

EFFECTOS DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA REGULACIÓN HIDROLÓGICA DE MICROCUENCAS DE PÁRAMO

Rolando Célleri Alvear¹, Bert De Bièvre, Vicente Iñiguez
Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril s/n, Cuenca, Ecuador

Resumen

Una de las fuentes de agua más importantes de nuestro país son los páramos. Sin embargo poco o casi nada se conoce sobre los procesos hidrológicos que ocurren en estos ecosistemas de montaña. Adicionalmente hay sitios donde se han iniciado procesos de (re)forestación con especies forestales nativas y exóticas, desconociendo los efectos que se producirán. El estudio aborda la influencia de la cobertura vegetal en microcuencas de páramo partiendo del análisis de los datos de precipitación-escorrentía generados a partir de dos cuencas hidrográficas, con similares características geomorfológicas pero con diferente cobertura vegetal en zonas de páramo, que han sido monitoreadas durante 130 días. El modelo de reservorio lineal es aplicado para comparar la respuesta hidrológica de las dos microcuencas. Las constantes de tiempo utilizados por el modelo no presentan diferencias significativas, es decir que la respuesta en tiempo es similar en las dos microcuencas. El coeficiente de escorrentía para la cuenca con pajonal es de 0.50 y para la cuenca con pinos es 0.22. El caudal específico mínimo de la cuenca con pajonal es aproximadamente tres veces más alto con respecto a la cuenca con pinos. La influencia del pino sobre los suelos de páramo, se ve reflejada en una disminución en el contenido volumétrico de agua bastante marcada y con fuertes implicaciones en la hidrología de las zonas de páramo.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La provisión de agua como recurso vital es de suma importancia para el desarrollo de los pueblos.

Un adecuado manejo de los recursos hídricos a escala de cuenca hidrográfica debe estar sustentado por un profundo conocimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en ella (Beven, 1997).

Este desconocimiento ha llevado a muchas personas y organizaciones a alterar estos ecosistemas, ya sea para usarlos en la producción agropecuaria (Morocho et al., 2002) o forestal (Ponce 2000). Pensando que la (re)forestación con especies nativas ayudará a mantener los caudales en épocas de estiaje (como resulta en cuencas de media y baja montaña) se han sembrado árboles de diferentes especies en los pajonales, lo cual producirá efectos desconocidos, probablemente reduciendo la producción hídrica (Hofstede, 2000, 2001) al igual que ha ocurrido en otros países con ecosistemas similares al páramo (Bosch y Hewlett, 1982; Duncan, 1995; Putuhena y Cordery, 2000).

¹ rcelleri@gmail.com

Este proyecto se enmarca dentro de un programa de monitoreo de cuencas de páramo que se está llevando a cabo actualmente. En esta primera fase se encuentran monitoreadas 3 microcuencas de páramo: una inalterada y bien conservada con pajonales ubicada en la Cordillera Occidental, una degradada por las actividades agrícolas y otra con pajonales y ligeramente alterada en la Cordillera Real (Buytaert et al., 2002); además se monitorea otra microcuenca ubicada en un sitio de montaña a más baja altura.

En esta nueva fase se pretende monitorear dos nuevas microcuencas ubicadas en zonas de páramo con diferentes coberturas vegetales, preferentemente con pajonal y con especies exóticas (pino) para analizar los efectos hidrológicos de la cobertura vegetal.

Los resultados del proyecto permitirán tener un conocimiento más profundo de la hidrología de estos sitios de alta montaña, lo cual servirá como base para establecer políticas de manejo de páramos y cuencas hidrográficas.

El proyecto se enmarca dentro de las líneas de investigación de la Universidad de Cuenca en el área de Medio Ambiente y Recursos Naturales, subárea de Manejo de Recursos Hídricos Superficiales.

1.2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es contribuir a un correcto manejo y planificación de los recursos hídricos y naturales en cuencas hidrográficas de montaña mediante la cuantificación de la influencia de la cobertura vegetal sobre la hidrología de páramos.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Cuantificar las influencias de la cobertura vegetal y de los suelos en la contribución o regulación hidrológica de microcuencas de páramo.
- Difundir los resultados.

2. Materiales y métodos

2.1. Selección de las microcuencas de estudio

El presente estudio inició con la determinación de las microcuencas a ser sujetas de análisis. Dos microcuencas con diferente cobertura vegetal fueron identificadas por medio de una imagen satelital y fotografías aéreas que posteriormente fueron localizadas con precisión en la correspondiente visita de campo, las mismas que se encuentran en zonas de páramo. Estas microcuencas se ubican al noroeste de la ciudad de Cuenca, la carretera principal de acceso es la vía Cuenca-Molleturo-Naranjal, ver figura 1.

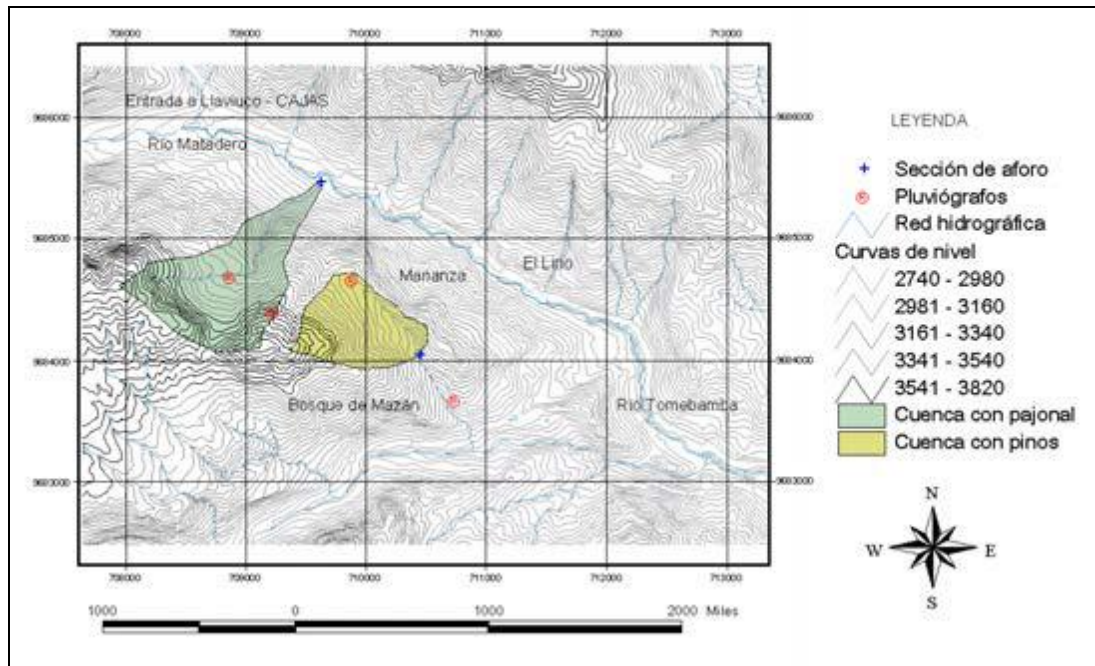


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio y de las estaciones de medición

Las características principales de estas dos microcuencas se especifican en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las dos microcuencas que fueron monitoreadas y modeladas para valorar el efecto de la cobertura vegetal

Cobertura vegetal:	Pajonal	Pinos
Área:	1.003 km ²	0.590 km ²
Uso del suelo	ganadería extensiva	pinos
Tipo de suelo:	Andosol	Andosol
Rango de altitud:	2980-3740 m	3240-3700 m

Para conocer el área exacta de cobertura vegetal predominante se realizó un levantamiento topográfico con G.P.S., presentando para la microcuenca con pajonal un 86.4 % del área de la misma como vegetación predominante y un 98 % de pinos en la otra microcuenca. En ambas cuencas se distingue áreas con bosque nativo secundario cuya extensión correspondería al área restante de cada microcuenca.

2.2. Equipamiento de las microcuencas

Las dos microcuencas con diferente cobertura vegetal, pajonal y pino, pero con similar geomorfología fueron cada una equipadas para monitoreo de la precipitación y el caudal.

Dos pluviógrafos cuya resolución es de 0.254 mm fueron instalados en cada una de las microcuencas (fig.2). En la salida de cada una de las cuencas, el caudal es medido cada 15 minutos en un vertedero triangular de cresta delgada equipado con un transductor de presión para medir el nivel aguas arriba de la estructura (fig.3). La ubicación geográfica de cada una de las estaciones mencionadas anteriormente se puede observar en la figura 1.



Figura 2. *Pluviógrafo “ RAIN COLLECTOR II “*



Figura 3. *Vertedero de cresta delgada y caseta para protección del sensor de nivel*

2.3. Datos registrados

2.3.1. Precipitación media

En las dos microcuencas se desarrolla un análisis de los datos de lluvia extraídos de las estaciones pluviométricas con el objetivo de obtener el volumen de precipitación requerido para el cálculo del coeficiente de escorrentía.

Se inicia el estudio de la precipitación determinándose primero los límites del área efectiva de cada estación, utilizando para esto el método de Thiessen. Luego se presenta los datos de lluvia diarios registrados en cada estación en el periodo de tiempo que han sido monitoreadas y se termina con el cálculo de la precipitación media en cada una de las cuencas.

El método de Thiessen establece que en cualquier punto de la cuenca la lluvia es igual a la que se registra en el pluviógrafo más cercano; luego la profundidad registrada

en un pluviógrafo dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección (Chow *et al.* 1994).

El procedimiento empleado es el siguiente, las estaciones se colocan en el mapa de la cuenca y se dibujan líneas que las conecten unas con otras, figura 4. Las mediatrices, o perpendiculares bisectrices de estas líneas, forman polígonos alrededor de cada estación. Los lados de cada polígono son los límites del área efectiva que se consideran para cada estación. El área mencionada para las estaciones instaladas en la zona (ver figura 1) se determinó utilizando el programa AutoCAD 2004.

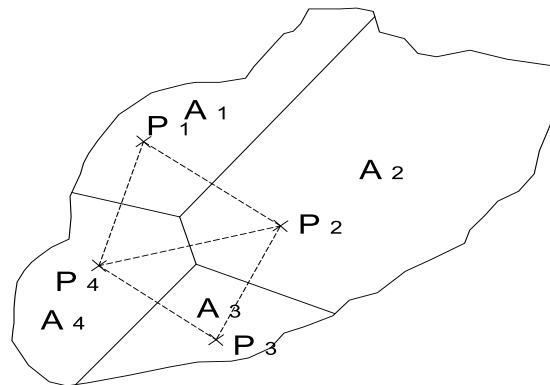


Figura 4. Método de Thiessen

2.3.2. Datos lluvia-escorrentía

Se determina la precipitación promedio cada 15 minutos, a partir de toda la resolución temporal registrada en las estaciones pluviométricas, indispensable para visualizar en un solo gráfico los datos de lluvia contra los de caudal, teniendo en cuenta que la descarga es registrada cada 15 minutos.

2.4. Indicadores del régimen hidrológico

Se hace uso de tres indicadores del régimen hidrológico, las constantes de tiempo de la regresión del reservorio lineal, el coeficiente de escorrentía y caudales mínimo. Cada uno de estos parámetros permitirán aprender sobre los procesos hidrológicos que ocurren en estas zonas de páramo donde la forestación con especies exóticas, pinos es analizado aquí, influyen sobre su hidrología. Finalmente se compara cual es la respuesta hidrológica a los eventos extremos de lluvia registrados en las dos microcuencas.

2.4.1. El concepto del reservorio lineal (Buytaert et al., 2004)

Con este indicador se pretende conocer cual es la respuesta hidrológica del caudal a la precipitación en cada una de las microcuencas. Principalmente estudiar los flujos de agua predominantes en estas cuencas: escorrentía superficial, flujo de agua entre la capa de suelo y el material parental ó roca y el flujo de agua en el suelo; éstos

son representados como “reservorios”, cuya relación entre el almacenamiento y la descarga o caudal es lineal. Comparando los resultados entre las dos microcuencas podremos observar la influencia de la cobertura vegetal.

El concepto del reservorio lineal está basado en el análisis de las curvas de recesión de los hidrogramas de drenaje, y ha sido usado ampliamente para la descripción de la respuesta de cuencas hidrográficas (Hornberger et al., 1991; Dingman, 1994; Sivapalan et al., 2002). Esto puede ser descrito como:

$$Q = k \cdot S \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -Q \quad (2)$$

Donde Q es la descarga o caudal, S es la cantidad de agua almacenada, t el tiempo y k es una tasa constante. Con $k = 1 / T$, las ecuaciones anteriores pueden combinarse en:

$$Q = Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \quad (3)$$

con Q_0 siendo el caudal al $t = 0$. La ec.3 puede ser linealizada en un gráfico semi-logarítmico:

$$\ln Q = \ln Q_0 - \frac{t}{T} \quad (4)$$

La tasa constante k , la misma que es el inverso de la constante de tiempo T , es un índice de la velocidad con la cual un reservorio drena. Matemáticamente, T es el tiempo en el cual el caudal Q cae a un valor de Q_0/e ó $0.37Q_0$. Así, T indica la capacidad de amortiguamiento de un reservorio o la lentitud de liberación del agua. Por lo tanto, este es un buen estimador para la capacidad de amortiguamiento de un reservorio de almacenamiento, S , que es justamente motivo de nuestro estudio.

Muy pocas cuencas pueden ser descritas usando el modelo del reservorio lineal como tal por la diversidad de tipos de “reservorios” dentro de la cuenca, tales como almacenamiento de agua superficial, retención de agua en el suelo, intercepción por vegetación, lagos y agua subterránea. Todos tienen sus propias constantes de tiempo y algunos no cumplen completamente la hipótesis de linealidad, su comportamiento en la recesión no es lineal, cuando se grafica en una escala semi-logarítmica. Sin embargo, en pequeñas cuencas, algunos de estos reservorios son más importantes que otros. En las cuencas examinadas aquí, las fuentes de aguas subterráneas y lagos no están presentes por la geomorfología propia de esta zona, de hecho toman mayor importancia los reservorios de suelo y la posibilidad de intercepción por la vegetación, en el caso de la microcuenca con pinos.

Por lo tanto, el modelo empleado asume que las cuencas pueden ser consideradas como una cadena paralela de reservorios con diferentes valores de T. Cuando estos valores de T difieren sustancialmente, interferencias pueden ser despreciables, y el resultado de la regresión a la curva de recesión es una cadena temporal de descargas desde diferentes reservorios (fig.5). Estos sectores lineales pueden ser identificados en un gráfico semi-logarítmico de las curvas de recesión, cada uno está representando por un reservorio teórico con una constante de tiempo particular T que puede ser determinada directamente desde la pendiente de la parte lineal (fig.6):

$$\frac{1}{T} = - \frac{\delta(\ln Q)}{\delta t} \quad (5)$$

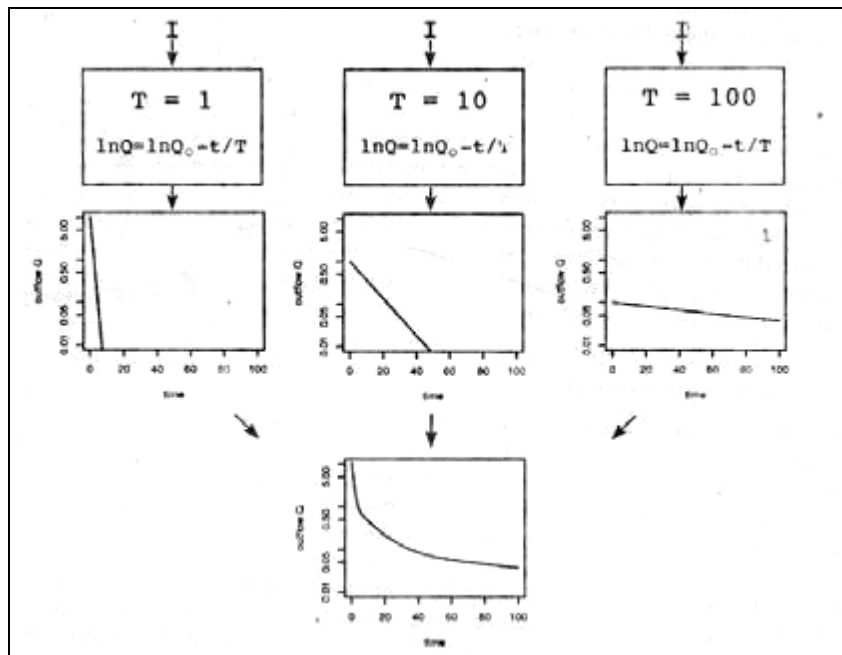


Figura 5. Representación conceptual del reservorio lineal. Cada reservorio está caracterizado por una constante de tiempo T en paralelo con otros reservorios para crear la descarga final.

En la figura 6, se presenta un hidrograma en escala semi-logarítmica de la microcuenca Testigo, en el cual tres partes lineales de la curva de recesión son claramente visibles.

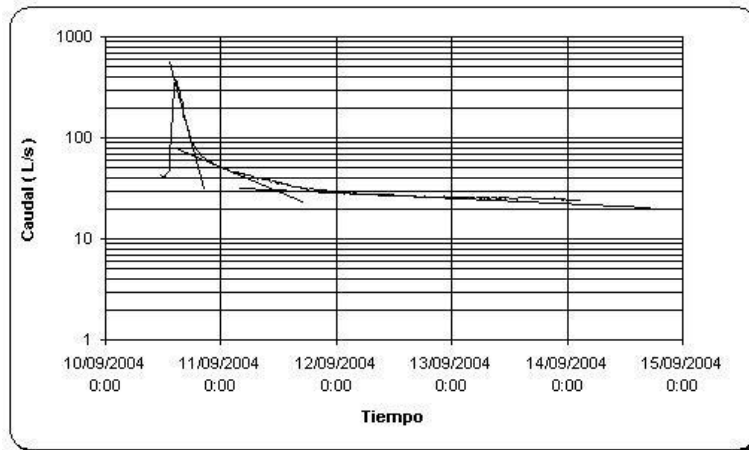


Figura 6. En un gráfico semi-logarítmico de una rama del hidrograma de una pequeña cuenca, se pueden distinguir secciones lineales, indicando la relativa importancia de un particular reservorio en esta curva de recesión.

2.4.2. Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía se define como la relación entre el volumen de agua escurrido superficialmente a través de caudal en el río y el volumen de agua correspondiente a la precipitación, datos registrados para un mismo periodo de tiempo. Matemáticamente puede expresarse como:

$$C = \frac{\text{vol.caudal}}{\text{vol.precipitación}} \quad (6)$$

El coeficiente de escorrentía permite conocer cual es la evapotranspiración promedio en cada una de las cuencas esto se desprende fácilmente al establecer el balance hídrico conocidos, como es en este caso, la precipitación y el caudal. La variación de este coeficiente implicaría un aumento o disminución de los otros dos elementos del balance, precipitación y caudal, y por lo tanto un cambio en la evapotranspiración con lo cual estableceríamos una parte importante del régimen hidrológico.

2.4.3. Caudales mínimo

Conocer la producción hídrica de una cuenca en los diferentes meses del año es un aspecto de vital importancia para un manejo sostenible. Con los datos de caudal registrados durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre, se pretende conocer y comparar la producción hídrica de cada una de las microcuencas. Específicamente se estudia los caudales mínimo correspondiente a este periodo. Como parámetro se utiliza el caudal específico, q , es decir la descarga expresada por superficie de la cuenca, ecuación 7.

$$q = \frac{Q}{A} \quad (7)$$

Donde:

q, caudal específico en $(L \cdot s^{-1}) \cdot Ha^{-1}$.

Q, caudal en $L \cdot s^{-1}$

A, área de la cuenca en Ha

2.5. Hidrofísica de suelos. Curva de retención de agua

La curva de retención de agua en el suelo permite conocer el contenido volumétrico de agua en el suelo para un determinado potencial matricial. Esta curva puede ser determinada sobre la base de un conjunto de mediciones puntuales o discretas determinados en laboratorio o en el campo. Para el presente estudio se tomaron en el campo muestras inalteradas en anillos de Kopecky cuyo volumen es de 100 cm^3 en cada una de las microcuencas. Trece anillos en total fueron analizados en el laboratorio con el Multistep (CIP / INIAP, 1998) y adicionalmente se tomaron muestras alteradas para el análisis con el aparato de membrana (CIP / INIAP, 1998). Posteriormente se realizó el ajuste de los datos al modelo de Van Genuchten, para lo cual se utilizó el programa RTEC code (van Genuchten et al.,1991)

El modelo se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{1}{1 + (\alpha \cdot |h|)^n} \right)^m \quad (8)$$

Donde:

θ , contenido volumétrico de humedad (m^3/m^3)

θ_r , contenido volumétrico de humedad residual (m^3/m^3)

θ_s , contenido volumétrico de humedad en la saturación (m^3/m^3)

h, potencial matricial (sin dimensiones, pero expresado en cm de H₂O)

α , n y m, parámetros adimensionales

Si, como propuso van Genuchten,

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{para } n > 1 \quad (9)$$

la ecuación (8) contiene 4 parámetros independientes, los cuales son estimados a partir de las mediciones realizadas en laboratorio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DATOS REGISTRADOS

3.1.1 Precipitación media

En el anexo 1 se presenta la precipitación registrada en cada uno de los cuatro pluviógrafos instalados en la zona de estudio, ver figura 1. Este mapa permite designar de izquierda a derecha las estaciones de lluvia con los siguientes nombres: PT1 = pluviógrafo testigo 1, PT2 = pluviógrafo testigo 2, PP1 = pluviógrafo pinos 1, PP2 = pluviógrafo pinos 2 respectivamente.

Lamentablemente el pluviógrafo pinos 2, presentó daños en el mes de septiembre. Por lo cual no fue considerado en los cálculos de precipitación media de las microcuencas y tampoco para el coeficiente de escorrentía. En la tabla 2, se presenta la precipitación total registrada en cada unos de los pluviógrafos.

Tabla 2. Precipitación total registrada para el periodo 30/Mayo/2004 – 09/Octubre/2004

Pluviógrafo	PP1	PP2	PT1	PT2
Precipitación total (mm)	300.0	185.4	338.3	328.9

Comparando la precipitación total registrada entre los tres pluviógrafos que han permanecido sin problemas podemos ver que no existe mayor diferencia, la relativa cercanía de los tres pluviógrafos puede ser la causa de este resultado.

El primer paso para determinar la precipitación media en las microcuencas fue el cálculo del área efectiva de las estaciones consideradas para el análisis, ver figura 7.

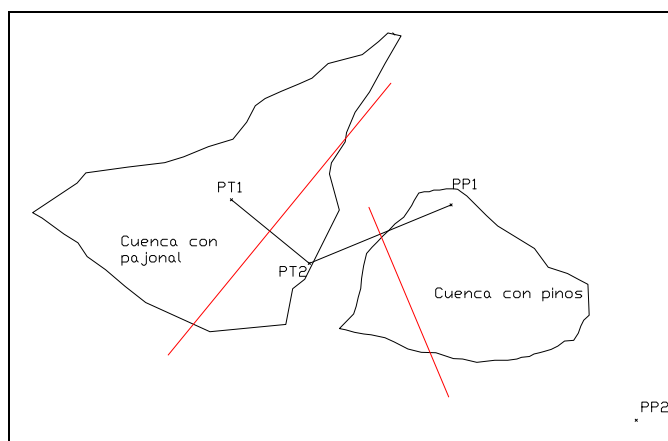


Figura 7. Polígonos de Thiessen

Determinada el área efectiva de cada estación la precipitación media o promedio en cada una de las microcuencas se presenta en los gráficos 1 y 2.

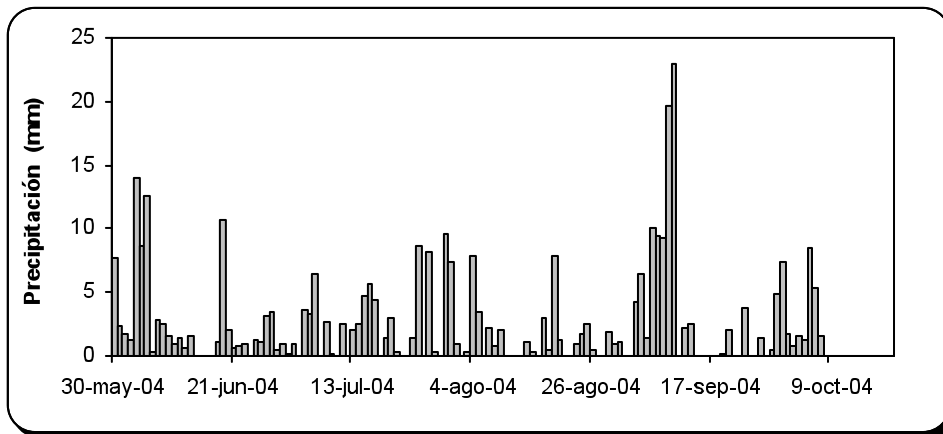


Gráfico 1. *Precipitación diaria promedio microcuenca con pajonal*

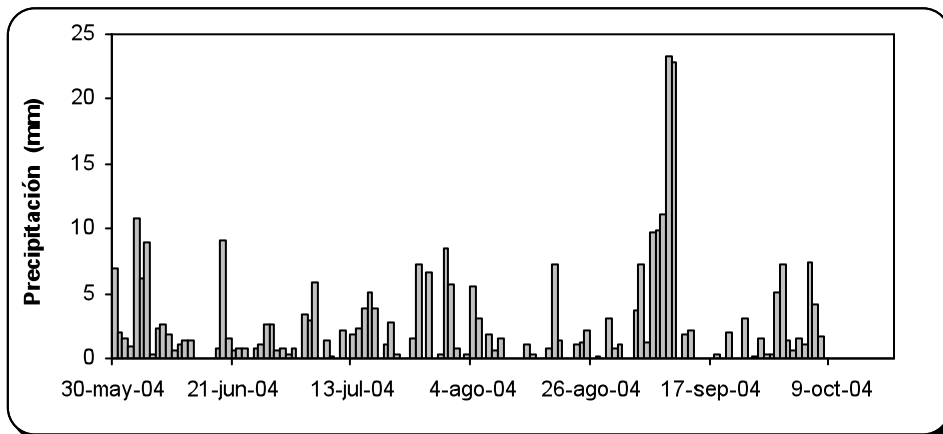


Gráfico 2. *Precipitación diaria promedio microcuenca con pinos*

Como se puede observar de los gráficos 1 y 2, la precipitación media es muy similar para las dos microcuencas. Otra característica es la constante precipitación registrada en casi todos los días en la zona de estudio.

3.1.2. Datos de Lluvia-Escorrentía

El patrón de lluvia-escorrentía superficial es de importancia para entender los procesos físicos que se dan en este tipo de cuencas de montaña. Lo anterior se visualiza y comprende mejor con los gráficos 3, 4 y 5.

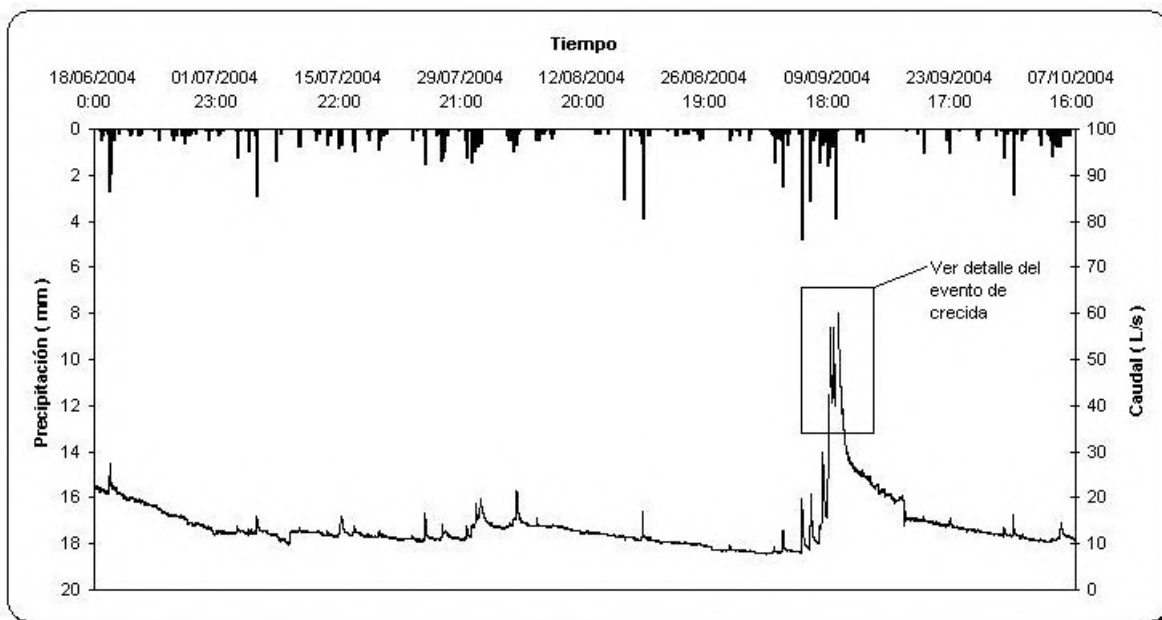


Gráfico 3. *Lluvia-Escorrentía microcuencia con pajonal*

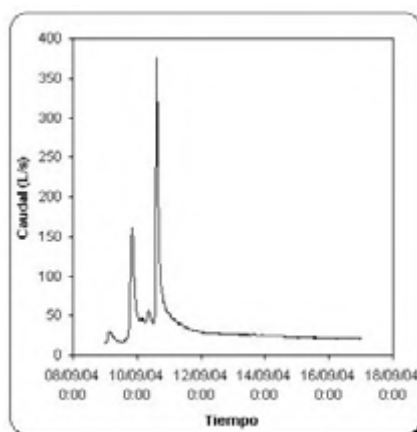


Gráfico 4. *Detalle del evento de crecida*

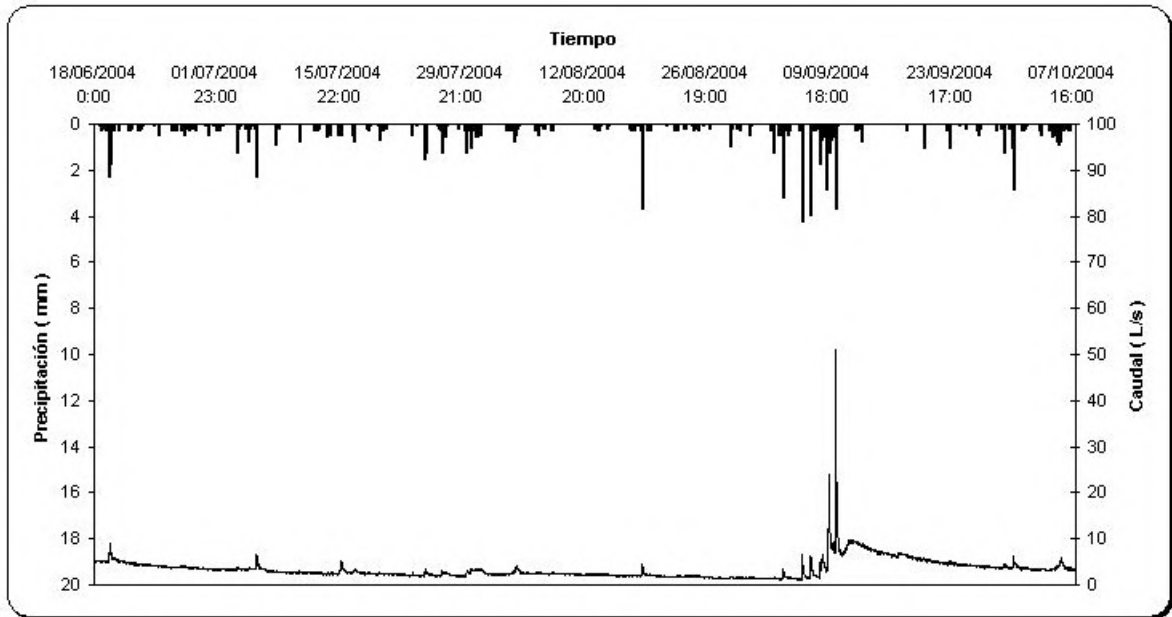


Gráfico 5. *Lluvia-Escorrentía microcuenca con pinos*

De los gráficos anteriores la característica más distinguible es la diferencia en el caudal base, ampliamente superior para la cuenca con pajonal en contraste con la cuenca con pinos.

3.2. Reservorio Lineal

En cada una de las microcuencas se estudiaron eventos de crecida para determinar las constantes de tiempo T. Como se puede observar en la figura 6, éste presenta tres segmentos lineales claramente visibles en la curva de recesión, los mismos que representarían tres reservorios:

- Escorrentía superficial (T1)
- Flujo de agua en el borde entre el suelo y el material parental o roca (T2)
- Retención de agua y flujo en el perfil del suelo (T3)

En la tabla 3 se presenta los resultados obtenidos del análisis de las curvas de recesión en las dos microcuencas.

Tabla 3. *Constantes de tiempo T del modelo de reservorio lineal*

# PICO	CUENCA CON PAJONAL			CUENCA CON PINOS				
	FECHA	T1(h)	T2(h)	T3(h)	FECHA	T1(h)	T2(h)	T3(h)
1	26/03/2004	6.6	47.2	521.9	19/06/2004		23.6	681.2
2	12/04/2004	3.1	15.0	108.2	06/07/2004		18.5	472.3
3	14/04/2004	4.3	31.8	153.7	16/07/2004		16.3	129.0
4	25/07/2004		14.2	766.4	25/07/2004		20.3	242.7
5	05/08/2004		40.1	1154.6	05/08/2004		41.1	1178.5
6	19/08/2004	9.0		1117.2	19/08/2004	7.7		1162.9
7	10/09/2004	9.4		688.3	06/09/2004	6.2	32.1	
8					07/09/2004	7.1	46.0	
9					10/09/2004	2.7	15.61	
10					06/10/2004		23.6	186.8

Para entender mejor los resultados se realiza un análisis de varianza para determinar estadísticamente si existen diferencias en los valores promedio de las tres constantes de tiempo, ver tabla 4.

Tabla 4. *Análisis de varianza para las constantes de tiempo del modelo de reservorio lineal*

	Cuenca con pajonal	Varianza	Cuenca con pinos	Varianza	Diferencia	P
T ₁ (h)	6.5	7.8	5.9	4.9	-8%	0.50
T ₂ (h)	29.7	218.5	26.4	120.5	-11%	0.10
T ₃ (h)	644.3	173970.5	579.1	198601.1	-10%	0.60

Estadísticamente no existen diferencias significativas entre los valores correspondientes a las tres constantes de tiempo estudiadas en las dos microcuencas, según se desprende del valor “p” (Mendenhall et al., 1995). Lo anterior implica que la capacidad de amortiguamiento de las dos microcuencas es la misma.

3.3. Coeficiente de Escorrentía (C)

Los coeficientes de escorrentía se determinaron para el periodo de tiempo que va desde el 18/Junio/2004 hasta el 07/Oct/2004 para cada microcuenca y también en forma mensual. Los resultados se presentan en las tablas 5 y 6 y gráfico 3.

Tabla 5. *Coeficientes de escorrentía periodo 18/Junio/2004 – 07/Octubre/2004*

Cuenca hidrográfica	Volumen (m ³)		Coef. Escorrentía
	Lluvia	Caudal	
con pajonal	277369.63	138952.94	0.50
con pinos	151008.72	33447.91	0.22

Tabla 6. *Coeficientes de escorrentía mensuales*

Cuenca con pajonal				
Meses:	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	TOTAL
VOLUMEN (m ³)				
LLUVIA	79744.45	40932.85	109212.68	229889.99
CAUDAL	32373.19	31815.88	47583.15	111772.22
Coef. Escorrentía	0.41	0.78	0.44	0.49

Cuenca con pinos				
Meses:	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	TOTAL
VOLUMEN (m ³)				
LLUVIA	40272.76	20236.54	66741.37	127250.67
CAUDAL	7443.57	5743.84	13028.57	26215.98
Coef. Escorrentía	0.18	0.28	0.20	0.21

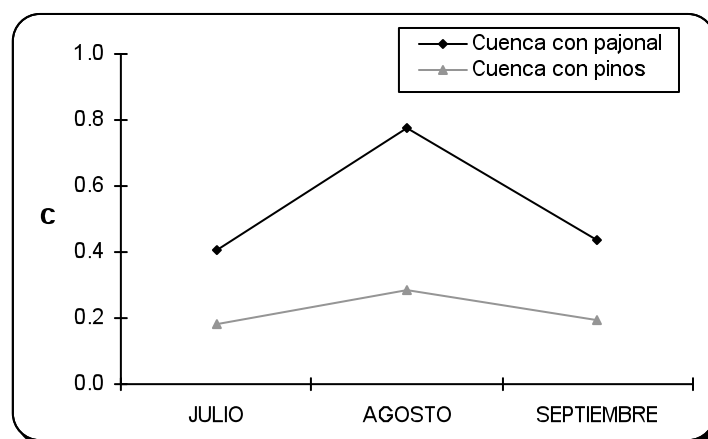


Gráfico 6. *Coeficientes de escorrentía*

Del gráfico 6 es evidente una diferencia en los valores del coeficiente de escorrentía para las dos microcuencas. El coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca con pajonal es más del doble de la cuenca con pinos, 0.50 y 0.22 respectivamente. Esto indica un mayor consumo de agua en los pinos, es decir mayor evapotranspiración.

3.4. Caudales mínimo

Una mayor producción hídrica se produce en la cuenca con pajonal en comparación con la cuenca con pinos como se puede observar en la tabla 7 y del gráfico 7, donde se disponen los resultados obtenidos para cada una de las microcuencas.

Tabla 7. Caudales específicos mínimos

Cuenca con pajonal				
Caudales específicos (L · s ⁻¹) · Ha ⁻¹	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
mínimo	0.133	0.096	0.083	0.077
Cuenca con pinos				
Caudales específicos (L · s ⁻¹) · Ha ⁻¹	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
mínimo	0.055	0.030	0.021	0.019

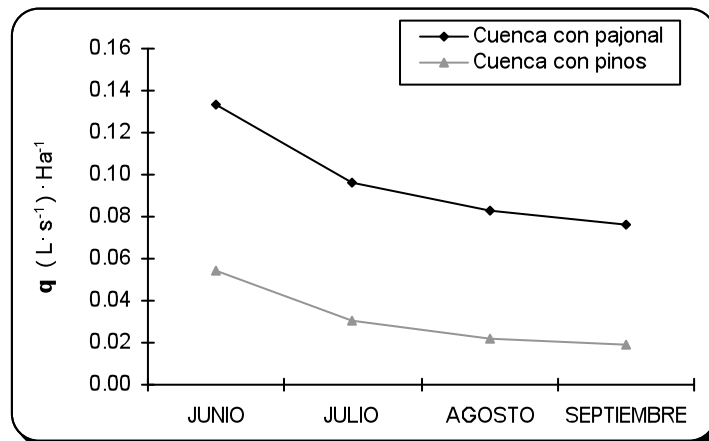


Gráfico 7. Caudales específicos mínimos

El caudal específico mínimo de la cuenca con pajonal es aproximadamente tres veces más alto con respecto a la cuenca con pinos, ver gráfico 7.

3.5. Respuesta a eventos extremos de lluvia

Durante el periodo de monitoreo un solo evento extremo de lluvia fue registrado en la zona de estudio. Los datos se presentan en el gráfico 8, junto con la respuesta hidrológica expresada en caudal de cada una de las dos microcuencas. El evento de lluvia duró 42 horas y la precipitación media total registrada es de 46.6 mm.

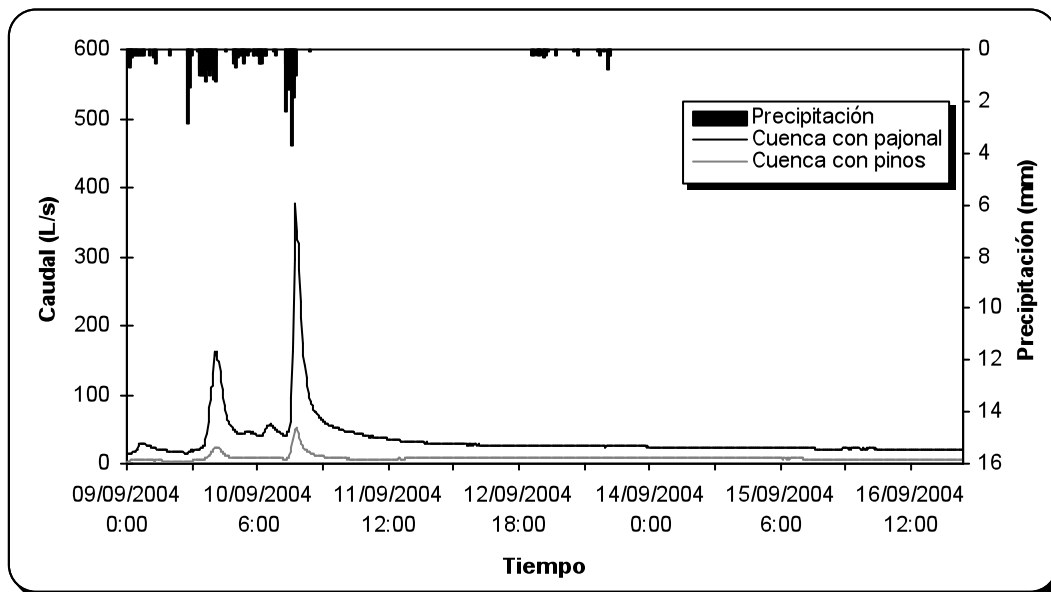


Gráfico 8. Comparación de la respuesta en caudal a eventos extremos de lluvia

Del gráfico 8, se distingue una similar respuesta en tiempo de cada una de las dos microcuencas, no así en volumen de escorrentía superficial.

3.6. Curva de retención de agua en el suelo

De los análisis de hidrofísica de suelos se desprenden importantes resultados. En la tabla 8 se presenta los resultados del ajuste al modelo de van Genuchten (parámetros) y en el gráfico 9 las curvas de pF obtenidas.

Tabla 8. Parámetros del modelo de van Genuchten y bondad de ajuste

Procedencia	θr	θs	α	n	m	Coefficiente de ajuste R ²
Bajo pajonal	0.38	0.759	0.001	1.544	0.352	0.93
Bajo Pinos (30 cm)	0.00	0.659	0.003	1.131	0.116	0.89
Bajo Pinos (45 cm)	0.00	0.706	0.093	1.065	0.061	0.90

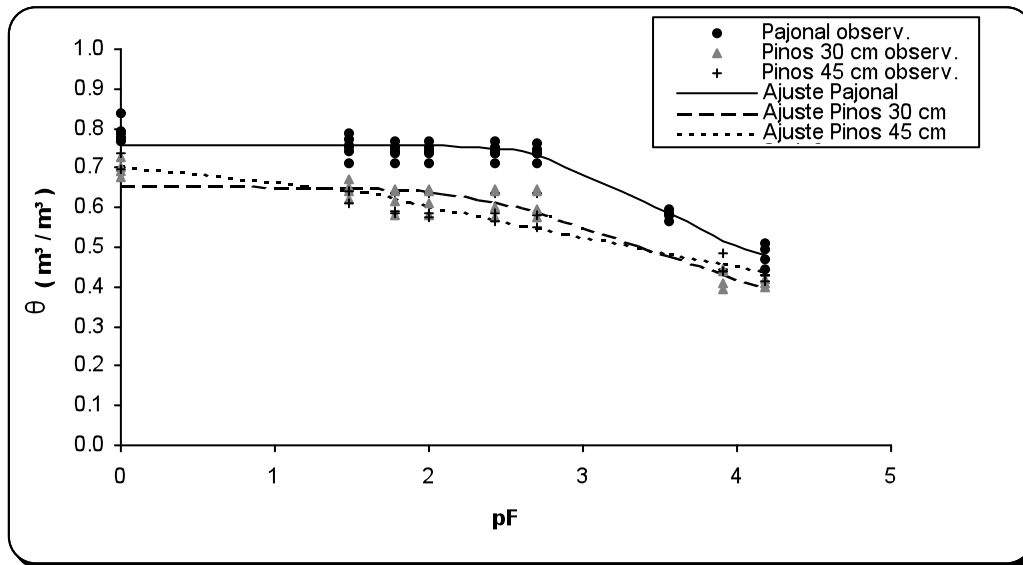


Gráfico 9. *Curvas de retención de agua en el suelo para los suelos bajo pajonal y bajo pinos*

Importantes diferencias se puede observar de las curvas de retención obtenidas para las dos microcuencas. Se distingue una apreciable disminución del contenido volumétrico de humedad para los suelos bajo pino.

CONCLUSIONES

Del análisis estadístico realizado para las constantes de tiempo de la regresión del modelo de reservorio lineal, no se desprende diferencias significativas, es decir que la respuesta en tiempo a un determinado evento de lluvia es similar en las dos microcuencas, en otras palabras los mismos procesos hidrológicos son los que están presentes.

El coeficiente de escorrentía promedio para la cuenca con pajonal es de 0.50 y para la cuenca con pinos es 0.22. Eso significa que el caudal que produce la cuenca con pinos es la mitad de lo que se produce en la cuenca testigo.

El caudal específico mínimo de la cuenca con pajonal es aproximadamente tres veces más alto con respecto a la cuenca con pinos. Esto se debe principalmente a mayor consumo de agua por evapotranspiración de parte de los árboles.

Una considerable disminución en el contenido volumétrico de agua en el suelo para cualquier valor de pF del suelo bajo pinos se observa del gráfico 9. La retención de agua bajo cobertura vegetal natural es ampliamente superior y permite entender mejor porqué el páramo y sus suelos principalmente son una fuente permanente de agua para las zonas bajas de las cuencas de montaña en la Sierra Ecuatoriana.

Sobre los suelos de páramo, los Andosoles, se comprueba una vez más su elevada capacidad de retención de agua, si se estudian algunos puntos característicos de la curva pF podemos ver que el contenido volumétrico de agua en el suelo en la saturación está entre el 80 % y 90 %. El punto de marchitez permanente alcanza valores alrededor del 50 %, valores que sin duda distan mucho de aquellos suelos denominados comunes.

La influencia del pino sobre estos suelos, se ve reflejada en una disminución en el contenido volumétrico de agua bastante marcada y con posibles implicaciones en la hidrología de las zonas de páramo.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca, con fondos del II Concurso de Proyectos de Investigación. El aporte de Wouter Buytaert para la realización de los análisis es apreciado.

BIBLIOGRAFÍA

- Beven, K., 1997. Rainfall-Runoff: The Primer. John Wiley & Sons, London.
- Bosch, J.M., y J. Hewlett, 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiración. Journal of hydrology 55: 3-23
- Buytaert W., B. De Bièvre, G.Wyseure y J. Deckers, 2004. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrological of catchments in the Andes . Hydrology and Earth System Sciences, 8(1), 108-114.
- Buytaert W., R. Céleri, B. De Bièvre, J. Deckers y J. Feyen, 2002. Efecto del cambio del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de microcuencas del páramo. Memorias del I Congreso mundial de páramos. Colombia.
- Chow V. T., D. R. Maidment, L. W. Mays, *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill Interamericana, S.A., Bogotá, Colombia, 1994.
- CIP / INIAP, 1998. Las propiedades físicas del suelo en análisis de uso de la tierra desde datos de estudios de suelos hasta retención de agua y conductividad hidráulica. Quito, Ecuador.
- Dingman S. L., 1994. Physical hydrology. Macmillan Publishing Co., New York
- Duncan, M.J., 1995. Hydrological impacts of converting pasture and gorse to pine plantation and forest harvesting, New Zealand. Journal of hydrology 34(1):15-41.
- Hostede, R., 2000. Aspectos técnicos ambientales de la forestación en los páramos. En: Medina, G., C. Josse y P. Mena (Eds.). La forestación en los páramos. Serie Páramo 6. GTP/Abya Yala. Quito.
- Hostede, R., 2001. El impacto de las actividades humanas sobre el páramo. En: Mena, P., G. Medina y R. Hostede (Eds.). Los páramos del Ecuador. Particularidades, problemas y perspectivas. Abya Yala/Proyecto Páramo. Quito.
- Hornberger, G. M., Germann P. F., and Beven, K. J., 1991. Throughflow and solute transport in an isolated sloping soil block in a forested catchment. Journal of Hydrology, 124:81-99.
- Mendenhall W y Sincich T, 1995. Statistics for engineering and sciences. Prentice Hall. USA.

Morocho, A., L. Peñalosa y J. Escandón, 2002. Cochapamba: Una propuesta para recuperar un páramo con vista al mar en el Azuay. En: Mena, P. y D. Ortiz (Eds.). El manejo comunitario de los páramos. Serie Páramo 11. GTP/Abya Yala. Quito.

Ponce, D., 2000. La forestación en la sierra Ecuatoriana: El punto de vista industrial. En: Medina, G., C. Josse y P. Mena (Eds.). La forestación en los páramos. Serie Páramo 6. GTP/Abya Yala. Quito.

Putuhena, W. e I. Cordery, 2000. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology* 100, 59-72.

Sivapalan M., C. Jothityangkoon, and M. Menabde, 2002. Linearity and nonlinearity of basin response as a function of scale: Discussion of alternative definitions. *Water Resources Research*, 38(2).

van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates, 1991. The RTEC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Versión 6.0. U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California

ANEXO 1

A.1. Datos de las estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis de la precipitación.

En los siguientes gráficos se presentan los datos diarios registrados para el periodo del 30/Mayo/2004 hasta el 09/Octubre/2004.

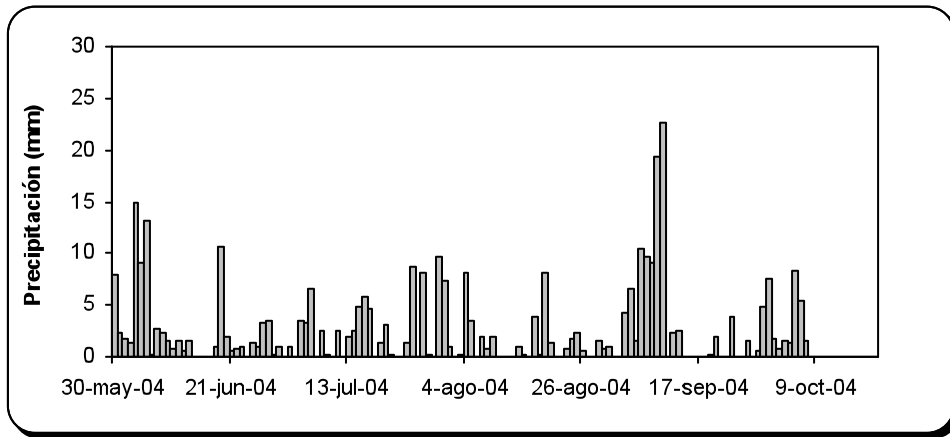


Gráfico A.1. Datos diarios de precipitación del pluviógrafo (PT1)

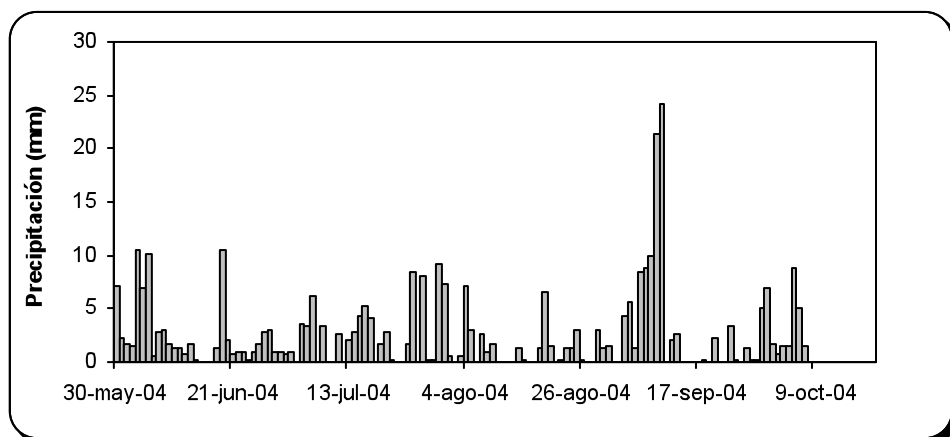


Gráfico A.2. Datos diarios de precipitación del pluviógrafo (PT2)

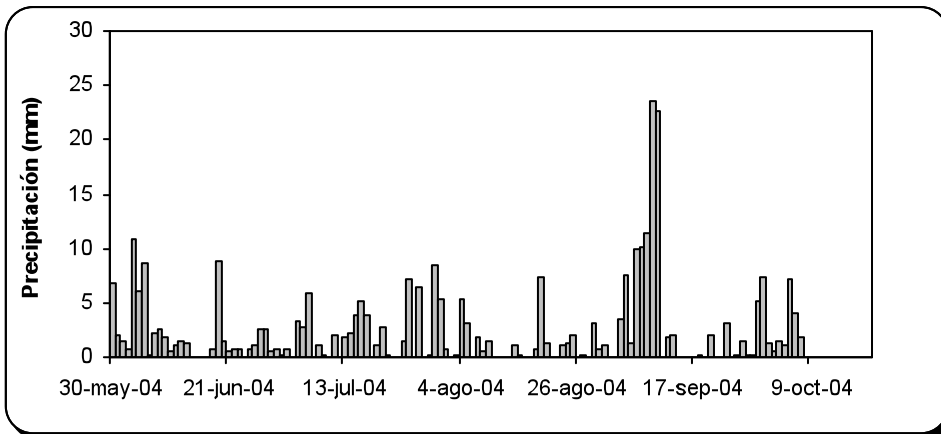


Gráfico A.3. Datos diarios de precipitación del pluviógrafo (PP1)

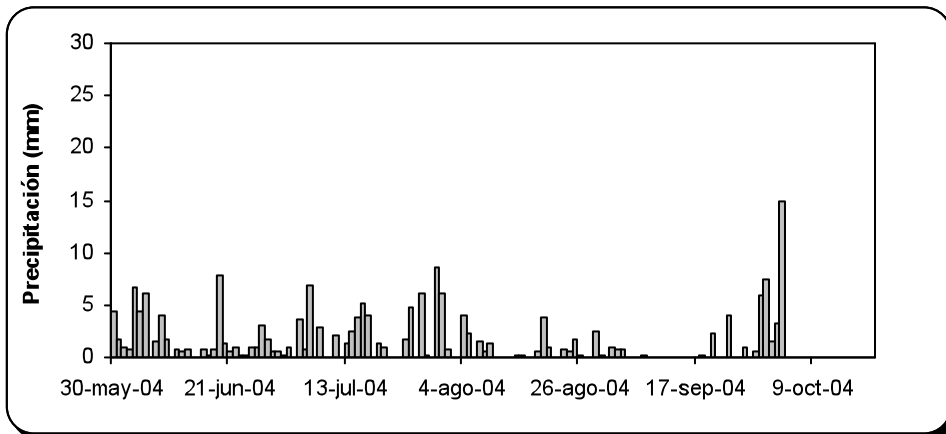


Gráfico A.4. Datos diarios de precipitación del pluviógrafo (PP2)