

Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, Ecuador.

Influence of the land cover on the runoff coefficients at Catamayo River Basin, Ecuador

Aníbal González González¹
Pablo Alvarez-Figueroa²
Max González Fuertes³
Zhofre Aguirre-Mendoza⁴

1. Centro de Investigaciones Territoriales-Universidad Nacional de Loja

2. Programa de Investigación Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos-Universidad Nacional de Loja

3. Carrera de Ingeniería Agrícola-Universidad Nacional de Loja

4. Docente de la Universidad Nacional de Loja

*Autor para correspondencia: a_gonzalez52@hotmail.com

RECIBIDO: 14/04/2016

APROBADO: 16/11/2016

RESUMEN

La cobertura vegetal y uso del suelo son factores determinantes en el balance hidrológico y la generación de escorrentía. La influencia del cambio de cobertura vegetal en el coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca superior del río Catamayo del periodo 1986-1999 fue determinado mediante SIG y teledetección. La metodología se dividió en tres fases que consistieron en el análisis de los coeficientes de escorrentía reales de la cuenca mediante la relación de volúmenes escurridos y precipitados, el análisis del cambio de cobertura vegetal a través de imágenes satelitales Landsat 5 y la aplicación de dos métodos indirectos de generación de escurrimientos: racional y número de curva, para determinar cuál mantiene mayor correlación con los coeficientes reales. Los datos de cobertura vegetal y los coeficientes de escorrentía se

ABSTRACT

Land cover is a determining factor in the hydrological balance and runoff generation. The influence of land cover change in the average runoff coefficient of the upper Catamayo River Basin of the period 1986-1999 was determined by GIS and remote sensing. The methodology was divided into three phases: analysis of the real runoff coefficients from the basin by the ratio of precipitated and drained volume; analysis of change of vegetation cover through satellite images Landsat 5; and application of two indirect methods of generating runoff: rational curve number methods in order to determine which holds greater correlation with real coefficients. The data of vegetation cover and runoff coefficients were compared through geospatial models and statistical tests. The results indicate a good hydrological state of the

compararon a través de modelos geoespaciales y pruebas estadísticas. Los resultados obtenidos indican un buen estado hidrológico de la cuenca con un coeficiente de escorrentía promedio de 0,41; la cobertura vegetal presenta un cambio del 43,5%. Los coeficientes generados mediante el método del número de curva mantienen una correlación significativa al 85% con los coeficientes reales. Finalmente se puede concluir que el cambio de cobertura vegetal analizada no influyó significativamente en la fluctuación del coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca superior del río Catamayo.

Palabras Clave: cobertura vegetal, coeficiente de escorrentía, SIG, teledetección

basin with an average runoff coefficient of 0.41; vegetative cover has a change of 43.5%. The coefficients generated by the number curve method maintain 85% of correlation with real coefficients. Finally, it was possible to conclude that the change in vegetation cover did not significantly influence in the fluctuation of average runoff coefficient of the upper Catamayo River Basin.

Keywords: GIS, land cover, remote sensing, runoff coefficient.

■ INTRODUCCIÓN

La nueva concepción acerca de la relación escurrimiento-cobertura vegetal indica que los bosques usan más agua a través de la interceptación y de complejos procesos de evapotranspiración, que otros usos de la tierra, como los pastizales o la agricultura. Por lo tanto, los bosques reducen el total de los escurrimientos ya que evaporan considerablemente más agua que la vegetación más baja y reducen el agua para restablecer o recargar acuíferos y ríos (Calder, 2003). Sin embargo, la remoción de la cobertura vegetal es la principal causa de deterioro ambiental y degradación del suelo (Castillo *et al.*, 1997; Alvarez *et al.*, 2015).

El punto de vista generalizado de que más árboles implican más agua en la cuenca hidrográfica es una idea que debe ser analizada a profundidad dependiente de las condiciones específicas de cada zona. Con este antecedente, y por la escasa información a nivel nacional de la influencia de la cobertura vegetal sobre los escurrimientos, se seleccionó para su estudio la cuenca superior del río Catamayo ya que ésta es productora de agua de la cuenca binacional

Catamayo-Chira. Los caudales diarios promedio en época de sequía en las estaciones hidrométricas Vicin que cubre 4157,7 km² de la cuenca y El Arenal en el puente Boquerón que cubre 1123,8 km² son 13,5 y 10,5 m³ s⁻¹ respectivamente, y representan un aporte del 80% a la generación de caudales.

La presente investigación se enfocó a determinar la influencia del cambio de cobertura vegetal sobre el coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca superior del río Catamayo en un periodo de 13 años a través de: a) la generación de los coeficientes reales de escorrentía mediante el análisis de los volúmenes escurridos y precipitados; b) el análisis de la influencia del cambio de cobertura vegetal en los coeficientes obtenidos y c) la determinación de la correlación de los coeficientes reales con los métodos empíricos racional y número de curva. Con la información generada, los tomadores de decisiones, tendrán elementos de juicio para definir las zonas que deben proteger con la finalidad de regular el balance hídrico en esta cuenca que aporta sus aguas a diferentes sistemas de riego de la provincia de Loja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca superior del río Catamayo, ubicada en la zona geográfica 17 S, entre las coordenadas planas: 9 552 502 m - 9 501 498 m N; y, 711 117 m - 675 869 m E; entre los 1160 msnm y 3800 msnm de altitud. El área aproximada es de 1124 km² y la elevación media es de 2080 msnm (Figura 1). Posee un régimen pluviométrico bien definido, el periodo de lluvias comprende los meses de diciembre a abril con precipitaciones que varían de 100 mm a 182 mm, mientras que el periodo de menor precipitación comprende los meses de mayo a noviembre con registros que oscilan entre 24 y 79 mm.

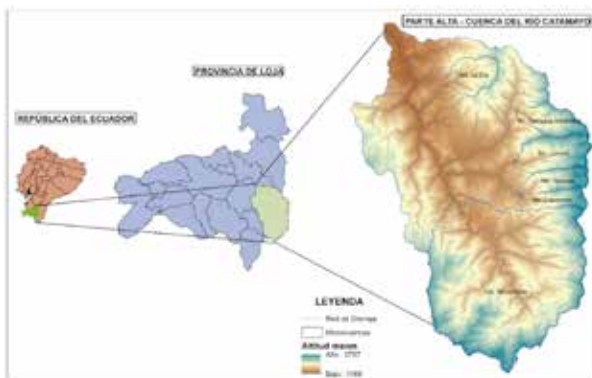


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca superior del río Catamayo.

Coefficientes de escorrentía reales de la cuenca

Se generó el coeficiente de escurrimiento real de la cuenca a través del análisis de los volúmenes escurridos y precipitados para el periodo comprendido entre 1986-1999. Una base de datos meteorológica e hidrométrica fue estructurada. La información meteorológica se extrajo de los anuarios meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se utilizó 12 estaciones, de las cuales cuatro se encuentran dentro de la cuenca:

Quinara, Vilcabamba, Malacatos y Yangana y las ocho restantes de sus alrededores: Catamayo, Cajanuma, Gonzanamá, La Argelia, Nambacola, Quilanga, San Francisco y Zamora. La información hidrométrica de las estaciones El Arenal y Uchima se descargó de los anuarios hidrológicos del INAMHI, mientras que para las estaciones Yambala, Campana-Malacatos, Capamaco, La Era, Piscobamba y Masanamaca, la información fue proporcionada por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA).

La consistencia de datos se realizó a través del análisis de doble masa. Se aplicó el método de interpolación Spline para obtener las capas raster de precipitación mensual, y consecuentemente los volúmenes precipitados mediante el uso del software ArcGis 10.1. Los volúmenes escurridos se los obtuvo transformando los datos de caudal medio diario a escurrimiento. Relacionando los volúmenes escurridos y volúmenes precipitados se calcularon los coeficientes de escorrentía reales de la cuenca, que fueron corregidos mediante el aporte del caudal base calculado mediante medias móviles.

Análisis del cambio de cobertura vegetal

Esta fase se realizó a través del procesamiento de imágenes satelitales del periodo comprendido entre 1986 y 1999. Se utilizó cuatro imágenes Landsat 5 correspondientes a los años 1986, 1987, 1996 y 1999, a las que se les aplicó la corrección respectiva (radiométrica del sensor, radiancia del suelo y reflectividad). Se aplicó un método de clasificación supervisado determinando sitios de muestreo (ROIS) con un índice de separabilidad mínimo de 1,98. Se realizó la combinación de bandas espectrales, previamente se enmascaró nubes y cuerpos de agua presentes en las imágenes para evitar errores en la clasificación. Como método de asignación se utilizó el de máxima probabilidad. La clasificación fue validada mediante una matriz

de confusión, a través de una imagen verdadera de la cuenca generada a partir de muestreos de campo de cobertura vegetal (Chuvienco, 2010). El análisis multi-temporal se realizó mediante la intersección de capas vectoriales en Arc Gis 10.1.

Coefficientes de escorrentía generados por métodos indirectos

Se generó coeficientes de escorrentía en la cuenca mediante el método racional y el método del número de curva utilizando la información de precipitación disponible y la cobertura vegetal generada. Esta última constituye la variable independiente que permite generar escurrimientos.

Método racional

Se utilizó para calcular el escurrimiento medio de la cuenca. El método supone que la cobertura vegetal y la velocidad de infiltración se mantienen constantes a lo largo del año. Para determinar los escurrimientos medios se utilizó la Ecuación 1:

$$V_m = C P_m A_c \quad \text{Ec.1}$$

Dónde V_m = volumen medio que puede escurrir la cuenca (millones de m³), C = coeficiente de escurrimiento, P_m = precipitación mensual (mm) y A_c = área de la cuenca (Km²).

Para obtener los coeficientes de escurrimiento se utilizó una intersección de capas en el software Arc Map 10.1 con información de permeabilidad del suelo, pendiente y cobertura vegetal. La capa de permeabilidad se obtuvo del gestor de descargas del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de Ecuador (MAGAP) y se reclasificó de acuerdo a las exigencias del método. La pendiente se generó a partir del modelo digital del terreno (MDT) y las clases de cobertura vegetal fueron obtenidas de la clasificación supervisada.

Método del Número de Curva

Este método establece que la relación precipitación-escurrimiento es una función del tipo de suelo, su uso y de condiciones hidrológicas. La estimación del escurrimiento superficial por el método del número de curva fue realizada mediante la Ecuación 2:

$$P_e = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad \text{Ec.2}$$

Dónde P_e = escorrentía directa (mm), P = precipitación mensual (mm), $S = (25400/NC) - 254$ y NC = número de curva. Para obtener el coeficiente de escorrentía a partir de la escorrentía directa (P_e) obtenida con éste método se aplicó la Ecuación 3:

$$C_e = \frac{(P - \frac{5080 - 50,8 N}{N})^2}{P^2 + P \frac{20320 - 203,2 N}{N}} \quad \text{Ec.3}$$

Dónde C_e = coeficiente de escorrentía, P = escorrentía directa (mm) y N = número de curva.

Análisis de datos

Para la comparación de medias se realizó un análisis de varianza, mientras que para determinar si el cambio de cobertura vegetal tiene relación con el coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca superior del río Catamayo se aplicó la prueba t de student. Para definir la correlación de los métodos indirectos se utilizó la prueba estadística Chi cuadrado.

RESULTADOS

Análisis de coeficientes reales

Los volúmenes precipitaciones sobre la cuenca varían entre 27,4 y 199,4 millones de m³ por mes con un promedio de 1 144,5 millones

de m³ anuales. La estacionalidad de dichos volúmenes mantiene una relación directa con las precipitaciones, ya que los remanentes de los meses lluviosos modifican los escurrimientos de los meses subsecuentes. Las microcuencas de la parte alta ocupan el 52,3 % de la superficie y representan el 99,4% de los escurrimientos. En la serie temporal analizada (1986-1999), el coeficiente de escorrentía real promedio es 0,41.

En la Figura 2 se puede observar que el periodo comprendido entre 1990 y 1993 tiene los coeficientes más bajos debido a que los volúmenes escurridos de este periodo son relativamente menores a los de la serie analizada; mientras que en el periodo 1994 – 1995, se encuentran los coeficientes más altos, debido a que en este lapso de tiempo los volúmenes escurridos igualan ligeramente a los volúmenes precipitados ya que este fue un periodo de sequía en toda la región. Desde el punto de vista estacional, los coeficientes se mantienen estables en el periodo invernal y tienden a incrementar su valor en la época de verano, debido a que en el periodo mayo-agosto los volúmenes escurridos son prácticamente similares a los volúmenes precipitados. Este fenómeno puede explicarse por el aporte del caudal base (13,5 millones m³/mes) que es un aporte adicional al de las precipitaciones en los meses secos.



Figura 2. Serie temporal de coeficientes de escorrentía reales de la parte alta de la cuenca Catamayo.

En la Figura 3 se puede observar la varia-

ción espacial del coeficiente de escorrentía real de la cuenca. Los valores más altos se encuentran alrededor de las parroquias Malacatos y Vilcabamba y están relacionados con la presencia de matorrales, cultivos y zonas desprovistas de vegetación, que por su baja capacidad de interceptación de la lluvia hacen que la mayor parte de la precipitación que cae en la zona rápidamente se escurra. Las microcuencas de la parte alta presentan formas de ovaladas a rectangulares con coeficientes de compacidad que varía entre 1,50 y 1,81, los tiempos de concentración (T_c) son moderados y fluctúan entre 0,81 y 1,02 horas, a excepción de la subcuenca de la estación Moyococha que tiene un T_c de 3,46 horas, lo cual indica una baja tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento.

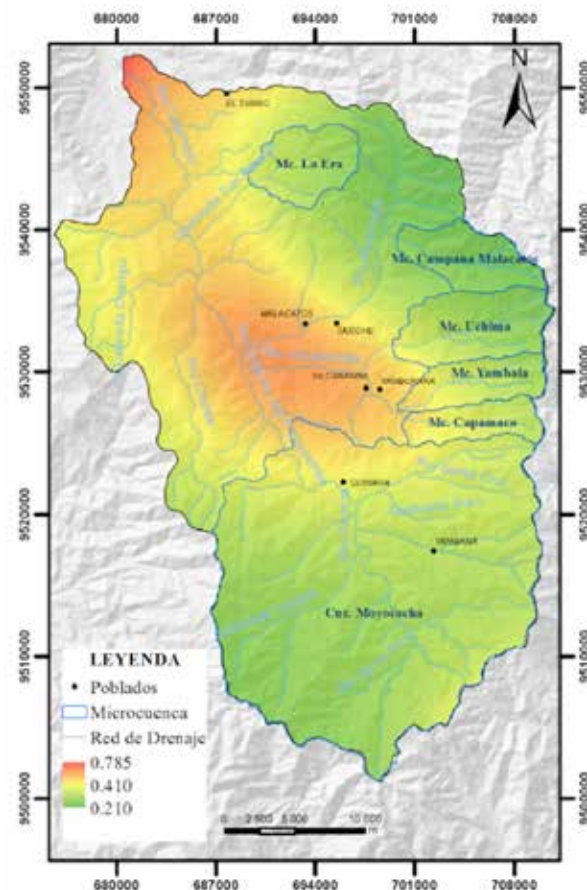


Figura 3. Coeficientes de escorrentía real de la parte alta de la cuenca del río Catamayo.

Análisis del cambio de cobertura vegetal

En la Figura 4a y 4b se puede observar los mapas de cobertura vegetal del año 1986 y 1999 respectivamente y las categorías identificadas. Se observó una alta dinámica en la cobertura vegetal en el periodo analizado ya que el 43,5% de la superficie (367,1 km²) presentó cambios notables. En este contexto, se puede observar que las superficies más cambiantes son las ocupadas por cultivos que tuvieron un incremento de 207% (de 30,6 a 94,2 km²) y las zonas desprovistas de vegetación donde han ocurrido incendios cuyo incremento es de 340%, sin embargo en términos de superficie el cambio fue de 4,8 a 21,0 km². Es importante mencionar que la cobertura vegetal predominante en la cuenca es matorral, la cual tuvo una disminución de 5,4% de su superficie (de 475,8 a 450,1 km²). En este sentido, el bosque natural también presentó una disminución de 3,6% (de 125,8 a 121,3 km²). En los pastizales la disminución fue de 61,8% (de 175,8 a 67,2 km²), superficie que se presume que en la actualidad está siendo ocupada por cultivos.

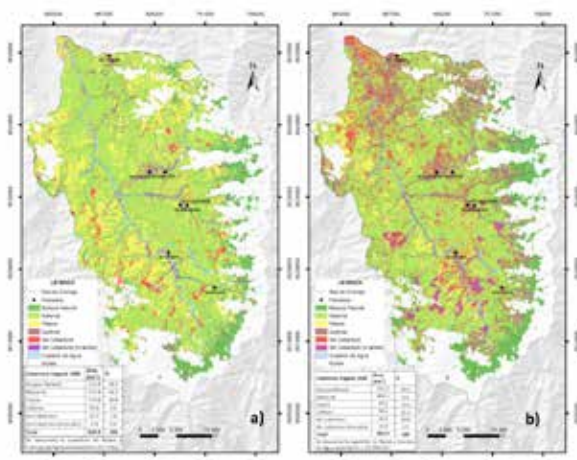


Figura 4. Cobertura vegetal de la cuenca alta del río Catamayo: a) año 1986 y b) año 1999.

Finalmente se realizaron dos pruebas t de student, utilizando como variable dependiente a los coeficientes de escorrentía mensuales gene-

rados. Esta prueba no superó el valor crítico que fue de 2,5, por lo que se asume que el cambio de cobertura vegetal no influyó significativamente en los coeficientes de escorrentía generados.

Coefficientes de escorrentía generados por métodos indirectos.

Los dos métodos utilizan capas de suelo, pendiente y cobertura vegetal. En la Figura (Figura 5a), se puede observar que las superficies planas (pendiente entre 0-5%) se ubican en la parte baja junto al margen del cauce principal y representan 1,2% de la cuenca. La pendiente entre 5-20% representa el 13,8% de la superficie. Entre estos dos rangos es donde están establecidos principalmente cultivos. La pendiente entre 20-50% representa el 40,4% de la superficie y está ocupada en su mayoría por pastos y matorrales con evidencias de procesos erosivos. La parte alta de la cuenca posee las pendientes más fuertes con valores que superan el 50% y representan el 44,6% de la cuenca. En esta zona es donde se encuentra la mayor cantidad de microcuencas. La cuenca posee una pendiente media del 42,4%.

En la Figura 5b se puede observar que en el suelo se identificaron únicamente los grupos hidrológicos B, C y D. El grupo hidrológico B se encuentra ubicado en la parte baja de la cuenca y ocupa el 29,2% de la superficie. Los suelos de este grupo son de textura fina (arcillosos y franco arcillosos), con baja permeabilidad, superficiales (0-20 cm) y con nivel freático mayor a 1 m. El grupo hidrológico C ocupa la mayor cantidad de superficie de la cuenca con 60,4% y se distribuye en la parte media y un pequeño porcentaje en la parte baja. Los suelos de este grupo son de textura media (franco arcillo limosos), semipermeables, moderadamente profundos (50-100 cm), con el nivel freático mayor a 1 m. El grupo hidrológico D se encuentra espacialmente distribuido en la parte superior

de la cuenca (cotas más altas) y representa el 10,4% de la superficie total. Los suelos de este grupo son de textura que va de media a gruesa (francos, franco arenosos, arenosos, entre otros), profundos (> 1 m), con un contenido de materia orgánica mayor a 7%, lo cual indica alta capacidad para retener agua.

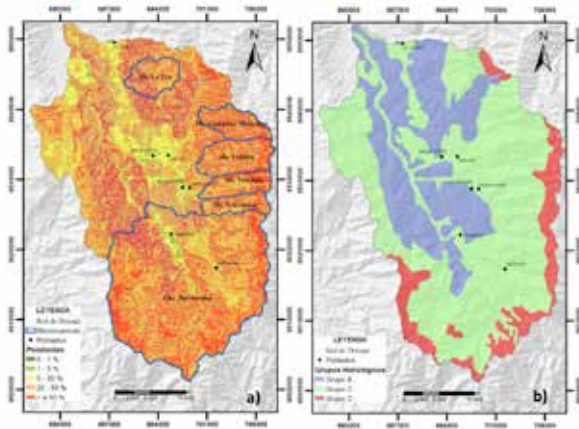


Figura 5. a) Mapa de pendientes y b) mapa de grupos hidrológicos de la cuenca alta del río Catamayo.

En la Figura 6a se puede ver la distribución espacial del coeficiente de escorrentía obtenido por el método racional correspondiente al año 1999. Los coeficientes más bajos que van de 0-0,35 se distribuyen en la parte baja de la cuenca junto a los márgenes del cauce principal y sus afluentes (5,6% de la superficie). Los coeficientes que van de 0,36 y 0,45 se distribuyen en la parte alta de la cuenca donde existe presencia de bosques (14,6% de la superficie). Los coeficientes que fluctúan en el rango 0,46 y 0,60 representan alrededor del 65 % de la superficie y están en la parte media de la cuenca, mientras que los coeficientes mayores a 0,60 (aproximadamente el 15% de la superficie) se distribuyen en la parte media y media alta de la cuenca y están ocupadas principalmente por superficies sin cobertura y áreas quemadas. El coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca calculado a través del método racional es 0,31.

En la Figura 6b se puede observar la distribución espacial del coeficiente de escorrentía obtenido por el método número de curva correspondiente al año 1999. De forma general se incrementan las áreas con bajo coeficiente de escorrentía y a la vez disminuyen las que tienen valores altos (mayores a 0,51). El coeficiente de escorrentía promedio con éste método es 0,34 lo cual indica un excelente estado hidrológico de la cuenca.

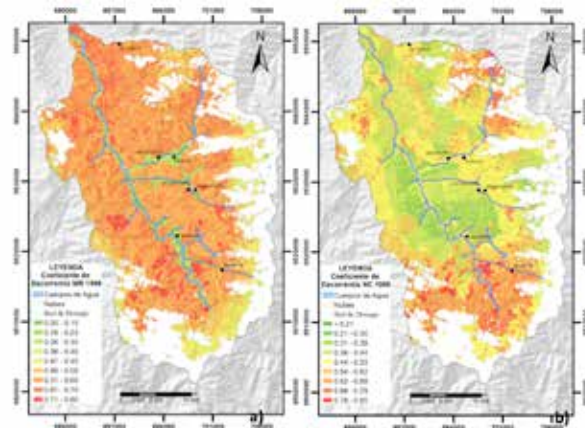


Figura 6. Coeficiente de escorrentía: a) método racional año 1999. b) método número de curva año 1999.

La correlación entre los coeficientes de escorrentía, generados mediante el método del número de curva y el método racional es negativa; mientras que los coeficientes reales presentan una correlación significativa al 85 % con el método del número de curva, por lo que en cuencas con similares características se recomienda utilizar este método.

■ DISCUSIÓN

Coeficientes de escorrentía reales

El coeficiente de escorrentía depende de numerosos factores como la precipitación (cantidad, intensidad y distribución en el tiempo), la humedad antecedente, el tipo de suelo (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación, microrelieve, rugosi-

dad), tipo de cobertura vegetal existente, entre otros factores. En este sentido la precipitación es irregular en toda la cuenca analizada ya que la parte baja de la cuenca en la cual se asientan los principales poblados como: Vilcabamba, Malacatos, Quinara, Taxiche, Yamburara, El Tambo, presenta un régimen de baja precipitación que oscila entre 800 y 1200 mm anuales; la parte media tiene una precipitación que fluctúa entre 1200 y 1500 mm anuales; mientras que en la parte alta (2600 y 3800 msnm) la precipitación varía entre 1500 y 2800 mm anuales, que constituye el régimen pluviométrico más alto. Sin embargo, considerando que los bosques son la vegetación predominante en esta última zona, el coeficiente de escorrentía real es bajo.

Análisis del cambio de cobertura vegetal

La vegetación (densidad, estructura, altura, estado de crecimiento, tiempo de permanencia) es determinante en el proceso de infiltración así como en la formación de escorrentía superficial. La velocidad de infiltración en suelos forestales es muy superior a la que presentan los suelos agrícolas debido al elevado contenido en materia orgánica de los suelos, la acción de las raíces primarias y secundarias que crean innumerables canales y compartimentos en el subsuelo, que incrementan la infiltración y hacen más eficiente la recarga de agua hacia capas profundas del suelo (Ataroff y Rada, 2000; Ataroff y Sánchez, 2000; Bonell, 2005; Schawe et al., 2010). Estudios realizados en cuencas que abastecen de agua indican una disminución en la escorrentía en las zonas ocupadas por bosques, en comparación con las ocupadas por vegetación más baja (Scott y Lesch, 1997). Cuando la vegetación natural es sustituida se generan cambios considerables en el régimen hidrológico de las cuencas de alta montaña debido a la alteración de las propiedades hidrofísicas del suelo (Tobón et al., 2004; Tobón, 2009). Entre los principales

problemas causados por el cambio en el uso del suelo están la compactación y disminución de la porosidad que incrementa la escorrentía y la posibilidad de que ocurran inundaciones (Kaimowitz et al., 2004; Lin y Wei, 2008). Además, se altera significativamente la relación precipitación-infiltración-escorrentía (Morales, 2008), lo cual genera cambios que pone en peligro la capacidad de estos ecosistemas como reguladores hídricos y la sostenibilidad en la provisión de agua limpia (Pacheco, 2005).

Coefficientes de escorrentía generados por métodos indirectos

Los métodos indirectos se basan principalmente en la pendiente, el suelo y la vegetación. En este sentido, en zonas empinadas el coeficiente de escorrentía es elevado, con lo que también se incrementa la erosión hídrica. Las dos propiedades físicas del suelo que mejor explican la formación de escorrentía superficial son la capacidad de infiltración y la permeabilidad. La materia orgánica del suelo le confiere a los suelos de los bosques andinos propiedades físicas e hidráulicas especiales como baja densidad aparente, alta porosidad, alta capacidad de infiltración, alta capacidad de retención de humedad, alta conductividad hidráulica y alta capacidad de regulación hídrica a nivel de cuenca (Tobón et al., 2004; Bahamon et al., 2008). El método del número de curva (NC) es más riguroso en entrada de datos que el método racional por la mayor cantidad de información que requiere para su determinación. Los coeficientes promedio obtenidos por ambos métodos constituyen un buen indicador del estado hidrológico de la cuenca, sin embargo el método NC presentó mayor correlación con el coeficiente de escorrentía real.

CONCLUSIONES

El coeficiente de escorrentía real de la cuenca es 0,41, que en el periodo de lluvias es en promedio 0,33, mientras que en la época seca se mantiene alrededor de 0,57. El caudal base de la cuenca es aproximadamente 5,03 m³ s⁻¹, que expresado en términos de volumen representa 13,5 millones de m³ de escurrimiento mensual, aporte que incrementa el coeficiente de escorrentía en un 43,7% en época de sequía. Independientemente del cambio de cobertura vegetal, la precipitación tiene un peso del 70,1% y la vegetación de 29,9% en la generación de coeficientes de escorrentía mediante el método número de curva. El cambio de cobertura vegetal no influyó significativamente en el coeficiente de escorrentía promedio de la cuenca superior del río Catamayo.

AGRADECIMIENTO

Al Centro Integrado de Geomática Ambiental (CINFA) y al Programa de Investigación Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de la Universidad Nacional de Loja.

LITERATURA CITADA

Alvarez P., F. Veliz, J. Muñoz y N. Aguirre. (2015). Análisis multi-temporal del cambio de uso de suelo en el cantón Zapotillo, provincia de Loja. *Bosques Latitud Cero*. 5, 33-47.

Ataroff M. y F. Rada. (2000). Deforestation impact on water dynamics in a Venezuelan Andean cloud forest. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 29(7): 440-444.

Ataroff, M. y L. Sánchez. (2000). Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado Táchira, Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 41(1): 11-30.

Bonell M. (2005). Runoff generation in tropical forests. En: Bonell M. y L. Bruijnzeel (Eds.) *Forest-Water-People in the Humid Tropics: Past Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management*. Cambridge University Press. Cambridge

Calder I. (2003). Assessing the water use of vegetation and forests-development of the Hyluc, Hydrological Land Use Change model. *Water Resources Research*, 39(11): 1-8.

Castillo V., M. Martínez y J. Albaladejo. (1997). Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Science Society of America*. 61, 1116-1121.

Chuvieco E. (2010). *Teledetección Ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. 3 ed. Editorial Planeta. Barcelona. 591 p.

Bahamon J., A. Osorio y C. Tobón. (2008). Dinámica de la humedad del suelo en bosques alto andinos en el páramo de Guerrero, Cundinamarca-Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. 61, 18-19.

Kaimowitz D., B. Mertens, S. Wunder y P. Pacheco. (2004). *Hamburger connection fuels*

Amazon destruction. Bangor, Indonesia: Center for International Forest Research 1-10.

Morales L. (2008). Evaluación de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo bajo influencia de tres coberturas vegetales en Porcé II, Antioquia, Colombia. Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 36 p.

Pacheco E. y M. Ataroff. (2005). Dinámica ecohidrológica en una selva nublada andina venezolana. Pp. 25-30. En Ataroff M. y J. Silva (Eds) Dinámica hídrica en sistemas neotropicales. Investigaciones en Dinámica Hídrica de la red RICAS. ICAE, Venezuela.

Lin Y. y X. Wei. (2008). The impact of large-scale forest harvesting on hydrology in the Willow watershed of Central British Columbia. J. Journal of Hydrology 359(1):141-149.

Schawe M., G. Gerold, K. Bach y S. Gradstein. (2010). Hydrometeorological patterns in relation to montane forest types along an elevational gradient in the Yungas of Bolivia. Pp. 199-207. En: Bruijnzeel L., F. Scatena y L. Hamilton (Eds). Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management. Cambridge University Press, UK.

Scott D. y W. Lesch. (1997). Streamflow responses to afforestation with *Eucalyptus grandis* and *Pinus patula* and to felling in the Moko-bulaan experimental catchments, South Africa. Journal of Hydrology 199(3): 360-377.

Tobón C., L. Bruijnzeel y A. Frumau. (2004). Physical and hydraulic properties of Tropical Montane Cloud Forest soils and their changes after conversion to pasture. Proceedings of the Second International Symposium: Science for Conserving and Managing Tropical Montane Cloud Forests, Waimea, Hawaii.

Tobón C. (2009). Los bosques andinos y el agua. Programa Regional Ecobona-Intercooperation, Condesan. Quito, Ecuador. 64 p.