Ballesteros, 1993). Los datos obtenidos aquí no pueden generalizarse debido a que ni la transpiración ni la evaporación fueron medidas directamente. No obstante, coinciden con los registrados para el balance hídrico en las microcuencas.

#### Almacenamiento:

El agua almacenada se estimó restando de la precipitación total la evapotranspiración. Esta fracción alcanzó valores prácticamente iguales para BN, E y C en su orden: 391 mm (28%), 374 mm (27%) y 362 (26%). Este hecho tiene su explicación en que los suelos bajo estas tres coberturas exhiben texturas y espacios porosos similares. Los análisis de retención de humedad de muestras tomadas en el espacio intensivo radical del suelo (10 - 50 cm) en las tres coberturas vegetales, indican que el porcentaje de agua almacenada (disponible) en el espacio capilar (0.33 - 15 Bars de presión) es del 46% (BN), 42 (E) y 36 (C); este resultado sugiere una eficiencia hídrica ligeramente mayor del bosque natural. La infiltración, medida con lisímetros de tensión cero colocados a 20, 40 y 80 cm tendió a cero en los horizontes superficiales y no se consideró relevante para el balance hídrico, mientras que la percolación profunda (80 cm) fue errática, sugiriendo un aporte lateral de agua que no pudo determinarse.

#### 5.2 Balance hídrico en la cuenca y en las microcuencas del río San Cristóbal

Para determinar el balance hídrico se tuvo en cuenta el trazado de isoyetas sobre el área de toda la cuenca, y de isothermas sobre el área de las microcuencas. Las isoyetas se delinearon con base en las estaciones pluviográficas de El Delirio, Palo Blanco, El Verjón y Vitelma. Los caudales de salida de cada microcuenca se estimaron mediante limnímetros instalados en el punto de cierre definido para cada una de ellas. Estas secciones de salida se localizaron así:

1. Microcuenca La Osa en El Delirio con limnómetro bajo el puente.
2. Microcuenca Palo Blanco en una sección previa a la confluencia con la quebrada la Upata.
3. Microcuenca la Upata, en sección previa a la confluencia con la quebrada Palo Blanco.

Para estas actividades de medición de caudales se calibraron las estaciones limnométricas instaladas mediante aforos que permitieron determinar los caudales para los diferentes niveles de acuerdo con sus variaciones periódicas.

Para la superficie total del río San Cristóbal se estimó el balance hídrico a nivel multianual, en el período 1952

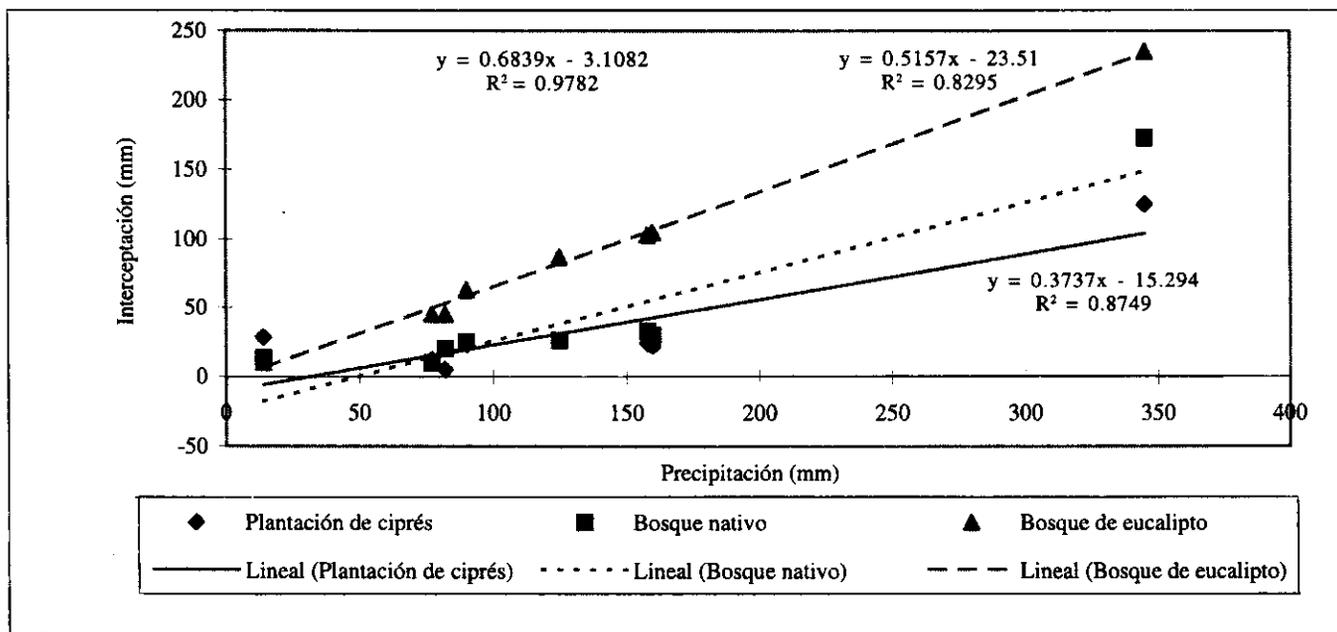


Figura 4. Curvas de regresión lineal para la relación precipitación (mm) - interceptación (mm) en tres tipos de coberturas vegetales de la cuenca del río San Cristóbal

- 1990, considerando el área de la cuenca hasta la estación El Delirio, con 2.360 hectáreas. Para ese período la precipitación anual es de 1.193,7 mm, que permitió alcanzar un caudal medio anual de 651 litros/seg, una evapotranspiración de 323.1 mm, un rendimiento hídrico de 28 litros/seg/Km<sup>2</sup> y un coeficiente de escurrimiento del 72.8%.

Posteriormente, se realizó el cálculo del balance hídrico y de los indicadores anteriores, en las tres microcuencas en que se dividió la cuenca: Palo Blanco (ciprés), La Osa (Bosque natural) y La Upata (*Eucalyptus*), utilizando los datos obtenidos en el período septiembre de 1995 - agosto de 1996. Dicho balance se ilustra en el cuadro 5.

La precipitación media se evaluó por el método de las isoyetas y los caudales, mediante las estaciones limnimétricas establecidas en cada una de las microcuencas. En estas estaciones se tomaron las lecturas limnimétricas, que luego se transformaron a caudales mediante las curvas de calibración obtenidas para cada una de las estaciones. Estas curvas se determinaron realizando aforos periódicamente.

De acuerdo con los resultados hallados, se observa que los niveles más bajos de evapotranspiración se presentaron en la microcuenca influida por la cobertura de ciprés, hecho que se puede explicar por la alta densidad del dosel que protege el suelo, y evita las pérdidas de agua. Este resultado es coherente con el registrado en el balance hídrico de coberturas vegetales; además, el rendimiento en esta microcuenca es el mayor con un valor de 39 litros/seg/Km<sup>2</sup>, lo que sugiere también una mayor eficiencia hídrica.

Los valores más altos de evapotranspiración se sucedieron en la microcuenca de la quebrada La Upata, donde hay cobertura de Eucalyptus, que demandó (transpiró) las mayores cantidades de agua dada su fisiología.

## 6. Discusión

Existe controversia sobre el efecto de las plantaciones en el consumo de agua en las cuencas hidrográficas. En

zonas húmedas, **Pereira** (1973) y **Kunkle** (1978) comentan que no existe evidencia de que el bosque nativo consume menos agua que las plantaciones forestales a una misma altitud y que las especies forestales tienen diferentes demandas de agua en plantaciones de la misma densidad sobre sitios similares. **Lima** (1986) afirma que en condiciones semejantes de sistema radical y de desarrollo, el consumo de agua por diferentes coberturas vegetales es prácticamente el mismo. Por otra parte, **Giraldo** (1993) concluyó que el suelo en microcuencas cubiertas con rastrojo, pino y ciprés en el departamento de Antioquia acusó tasas de almacenamiento altas (250 - 500 mm) y similares hasta una profundidad de 60 cm. En el presente estudio estas tasas de almacenamiento en los primeros 40 cm también oscilaron en rangos similares (362 - 391 mm), lo que sugiere que ni las coberturas de eucalipto ni de ciprés influyen negativamente el balance.

Los parámetros del balance hídrico evaluados en la presente investigación presentan las limitaciones siguientes:

- i. Son puntuales y por lo tanto no extrapolables a otras cuencas y coberturas vegetales.
- ii. Necesitan períodos más largos para establecer comparaciones estadísticamente mejor soportadas.
- iii. Su evaluación no siempre se basó en mediciones directas; la evapotranspiración por ejemplo, fue calculada por el método de Thornthwaite debido a la carencia de instrumentos, por lo demás, costosos.

### *Precipitación interna (PI)*

Ningún otro componente del ciclo hidrológico en bosques tropicales ha recibido tanta atención como la medición de la precipitación interna (o efectiva). Más de 100 estudios sobre interceptación en regiones tropicales, 70 de ellos conducidos en bosques naturales difieren grandemente en su confiabilidad por razones mayormente climáticas, vegetales y procedimentales (**Bruijnzeel, L.A.** 1990). La compleja naturaleza de los procedimientos

**Cuadro 5.** Balance hídrico en las microcuencas del río San Cristóbal

| Microcuenca | P(mm)  | Q (mm) | ET (mm) | R (lts/seg /km <sup>2</sup> ) | C.E (%) |
|-------------|--------|--------|---------|-------------------------------|---------|
| Palo Blanco | 1443.1 | 1228.9 | 214.2   | 39.0                          | 85      |
| La Osa      | 1206.1 | 971.1  | 235.0   | 30.8                          | 83      |
| Upata       | 1435.5 | 599.1  | 746.4   | 19.0                          | 28      |

R = Rendimiento hídrico

C.E = Coeficiente de escurrimiento

involucrados y la heterogeneidad espacial y algunas veces temporal del dosel de los árboles, requiere la elaboración de diseños confiables de muestreo hasta ahora raramente utilizados. **Bruijnzell** (1990) informa que de 77 estudios sobre precipitación interna (PI) consultados por él, solamente 20 registraron la PI más o menos adecuadamente (con límites de confianza de 10 al 15 por ciento). Utilizando la técnica de la relocalización de pluviómetros (al menos 20) se calculó una PI promedio anual de 85% (rango 77 - 93%) para bosques de bajura y de 81% (rango 75 - 86%) para bosques montanos (**Bruijnzell**, 1990). Esta técnica no fue utilizada en el presente estudio. Sin embargo, el valor arrojado por un solo pluviómetro se encuentra dentro del rango mencionado para bosques montanos.

### *Interceptación (I)*

El conocimiento del proceso de interceptación de la lluvia en el bosque se ha incrementado considerablemente en las últimas décadas. El registro de este componente es esencial en los estudios de balances hídricos. Teniendo en cuenta las observaciones hechas anteriormente, los resultados de estudios de interceptación en bosques tropicales varían entre 4.5% y 45% de la lluvia total (**Bruijnzell**, 1990). Este mismo autor registró valores entre 10 y 24% para bosques montanos seleccionando los estudios más confiables en los cuales utilizaron el 1% de la precipitación interna como contribución del escurrimiento por el tronco.

Si se expresan los valores de (I) como una fracción de la precipitación incidente, pueden compararse resultados entre diferentes localidades. Este procedimiento no suministra información directa sobre las tasas reales de evaporación desde la superficie húmeda del dosel del arbolado. La cantidad de agua que permanece sobre el follaje al final de una lluvia, constituye el grueso de la pérdida por interceptación.

El mayor valor (56%) registrado en el presente estudio para la cobertura de ciprés puede explicarse por la gran capacidad de "humedecimiento" de sus copas. Dado que no conocemos la evaporación desde el follaje, influida a su vez por el efecto secante del viento, la radiación solar, el tipo de hojas y de estomas y la duración de los aguaceros entre los principales factores, no podemos hacer mayores precisiones al balance hídrico.

El nuestro es un estimativo global que amerita por un lado, una mayor precisión (pluviómetros relocalizados temporalmente) y un mayor tiempo (por lo menos dos años) de observación por el otro.

### *Evapotranspiración (EVT)*

Shuttleworth y Stewart (citados por **Bruijnzell**, 1990) revisaron las técnicas para estimar la evapotranspiración (EVT) e hicieron una distinción general entre métodos de balance hídrico y técnicas micrometeorológicas. El primer método estima la EVT por diferencia e incluye medidas de precipitación, flujo de caudales o drenaje y cambio en la humedad del suelo o en su capacidad de almacenamiento. Se aplica comúnmente a las cuencas hidrográficas. Los métodos micrometeorológicos por otro lado, requieren, en la mayoría de los casos, de una sofisticada instrumentación dentro y encima del dosel de la vegetación arbórea y por eso han sido menos utilizados.

El modelo de evapotranspiración de Penman Monteith (**Giraldo**, 1989) por ejemplo, involucra las variables siguientes: presión, temperatura, energía disponible, calor específico del aire, presión de saturación de vapor, presión actual de vapor, resistencia aerodinámica, resistencia estomática, constante psicrométrica y densidad del aire.

En el presente trabajo la EVT real en coberturas vegetales no pudo ser calculada por carencia de una instrumentación adecuada; se recurrió a la fórmula de Thornthwaite y Matter (1.967) que relaciona la evaporación potencial con los índices de retención a baja (0.33 Bars) y alta (15 Bars) presión en el espacio capilar del suelo. El resultado es que la tasa anual de EVT gira en torno a los 1.000 mm en las coberturas del bosque natural (BN), eucalipto (E) y ciprés (C) seleccionadas para el balance hídrico. De esta cifra, 62% corre a cargo de la transpiración en BN, 74% en E y 27% en C. Anteriormente, se discutió por qué la cobertura de eucalipto mostró la más alta tasa de transpiración.

**Bruijnzell** (1990) comenta que la evapotranspiración anual gira alrededor del 50% de la precipitación para bosques de zonas bajas en Brasil, Panamá y Surinam, mientras que para los bosques naturales montanos este valor oscila entre 13% (río Macho, Costa Rica), y 64% (Sierra Nevada, Colombia).

### **Conclusiones**

1. No se obtuvieron evidencias de que la vegetación natural (BN) en la presente investigación evapotranspire menos que las otras dos coberturas vegetales comparadas (eucalipto (E) y ciprés (C)). Sin embargo, el almacenamiento de agua en el suelo bajo BN (46%) contra E (42%) y C (36%) sugiere una mayor eficiencia hídrica del BN.

**Lima** (1986) afirma que bajo condiciones semejantes de sistema radical y de desarrollo, el consumo de

- agua por diferentes coberturas forestales es prácticamente el mismo.
2. Los parámetros evaluados en el balance hídrico bajo las tres coberturas vegetales estudiadas presentan las siguientes limitaciones:
    - i. Son puntuales y por lo tanto no extrapolables a otras cuencas y coberturas vegetales.
    - ii. Necesitan períodos más largos para establecer comparaciones estadísticamente mejor sustentadas.
    - iii. Su evaluación no siempre se basó en mediciones directas; la evapotranspiración por ejemplo, fue calculada utilizando la ecuación de Thornthwaite y Matter por carencia de una sofisticada instrumentación dentro y encima del dosel de la vegetación arbórea.
  3. Contrario a lo esperado, el mayor rendimiento hídrico (39 litros/seg/Km<sup>2</sup>) se registró en la microcuenca Palo Blanco parcialmente cubierta por ciprés. Sin embargo, este resultado amerita un mayor escrutinio por cuanto:
    - i. La superficie arbolada es relativamente pequeña para influir decisivamente el balance hídrico.
    - ii. El tiempo de registro del caudal (1 año) es muy corto.
  4. Las mayores tasas de transpiración se registraron en la cobertura de eucalipto tanto in situ (756 mm/año) como en la microcuenca (746 mm/año) y las más bajas en la de ciprés (in situ, 283 mm/año), (microcuenca, 214 mm/año). Un lugar intermedio ocupó el sitio bajo bosque nativo (626 mm/año), microcuenca (235 mm/año). Este resultado coincide con la apreciación general de que el eucalipto consume mucha más agua. En el balance hídrico, la microcuenca Upata cercana a la plantación de eucalipto, registró el menor rendimiento hídrico (19 litros/seg/Km<sup>2</sup>).
  5. Las tasas reales anuales de evaporación desde las copas húmedas del dosel de ciprés, eucalipto y bosque nativo, no pudieron calcularse. Sin embargo, los valores de interceptación (I) (20% BN, 28% E y 56% C) concuerdan con los arrojados por otros estudios (Ballesteros, 1983; Ballesteros et. al., 1987; Bruijnzeel 1990; Franken, 1992; Lima, 1976; Grimm & Fassbender, 1981).

Calder (1991), comprobó que las pérdidas por interceptación están determinadas en primer lugar por la capacidad de la copa; es razonable esperar por lo tanto, que tales pérdidas sean menores en la cobertura de eucalipto. De acuerdo con esta apreciación, el alto porcentaje (56% : 745 mm) de pérdida por interceptación arrojado por la cobertura de ciprés, no es insólito. Este valor es compensado por la tasa más baja de transpiración y el mayor rendimiento hídrico.

6. La infiltración del suelo, calculada utilizando lisímetros de tensión cero colocados a 20 y 40 cm por debajo de la superficie, arrojó valores despreciables para el balance hídrico en coberturas vegetales. Teniendo en cuenta la importancia de este parámetro para la regulación del flujo hídrico en las microcuenas, es necesario utilizar una mejor tecnología (p.ej. platos de cerámica).
7. La importancia de obtener registros confiables para un óptimo manejo del agua en las cuencas que surten de agua a Bogotá, no se discute. Por lo tanto esta investigación amerita continuarse por un período no inferior a cinco años.

### Agradecimientos

La presente investigación se realizó gracias al aporte financiero del Fondo para la Protección del Medio Ambiente "José Celestino Mutis" FEN, Colombia y la Fundación Mc. Arthur. Los autores desean expresar sus agradecimientos a estas instituciones.

### Referencias

- Ballesteros M., De las Salas, G. & Cardozo, E. 1987. Introducción al balance hídrico de tres coberturas vegetales en Sabaneta. Fondo FEN Colombia.
- Ballesteros, M.M. 1983. Balance hídrico comparativo de una asociación de *Weinmannia* con los bosques de *Pinus* y *Eucalyptus* en la región del Neusa. Tesis de grado. Departamento de biología. Universidad Nacional. Bogotá.
- Bruijnzeel, L.A. 1990. Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of Knowledge review. Faculty of Earth Sciences. Free University. Amsterdam. The Netherlands. 222 p.
- Calder, I.R. 1991. Water use of Eucalyptus: a review. In: Calder, I.R. & Adlard, P.G. (eds): Growth and water use of forest plantations. Proceedings of an international symposium. Bangalore, India. Forest Department / Oxford Forestry Institute.
- Castillo, S. G. & López, R.M. 1983. Evaluación del efecto de la cobertura vegetal sobre los caudales de la cuenca hidrográfica del río San Cristóbal. Bogotá 132 páginas más anexos.

- DELSA LTDA.** 1986. Plan de aprovechamiento de las plantaciones de ciprés y eucalipto de la cuenca hidrográfica del río San Cristóbal. Bogotá 2 volúmenes.
- Franken, W. et al.** 1992. Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. *Acta Amazônica* 12 (2): 327-331.
- Giraldo, L.G.** 1989. Meteorología: aplicación especial al microclima del bosque. Universidad Nacional de Colombia, seccional Medellín. Departamento de ciencias forestales. 291 p. más apéndices.
- . 1993. Efecto de las coberturas vegetales ciprés, pino y rastrojo sobre la humedad del suelo en dos microcuencas de Piedras Blancas, Antioquia. *Crónica Forestal y del Medio Ambiente*. (8): 7-25.
- Grimm, H. & W. Fassbender.** 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes de Venezuela III: Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos en el agua. *Turrialba* (2): 89-99 pp.
- Jordan, C.F.** 1978. Stem flow and nutrient transfer in a tropical rain forest. *Oikos* 31: 257-263.
- Kunkle, S.H.** 1978. Forestry support for agriculture through watershed management, windbreaks and other conservation measurements. In: 8 Th. World forestry congress. Jakarta.
- . 1978. Manejo de cuencas hidrográficas; problemas y oportunidades. En: Zadroga, F. & R. Morales (eds). Taller regional sobre manejo de cuencas hidrográficas y áreas silvestres. UNESCO /PNUD/ ROCKEFELLER b.F. / CATIE. Turrialba, Costa Rica. 78-98 pp.
- Lima, W.P.** 1976. Interceptação da chuva por povoamentos de eucaliptos de pinheiro. *IPEF*. 13 : 75-90
- . 1986. Principios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrograficas. *ESALQ. Univ. De Sao Paulo. Piracicaba*. 241 p. (Original no consultado).
- Pereira H.C.** 1973. Land use and water resources in temperate and tropical climates. Cambridge University Press. 245 páginas.
- Van der Hammen T. & González E.** 1963 Historia del clima y la vegetación del Pleistoceno superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. *Boletín Geológico V. XI* (1-3)
- Venegas T.L.** 1958. Aspectos ecológicos del subpáramo en el río San Cristóbal. Tesis de grado. Universidad Distrital "Francisco José De Caldas". Bogotá, 76 páginas.
- Veneklaas, E.J. & Van E.K., R.** 1990. Rainfall interception in two tropical montane rain forest, Colombia. *Hydrological Processes* 4: 311-326. John Wiley.
- Villamizar, C.A.** 1967 Apuntes sobre la hoya hidrográfica del río San Cristóbal. Tesis de grado. Universidad Distrital "Francisco José De Caldas". Bogotá 90 páginas.
- Von Christein, H.** 1981. Consideraciones sobre el manejo de las cuencas hidrográficas con especial énfasis en el papel de la silvicultura. Asociación Colombiana de Reforestadores. 15 p (mimeografiado).
- Witch G.L.** 1981. The management of mountain catchments for forestry. *South African Journal of Forestry*. N° 77.