

ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN BOSQUES MONTANOS NATURALES Y PLANTADOS DE PIEDRAS BLANCAS, ANTIOQUIA (COLOMBIA)

Oscar Andrés Ruiz Suescún¹; Juan José Acosta Jaramillo² y
Juan Diego León Peláez³

RESUMEN

En bosques montanos naturales de roble (*Quercus humboldtii* Bonpl.) y plantados de pino pátula (*Pinus patula* Schltdl. & Cham.) y ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.) de la región de Piedras Blancas, Antioquia (Colombia), fueron medidos los flujos de escorrentía superficial (ES) por un periodo de tiempo de 16 meses. Se implementaron parcelas cerradas de escorrentía superficial de 10 m de largo x 2 m de ancho, tanques colectores y sistemas de registro volumétrico. Los flujos fueron de 23,19 mm año⁻¹ (1,07 % de la precipitación) para la cobertura de roble; 35,13 mm año⁻¹ (1,61 % de la precipitación) para la cobertura de pino pátula y 230,64 mm año⁻¹ (11,05 % de la precipitación) para la cobertura de ciprés. Mediante análisis de componentes principales (ACP) se identificaron las relaciones existentes entre las variables hidrológicas y los flujos de ES, y por medio de análisis de regresión lineal múltiple se ajustaron modelos para los flujos de ES por cobertura en función de la precipitación, la precipitación en el bosque y la intensidad de lluvia promedio, variables que mostraron alta relación con la ES según el ACP.

Palabras claves: Escorrentía, suelos hidrofóbicos, *Quercus humboldtii*, *Pinus patula*, *Cupressus lusitanica*

ABSTRACT

SURFACE RUNOFF IN NATURAL MONTANE FORESTS AND FOREST PLANTATIONS IN ANTIOQUIA, COLOMBIA

In natural montane oak forests (*Quercus humboldtii* Bonpl.), in pine (*Pinus patula* Schltdl. & Cham.) and cypress (*Cupressus lusitanica* Mill.) plantations in Piedras Blancas, Antioquia (Colombia), surface runoff flows (SRF) were measured over 16 months. Runoff was measured using 10 m long x 2 m wide runoff bounded plots, collector tanks and a volumetric counter

¹ Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <oscararuiz9@yahoo.es>

² Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <jjacosta@unalmed.edu.co>

³ Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <jdleon@unalmed.edu.co>

system. SRF were 23,19 mm year⁻¹ (1,07 % of rainfall) for oak forest; 35,13 mm year⁻¹ (1,61 % of rainfall) for pine and 230,64 mm year⁻¹ (11,05 % of rainfall) for cypress plantations. Relationships between hydrological variables and SRF were identified by a principal components analysis (PCA). For each one of the stands, multiple regression analysis was used to fit models of SRF on rainfall, throughfall and mean intensity of rainfall, variables that, according to the PCA results, appeared highly related to SRF.

Key Words: runoff, hydrophobic soils, *Quercus humboldtii*, *Pinus patula*, *Cupressus lusitanica*

INTRODUCCIÓN

En general, para las coberturas forestales, ha sido reportada la ocurrencia de valores bajos de escorrentía superficial (ES) en contraposición a lo encontrado para condiciones de suelo desnudo o bajo cultivo limpio (Temple, 1972; Suárez, 1980; McGregor, 1980, Maene y Sulaiman, 1980; Morgan, 1986; Alegre; Felipe-Morales y La Torre, 1990; Moreno, 1994; Schwab; Fangmeier y Elliot, 1996; León, 2001). Sin embargo, aún bajo cubierta forestal, los valores de ES pueden ser inusualmente altos, como es el caso de suelos en que se ha desarrollado repelencia al agua por la descomposición del material orgánico de algunas especies de coníferas. La aparición de compuestos hidrofóbicos durante el proceso de descomposición del material orgánico proveniente de la vegetación, podría afectar significativamente la distribución y movimiento del agua lluvia en el suelo, una disminución de la infiltración y por lo tanto un aumento en la ES. El objeto de este estudio fue cuantificar los flujos de ES en tres coberturas boscosas de la región de Piedras Blancas, Antioquia, y determinar las relaciones entre tales flujos y las condiciones climáticas, edáficas y de cobertura vegetal imperantes.

MÉTODOS

Área de Estudio. La zona de estudio se localizó al oriente del departamento de Antioquia (Colombia), cuenca hidrográfica de la quebrada Piedras Blancas, a una altitud de 2.400 msnm, temperatura media anual de 14,9 °C, humedad relativa promedio anual de 82 % y precipitación media anual -período 1942-1997- de 1.698 mm⁴. Las condiciones climáticas señaladas corresponden a la zona de vida bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB) (Holdridge, 1987). Los suelos son derivados de ceniza volcánica, correspondiendo al orden Andisoles, sobre roca anfíbolita.

Métodos de campo. El estudio se desarrolló en el período 18/11/2002 y 13/03/2004, para una duración total de 16 meses. En bosques de roble (*Quercus humboldtii* Bonpl.), pino pátula (*Pinus patula* Schltdl. & Cham.) y ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.) se implementaron parcelas convencionales cerradas de escorrentía, a razón de tres parcelas para los bosques de pátula y ciprés y dos parcelas para el bosque de roble. Las características de los bosques se muestran en la Tabla 1.

⁴ Estación Chorrillos localizada a una altitud de 2.353 m. Información suministrada por Empresas Públicas de Medellín

Tabla 1. Caracterización de los rodales para las tres parcelas experimentales establecidas en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

Parcela	Edad* (años)	Árboles** (ha ⁻¹)	Diámetro promedio (cm)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)
Roble	Madura	358	15,90	17,26	166,40
Pátula	39	439	23,11	41,73	328,18
Ciprés	39	615	18,16	36,58	194,80

* Plantaciones establecidas en julio 1 de 1965, ** Árboles de diámetro ≥ 10 cm.

Fuente: Ramírez y Zapata, 2004

Las dimensiones de las parcelas de escorrentía fueron de 2 metros de ancho por 10 metros de largo, y se dispusieron en dirección de la pendiente. Fueron delimitadas por láminas de polietileno, colocadas de canto en la superficie del terreno, hasta una profundidad de 10 cm con respecto al suelo mineral, quedando sobre la superficie del terreno 15 cm. En la parte inferior de cada parcela, se colectó el flujo mediante una canaleta de 3 pulgadas de diámetro que transportaba el agua hasta un tanque plástico de 250 litros de capacidad. En las parcelas de ES ubicadas en la cobertura de ciprés, se implementó un sistema alternativo de registro volumétrico (Acosta, Ruiz y León, 2003), pues fue allí en donde se presentaron los mayores volúmenes de ES, y la capacidad de los tanques de almacenamiento era insuficiente ante eventos, incluso, de características moderadas. Adicionalmente se midió la profundidad de la capa de hojarasca en cada parcela de ES, la cual, en promedio, osciló entre 40 y 60 cm en roble, 35 y 40 cm en pátula y entre 5 y 10 cm en ciprés.

Se registró la precipitación semanal mediante pluviómetros de 6 pulgadas de diámetro construidos en PVC, y dispuestos 1 m sobre la superficie del terreno. Estos pluviómetros se localizaron tanto a condición de campo abierto para monitoreo de la precipitación incidente, como dentro de los bosques en estudio, para monitoreo de la precipitación interna (neta). Las variables de intensidad de la precipitación (máxima y media) fueron tomadas de la Estación Automática Chorrillos de EPM, localizada en inmediaciones del embalse de Piedras Blancas, previa evaluación del ajuste de sus datos con aquellos registrados en la vecindad de las parcelas para la cantidad total de la precipitación. Semanalmente fueron medidos los volúmenes recogidos en las parcelas de escorrentía y en los pluviómetros. Adicionalmente, con el fin de relacionar la humedad del suelo con la generación de ES, se instalaron en cada una de las parcelas de ES, a una profundidad correspondiente a la primera capa de suelo mineral, bloques de yeso con electrodos en acero inoxidable, a través de los cuales se registró el contenido de humedad, empleando un lector digital de humedad del suelo (Delmhorst modelo KS-D10).

Análisis estadístico. Se realizaron pruebas de comparación de medias; análisis de componentes principales (ACP) con el fin de explicar la estructura de varianzas y covarianzas existente entre las variables estudiadas (Lema, 2002; Johnson y Wichern, 1998) y análisis de regresión para la construcción de modelos por cobertura que permitieran relacionar los flujos de ES con aquellas variables que presentaron relaciones importantes con éstos y que fueron identificadas previamente mediante el ACP. Los programas informáticos empleados fueron Microsoft Excel, Statgraphics Plus 5.0 y SPAD 3.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros hidrológicos y flujos de escorrentía superficial. Las variables hidrológicas por cobertura medidas semanalmente durante el periodo de estudio se presentan en la Figura 1, en la que los flujos de escorrentía superficial (ES) corresponden a los promedios semanales por cobertura. Dado que las parcelas fueron establecidas en fechas diferentes, en el caso de pátula y roble no se tienen registros para las primeras semanas. Las parcelas de ciprés fueron las primeras en implementarse y comenzar el registro, con lo cual el gráfico correspondiente comprende datos desde la primera semana.

En todas las coberturas estudiadas y durante todo el rango de medición, los flujos de ES se comportaron siguiendo el patrón de lluvias, así, los picos en los flujos de ES se mostraron asociados a los de la precipitación, situación presentada asimismo para los eventos de baja magnitud. En la Figura 1, se aprecia cómo los flujos de ES en ciprés superaron ampliamente aquellos flujos generados en las otras dos coberturas. De conformidad con las pruebas estadísticas practicadas (Tablas 2 y 3), los valores promedio de los flujos de ES presentaron diferencias estadísticamente significativas al nivel de 5 % en todas las coberturas. En el caso de las varianzas, éstas no fueron estadísticamente diferentes para las coberturas de roble y pátula, caso contrario de la cobertura de ciprés, en donde se registraron diferencias con las demás, conforme puede además establecerse a partir de la observación de los flujos conjuntos de ES en la Figura 1. En términos generales, la observación de la Figura 1 permite identificar la similitud en la respuesta del flujo de ES entre las coberturas de roble y pátula, respecto a sus patrones de distribución temporal y sus relaciones con los eventos de precipitación y precipitación interna, mientras que el flujo de ES en ciprés presentó un comportamiento similar a la intensidad de la precipitación (I max, I med).

Tabla 2. Lámina de ES (promedio semanal en mm \pm error) y varianza por cobertura para las parcelas experimentales establecidas en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

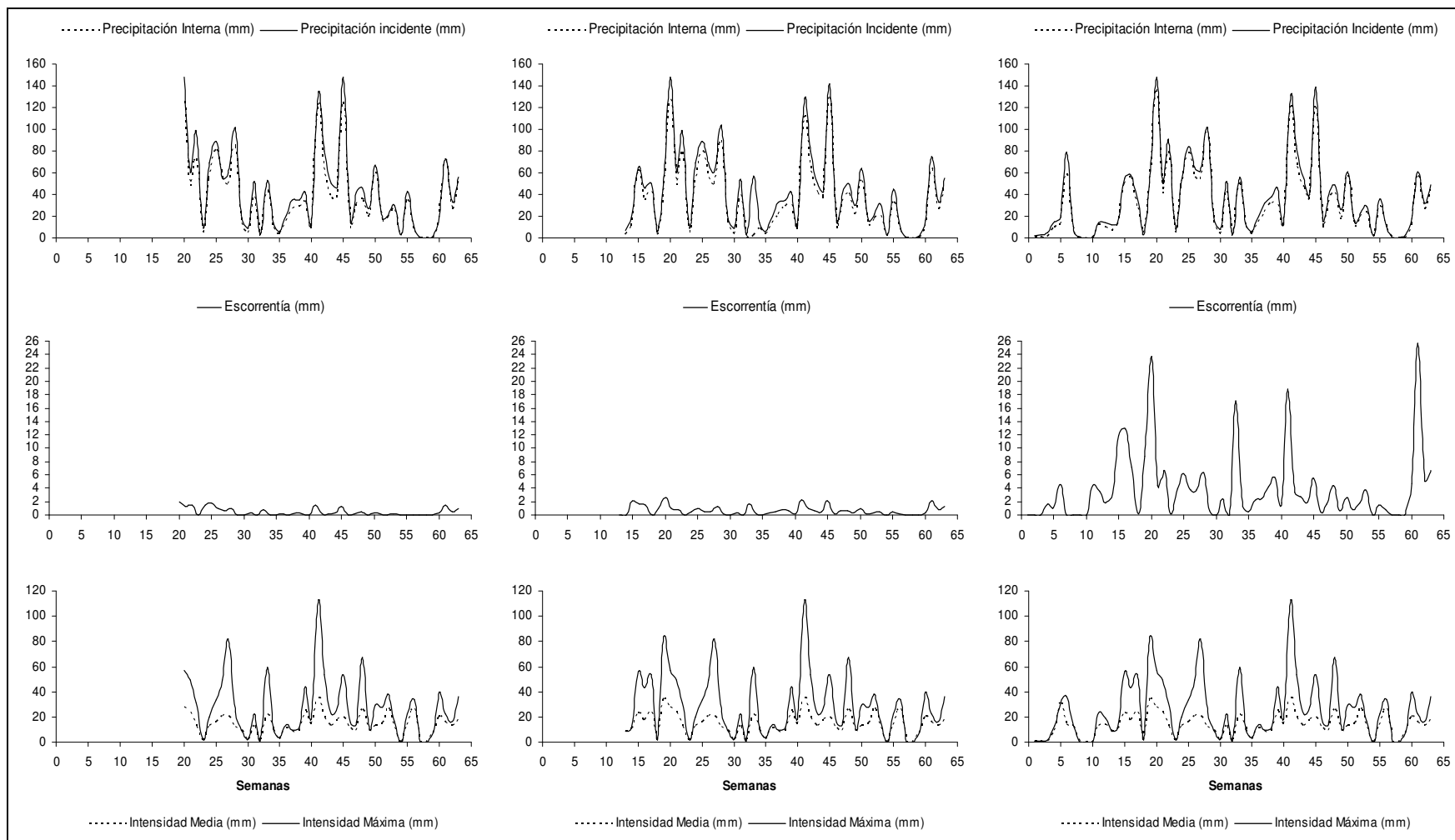
Parámetro	Roble	Pátula	Ciprés
ES	0,31 \pm 0,10	0,67 \pm 0,09	4,51 \pm 0,46
S ²	0,11	0,09	3,44

Tabla 3. Matriz de comparaciones de medias y varianzas para los flujos semanales de ES para las tres coberturas evaluadas en parcelas experimentales establecidas en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

		Roble	Pátula	Ciprés
Roble	Media		d	d
	Varianza		nd	d
Pátula	Media	d		d
	Varianza	nd		d
Ciprés	Media	d	d	
	Varianza	d	d	

d: diferencia estadísticamente significativa al 5 %

nd: diferencia estadísticamente no significativa al 5 %



Roble

Pátula

Ciprés

Figura 1. Caracterización hidrológica y flujo de ES para las tres coberturas de bosque montano, durante el período de estudio en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

Las magnitudes de los flujos de ES para roble, pátula y ciprés, fueron 23,190 mm año⁻¹ (1,07 % de la precipitación), 35,126 mm año⁻¹ (1,61 % de la precipitación) y 230,642 mm año⁻¹ (11,05 % de la precipitación), respectivamente. En la cobertura de ciprés se obtuvo la mayor razón precipitación interna/precipitación, (87,36 %), lo cual refleja una menor interceptación de la precipitación por el dosel, favoreciendo mayores volúmenes de agua para generar flujos de ES.

En general, los flujos de ES reportados para bosques naturales de la región tropical oscilan entre 0,0025 y 13,91 mm año⁻¹, encontrándose valores extremos de 126,2 mm año⁻¹ en Malasia (Malmer 1996), en donde la escorrentía solo alcanzó un 2,9 % de la precipitación; y de 187 mm año⁻¹ en un bosque amazónico colombiano (McGregor, 1980), en donde los valores de precipitación fluctuaron en 4000 y 4500 mm año⁻¹, por lo que la escorrentía sólo alcanzó un 4,4 % de ésta. Los reportes para bosques plantados de especies latifoliadas de la región tropical fluctúan entre 14 y 26,1 mm año⁻¹ (Narain *et al.*, 1998). Los valores obtenidos para la cobertura de roble se asemejan a los valores reportados.

Morales; Navar y Domínguez (2000), encontraron para plantaciones de *Pinus arizonica* en México valores de ES entre 3,7 y 9,6 mm año⁻¹ (sólo el 0,45 % de la precipitación), mientras que los reportes para las plantaciones de las regiones templadas varían ampliamente entre 0,65 y 742,4 mm año⁻¹. De estos, el menor valor (0,65), correspondiente a bosques de coníferas, representa escasamente 0,14 % de la precipitación incidente (Pardini; Gispert y Dunjo, 2003). En bosques de *Pinus pinaster* (Thomas; Walsh y Shakesby, 2000), también de la península Ibérica, han sido reportados valores bajos de ES (3,4 mm año⁻¹) que representan 0,2 % de las lluvias allí registradas.

Se destaca la gran diferencia existente entre los flujos de ciprés y pátula, siendo del orden de 6,5 veces mayores los de la primera cobertura forestal. Esta situación puede explicarse a partir de los mayores valores de la relación precipitación interna/precipitación, ya mencionados, y que condicionan en gran medida la cantidad de agua que alcanza el piso forestal y que potencialmente constituiría flujo de ES. Otros factores que podrían incluirse en la explicación de tales diferencias serían la arquitectura del dosel y la ocurrencia eventual de procesos de repelencia al agua más acentuados en esta cobertura.

Interrelaciones entre variables. Para identificar las posibles interrelaciones entre las variables de flujo de ES con las de precipitación y de contenido de humedad del suelo, se practicaron ACP y análisis de regresión, éste último conducente a modelación. Dado que los datos de intensidad y contenido de humedad del suelo fueron obtenidos para un periodo inferior de tiempo al empleado para las demás variables, en la aplicación del ACP se separaron los datos en dos grupos. El primer grupo comprendió las variables de ES, precipitación e intensidades; el segundo las variables de ES, precipitación y contenido de humedad del suelo.

ACP Grupo 1. Las variables involucradas en éste análisis fueron: I med: Intensidad media semanal (mm h⁻¹), I max: Intensidad máxima semanal (mm h⁻¹), R ES: Flujos de ES en roble (mm), P ES: Flujos de ES en pátula (mm), C ES: Flujos de ES en ciprés (mm), R PI: Precipitación Interna roble (mm), P PI: Precipitación Interna pátula (mm), C PI: Precipitación Interna ciprés (mm), R P: Precipitación roble (mm), P P: Precipitación pátula (mm), C P: Precipitación ciprés (mm). En la Tabla 4 se presentan los coeficientes de correlación lineal

calculados para cada par de variables. La representación gráfica del primer plano factorial del ACP para el primer grupo de variables se muestra en la Figura 2.

Todas las variables involucradas en el análisis presentaron relaciones lineales significativas (coeficientes de correlación con $P < 0,05$), siendo las correlaciones más bajas las encontradas para los flujos de ES en roble con las variables de intensidad de la precipitación. Dado que el ACP muestra que los dos primeros componentes principales estandarizados explican el 91,98 % de la estructura de varianzas y covarianzas de los datos, el primer plano factorial constituye el mejor plano de proyección para observar las relaciones de los datos originales.

En este primer plano factorial, se observa que todas las variables involucradas en el análisis están muy bien representadas dada su proximidad al círculo de radio uno (círculo de correlaciones). Las variables de intensidad y lámina de precipitación se agrupan de dos maneras: un primer grupo que corresponde al de las variables de Intensidad y otro, formado por aquellas variables relacionadas con la precipitación y precipitación interna. Entre tanto, las variables de los flujos de ES se proyectan entre ambos grupos, indicando de esta manera una alta dependencia de los flujos de ES con dichos grupos de variables. Esta relación ha sido ampliamente reportada tanto en investigaciones en regiones tropicales como templadas (Hartanto *et al.*, 2003; Pardini; Gispert y Dunjo, 2003; Alegre y Rao, 1996; Vacca *et al.*, 2000; McDonald; Healey y Stevens, 2002; Ferreira *et al.*, 2000; Fujieda *et al.*, 1997; Gautam; Watanabe y Saegusa, 2000; Bergkamp, 1998; Vahrson y Cervantes, 1991).

Tabla 4. Matriz de correlación para las variables de ES y precipitación en cada una de las coberturas estudiadas establecidas en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia). *

	Imed	Imax	R ES	P ES	C ES	RPI	PPI	CPI	R P	P P	C P
Imed	1	0,9	0,5	0,67	0,66	0,63	0,57	0,62	0,6	0,62	0,63
Imax		1	0,54	0,7	0,67	0,69	0,61	0,68	0,66	0,67	0,69
R ES			1	0,74	0,7	0,85	0,81	0,83	0,84	0,85	0,82
P ES				1	0,88	0,92	0,85	0,93	0,92	0,91	0,93
C ES					1	0,74	0,62	0,76	0,73	0,73	0,75
RPI						1	0,97	0,99	0,99	0,99	0,99
PPI							1	0,97	0,97	0,97	0,97
CPI								1	0,99	0,99	0,99
R P									1	0,99	0,99
P P										1	0,99
C P											1

*: Todas las correlaciones significativas ($P\text{-value} < 0,05$).

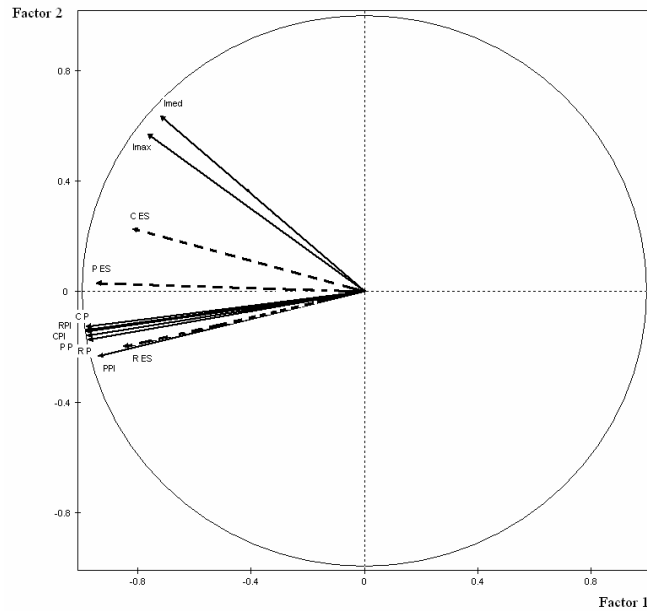


Figura 2. Primer plano factorial ACP1 para las variables de ES y precipitación en las tres coberturas estudiadas en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

De acuerdo con el comportamiento observado en la proyección de las variables de ES en el primer plano factorial, al parecer, los flujos de ES en ciprés, son los que mayor relación tienen con las variables de intensidad de la precipitación, al ubicarse más cerca de éstas, mientras que los flujos de ES de roble y pátula están más cercanos a las variables de lámina de precipitación y de precipitación interna. La cobertura de roble parece no tener una relación muy fuerte con las variables de intensidad, pues su vector característico, se encuentra muy distante y formando un ángulo casi perpendicular con ellas.

Según lo anterior, los comportamientos de los flujos de ES pueden estar influenciados diferencialmente por las características inherentes de cada cobertura vegetal, tales como profundidad de la capa de hojarasca y presencia de productos derivados del proceso de descomposición del material orgánico en plantaciones forestales de coníferas, caracterizados por grados muy severos de repelencia al agua, de conformidad con los resultados obtenidos por Jaramillo *et al.* (1997) en cercanías a la zona de estudio, para el caso de tales plantaciones. De hecho Arbeláez *et al.* (2004) realizaron en las coberturas vegetales del presente estudio, una evaluación de la persistencia de repelencia al agua mediante el método de WDPT (Water Drop Penetration Time: tiempo de penetración de una gota en el suelo), encontrando valores –en condiciones reales- mayores de 1800 segundos en ciprés, de 479,81 segundos en pátula, y de 223,78 segundos en roble. Aun cuando estos valores muestran que en las tres coberturas se presenta en grado diferencial la repelencia al agua por el suelo, es notoria la acentuación del fenómeno en la cobertura de ciprés. El papel de la profundidad de la capa de hojarasca en el control de la velocidad y cantidad de los flujos de ES ha sido ampliamente reportado (Alegre y Rao, 1996; Hartanto *et al.*, 2003). En el caso de las coberturas de roble y pátula se tienen

profundidades y un nivel de desarrollo importante de este mantillo, lo cual puede explicar parcialmente los bajos volúmenes de ES en ellas registrados en comparación con los obtenidos en la cobertura de ciprés. En esta última el horizonte holorgánico es sumamente pequeño -5 cm en promedio- y muy compacto por la ocupación de raíces finas de manera intensiva, con lo cual, sumado al desarrollo de procesos de repelencia al agua, se ven favorecidas las condiciones para la ocurrencia de volúmenes altos de ES y una estrecha correlación con las intensidades de las lluvias. La situación descrita se encuentra por su parte reflejada a partir de las pruebas de comparación de varianzas (Tabla 3), según las cuales se presentan diferencias entre las parcelas de roble y pátula con respecto a la de ciprés.

ACP Grupo 2. Además de las variables incluidas en el ACP Grupo 1, ya descritas, fueron incorporadas en el ACP Grupo 2 las de contenido de humedad del suelo en la parcela de roble (R CHS), contenido de humedad del suelo en la parcela de pátula (P CHS) y contenido de humedad del suelo en la parcela de ciprés (C CHS). La representación gráfica del primer plano factorial del ACP para el segundo grupo de variables se muestra en la Figura 3.

De la matriz de correlación (Tabla 5) se desprende que para el grupo de variables de contenido de humedad del suelo, no existe una relación lineal significativa con otras variables dado que sus coeficientes de correlación están asociados a valores $P > 0,05$. El ACP muestra que con dos componentes principales se logra explicar el 92 % de la variación total, por lo tanto el primer plano factorial proporciona una clara visión del comportamiento de la nube de datos original. En él se observa que las variables diferentes a las de los flujos de ES se agrupan en dos: de nuevo un grupo formado por las variables de precipitación y precipitación interna y un segundo grupo que integra las variables de contenido de humedad del suelo. El grupo de variables de ES presenta una fuerte correlación con el grupo de variables de precipitación y precipitación interna; sin embargo, ambos grupos no parecen presentar alguna relación lineal con el grupo de variables de contenido de humedad del suelo pues se encuentran en dirección casi perpendicular a él y a una distancia considerable.

Tabla 5. Matriz de correlación para las variables de ES, precipitación y contenido de humedad del suelo en cada una de las coberturas estudiadas en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

	R ES	P ES	C ES	R PI	P PI	C PI	R P	P P	C P	R CHS	P CHS	C CHS
R ES	1	0,96	0,82	0,84	0,82	0,79	0,8	0,8	0,77	-0,22*	0,01*	-0,22*
P ES		1	0,77	0,93	0,91	0,9	0,9	0,91	0,88	-0,07*	0,19*	-0,03*
C ES			1	0,53	0,48	0,45	0,47	0,48	0,42	-0,41*	-0,1*	-0,33*
R PI				1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,13*	0,3*	0,19*
P PI					1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,19*	0,33*	0,24*
C PI						1	0,99	0,99	1	0,2*	0,35*	0,27*
R P							1	0,99	0,99	0,19*	0,34*	0,25*
P P								1	0,99	0,2*	0,35*	0,26*
C P									1	0,21*	0,36*	0,29*
R CHS										1	0,78	0,9
P CHS											1	0,82
C CHS												1

*: Correlaciones no significativas ($P\text{-value} > 0.05$)

Una consecuencia de la hidrofobicidad de suelos (Lavabre; Tórres y Cernesson, 1993) es la reducción de la capacidad de infiltración del suelo, e incremento de los flujos superficiales, además de la creación de una capa seca hidrofóbica bajo la capa húmeda de horizonte orgánico. Bajo estas condiciones es el proceso de hidrofobicidad el que potencialmente regula los movimientos de agua en superficie antes que el contenido de humedad antecedente. Ferreira *et al.* (2000) no encontraron relación entre los flujos de ES y el contenido de humedad del suelo en un bosque de eucalipto establecido sobre suelos que presentaban hidrofobicidad en la época de verano, en Portugal. Además, Acosta, Ruiz y León (2003) reportaron un alto coeficiente de ES para coberturas de ciprés de 15,96 % durante una época seca en la zona de estudio, respaldando así el supuesto carácter hidrofóbico del suelo. Por el contrario, en zonas donde no se reporta hidrofobicidad, el contenido de humedad del suelo es muy importante y además se relaciona fuertemente con los flujos de ES, y los eventos de precipitación, tal y como lo encontraron Gautam; Watanabe y Saegusa (2000), en bosques mixtos de Japón, y Malmer (1996) en bosques lluviosos tropicales de Malasia.

Modelación. Si bien se requiere de un período más prolongado en el tiempo para fines de modelación del fenómeno aquí estudiado, se presentan a continuación (Tabla 6) los modelos de mejor ajuste estadístico obtenidos para cada una de las coberturas monitoreadas, dado que se consideran un aporte significativo en la materia, en vista de la evidente escasez de reportes en la literatura especializada. Estos respaldan parcialmente, la identificación de las relaciones existentes entre variables. El modelo ajustado para la cobertura de roble no incluye dentro de sus variables independientes alguna de las dos variables de intensidad (I max e I med), caso contrario de los modelos ajustados para pátula y ciprés.

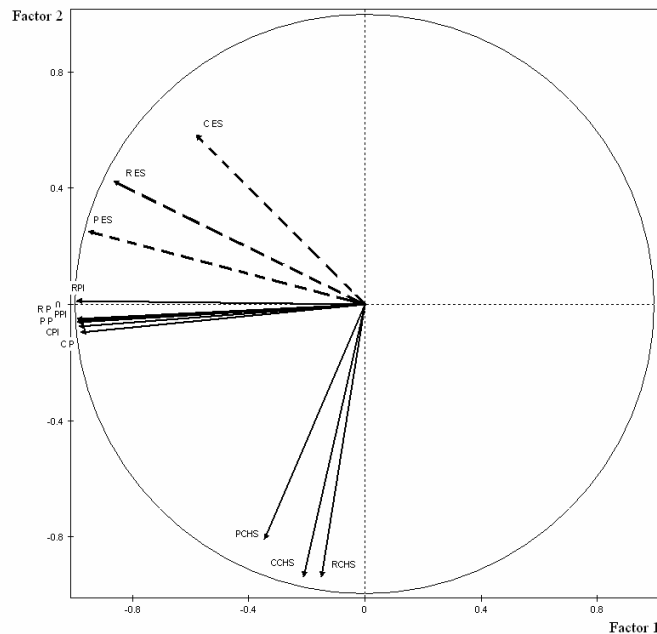


Figura 3. Primer plano factorial ACP2 para las variables de ES, precipitación y contenido de humedad del suelo en las tres coberturas estudiadas en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

Tabla 6. Modelos de regresión lineal múltiple ajustados para el flujo de ES por cobertura en bosques montanos naturales y plantados en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas (Antioquia, Colombia).

Parcela	Modelo	R ² (%)	D-W	N	Valor-P
Roble	$R ES = 0,0136599 * R P I$	85,05	0,74	34	0,00
Pátula	$P ES = 0,00621929 * I Max + 0,0116197 * P P$	88,93	1,22	41	0,00
Ciprés	$C ES = 0,0808919 * I Max - 0,271668 * C P + 0,36516 * C P I$	80,35	1,50	53	0,00

R²: Coeficiente de determinación, D-W: Estadístico Durbin-Watson., N: Tamaño muestral

En general los modelos presentaron un buen ajuste (valores altos de R², y Valores-P muy pequeños), pero los valores bajos del estadístico de Durbin-Watson en los modelos de roble y pátula indican la presencia de autocorrelación de los errores en el tiempo. Las consecuencias derivadas de esta situación son que los estimadores mínimo cuadráticos, aunque insesgados, ya no tienen varianza mínima; así, los intervalos de confianza y de predicción pueden perder validez (Lema 2003). Sin embargo, es normal que los datos de este estudio tengan este comportamiento debido a que éstos no se presentan aisladamente en el tiempo. Soluciones alternativas se tendrían en la modelación de los flujos de ES mediante la aplicación de Series Temporales –no aplicadas ya que requieren de un rango de medición más amplio en el tiempo (varios años) para identificar la estacionalidad y tendencia de la serie y lograr modelarla (Correa, 2000)- o en el empleo de redes artificiales neuronales como lo hicieron Gautam; Watanabe y Saegusa (2000) en análisis de flujos de ES en Tono, Japón.

CONCLUSIONES

Los menores flujos de ES se presentaron en bosques naturales de roble (*Quercus humboldtii* Bonpl.), seguidos por bosques plantados de pino pátula (*Pinus patula* Schltdl. & Cham.) y ciprés (*Cupressus lusitanica* Mill.), siendo sus valores 23,19 mm año⁻¹ (1,07 % de la precipitación), 35,13 mm año⁻¹ (1,61 % de la precipitación) y 230,64 mm año⁻¹ (11,05 % de la precipitación), respectivamente. Los valores anteriores corresponden con los reportados para bosques tropicales; caso de las coberturas de roble y pátula, a diferencia de la cobertura de ciprés en donde se registraron flujos de ES similares a los reportados para bosques plantados de la región templada.

En las plantaciones de coníferas (pátula y ciprés), los flujos de ES se relacionaron con las variables de volumen e intensidad de las lluvias, mientras que en la cobertura de roble éstos se relacionaron con las variables de volumen de la precipitación. Otros factores determinantes en la magnitud de los flujos de ES fueron aquellas características inherentes de cada cobertura vegetal, las coberturas con mayor profundidad de la capa de hojarasca presentaron menores valores de ES (roble y pátula), mientras que en la cobertura ciprés, donde la capa de hojarasca era delgada, los flujos de ES alcanzaron los mayores valores. El fenómeno de hidrofobicidad presentado en las plantaciones de la zona de estudio, altera el contenido de humedad, y de allí, en forma particular, su relación con los flujos de ES.

Algunos de los modelos matemáticos encontrados para explicar el comportamiento de los flujos de ES por cobertura, presentaron problemas de dependencia de las observaciones en el tiempo. Por lo tanto es necesario destacar que para alcanzar modelaciones efectivas de estos flujos, posiblemente sea conveniente el empleo de métodos de análisis de series temporales sobre datos recogidos por periodos de tiempo multianuales. Las investigaciones señaladas deberán acoger periodos mínimos de monitoreo de un año, de forma que se cubra un patrón climático completo, y una instrumentación que suministre la información clave para explicar satisfactoriamente los volúmenes de ES (v.g. pluviográfica).

Las parcelas cerradas de escorrentía empleadas en este estudio fueron un método relativamente simple y de bajo costo para monitorear los flujos de ES. Su instalación en campo es relativamente rápida y sus costos de mantenimiento mínimos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los profesores Álvaro Lema Tapias, Guillermo Correa Londoño y Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo; al Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín; al Laboratorio de Ecología y Conservación Ambiental, en particular a sus directores y a sus laboratoristas Gloria Estella Mazo Carvajal y José Vicente Betancourt Ospina. Al personal de la Escuela de Tecnología Forestal de Piedras Blancas: José Uriel Atehortúa Grajales, Aníbal Gutiérrez Vanegas y Luis Alberto Vanegas Ramírez; a NICRO Ltda. “Resistencias Industriales”; y a las Empresas Públicas de Medellín quienes contribuyeron al logro de los objetivos planteados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, J. J.; RUIZ, O. A. y LEON, J. D. Propuesta técnica alternativa para el registro de volúmenes de agua en parcelas de escorrentía superficial. p. 29-35. *En*: DÍEZ, M. C. y LEÓN, J. D., eds. Primer simposio forestal DCF 2003. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

ACOSTA, J. J.; RUIZ, O. A. y LEON, J. D. Propuesta técnica alternativa para el registro de volúmenes de agua en parcelas de escorrentía superficial. *En*: SIMPOSIO FORESTAL DCF 2003 (1: 2003: Medellín). Medellín: Universidad Nacional de Colombia (Medellin), C2003. p. 29-35.

ALEGRE, J. C., FELIPE-MORALES, C. y LA TORRE, B. Soil erosion studies in Peru. *En*: Journal of Soil and Water Conservation. Vol. 45, No.3 (1990); p. 417-420.

_____ y RAO, M. R. Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *En*: Agriculture, Ecosystem and Environment. Vol. 57 (1996); p. 17-25.

ARBELÁEZ, S. P. *et al.*. Estudio de suelos en Robledales (*Quercus humboldtii*) y plantaciones forestales (*Pinus patula* y *Cupresus lusitanica*) en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas. s.l.: s.n., 2004.

BERGKAMP, G. A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *En: Catena*. Vol. 33 (1998); p. 201-220.

CORREA, E. Series de Tiempo. Conceptos básicos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2000. 311 p.

FERREIRA, A. J. D *et al.* Hydrological implications of soil water-repellency in *Eucalyptus globulus* forest, north-central Portugal. *En: Journal of Hydrology*. Vol. 231-232 (2000); p.165-177.

FUJIEDA, M. *et al.* Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, Sao Pablo, Brazil. *En: Journal of Hydrology*. Vol. 196 (1997); p. 26-46.

GAUTAM, M. R.; WATANABE, K. and SAEGUSA, H. Runoff analysis in humid forest catchment with artificial neural network. *En: Journal of Hydrology*. Vol. 235 (2000); p. 117-136.

HARTANTO, H. *et al.* Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management. *En: Forest Ecology and Management*. Vol. 6210 (2003); p. 1-14.

HOLDRIDGE, L. R. Ecología basada en zonas de vida. San José, Costa Rica: IICA, 1987. 216 p.

JARAMILLO, J. *et al.* Extracción de sustancias hidrofóbicas de andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño, con solventes polares. *En: Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. Vol. 50, No.2 (1997); p. 19-43.

JOHNSON, R. A. and WICHER, D. W. Applied multivariate statistical analysis. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 816 p.

LAVABRE, J.; TORRES, D. S. and CERNESSON, F. Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *En: Journal of Hydrology*. Vol.142 (1993); p. 273-299.

LEMA T, A. Elementos de estadística multivariada. Medellín: Silvano, 2002. 430 p.

LEMA T, A.. Elementos estadísticos de dasimetría y medición forestal. Medellín: Silvano, 2003. 372 p.

LEÓN P, J. D. Estudio y control de la erosión hídrica. Medellín: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2001. 224 p.

MAENE, L.M. and SULAIMAN, W. Status of soil conservation research in peninsular Malaysia and its future development: *En: MORGAN. R. P. C., ed. Soil erosion and its control*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980. p. 202-219.

MALMER, A. Hydrological effects and nutrient losses of forest plantation establishment in tropical rain forest land in Sabah, Malaysia. *En: Journal of Hydrology*. Vol. 174 (1996); p. 126-148.

M. A., HEALEY, J. R. and STEVENS P. A. The effects of secondary forest clearance and subsequent land-use on erosion losses and soil properties in the Blue Mountains of Jamaica. *En: Agriculture Ecosystems and Environment*. Vol. 92 (2002); p.1-19.

McGREGOR, D. F. M. An investigation of soil erosion in the Colombian rain forest zone. *En: Catena*. Vol. 7 (1980); p. 265-273.

MORALES, H. A., NAVAR, J. and DOMÍNGUEZ, P. A.. The effect of prescribed burning on surface runoff in a pine forest stand of Chihuahua, Mexico. *En: Forest Ecology and Management*. Vol.137 (2000); p. 199-207.

MORENO, M. Balances de agua y nutrientes en rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd.) de la vertiente salmantina de la Sierra de Gata. Salamanca, 1994. 470 p. Tesis. Universidad de Salamanca. Facultad de Biología.

MORGAN, R. P. C. Soil erosion and conservation. New York: Longman, 1986. 385 p.

NARAIN, P. *et al.* Agroforestry for soil and water conservation in the western Himalayan Valley Region of India 1.: runoff, soil and nutrient losses. *En: Agroforestry Systems*. Vol.39 (1998); p. 175–189.

PARDINI, G., GISPERT, M. and DUNJO, G. Runoff erosion and nutrient depletion in five Mediterranean soils of NE Spain under different land use. *En: The Science of the Total Environment*. Vol. 309, No.1-3 (2003); p. 213-224.

RAMIREZ C., J. A. y ZAPATA D, C. M. Producción de hojarasca en bosques de *Quercus humboldtii*, *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica* de la Cordillera Central, Colombia. Medellín, 2004. 80 p. Trabajo de Grado (Ingeniería Forestal). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

SCHWAB G. O.; FANGMEIER, D. D. and ELLIOT, W. J. Soil and water management systems. New York: John Wiley, 1996. 371 p.

SUÁREZ D, C. F. Conservación de suelos. San José de Costa Rica: IICA, 1980.315 p.

TEMPLE, P. Measurements of runoff and soil erosion at an erosion plot scale with particular reference to Tanzania. *En: Geografiska Annaler*. Vol.54-A (1972); p. 203-220.

THOMAS, A. D., WALSH, R. P. D. and SHAKESBY, R. A. Solutes in overland flow following are in eucalyptus and pine forests, northern Portugal. *En: Hydrological Processes*. Vol.14 (2000); p. 971-985.

VACCA, A., *et al.* Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardina (Italy). *En: Catena*. Vol. 40 (2000); p. 69-92.

VAHRSON, W. y CERVANTES, U. Tasas de escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal, Costa Rica. *En: Revista Interamericana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 41 (1991396); p. 402.