

**NOTA TECNICA**  
**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA COMPARAR EL EFECTO DE**  
**DIFERENTES COBERTURAS VEGETALES EN LA REGULACIÓN DE**  
**CAUDALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS. APLICACIÓN EN LA**  
**MICROCUENCA DE LA QUEBRADA LA MURCIÉLAGO, ANTIOQUIA**

*Juan Fernando Patiño, Juan Diego León Peláez,  
León Andrés Montes & Laura Catalina Hernández*

*Departamento de Ciencias Forestales  
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.*

Recibido para evaluación: 24 de Marzo 2007/ Aceptación: 11 de Mayo de 2007 / Versión final: 22 de Mayo de 2007

**RESUMEN**

Se describe una propuesta metodológica para evaluar el efecto de diferentes coberturas vegetales sobre el rendimiento hídrico en cuencas hidrográficas de pequeña extensión. Para este fin se emplean procedimientos estadísticos, dentro de los cuales se encuentra la prueba de hipótesis para la comparación de pendientes de líneas de regresión, la cual no ha sido empleada para este propósito, y cuya aplicación requiere información hidrológica de fácil obtención. Posteriormente se muestra su empleo en la cuenca hidrográfica de la quebrada La Murciélagos (Piedras Blancas, Antioquia), cubierta por plantaciones forestales de *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica* y por bosque natural. Los resultados muestran diferencias significativas entre la cobertura de pino y las coberturas de ciprés y bosque natural, siendo esta última la que posee una menor pendiente y por lo tanto un mayor efecto de regulación sobre el rendimiento hídrico.

**PALABRAS CLAVE :** Cobertura Vegetal; Cuencas Hidrográficas; Regulación de Caudales; La Murciélagos (Microcuenca, Ant., Col.); Rendimiento Hídrico; Pino: *Pinus Patula*; Ciprés: *Cupressus Lusitanica*; Bosques Montano; Bosques Tropicales.

**ABSTRACT**

An alternative methodology is described for evaluating the effect of different vegetation covers on streamflow regulation in small watersheds. Toward this aim, statistical procedures are employed, including hypothesis testing on regression slopes, which has not been used before for this purpose, and it is based upon easily obtained hydrological information. Subsequently, its applicability is demonstrated for La Murciélagos stream watershed (Piedras Blancas, Antioquia) which is covered by *Pinus patula* and *Cupressus lusitanica* forest plantations, and natural forest. Results indicate significant differences between pine plantation, and cypress and natural forest covers, the latter with the smaller slope and therefore with a higher regulation capacity on water yield.

**KEY WORDS:** Vegetal Cover; Watersheds; Streamflow Regulation; La Murciélagos (Micro-Watershed, Ant., Col.); Water Yield; Pino: *Pinus Patula*; Ciprés: *Cupressus Lusitanica*; Montane Forest; Tropical Forest

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad ha sido reconocido el importante papel que cumplen las coberturas boscosas en la regulación de caudales en las cuencas hidrográficas (Zhang et al. 1999). Sin embargo, la capacidad de regulación del rendimiento hídrico dependerá a su vez de los tipos y características de cada cobertura forestal presentes en aquellas. Por esto, y en el caso particular de proyectos relacionados con el abastecimiento de aguas y/o la generación hidroeléctrica, resulta de gran interés conocer la respuesta hidrológica de cuencas hidrográficas que se encuentran bajo la influencia de distintos tipos de bosques, naturales o plantados.

No obstante, la comparación “directa” de corrientes de agua en cuencas con coberturas forestales contrastantes, resulta particularmente compleja debido a que el efecto de la vegetación sobre aquellas -regulación hidrológica- tiende a opacarse. Entre otras, se tienen consideraciones tales como las diferencias climáticas que se verifican entre sitios y/o años, y la dificultad de medir las trasferencias de agua subterránea entre cuencas (Bruijnzeel y Vertessy 2004).

La escorrentía y la recarga subterránea como componentes del balance hídrico, están directa e indirectamente afectados por la vegetación arbórea (Wilcox, 2002): (1) por la alteración de las características de infiltración del suelo a través de la penetración de las raíces y por la adición de materia orgánica proveniente del desfronde; (2) por la preservación de humedad en el suelo a través de la capa de hojarasca o mantillo, y por la sombra proyectada por el dosel; (3) a través del traslado o retiro de humedad vía transpiración; y (4) mediante la alteración del flujo subsuperficial debido a la actividad y posterior descomposición de las raíces, las cuales propician el desarrollo de macroporos en el suelo. En particular, es a través de la modificación, o de las diferencias en las tasas de evapotranspiración, que las plantas leñosas alteran con mayor fuerza el caudal o el rendimiento de una cuenca hidrográfica; dicha modificación o efecto diferencial de cada cobertura forestal sobre el rendimiento hídrico, varía en el tiempo según su estado de desarrollo. Así, el flujo de agua en las fases iniciales de la sucesión o en el establecimiento de una plantación es mayor, esperando que disminuya a medida que el bosque crece (Bruijnzeel, 1997). Con el fin de detectar el efecto que tienen los bosques -o diferentes tipos de cobertura vegetal- sobre el

rendimiento hídrico en una cuenca hidrográfica, ha sido propuesta la consideración de varias componentes para períodos similares (Best et al. 2003): descarga total del flujo, flujo superficial e interfluo (escorrentía directa), descarga de flujo base, descarga de flujo generado por la precipitación para las lluvias individuales; duración de la descarga y períodos de rezago. Es así como la variación relativa, el grado de acople y los tiempos de rezago (lag times), entre la precipitación y el flujo de agua, se convierten en rasgos característicos para cada cuenca (Jones y Swanson 2001).

Los distintos ecotipos y especies de plantas que conforman los ecosistemas, consumen cantidades diferentes de agua, situación que a su vez se refleja en los caudales, especialmente durante las épocas de estiaje, verificándose al mismo tiempo una relación directa entre el agotamiento del agua subterránea y el caudal. El consumo de agua tanto en bosques naturales como en plantaciones forestales y en coberturas vegetales de porte bajo, ha sido estudiado usando ecuaciones de balance hídrico, y a través de la medición de las tasas de transpiración (Tangtham, 1994).

Para estimar el efecto que tiene la vegetación sobre el rendimiento hídrico, ha sido empleada tradicionalmente la metodología de cuencas pareadas (Bruijnzeel, 2004, Best et al., 2003), según la cual es posible medir el efecto de un tratamiento en una de ellas y compararlo con la respuesta de la otra que actúa como testigo. Tal comparación, para variables como caudal y precipitación diaria, presenta problemas, ya que la naturaleza de la información es discreta y no independiente, lo cual viola los supuestos estadísticos tradicionales (Walpole et al., 1999).

De las consideraciones comentadas se desprende la importancia que tiene el desarrollo de metodologías versátiles, que permitan conocer el efecto de diferentes coberturas vegetales en la regulación hídrica, teniendo como única fuente de información, datos de precipitación y de caudal de naturaleza discreta y con una resolución diaria, dado que se trata de información de fácil recolección en cuencas experimentales de mediano a pequeño tamaño. Este trabajo propone una metodología de sencilla aplicación para determinar el efecto diferencial que sobre el rendimiento hídrico pueden tener distintas coberturas vegetales en cuencas hidrográficas de pequeño tamaño, adaptando para ello procedimientos estadísticos basados en la aplicación de pruebas de hipótesis para la comparación de pendientes entre líneas

de regresión -también conocidas como pruebas de paralelismo (Zar, 1984)- sobre modelos lineales ajustados mediante análisis de regresión.

Bajo esta aproximación de tipo “caja negra”, intervienen únicamente variables de entrada (lluvia) y de salida (caudal-rendimiento hídrico), para lo cual se desvinculan otras variables que revelan los complejos procesos de intercambio que se desarrollan entre los sucesos de estímulo y de respuesta en la cuenca, los cuales no fueron objeto de este trabajo. Las ventajas ofrecidas por esta aproximación radican en que de una forma relativamente rápida y sin complejos procedimientos estadísticos, pueden ser comparados a nivel de pequeñas cuencas, los rendimientos hídricos de diferentes tipos de cobertura vegetal -forestal, pastos, cultivos, otros- teniendo como insumo básico información hidrológica de fácil obtención.

A manera de estudio de caso, se muestra finalmente la aplicación de la metodología en la microcuenca hidrográfica de la quebrada La Murciélagos, localizada en el Oriente Antioqueño, la cual se encuentra totalmente cubierta por coberturas boscosas, tanto naturales como plantadas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Requerimientos de información e instrumentación

Para el desarrollo de los procedimientos metodológicos aquí propuestos, se tienen algunos requerimientos mínimos de información de las coberturas vegetales en estudio y de los procesos hidrometeorológicos que ocurren en la cuenca. Como primera medida se requiere información de la precipitación incidente sobre cada cobertura vegetal que se quiere estudiar. Ante la certeza de que la precipitación no muestra variaciones espaciales significativas en la microcuenca en estudio, podrá asumirse dicha variable como un estímulo hidrológico homogéneo para las coberturas vegetales; en caso contrario la precipitación deberá ser monitoreada de forma discriminada en cada una de ellas.

Por otra parte, las áreas de influencia (v.g. captación) de las coberturas vegetales, deben estar claramente asociadas a puntos de aforo y monitoreo sobre la red de drenaje, pudiendo ser bien definidas y cuantificadas, ya que éstas constituirán las unidades experimentales en estudio. En los puntos de aforo deberá contarse con

vertederos permanentes que permitan registrar los caudales con la misma resolución temporal de la precipitación incidente, teniéndose como resultado series paralelas de precipitación y de caudal en el tiempo. Para la obtención de resultados sólidos, será necesario contar con información de buena calidad y resolución, y un amplio periodo de registro.

En síntesis, el ámbito ideal de aplicación de los procedimientos metodológicos expuestos comprende una cuenca de pequeña extensión, con régimen climático uniforme para todos sus puntos geográficos, así como condiciones edáficas similares, y puntos sobre la red de drenaje claramente asociados a coberturas vegetales que cubran el área de captación respectiva. Además, desde la perspectiva hidrogeológica y estratigráfica, la cuenca internamente no debería permitir potenciales movimientos laterales subsuperficiales y/o transvases de agua.

### 2.2. Depuración y fase exploratoria

Una vez conformada la base de datos, se debe realizar una depuración inicial de ella, así como acometer una fase exploratoria que permita obtener una primera aproximación a las tendencias generales de los datos.

Posteriormente, se explorarán las series de datos a nivel descriptivo, obteniendo las principales medidas de resumen (media, varianza, desviación estándar, valores extremos); esta exploración contempla además la de los datos a nivel gráfico, a partir de la construcción de diagramas de dispersión de doble eje que involucren las variables precipitación y caudal (rendimiento hídrico) a lo largo del período de estudio. En este momento se alcanzará una aproximación gráfica de la respuesta -en términos de rendimiento hídrico- al estímulo de la precipitación por tipo de cobertura vegetal. Con el fin de determinar el tiempo que toma para un evento de lluvia determinado, manifestarse como caudal, son calculados los coeficientes de correlación “producto - momento” de Pearson entre ambas variables, desfasando la precipitación por días hasta encontrar el conjunto de datos que presente la máxima correlación. Los análisis subsiguientes se realizarán con este conjunto de datos.

### 2.3. Modelación y comparación estadística

Con el objetivo de comparar estadísticamente los rendimientos hídricos asociados con las diferentes coberturas vegetales, se practican transformaciones

matemáticas apropiadas para las variables de forma que se obtenga una tendencia lineal de los datos. Posteriormente se ajustan modelos de regresión lineal simple que involucran como variable dependiente el rendimiento hídrico bajo cada cobertura, y como variable independiente la precipitación, siendo evaluada su validez estadística a partir de los parámetros de ajuste usualmente empleados. Ya que en otros ejercicios se ha asumido la existencia de una relación lineal entre la precipitación y la escorrentía, es conveniente aclarar que los modelos que aquí se obtienen no son empleados para hacer estimaciones de caudal y/o de rendimiento hídrico. El fin último consiste en, bajo la aproximación de caja negra aquí propuesta, obtener los parámetros de regresión con el fin de realizar comparaciones entre ellos y por ende determinar las diferencias entre las coberturas vegetales de interés.

La comparación de los valores de pendiente de cada modelo de regresión, permite identificar la existencia de diferencias en la respuesta hidrológica de las diferentes coberturas vegetales ante eventos de lluvia, en términos de rendimiento hídrico. Así, mediante los modelos (relación directa de la precipitación con el rendimiento hídrico), es posible evidenciar el aporte diferencial de cada cobertura vegetal frente a la regulación de caudales. Se desarrolla entonces una prueba de hipótesis (Ecuación 1), a partir de la cual se comparan estadísticamente las pendientes entre los modelos de regresión lineal simple ajustados, prueba denominada “de paralelismo” (Zar 1984). Para esto, se emplea una prueba de F convencional con un  $F$  calculado ( $F_c$ ) particular (Ecuación 2), contra un  $F$  tabular ( $F_t$ ) (Ecuación 3). Los valores necesarios para el cálculo de  $F_c$ , se obtienen de la estructura propuesta por el mismo autor (Tabla 1).

$$\text{Hipótesis nula} \rightarrow H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k \quad (1)$$

$$\text{Hipótesis alterna} \rightarrow H_a : \beta_i \neq \beta_j$$

Donde:

$\beta_i$  representa la pendiente del modelo de regresión lineal ajustado para el rendimiento hídrico bajo cada cobertura, en función de la precipitación, con  $i: 1, 2, \dots, k$

$$F_c = \frac{\left( \frac{SC_c - SC_p}{k-1} \right)}{\frac{SC_c}{GL_p}} \quad (2)$$

Donde:

$$SC_c = \text{Suma de cuadrados residual común.}$$

$SC_p$  = Suma de cuadrados residual agrupado (sumatoria de las sumas de cuadrados residuales para cada regresión)

$$GL_p = \text{Grados de libertad residual agrupado.}$$

$k$  = Número de modelos de regresión (o número de coberturas vegetales evaluadas).

$$F_t_{\alpha(1)v1, v2; \alpha} = 0.01 \quad (3)$$

Con  $v1$  y  $v2$  grados de libertad del numerador y denominador respectivamente.

En el caso de ser rechazada la hipótesis nula, son aplicadas pruebas de comparación múltiple de *Tukey*, con el fin de determinar entre cuáles coberturas se presentan las diferencias significativas en la relación “rendimiento hídrico - precipitación”.

Con el objetivo de concluir acerca del efecto diferencial que tienen las coberturas evaluadas sobre el rendimiento hídrico en la cuenca hidrográfica de interés, son comparados pares de valores de pendientes a través del cálculo de un valor crítico ( $q$ ) (Ecuación 4), que se compara contra un valor  $q$  tabular ó de rango Studentizado (Ecuación 5).

$$q = \frac{b_i - b_j}{SE} \quad (4)$$

Donde:

$b_i, b_j$  = Pendientes asociadas a los modelos de regresión de las coberturas  $i$  y  $j$  respectivamente.

$$SE = \sqrt{\frac{\frac{SC_j + SC_i}{GL_i + GL_j}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}} \quad (5)$$

$$q_{\alpha, v, p}$$

Con:

$\alpha$  = nivel de significancia

$v$  = grados de libertad residual agrupado.  $p$

$p$  = número de modelos de regresión lineal simple (coberturas vegetales).

### 3. ESTUDIO DE CASO

#### 3.1. Área de estudio

La metodología propuesta fue aplicada en la microcuenca de la quebrada La Murciélagos (Piedras Blancas,

**Tabla 1.** Cálculos para la prueba de diferencias entre pendientes de k regresiones lineales simples

	$A_i = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}$	$B_i = \sum xy_i - \frac{(\sum x)(\sum y_i)}{n}$	$C_i = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$	<i>SC Residual</i>	<i>GL Residual</i>
<i>Regresión 1</i>	<i>A1</i>	<i>B1</i>	<i>C1</i>	$SC_1 = C_1 - \frac{B_1^2}{A_1}$	$GL_1 = n_1 - 2$
<i>Regresión 2</i>	<i>A2</i>	<i>B2</i>	<i>C2</i>	$SC_2 = C_2 - \frac{B_2^2}{A_2}$	$GL_2 = n_2 - 2$
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
<i>Regresión k</i>	<i>Ak</i>	<i>Bk</i>	<i>Ck</i>	$SC_k = C_k - \frac{B_k^2}{A_k}$	$GL_k = n_k - 2$
<i>Regresión “Agrupada”</i>				$SC_P = \sum_{i=1}^k SS_i$	$GL_P = \sum_{i=1}^k (n_i - 2)$
<i>Regresión “Común”</i>	$A_c = \sum_{i=1}^k A_i$	$B_c = \sum_{i=1}^k B_i$	$C_c = \sum_{i=1}^k C_i$	$SC_c = C_c - \frac{B_c^2}{A_c}$	$GL_c = \sum_{i=1}^k (n_i - k - 1)$

\*  $X$ : Precipitación (variable independiente).

\*\*  $y_i$ : Rendimiento hídrico asociado a cada cobertura (variable dependiente). Con  $i: 1, 2, \dots, k$ . Fuente: Zar (1984).

Antioquia), cuyas condiciones bioclimáticas corresponden con la zona de vida bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB). La cuenca está situada sobre suelos residuales derivados de anfibolita y duníta serpentinizada, con la cobertura de cenizas volcánicas característica de los suelos del Oriente Antioqueño, de uno a dos metros de espesor, con altos contenidos de materia orgánica, y entrecruzada con saprolito del material parental (EPM 1989). Su extensión es de 5,63 ha, y se localiza en predios propiedad de Empresas Públicas de Medellín -EPM- coordenadas planas 1.184.200-1.184.400 N y 841.500 - 841.700 E con origen Bogotá. La cobertura vegetal se compone de plantaciones forestales de pino pátula (*Pinus patula* Schleidl. & Cham) y ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.) que ocupan el 34,76% del área, mientras que el 65,24% está cubierto por vegetación natural de tipo rastrojo alto, denominado en este estudio como bosque natural. Algunos parámetros estructurales de los bosques estudiados se presentan en la Tabla 2.

### 3.2. Instrumentación y procesamiento de la información

La microcuenca fue instrumentada en el año 2002 en el marco de la línea de profundización en Bosques y

Conservación Ambiental, Área Hidrología Forestal, del Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. La instrumentación consistió en la instalación de pluviómetros, tanto fuera del bosque como dentro de cada cobertura. Además, se establecieron cuatro vertederos permanentes sobre la red de drenaje para el monitoreo de los caudales base asociados con las coberturas forestales (Henao y Restrepo, 2000; Hernández, 2005), cuyas características se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 1. En la Tabla 4 pueden así mismo apreciarse el área de influencia y la cobertura asociada a cada vertedero.

Dado que para la cobertura de composición mixta (bosque natural y plantación forestal de pino pátula) se tienen dos vertederos, su caudal total ha sido calculado como la suma de los obtenidos en ellos. En esta cobertura de composición mixta, se realizó la separación de la influencia del bosque de pino pátula, partiendo de los supuestos de la teoría de cuencas pareadas (Best et al., 2003). Así, en este caso particular, se procedió de la siguiente manera: (i). El valor obtenido para el rendimiento hídrico de la cobertura de bosque natural “pura”, se multiplicó por el área de bosque natural que se tiene dentro de la cobertura mixta, obteniéndose así

**Tabla 2.** Resumen de parámetros estructurales por rodal para las coberturas de *Cupressus lusitanica*, *Pinus patula* y bosque natural. Cobertura N° árb

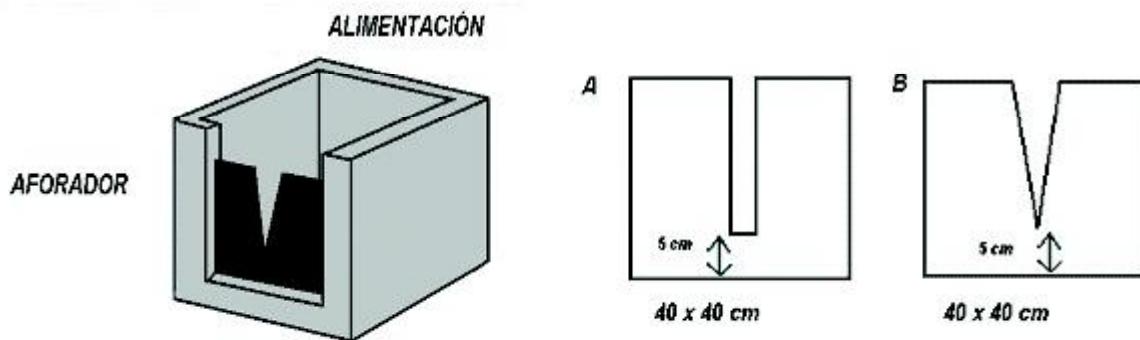
Cobertura	Nº árb (árboles/ha)	Dq/ha* (cm)	HE/ha <sup>+</sup> (m)	G/ha <sup>□</sup> (m <sup>2</sup> /ha)
Ciprés	593	36,7	18,2	63,7
Pino pátula	594	25,4	16,5	29,0
Bosque Natural	560	12,0	12,5	13,0

(\*) Diámetro cuadrático promedio por hectárea; (+) Altura estimada por hectárea;  
(□)Área basal por hectárea. Fuente: Yepes et al. (2003)

el caudal atribuible al bosque natural dentro de dicha cobertura mixta: (ii). Al valor de caudal total de la cobertura mixta se le restó el caudal recién calculado, con el cual se obtiene el caudal atribuible a la plantación de pino pátula dentro de la cobertura de composición mixta, (iii). Se dividió este último valor por el área ocupada por pino pátula dentro de la cobertura mixta para obtener el Rendimiento Hídrico de Pino.

El planteamiento implica asumir que no hay sesgo al considerar que el rendimiento hídrico bajo una cobertura

es similar en otro lugar que se encuentra influenciado y/o caracterizado por condiciones similares. En este caso particular, se acepta que ambos tipos de cobertura dentro de la cuenca se encuentran bajo unas condiciones climáticas y edáficas similares, y que la cobertura de bosque natural a partir de la cual se ha realizado el cálculo del rendimiento hídrico, se corresponde íntimamente en sus parámetros estructurales y silviculturales con el bosque natural que hace parte de la cobertura mixta, situación corroborada en el trabajo de campo. Con base en mediciones diarias de caudal y precipitación durante

**Figura 1.** Estructura de aforo y tipos (A. Ranura de 1/2". B. Triangular 10°) de vertedero (Henao & Restrepo 2000)**Tabla 3.** Ecuaciones generales para cada dispositivo aforador (Henao & Restrepo 2000)

Tipo de Vertedero	Ángulo de Escotadura	Caudal (l/s)	Coeficiente de Descarga (Cd)	Ecuación de Caudal* (Q vs. H)	R <sup>2</sup>
Triangular	5°	0,023 – 0,390	0,95	$Q = 1,48 H^{2,29}$	0,992
	10°	0,120 – 1,030	0,79	$Q = 2,45 H^{2,32}$	0,994
	15°	1,120 – 1,130	0,81	$Q = 2,81 H^{2,44}$	0,997
Rectangular o Ranura	½"	0,130 – 1,040	0,73	$Q = 24,34 H^{1,52}$	0,999

\*Caudal expresado como cm<sup>3</sup> seg<sup>-1</sup>

**Tabla 4.** Coberturas vegetales asociadas a cada vertedero

Cobertura	Área (ha)	Vertedero
Ciprés (C)	1,30	Triangular
Bosque Natural (BN)	3,24	Triangular
Mixta BN-Pino pátula (P)	1,09*	Triangular y ranura
Total	5,63	

\* Esta área está representada por 60,3% en pino pátula y 39,7% en bosque natural

el periodo abril de 2003 - abril de 2005, y tomando el área asociada a cada cobertura vegetal, se determinó el efecto que sobre el rendimiento hídrico tenían las distintas coberturas forestales en la cuenca. El juego de hipótesis (Ecuación 6) con un nivel de significancia ( $\alpha$ )= 0,01 para las pendientes de las coberturas estudiadas se estableció de la siguiente manera:

$$H_0: \beta_C = \beta_{BN} = \beta_P \quad (6)$$

$$H_a: \beta_i \neq \beta_j$$

Donde:

$\beta_C$  = Pendiente del modelo lineal ajustado para ciprés.

$\beta_{BN}$  = Pendiente del modelo lineal ajustado para bosque natural.

$\beta_P$  = Pendiente del modelo lineal ajustado para pino pátula.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Fase exploratoria

La precipitación diaria promedia mensual durante el período de estudio osciló entre 2,16 mm y 7,35 mm para los meses de agosto y septiembre, respectivamente (Tabla 5). Los valores extremos para la precipitación diaria máxima se presentaron entre enero y abril, siendo estos 15,35 mm y 54,27 mm, respectivamente. Como era de esperarse la precipitación mínima diaria para todos los meses fue cero. En cuanto al rendimiento hídrico diario promedio mensual, éste osciló entre 0,09 y 2,10 l s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> (Tabla 6). El rango de valores más altos se presentó en la cobertura de pino pátula, seguido por las coberturas de ciprés y bosque natural.

Es conveniente dejar aquí indicado que para la determinación del rendimiento hídrico en una cuenca es necesario involucrar variables clave que permitan esclarecer de manera detallada el funcionamiento del sistema vegetación-suelo-escorrentía. Así, la inclusión de variables como la evapotranspiración y la variación

en el almacenamiento de agua en el suelo, entre otras, conducen a la obtención de modelos que se acercan bajo una aproximación de “caja gris” a la explicación del funcionamiento del sistema arriba señalado. Los datos aportados en la Tabla 6 excluyen estas variables -a pesar de su reconocida importancia en la explicación de los fenómenos en cuestión-dado que no fueron parte de los objetivos de este estudio que pretende, desde la aproximación de “caja negra”, explicar la respuesta hidrológica diferencial de una cuenca hidrográfica a los estímulos de lluvia, partiendo de información de una relativamente fácil consecución.

Al graficar las variables precipitación y rendimiento hídrico a lo largo del período analizado (Figura 2), se puede observar cómo hay una correspondencia directa entre las variaciones de ambos flujos, haciéndose evidente la relación de los caudales pico con los eventos máximos de lluvia. Igualmente, el flujo base se resalta a partir de las menores fluctuaciones de las curvas de rendimiento hídrico durante la época de menor cantidad de lluvia.

De las gráficas se deriva la afectación diferencial ejercida por cada tipo de cobertura sobre el rendimiento hídrico, si bien presenta sincronía entre las curvas a través de las fluctuaciones en la precipitación según los eventos lluviosos. Se puede observar la respuesta de cada cobertura forestal a variaciones amplias en la precipitación, lo cual es indicado por la sensibilidad de la curva ante eventos de lluvia. En este caso, y de conformidad con la Figura 2, el bosque natural es, entre las coberturas estudiadas, el que presenta menor rendimiento hídrico, lo cual conduce a suponer que es la cobertura vegetal en que se presenta un mayor consumo y/o retención de agua, si bien, conforme ha sido recién indicado, no se cuenta con información de variables fundamentales para determinar este aspecto. Por contrapartida, el mayor rendimiento hídrico es obtenido en la plantación de pino pátula. Al parecer los estímulos de lluvia generan una respuesta más rápida en caudal

**Tabla 5.** Medidas de resumen para la variable precipitación diaria mensual multianual (mm). Abril 2003-abril 2005.

Precipitación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Diaria prom.	2,60	2,39	2,71	6,10	7,35	6,93	4,51	2,16	7,14	6,94	6,83	2,60
Máx*	15,35	43,86	18,37	54,27	46,93	31,74	24,67	16,06	45,34	37,28	17,00	37,55
Mín*	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

\* Valores extremos registrados durante el período de monitoreo

**Tabla 6.** Medidas de resumen para la variable rendimiento hídrico ( $\text{l s}^{-1} \text{ha}^{-1}$ ). Abril 2003-abril 2005

Rendimiento hídrico	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Dp Ciprés	0,61	0,52	0,57	0,58	0,55	0,61	0,51	0,40	0,54	0,61	0,57	0,72
Dp B. natural	0,16	0,10	0,09	0,12	0,18	0,17	0,14	0,12	0,15	0,20	0,19	0,22
Dp Pino pátula	1,83	1,66	1,80	1,89	1,79	1,83	1,70	1,68	1,88	2,10	2,03	2,04

Dp: Valor diario promedio

en la cuenca bajo esta última cobertura, situación que podría además guardar relación con los diversos reportes de repelencia del suelo al agua verificados en plantaciones de *Pinus patula* en la región de estudio (Jaramillo 1996; Arbeláez et al., 2004, Ruiz et al., 2005), los cuales promueven flujos preferenciales de escorrentía superficial antes que los de infiltración en el suelo.

Con el fin de determinar la temporalidad de la respuesta hidrológica, se intentó encontrar la correlación entre la precipitación y el rendimiento hídrico, con diferentes días de desfase (Tabla 7). Para esta microcuenca se encontró que su respuesta es prácticamente inmediata, dado que la mayor correspondencia se observó cuando se correlacionaron los datos de rendimiento hídrico con los datos de precipitación del mismo día; esta respuesta es además reflejo de su área, la cual es bastante reducida. Por el contrario, en cuencas de mayor tamaño esta situación no ha sido verificada; así por ejemplo, en un trabajo realizado para comparar el régimen hidrológico en varias cuencas distribuidas en tres lugares de Estados Unidos y en Puerto Rico (Post y Jones 2001), se encontró que a una escala diaria, el rendimiento hídrico estaba positivamente correlacionado con la precipitación en un desfase de 4-6 días y, que de igual forma, la microcuenca almacenaba y liberaba humedad en un periodo inferior a una semana después de un evento de precipitación. Sin embargo, a una escala mensual, esta correlación no era significativa para ningún desfase.

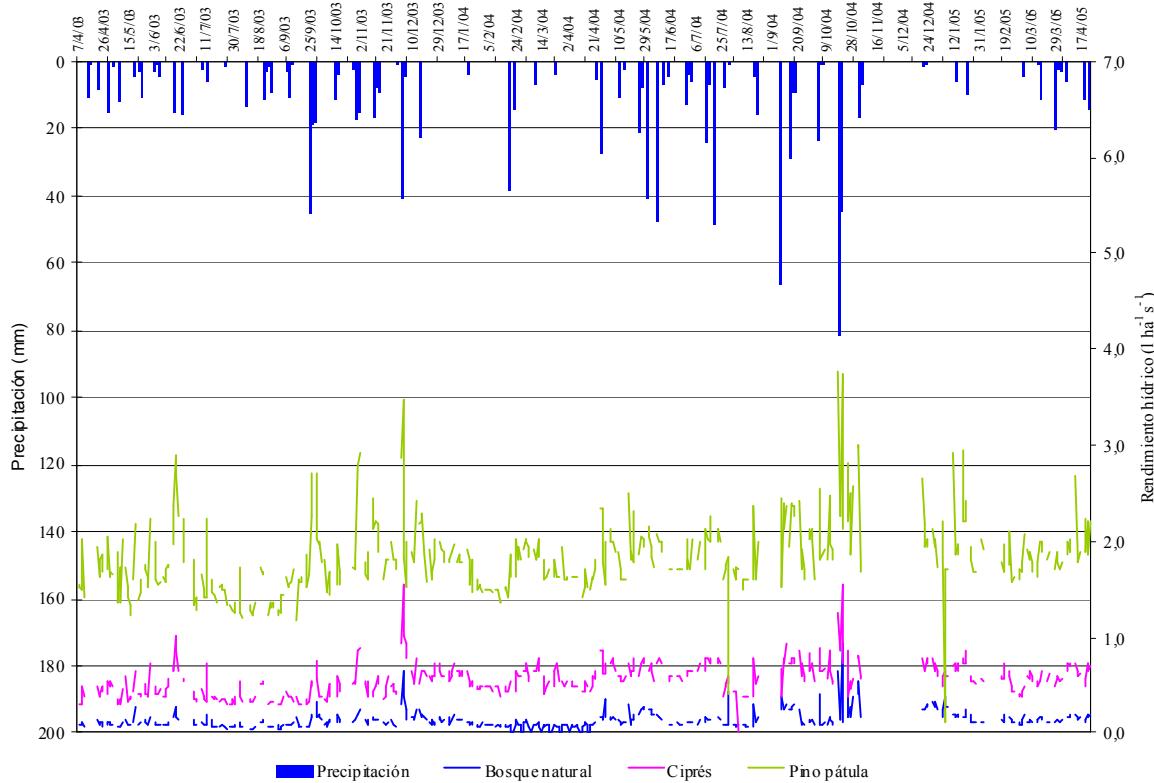
Tomando como base los resultados aquí obtenidos, se acogen los valores diarios de ambas variables para el

ajuste de los modelos de regresión, que posteriormente permitirán discriminar los aportes de cada tipo de cobertura en materia de regulación hidrológica.

#### 4.2. Modelación y comparación estadística

Previa modelación de la variable “Rendimiento Hídrico”, se encontró que la transformación raíz cuadrada sobre los datos de la variable independiente “Precipitación”, era la que producía los mejores resultados normalizando y ayudando a mostrar una tendencia lineal de los datos. Los modelos de regresión lineal ajustados para las tres coberturas, se muestran en la Tabla 8 y en la Figura 3. Modelos de tipo lineal para relacionar estas variables han sido ajustados en cuencas con varios años de registro, entre 9 y 60 años, por Post & Jones (2001).

Estos modelos lineales suministran información acerca de la capacidad de regulación que tienen las coberturas sobre los caudales, a través de la interpretación de la magnitud de la pendiente ( $\beta_i$ ). Es así como para el caso analizado, la cobertura con menor pendiente corresponde a bosque natural (Figura 3), lo cual presupone que ésta es la cobertura con mayor poder de regulación, es decir, la respuesta en la variación del rendimiento hídrico a la variación de la precipitación es menor. La situación descrita concuerda con lo mostrado en la Figura 2, así para un mismo evento de lluvia la respuesta hidrológica, expresada como rendimiento hídrico, seguirá en orden ascendente la secuencia bosque natural, ciprés, pino pátula. De conformidad con la aplicación de la prueba de comparación de pendientes - prueba de “F” - para las

**Figura 2.** Diagrama de precipitación y rendimiento hídrico a través del tiempo**Tabla 7.** Coeficientes de correlación “Producto momento” de Pearson entre precipitación y rendimiento hídrico con varios días de desfase.

Cobertura	Desfase (días)	0	1	2	3	4	5
Bosque natural	P*	0,421	0,141	0,197	0,079	0,088	0,177
	p-value**	0,000	0,014	0,003	0,255	0,195	0,004
Ciprés	P*	0,405	0,222	0,296	0,166	0,027	0,158
	p-value**	0,000	0,000	0,000	0,000	0,701	0,011
Pino pátula	P*	0,544	0,253	0,274	0,175	0,112	0,288
	p-value**	0,000	0,000	0,000	0,015	0,115	0,000

\* Coeficiente de correlación “Producto momento” de Pearson.

\*\*p-value &lt; 0,05 indica diferencia de correlación “cero” significativa

cubiertas de la microcuenca La Murciélagos, la hipótesis nula “ $H_0$ ” es rechazada (Tabla 9), lo cual indica que al menos un par de pendientes de las líneas de regresión ajustadas por cubierta, son estadísticamente diferentes. En vista de esto y conforme a los procedimientos metodológicos propuestos, se emplea la prueba de comparación múltiple de Tukey (Tabla 10).

La aplicación de esta prueba conlleva el rechazo de la hipótesis nula en todos los casos, determinando la existencia de diferencias estadísticamente significativas ( $P = 0,01$ ), con un alto nivel de rigor ( $P = 0,001$ ).

La influencia que tiene la vegetación natural frente al movimiento de agua en una cuenca pequeña es notoria, ya que sí existen diferencias en el almacenamiento de agua en el suelo a diferentes profundidades, la dinámica de esta humedad, tanto en volumen como en tiempo, para convertirse en flujo, también debe diferir. Por tanto, el hecho de que la vegetación natural presente bajos valores en el rendimiento hídrico y a su vez un almacenamiento de agua mayor, son indicativos de que la cubierta natural libera el agua almacenada en el perfil del suelo, más lentamente que las otras cubiertas en consideración.

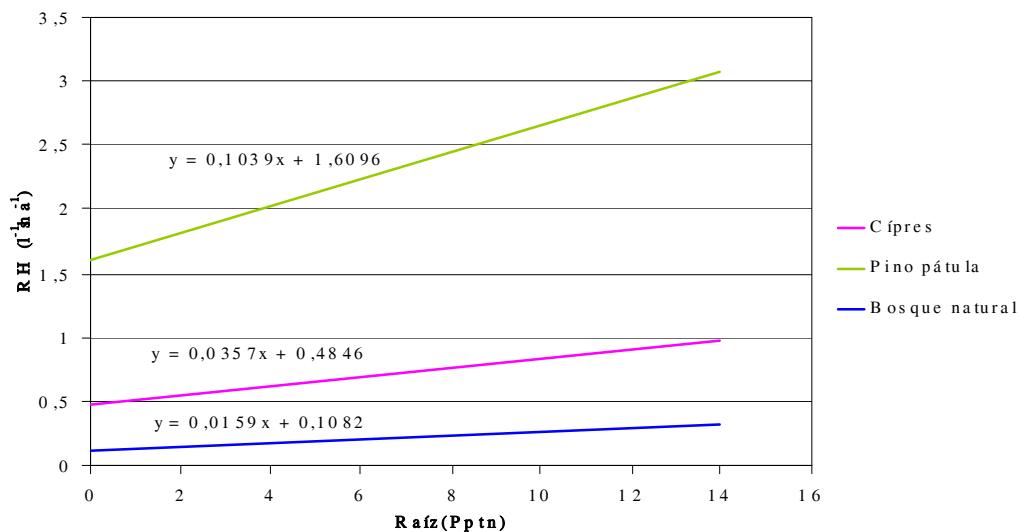
**Tabla 8.** Modelos de regresión lineal para el rendimiento hídrico bajo cada cobertura

Cobertura	Modelo ajustado*	Valor P del Modelo
Bosque Natural	$BN = 0,108188 + 0,0158904 \times \sqrt{Pptn}$	0,0000**
Pino pátula	$P = 1,609610 + 0,1038720 \times \sqrt{Pptn}$	0,0000
Ciprés	$C = 0,484638 + 0,0356598 \times \sqrt{Pptn}$	0,0000

\*  $C$  = Rendimiento hídrico bajo cobertura de ciprés.  
 P = Rendimiento hídrico bajo cobertura de pino pátula.  
 BN = Rendimiento hídrico bajo cobertura de bosque natural.  
 $Pptn$  = Precipitación.  
 \*\* Válidos en el análisis de varianza menores a 0,01 denotan una relación estadísticamente significativa entre la variable dependiente Y y la variable independiente X.

**Tabla 9.** Prueba de hipótesis para las pendientes.

Fc	F(0,01)(1),2,1155	Decisión
64,97	4,62	$F_c > F_t$ Rechazo $H_0$ .

**Figura 3.** Relación rendimiento hídrico (RH)-precipitación (pptn) según los modelos ajustados para cada cobertura.**Tabla 10.** Pruebas de comparación múltiple de Tukey para la igualdad de pendientes.

$H_0$	Comparación	Diferencia	SE	Q	$q_{(0,01)1155,3}$	Conclusión	$q_{(0,001)441,3}$	Conclusión
$\beta_{BN} = \beta_P$	Bn vs. P	0,0880	0,0063	13,880	4,12	Rechazo $H_0$	5,063	Rechazo $H_0$
$\beta_{BN} = \beta_C$	Bn vs. C	0,0185	0,0034	5,4305	4,12	Rechazo $H_0$	5,063	Rechazo $H_0$
$\beta_C = \beta_P$	C vs. P	0,0695	0,0069	10,057	4,12	Rechazo $H_0$	5,063	Rechazo $H_0$

## 5. CONCLUSIONES

La aplicación de los procedimientos metodológicos descritos permite determinar, desde una aproximación de caja negra, y de una forma relativamente sencilla, el efecto que diferentes tipos de cobertura vegetal tienen sobre los caudales en cuencas de pequeño tamaño. No obstante, si se quieren determinar los procesos implicados en el fenómeno en estudio con una mayor resolución, es necesario incluir variables que ejercen un importante rol, como lo son la evapotranspiración de las coberturas vegetales, y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, las cuales no han sido objeto de este estudio.

La versatilidad de la metodología estriba, fundamentalmente, en los requerimientos de información, los cuales son de fácil adquisición para las variables caudal y lluvia.

La metodología propuesta aplicada al estudio de las coberturas vegetales presentes en la microcuenca La Murciélagos, ha permitido develar el efecto diferencial sobre el ciclo hidrológico en términos de la regulación de caudales, entre estas coberturas. Específicamente tal diferencia se presenta de manera marcada entre las coberturas de pino (*Pinus patula*) y las coberturas de ciprés (*Cupressus lusitanica*) y bosque natural; siendo esta última la que ante estímulos de lluvia, tiene un poder de regulación mayor (menor pendiente), reflejado en un menor valor en el rendimiento hídrico comparado con las otras coberturas. Entre las coníferas la regulación hídrica también muestra diferencias, siendo notablemente menor en ciprés.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado en predios propiedad de Empresas Públicas de Medellín, en inmediaciones de la Estación Experimental Piedras Blancas del Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Este artículo ha sido desarrollado gracias al trabajo de investigación que desde el año 2003 el Departamento de Ciencias Forestales viene realizando en la cuenca de la quebrada La Murciélagos en materia de flujo de agua y ciclo de nutrientes. Especialmente gracias a la instrumentación y el monitoreo realizado inicialmente por estudiantes de la Línea de Profundización en Bosques y Conservación Ambiental, continuado mediante estudiantes de trabajo de grado del programa Ingeniería Forestal. Los

autores expresamos un agradecimiento por sus valiosos aportes y críticas a los profesores de la Universidad Nacional de Colombia Guillermo Vásquez, Conrado Tobón, Álvaro Lema, Guillermo Correa y Jaime Ignacio Vélez.

## REFERENCIAS

- Arbeláez, S.P., Duque, J.R., Jaramillo, D.F., y León, J.D., 2004. Estudio de hidrofobicidad de suelos en robledales (*Quercus humboldtii*) y plantaciones forestales (*Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*) en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas. Revista Facultad Nacional de Agronomía 57: pp. 2423-2434
- Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A. y Vertessy, R. 2003. A critical review of paired catchments studies with reference to seasonal flows and climatic variability. Murray-Darling Basin Commission and CSIRO, Camberra. 56 P
- Bruijnzeel, L. A., 2004. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment, 104: pp. 185-228
- Bruijnzeel, L. A., 1997. Hidrología de las plantaciones forestales en los trópicos. En: E.K.S. Nambiar and A.H. Brown (Eds.). Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. CSIRO, Camberra, Australia. 517 P.
- Bruijnzeel, L.A. y Vertessy, R.A., 2004. Impacts of forest management on streamflow.. En: Burley, J., J. Evans J.Y. Quist (Eds.) Encyclopedia of Forest Science. Elsevier, The Netherlands. pp. 358-366
- Empresas Publicas de Medellín (EPM), 1989. Estudio general de coberturas vegetales de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Medellín: EPM, Dirección de Planeación Unidad de Recursos Naturales. 42 P.
- Henao, M. y Restrepo, M., 2000. Estructuras de aforo y distribución de pequeños caudales. Trabajo de grado de Ingeniería Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 104 P.
- Hernández, L.C., 2005. Ciclo hidrológico y de nutrientes en la cuenca de la quebrada La Murciélagos, Piedras Blancas (Antioquia). Trabajo de Grado de Ingeniería Forestal, Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 93 P.
- Jaramillo, D.F., 1996. Algunos estudios sobre repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Trabajo de promoción a Profesor Titular, Instituto de Ciencias

- Naturales y Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 311 P
- Jones, J.A. y Swanson, F.J., 2001. Hydrologic inferences from comparisons among small basin experiments. *Hydrological Processes* 15, pp. 2363-2366
- Post, D. A. y Jones, J.A., 2001. Hydrologic regimes of forested, mountainous, headwater basin in New Hampshire, North Carolina, Oregon and Puerto Rico. *Advances in Water Resources* 24, pp. 1195-1210
- Ruiz s., O.A., Acosta, J.J. y León, J.D., 2005. Escorrentía superficial en bosques montanos naturales y plantados de Piedras Blancas, Antioquia (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 58: pp. 2635-2649
- Tangtham, N., 1994. The hydrological roles of forests in Thailand. TDRI (Thailand Development Research Institute) Quarterly Review 9 (3): pp. 27-32
- Walpole, R.E., Myers, R.H. y Myers, S.L., 1999. Probabilidad y estadística para ingenieros, 6<sup>a</sup> ed. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A. México. 752 P.
- Wilcox, B. P., 2002. Shrub control and streamflow on rangelands: A process based viewpoint. *Journal of Rangeland Management* 55: pp. 318-326
- Zar, J.H., 1984. Bioestatistical analysis. Department of Biological Sciences, Northern Illinois University. EEUU. 842 P.
- Yepes, A.P., Agudelo, E.A., Diaz, A.L., Hernandez, L.C., Luna, T.L., Vasquez, C. y Vélez, S., 2003. Línea de profundización en bosques y conservación ambiental, Piedras Blancas-Antioquia. Informe de práctica profesional de Ingeniería Forestal, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Zhang, L., Dawes, W. R. y Walker, G.R., 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. CRC for Catchment Hydrology. Technical Report 99/12, Canberra. Disponible en: <http://www.catchment.crc.org.au/pdfs/technical199912.pdf>.