

Efectos de la restauración de los bosques montanos tropicales sobre el funcionamiento ecohidrológico de cuencas hidrográficas

Effects of tropical montane forest restoration on the ecohydrological functioning of watersheds

Marcela Mosquera-Vásquez ^{a*}, Conrado Tobón-Marin ^b

* Autor de correspondencia: ^a Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Postgrado en Conservación de Bosques y Manejo Ambiental, Medellín, Colombia.
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6910-5930>, mmosquerav@unal.edu.co

^b Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Ciencias Forestales.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8372-0625>

SUMMARY

At the global level, ecological restoration is becoming increasingly important due to the degraded conditions of ecosystems, which requires urgent efforts to recover these ecosystems and reestablish ecosystem services and forest biodiversity. However, there is a scarcity of studies evaluating the effects of forest restoration programs on soil properties and ecohydrological functioning of tropical ecosystems, which are in rapid decline. This research aims to evaluate ecohydrological processes in two low montane moist forest (bh-MB) watersheds subjected to ecological restoration (El Silencio and Montañita), compared to one with pastures (Pastos), and to characterize the variables influencing these processes in emerging ecosystems. In each watershed, climatic variables were monitored, and the physical, hydraulic and organic matter properties of the soil were measured, along with ecohydrological variables. The results indicate that watersheds under the restoration program exhibit a tendency to recover the initial conditions of soil properties, favoring the regulation of summer flows and reducing storm flows. In contrast, the pasture watershed shows a tendency towards degraded soils. The natural regeneration process of the forest in areas dedicated to extensive cattle raising contributes to improving the physical conditions of the soil. This improvement, in turn, facilitates water recharge to the aquifers and sustains the base flow during periods of low precipitation.

Keywords: tropical forest, deforestation, soil properties, water regulation, water yield.

RESUMEN

A nivel mundial, la restauración ecológica cobra cada vez mayor importancia, dada las condiciones de degradación de los ecosistemas y, por lo tanto, la urgente necesidad de recuperar dichos ecosistemas y restablecer los servicios ecosistémicos y la biodiversidad de los bosques. Específicamente, los bosques tropicales se han venido degradando a tasas aceleradas, hasta la fecha existen muy pocos estudios donde se hayan evaluado los efectos de programas de restauración forestal sobre las propiedades del suelo y el funcionamiento ecohidrológico de los ecosistemas tropicales. Esta investigación tuvo como objetivo evaluar los procesos ecohidrológicos en dos cuencas hidrográficas de bosque húmedo montano bajo (bh-MB), sometidas a restauración ecológica (El Silencio y Montañita), frente a una con pasturas (Pastos) y caracterizar las variables que determinan dichos procesos en los ecosistemas emergentes. En cada cuenca se monitorearon las variables climáticas, a su vez se midieron las propiedades físicas, hidráulicas y materia orgánica del suelo y las variables ecohidrológicas. Los resultados indican que, las cuencas bajo el programa de restauración muestran una tendencia a recuperar las condiciones iniciales de las propiedades del suelo, lo que favorece la regulación de caudales en verano y disminuye los caudales de tormenta; mientras que la cuenca de Pastos presenta una tendencia a suelos degradados. Se concluye que, el proceso de regeneración natural del bosque en áreas dedicadas a ganadería extensiva contribuye a mejorar las condiciones físicas del suelo, lo que favorece la recarga de agua a los acuíferos y el sostenimiento del caudal base en época de bajas precipitaciones.

Palabras clave: bosque tropical, deforestación, propiedades del suelo, regulación hídrica, rendimiento hídrico.

INTRODUCCIÓN

La deforestación en los trópicos es motivo de gran preocupación e importancia ambiental, debido a que el 75 % de la superficie terrestre ha experimentado alteraciones

significativas (IPBES 2019). Durante el periodo comprendido entre 2015 y 2020, se estima que se deforestaron aproximadamente 10,2 millones de hectáreas en el mundo (FAO 2022), lo que ha dejado como resultado suelos infértiles, erosionados e infestados de malezas producto

de la conversión de bosques a otros usos del suelo, como pasturas, plantaciones forestales, agricultura y minería, en su mayoría con manejos inapropiados (Hurtado-M *et al.* 2022). Por ejemplo, en América Latina países como Ecuador reportaron en el periodo de 1990 y 2015 las mayores pérdidas de bosque primario que ascienden a 2,1 millones de hectáreas (Bonilla-Bedoya *et al.* 2018). En Colombia, en el año 2020 se reportó una tasa de crecimiento de la deforestación del 8 % en comparación con el 2019, donde la principal causa es la conversión de áreas de bosque a pastos (WWF 2021).

Varios autores han demostrado que la desaparición de los bosques para dar lugar a otros usos del suelo tiende a alterar el funcionamiento hidrológico en cuencas y el régimen de caudales, específicamente, con una disminución de los caudales en periodos secos y considerables incrementos en los caudales en periodos húmedos (Tobón *et al.* 2010, Beck *et al.* 2013, Ochoa-tocachi *et al.* 2016, Ramírez *et al.* 2017, Leite *et al.* 2018, Tobón y Bruijnzeel 2021). Este cambio, parece tener un efecto significativo en las propiedades hidrofísicas del suelo, evidenciándose la destrucción de los poros, la compactación del suelo, la disminución de la conductividad hidráulica y el aumento de la densidad aparente. De manera conjunta, estos factores contribuyen a un aumento de la escorrentía superficial y una disminución en los caudales base (Germer *et al.* 2010, Muñoz-Villers *et al.* 2015).

Ante esta problemática, el proceso de la restauración ecológica cobra cada vez mayor importancia como una solución para revertir los procesos de degradación en estos ecosistemas, la pérdida acelerada de su biodiversidad y los servicios que de estos emanan (Holl 2013). Aunque existen diferentes programas de restauración alrededor del mundo que parecen ser exitosos en el establecimiento de las plántulas y en algunos casos en el desarrollo de nueva vegetación, hay muy pocos estudios donde se haya llevado a cabo un seguimiento de los cambios físicos que se presentan en los nuevos ecosistemas y la velocidad de estos cambios, especialmente relacionados con el funcionamiento ecohidrológico de los ecosistemas emergentes y la restauración de las propiedades del suelo (Suganuma y Durigan 2015, Murcia *et al.* 2016, Lozano-Baez *et al.* 2018).

Por ejemplo, la determinación de los parámetros físicos del suelo (estructura, textura, densidad aparente, porosidad y humedad del suelo) son importantes porque brindan información sobre los factores que afectan el movimiento del agua y el aire a través del suelo (Angulo-Jaramillo *et al.* 2016). Los parámetros químicos del suelo (Materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, etc.) brindan información sobre la disponibilidad de nutrientes para la producción forestal. Los parámetros biológicos del suelo (macro, meso y microfauna) dan información del secuestro de carbono (Mendes *et al.* 2019)

En Colombia el 80 % de los ecosistemas naturales han sido deforestados para el establecimiento de cultivos ilícitos, minería y ganadería. Frente a este panorama, el

Gobierno Nacional anunció en el año 2020 la siembra de 180 millones de árboles hasta el año 2022 para recuperar las áreas degradadas y se basará en el Plan Nacional de Restauración para realizar el seguimiento a los ecosistemas en cuanto a la composición de especies y diversidad estructural (Mendes *et al.* 2019). No obstante, en este tipo de proyectos es necesario incluir parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo, ya que estos proporcionan una radiografía del funcionamiento hidrológico de estos sitios (Lozano-Baez *et al.* 2021). Los autores Murcia y Guariguata (2014) expresan que gran parte de los proyectos de restauración que se ejecutan en Colombia no consideran ningún parámetro del suelo, por lo que persisten inquietudes como: ¿Cómo se han abordado las propiedades del suelo durante el proceso de restauración?; ¿Qué tipo de propiedades del suelo se utilizan?; ¿Cuáles son las regiones de Colombia donde se han medido las propiedades del suelo durante el proceso de restauración ecológica?; etc.

Por lo anterior, se requieren más investigaciones sobre el tema conjunto vegetación – agua - suelo en zonas donde se desarrollan procesos de restauración, con el propósito de conocer los efectos de los programas de restauración, más allá del establecimiento y desarrollo de nueva vegetación, es decir, que permitan conocer el funcionamiento de los nuevos ecosistemas y sus servicios ambientales. Con el fin de expandir la comprensión de los efectos en el funcionamiento ecohidrológico en los ecosistemas altoandinos que tiene la cobertura vegetal, este estudio busca evaluar los procesos ecohidrológicos en cuencas hidrográficas de Bosque Húmedo Montano Bajo sometidas a un proceso de restauración ecológica, frente a una bajo pasturas y caracterizar las variables que determinan dichos procesos en los ecosistemas emergentes.

MÉTODOS

Localización y caracterización de las zonas de estudio.

En el marco de esta investigación, se seleccionaron tres cuencas hidrográficas ubicadas en la cordillera central de los Andes en Colombia, en el departamento de Antioquia en el municipio El Retiro (figura 1). Dos de estas cuencas partieron de cobertura con pastos para ganadería, luego fueron abandonadas y están siendo objeto de un programa de restauración forestal, llevado a cabo por la Fundación Natura en la Reserva Biológica El Silencio. La cuenca Montañita, que fue abandonada en el año 1998, actualmente cuenta con 16,4 ha de bosque denso bajo de tierra firme, lo cual representa el 35,7 % de su superficie total. Asimismo, posee 1,3 ha de bosque de galería, equivalente al 2,8 % del total de su superficie. Además, se encontró 10,4 ha de bosque fragmentado con vegetación secundaria, que representa el 22,2 % del área total, y 7 ha de vegetación secundaria alta, lo cual representa el 15,0 % del área total. Por su parte, la cuenca El Silencio, en el año 2007, más del 80 % de su superficie estaba cubierta por pastos destinados a la ganadería extensiva, hoy por hoy

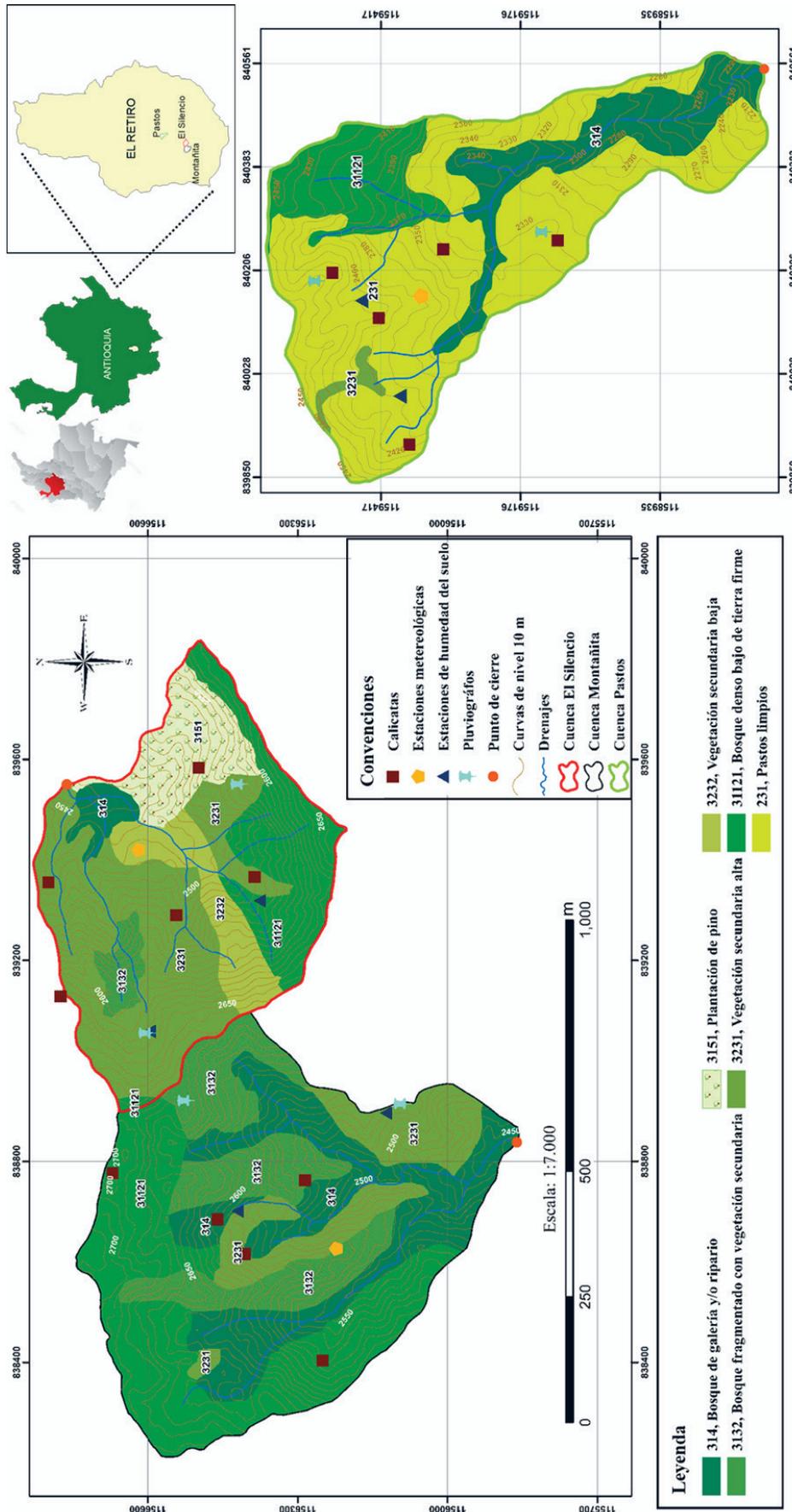


Figura 1. Mapas de los sitios de estudio ubicados en el municipio El Retiro, Antioquia.
 Maps of the study sites located in the municipality of El Retiro, Antioquia.

Fuente: Corine Land Cover (IDEAM et al. 2008).

tiene 15,16 ha de vegetación secundaria alta, lo cual representa el 45,6 % de su área total. Además, se han identificado 7,2 ha de bosque denso bajo de tierra firme, que representa el 21,6 % de su superficie total. Asimismo, se han encontrado 4,6 ha de plantaciones de pino, que equivalen al 13,9 % de su área total. También se han identificado 3,8 ha de vegetación secundaria, que representan el 11,6 % del área total, 1,2 ha de bosque fragmentado con vegetación secundaria, que representa el 3,7 % de su superficie total y 1,5 ha de bosque de galería correspondiente al 3,5 % de su superficie total. La tercera cuenca llamada Pastos (cuenca control) se localiza en la vereda La Cecilia, en el municipio El Retiro, departamento de Antioquia, cuenta con 19,7 ha de pastos limpios, para ganadería extensiva que representan el 66,6 % de su área total. También tiene 5,3 ha de bosque de galería, que equivalen al 17,9 % de su superficie total. Asimismo, tiene 4,1 ha de bosque denso bajo de tierra firme, que representan el 14 % de su área total. Por último, se identificaron 0,4 ha de vegetación secundaria que corresponde al 1,4 % de su área total. Utilizando imágenes satelitales del programa Landsat, se delimitaron cada una de las cuencas y se caracterizó su

morfometría. Igualmente se determinaron las propiedades físicas e hidráulicas del suelo, hasta una profundidad de 1 m, o hasta la presencia de la roca. Adicionalmente, se incluyó un fragmento con bosque nativo existente dentro de la Reserva (Bosque Natural), con el objetivo de establecer la línea base o valores de referencia para realizar comparaciones entre sitios de las propiedades físicas e hidráulicas y materia orgánica en el suelo. En relación con la clasificación de Holdridge, los sitios seleccionados pertenecen al Bosque húmedo Montano Bajo (bh-MB), la temperatura promedio oscila entre 14 y 16 °C y la precipitación media anual es de 2.060 mm, la cual, presenta una forma bimodal característica de la región andina en la que los periodos húmedos se registran en los trimestres de septiembre a noviembre y de marzo a mayo; y los periodos secos se presentan en los trimestres de diciembre a febrero y de junio a agosto. En el cuadro 1 se presentan las características de cada una de las cuencas de estudio.

Condiciones del clima en las cuencas estudiadas. Durante el periodo comprendido entre julio de 2017 y octubre de 2018 en cada cuenca se midieron las condiciones del clima

Cuadro 1. Ubicación y generalidades del sitio de estudio.

Location and generalities of the study site.

	<i>Cuenca El Silencio</i>	<i>Cuenca Montañita</i>	<i>Cuenca Pastos</i>
<i>Altitud (m s.n.m.)</i>	2.438 – 2.687	2.441 – 2.726	2.200 – 2.459
<i>Precipitación (mm)</i>	2.855,6	2.994,5	2.384,8
<i>Temperatura (°C)</i>	16,16	15,09	14,81
<i>Humedad relativa (%)</i>	90,66	74,80	85,67
<i>Coordenadas geográficas (grados decimales)</i>	Latitud: 6,00806 Longitud: -75,52583	Latitud: 6,00972 Longitud: -75,53222	Latitud: 6,03750 Longitud: -75,52028
<i>Área (km²)</i>	0,332	0,468	0,296
<i>Perímetro (km)</i>	2,49	2,87	2,70
<i>Long. de la cuenca [L] (km)</i>	0,66	0,95	0,96
<i>Pendiente media (%)</i>	62,87	59,90	45,05
<i>Factor de forma [F]</i>	0,76	0,52	0,32
<i>Índice de Gravelius [KC]</i>	1,21	1,17	1,39
<i>Órdenes Suelos</i>	Andisoles e Inceptisoles. ^(a)	Andisoles e Inceptisoles. ^(a)	Andisoles, Inceptisoles y Entisoles. ^(a)
	Helecho (<i>Cyathea</i> sp.) ^(b)	Mano de oso (<i>Oreopanax</i> sp.)	Kikuyo [<i>Cenchrus clandestinus</i> (Hochst. ex Chiov.)]
<i>Especies vegetales más representativas</i>	Yarumo (<i>Cecropia telenitida</i>) ^(b)	Laurel chaquiro (<i>Ocotea</i> sp.)	Falsa poa (<i>Holcus lanatus</i> L.)
	Drago (<i>Croton magdalenensis</i>) ^(b)	Amarrabollo (<i>Meriania nobilis</i> Triana.)	Espartillo (<i>Spartina densiflora</i>)
	Roble de tierra fría (<i>Quercus humboldtii</i>) ^(b)	Roble de tierra fría (<i>Quercus humboldtii</i>)	Pasto oloroso (<i>Anthoxanthum Odorum</i>)

Fuente: ^(a) (IGAC 2007). ^(b) (Fundación Natura 2016).

(precipitación, humedad relativa, temperatura, radiación solar, dirección y velocidad del viento), usando estaciones meteorológicas Davis Vantage Pro-2 (Davis Co) y Campbell (CampbellSci), las cuales fueron programadas para medir las condiciones del tiempo cada minuto y registrar datos totales (precipitación) y promedios (las demás variables) cada 15 minutos. Asimismo, en lugares diferentes a los que se ubicaron las estaciones meteorológicas se instalaron, en espacios completamente abiertos, dos pluviógrafos de cazoletas; uno marca Texas Instruments® y otro marca Hobo (Onset®) acoplados con dispositivos registradores de datos Tynitag (Gemini dataloggers®), que almacenaron datos de precipitación cada 5 minutos, con el objetivo de cubrir toda la variabilidad espacial de la precipitación y poder ajustar su valor diario. Durante el periodo de monitoreo, la descarga de los datos se realizó cada quince días usando un computador portátil, con la información obtenida se procesaron los conjuntos de datos en escalas horaria, diaria y mensual.

Propiedades físicas e hidráulicas y materia orgánica en el suelo. Dentro de cada cuenca, se realizaron selecciones aleatorias de sitios para evaluar las propiedades físicas e hidráulicas de los suelos, con el fin de obtener una representativa de las condiciones edáficas. En cada sitio se seleccionaron al azar cinco puntos, donde en cada uno de ellos se excavó una calicata de 1 x 1 x 1 m para tomar muestras de suelo de cada horizonte diagnóstico presente (A, B y C), para determinar la textura, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y las curvas de retención de humedad. Además, se tomaron muestras de suelo de cada horizonte para determinar el contenido de materia orgánica.

Mediciones ecohidrológicas. En este estudio, se emplearon diferentes métodos para determinar las variables ecohidrológicas contempladas. A continuación, se describe detalladamente la metodología utilizada para cada una de estas variables:

1. Infiltración: En cada cuenca, se llevó a cabo la medición *in situ* de la capacidad de infiltración del suelo utilizando el método de los anillos infiltrómetros (Jaramillo 2002). Para esto, se seleccionaron 12 sitios que abarcaban las partes altas, medias y bajas de las laderas. En cada sitio, se nivelaron los anillos y se enterraron aproximadamente a una profundidad de 10 cm. Se usó una regla milimétrica en el anillo interno para medir la lámina de agua infiltrada en intervalos de 5 minutos. Se llenó primero el anillo interno con agua y luego el externo manteniendo el nivel constante. En el anillo interno se midió cada 5 minutos la tasa de ingreso de agua al suelo. La prueba finalizó cuando el volumen de agua infiltrada se mantuvo constante.

2. Humedad del suelo: Se realizaron mediciones en campo de la humedad volumétrica del suelo mediante el uso de sensores de humedad en suelo TDR (Time Domain Reflectometry, Campbell Sci), instalados a diferentes profundidades dentro del perfil (5, 25, 50 y 100 cm), en dos sitios diferentes en cada una de las cuencas. Los sensores TDR se conectaron a dataloggers Campbell CR1000 y CR200 (Campbell Sci), los cuales fueron programados para medir la humedad del suelo cada 30 segundos y registrar los valores promedios cada 15 minutos. Las mediciones de campo mediante la técnica TDR fueron calibradas, de acuerdo con la metodología indicada por Tobón *et al.* (2010), mediante la extracción de muestras de suelo de volumen conocido (anillos de 5 x 5 cm), en cada uno de los sitios donde estaban instalados cada uno de los sensores, a las cuales se les determinó la humedad gravimétrica, comparando los valores entre los dos métodos y generando las respectivas ecuaciones de calibración.
3. Evapotranspiración: Se realizaron mediciones de las variables meteorológicas, como temperatura máxima y mínima, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, en cada cuenca. A partir de estos datos, se determinó la evapotranspiración de referencia (ET_o) utilizando el método de Penman-Monteith (1965). Este método tiene en cuenta parámetros fisiológicos y aerodinámicos (Allen *et al.* 1998) [1]. Los valores teóricos de los parámetros del modelo fueron: albedo (0,23), altura de la rugosidad (0,02 m), altura de la vegetación (0,12 m) y resistencia superficial (70 s m⁻¹); en lo que respecta a la elevación (m s.n.m.) y la ubicación geográfica (radianes) estos fueron específicos de cada cuenca.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p \left(\frac{e_a - e_d}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(\frac{1 + r_c}{r_a} \right)} \quad [1]$$

Donde:

R_n: Radiación neta

G: flujo del calor en el suelo

(e_a - e_d): déficit de presión de vapor del aire

ρ: densidad media del aire a presión constante

C_p: calor específico del aire

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor de saturación

γ: constante psicrométrica

r_c: resistencia superficial total

r_a: resistencia superficial aerodinámica

La evapotranspiración real o actual ET_a [2], fue calculada de acuerdo con Allen *et al.* (1998), a partir de los valores de evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o)

$$ET_a = ET_o \times Kc \times Ks \quad [2]$$

Donde K_c es el coeficiente del cultivo, aquí denominado coeficiente de la vegetación en cada cuenca y K_s es un coeficiente de reducción a la transpiración por estrés hídrico, el cual depende del agua disponible (AD) en la zona de raíces, con valores adimensionales entre 0 y 1, este queda determinado por el balance de agua en el suelo y la curva de agotamiento o reducción de la lámina de agua en la zona de raíces finas (Allen *et al.* 1998).

4. *Caudal.* En los puntos de cierre de cada cuenca, se midió el caudal, mediante el método de canales abiertos mejorados, tipo vertedero rectangular, que se instalaron en el lecho de las quebradas de cada cuenca. En cada vertedero, se instaló un limnógrafo y un barógrafo (Solinst®) para medir cada 30 segundos la lámina de agua y registrar los valores promedios cada 5 minutos. El barógrafo permitió calibrar las mediciones del limnógrafo, mediante registro continuo de la presión atmosférica. Adicionalmente, al menos una vez al mes durante el período de estudio, se llevaron a cabo aforos manuales del caudal en cada cuenca, usando un correntómetro digital FP111 (Global Water, USA) para medir la velocidad de la corriente y mediciones de la sección transversal del cauce, aplicando el método de área por velocidad de la corriente en una unidad de tiempo (segundos). Estos aforos permitieron calibrar los resultados de los cálculos de caudal mediante la medición continua de la lámina de agua en los vertederos.

A partir de los valores de caudal total en cada unidad de tiempo, se hizo la separación de los caudales, mediante el método del filtro digital recursivo (Nathan y MacMahon 1990), asignando un valor inicial al parámetro α de 0,939, de acuerdo con la calibración hecha para cada vertedero. La cantidad de caudal por encima de la línea de separación corresponde al flujo rápido o caudal de tormenta, mientras que por debajo de la línea corresponde al caudal base en cada cuenca [3].

$$Q_t = \alpha q_{t-1} + \frac{(1 + \alpha)}{2} (Q_t - Q_{t-1}) \quad [3]$$

Donde:

- Q_t = caudal de escorrentía directa filtrada en el tiempo t
- q_{t-1} = caudal de escorrentía directa filtrado en el tiempo anterior $t-1$
- Q_t = caudal total en el tiempo t
- Q_{t-1} = caudal total en el tiempo anterior $t-1$
- α = Parámetro de infiltración

- *Índice de retención y regulación hidrológica (IRH).* El Índice de retención y regulación hídrica evalúa la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales, derivado de las interacciones entre el sistema suelo-vegetación con las condiciones

climáticas y con las características físicas y morfométricas de la cuenca. Es un indicador que permite evaluar la capacidad de regulación del sistema en su conjunto (IDEAM 2010). Los valores necesarios para el cálculo se extraen de la curva de duración de caudales medios diarios para las estaciones en cada cuenca de análisis, la estimación está dada por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio y el correspondiente al área total bajo la curva de duración de caudales diarios [4]. La expresión es:

$$IRH = \frac{V_p}{V_t} \quad [4]$$

Donde:

IRH: índice de retención y regulación hídrica

V_p : Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio

V_t : Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios

- *Respuesta de las cuencas hidrográficas a eventos de precipitación.* Para analizar la respuesta de cada una de las cuencas ante eventos de precipitación en diferentes periodos del año, se seleccionaron tres eventos con magnitudes e intensidades similares, durante tres periodos característicos del clima en la región: periodos húmedos o de altas precipitaciones, en el trimestre de septiembre a noviembre de 2017 y 2018 (grupo 1), periodos de transición de húmedo a seco, durante el trimestre de diciembre a febrero de 2018 (grupo 2) y periodos secos o de bajas precipitaciones, en el trimestre de junio a agosto de 2017 y 2018 (grupo 3), los cuales se representaron por medio de hidrogramas unitarios, posteriormente se analizó la forma de los gráficos y se determinó el tipo de respuesta.
- *Rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE).* Para evaluar y comparar el funcionamiento hidrológico de las cuencas en estudio, se determinó el rendimiento hídrico, es decir, la relación entre el caudal (Q) y la precipitación (P) o la cantidad de caudal que fluye de una cuenca por unidad de superficie, en un intervalo de tiempo determinado (mm y^{-1}) (IDEAM 2010) [5], que incluye la precipitación media de la cuenca como factor de ponderación (Vásquez Velázquez 2016).

$$RH = \frac{Q}{P} \quad [5]$$

Donde:

RH: Rendimiento hídrico

Q: Caudal total (mm y^{-1})

P: Precipitación (mm y^{-1})

Adicionalmente, se utilizaron los datos de caudal rápido y precipitación colectados durante el periodo de estudio. A partir de ello, se calculó el coeficiente de escorrentía [6].

$$CE = \frac{Q_r}{P} \quad [6]$$

Donde:

CE: Coeficiente de escorrentía anual
 Q: Caudal de tormenta o rápido (mm)
 P: Precipitación (mm)

5. *Balance hídrico.* El balance hídrico de cada una de las cuencas de estudio se realizó con base en la ecuación de continuidad o ecuación general del balance de masas [7]; donde todos los factores que integran esta ecuación se expresan en término de lámina por unidad de tiempo (mm mes⁻¹).

$$\frac{\Delta Per}{\Delta t} = P - ET_a - Q - \Delta \theta t \quad [7]$$

Dónde:

Per: percolación profunda o agua infiltrada que recarga los acuíferos.
 P: Precipitación registrada (mm).
 ET_a: Evapotranspiración real (mm).
 Q: Caudal registrado (mm).
 Δθt: Cambio de humedad del suelo en el tiempo t.

Análisis estadístico. Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para comparar las variabilidad entre las medias hidrológicas y de suelos (físicos, hidráulicos y materia orgánica) monitoreadas en las tres cuencas. Además, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para evaluar la distribución normal de los datos.

Por otra parte, se realizó la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0,05$) para examinar posibles diferencias en el comportamiento promedio de las variables de suelos.

Adicionalmente, se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP) para realizar correlaciones múltiples de las variables analizadas en este estudio.

RESULTADOS

Propiedades físicas y materia orgánica en el suelo. En las tres cuencas, en cada uno de los sitios muestreados, se observó que el horizonte superficial del suelo (A) presentó las menores densidades aparentes y las mayores porosidades, así como los mayores contenidos de materia orgánica (cuadro 3). Estas características son propias de suelos Andisoles (Sánchez y Rubiano 2015). La densidad aparente presentó diferencias significativas ($P \leq 0,05$) en todos los horizontes entre los sitios en restauración (El Silencio y Montañita) y Pastos; a su vez, la porosidad mostró diferencias significativas en estos mismos sitios para los horizontes B y C. La materia orgánica en el horizonte A presentó

un valor promedio significativamente más bajo para Pastos que para Bosque Natural. La conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) tuvo diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los sitios de Bosque Natural y Pastos. Las constantes de humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) para todos los sitios fueron mayores en el horizonte superficial, donde los suelos de la cuenca El Silencio presentaron la mayor cantidad de agua disponible (AD) (0,45 cm³ cm⁻³).

Variables ecohidrológicas. Los resultados de cada una de las variables consideradas en este estudio se describen a continuación:

1. *Infiltración:* La tasa de infiltración varió significativamente ($P \leq 0,05$) entre las cuencas en restauración (El Silencio y Montañita) y la cuenca con cobertura de pastos (Pastos). El Silencio y Montañita presentaron notables similitudes en sus fases transitorias (de hasta 40 minutos) y estacionarias (de 40 minutos en adelante). Sin embargo, se destacó una disparidad en cuanto a la tasa de infiltración instantánea entre ambas cuencas, siendo Montañita la que sobresalió en este aspecto. En contraste, Pastos exhibió un perfil notablemente distinto, caracterizado por tasas de infiltración considerablemente más bajas tanto en las fases transitorias (menos de 20 minutos) como en las estacionarias (menos de 80 minutos).
2. *Humedad del suelo.* En la figura 2 se presenta el comportamiento del contenido de humedad de los suelos en los horizontes A, transición A / B, B y C, en las Cuencas El Silencio (A), Montañita (B) y Pastos (C), para el periodo estudiado (junio 2017 hasta octubre 2018). En términos generales, en las tres cuencas se aprecian diferencias en valores absolutos entre horizontes, el contenido de humedad tiende a aumentar en los periodos de altas precipitaciones (01/09/2017 hasta 30/11/2017 y 01/03/2018 hasta 31/05/2018), y a su vez disminuye progresivamente en los periodos de bajas precipitaciones (01/07/2017 hasta 31/08/2017; 01/12/2017 hasta 28/02/2018 y 01/06/2018 hasta 31/08/2018).
3. *Evapotranspiración:* Se observó una variación en la tasa de evapotranspiración real o actual (ET_a) en los sitios en restauración (El Silencio y Montañita) durante los periodos de altas y bajas precipitaciones, la cual osciló entre 1,9 y 3,1 (mm d⁻¹). En relación con el sitio de pastos para dichos periodos, la ET_a experimentó una variación de 2 y 3,2 mm d⁻¹.
4. *Caudal:* Por otra parte, los caudales base y rápido guardan una proporción del caudal total; en El Silencio el 85,90 % del caudal total corresponde a flujo base y el 14,1 % a escorrentía directa, mientras que, en Montañita, el 92,03 % es caudal base y el 7,97 % caudal rápido y en pastos el 86,97 % es flujo base y el 13,03 % escorrentía directa (cuadro 2).

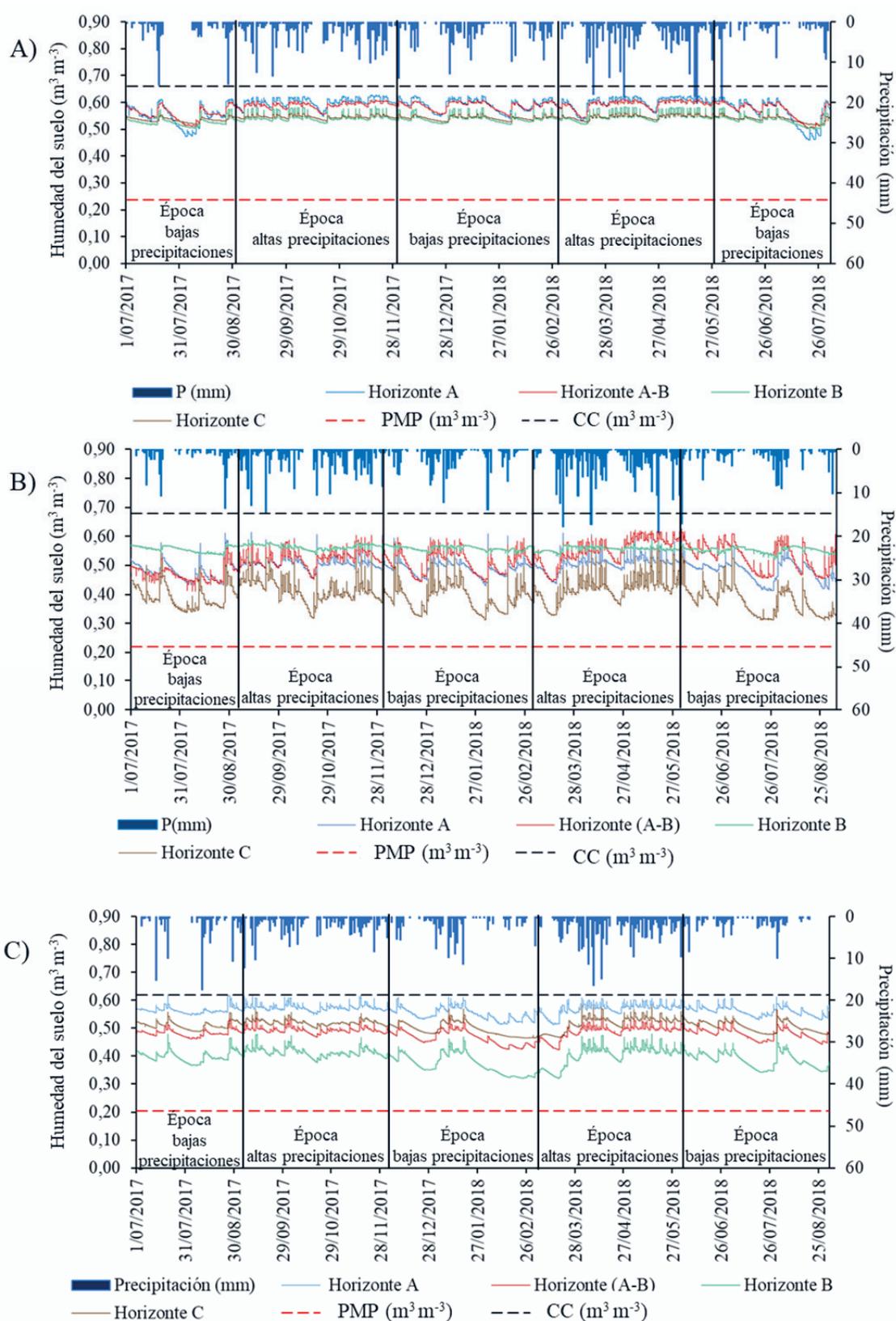


Figura 2. Comportamiento de la humedad del suelo en las cuencas El Silencio (A), Montañita (B), Pastos (C), para el periodo estudiado.
 Soil moisture behavior in the El Silencio (A), Montañita (B), and Pastos (C) watersheds for the studied period.

Cuadro 2. Valores promedio anuales de precipitación, caudales e índices de respuesta hidrológica.
 Average annual values of precipitation, flow rates and hydrological response indices.

Parámetros	Cuencas hidrográficas		
	El Silencio	Montañaíta	Pastos
P (mm y ⁻¹)	2.855,6 ± 0,196	2.994,5 ± 0,205	2.384,8 ± 0,169
Q _t (mm y ⁻¹)	1.630,2 ± 0,010	1.626,1 ± 0,006	1.518,1 ± 0,007
Q _b (mm y ⁻¹)	1.400,3 ± 0,005	1.496,4 ± 0,002	1.320,3 ± 0,002
Q _r (mm y ⁻¹)	229,9 ± 0,009	129,7 ± 0,005	197,8 ± 0,007
RH	0,57	0,54	0,63
CEA (%)	8,05	4,33	8,30
IRH	0,85	0,93	0,90

P: Precipitación, Qt: Caudal total, Qb: Caudal base, Qr: Caudal rápido o tormenta, RH: Rendimiento hídrico, CEA: Coeficiente de escorrentía anual, IRH: Índice de retención y regulación hídrica.

- *Índice de retención y regulación hidrológica (IRH).* Los sitios Montañaíta y Pastos exhibieron una muy alta capacidad de retención y regulación de humedad, mientras que, El Silencio mostró una alta capacidad en este índice. En relación con los resultados obtenidos el 85,90 % de los caudales totales generados en la cuenca El Silencio son de flujo base y el 14,1 % son escorrentía directa, mientras que la cuenca Montañaíta presentó el 92,03 % de los caudales totales como flujo base y el 7,97 % como escorrentía directa, por su parte la cuenca de pastos acumula el 86,97 % del caudal total como flujo base y el 13,03 % como escorrentía directa.
- *Rendimiento hídrico (RH) y coeficiente de escorrentía (CE).* En el sitio El Silencio, el Qt representa el 57 % de la precipitación, mientras que el Qr equivale al 8 % de esta, que sale de la cuenca en forma de escorrentía. Asimismo, en los sitios Montañaíta y pastos, se halló que el Qt representa un 54 % y un 63 % respectivamente, mientras que el Qr comprende un 4,33 % y un 8,30 % correspondientemente.
- 5. *Balance hídrico anual:* En relación con el balance hídrico anual (cuadro 4) expresado en términos de percolación o recarga de acuíferos en cada una de las cuencas estudiadas, El Silencio presentó el mayor valor durante el período de estudio (365,9 mm), seguido de Montañaíta (259,5 mm) y por último Pastos, con solo 94,7 mm.
- 6. *Análisis de componentes principales (ACP):* se observa en la figura 4 que los dos primeros factores explican la totalidad (100 %) de la variabilidad de los datos. El primer factor, llamado Dimensión 1 (Dim 1), es responsable de explicar el 75.4 % de esta variabilidad y está influenciado por las siguientes variables: conductividad hidráulica saturada (Ksat), infiltración (IN) y rendimiento hídrico (RH). Por otro lado, el segundo factor, conocido como Dimensión 2 (Dim 2), contribuye con el 24.6 % restante y se relaciona principalmente con las variables de percolación (PER), índice de retención y regulación hídrica (IRH) e índice de Baker Flashiness o de estabilidad de caudales (IBF).

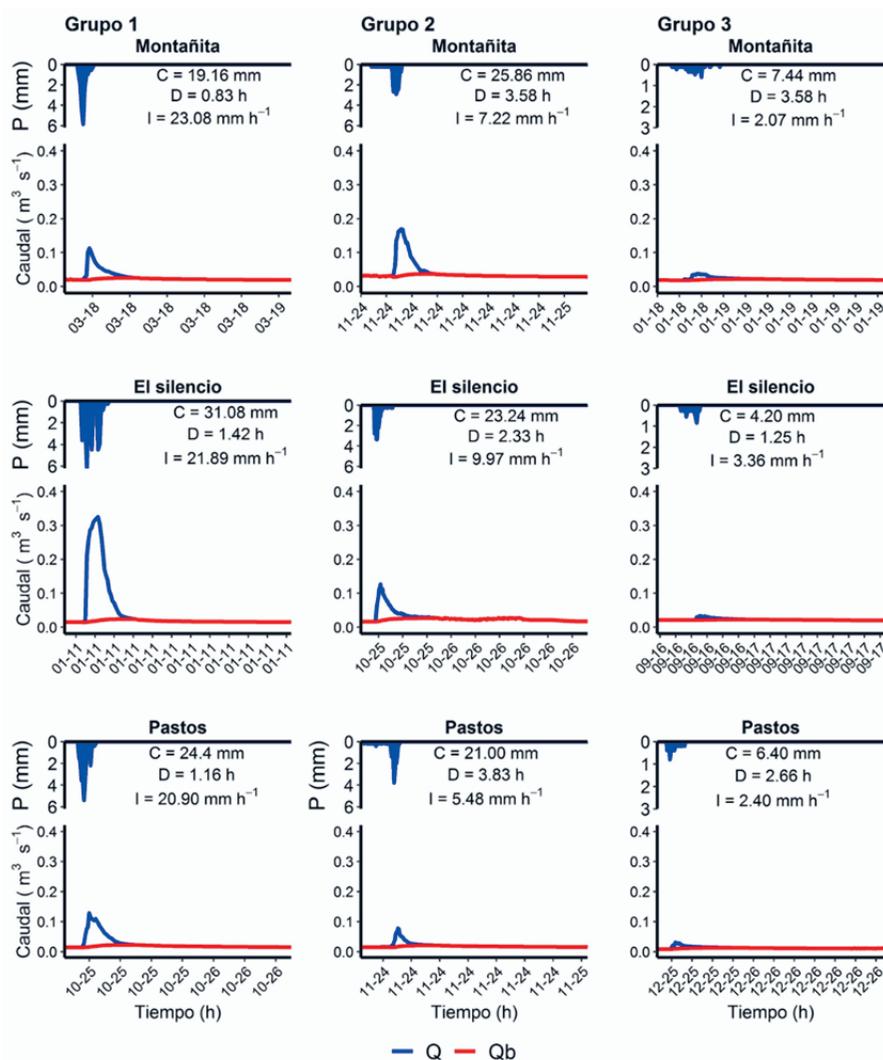


Figura 3. Contribuciones de flujos superficiales y subsuperficiales al caudal (Q) generado durante los eventos de precipitación (P). Los números al interior de cada imagen hacen referencia a la cantidad de la precipitación total registrada en dicho periodo [C en milímetros (mm)], la duración del periodo seleccionado [D en horas (h)], la intensidad promedio [I en milímetros por hora (mm h⁻¹)] y el caudal base (Qb) para cada uno de los eventos seleccionados.

Contributions of surface and subsurface flows to the flow generated during precipitation events. The numbers within each image refer to the total amount of precipitation recorded in that period [C in millimeters (mm)], the duration of the selected period [D in hours (h)], the average intensity [I in millimeters per hour (mm h⁻¹)] and base flow [Qb] for each of the selected events.

Un hallazgo interesante es que el contenido de humedad del suelo (CHS) y el IRH son ortogonales con respecto al coeficiente de escorrentía anual (CEA). Esto significa que a medida que aumenta CHS e IFB, disminuyen el CEA. Del mismo modo, se observa que la densidad aparente (Da) es ortogonal a la porosidad (Po), de manera que un aumento en Da implica una disminución de la Po y *viceversa*.

En cuanto a la caracterización de las cuencas, se puede apreciar que Montañaíta se destaca por tener los valores más altos de IN, Ks, CHS e IRH. Por otro lado, El Silencio se caracteriza por su alta percolación (PER), mientras que Pastos se distingue por tener una mayor densidad aparente (Da) y un rendimiento hídrico (RH) superior.

DISCUSIÓN

Las cuencas en proceso de restauración (El Silencio y Montañaíta), muestran una clara tendencia a recuperar las condiciones iniciales de las propiedades físicas, hidráulicas y químicas del suelo, a medida que transcurre el tiempo. La mayor recuperación de las propiedades del suelo observada en Montañaíta puede estar relacionada con la presencia de una mayor proporción de raíces finas y la actividad de bacterias y hongos. Estos organismos desempeñan un papel fundamental en la mejora de la estructura del suelo, ya que contribuyen al aumento de la conectividad de los poros y al potencial mátrico de la rizosfera. Esto, a su

Cuadro 3. Media de las propiedades físicas, hidráulicas y químicas del suelo monitoreadas en cada uno de sus horizontes (n = 48).
Mean physical, hydraulic and chemical properties of the soil monitored in each of its horizons (n = 48).

Parámetros suelo	Sitios de estudio															
	Bosque Natural				El Silencio				Montañaíta				Pastos			
	A	B	C	p-value	A	B	C	p-value	A	B	C	p-value	A	B	C	p-value
pb (g cm ⁻³)	0,58 ^{de}	0,73 ^{cd}	0,88 ^{bc}	0,00546 **	0,54 ^e	0,59 ^{de}	0,66 ^{de}	0,0525	0,55 ^e	0,57 ^{de}	0,59 ^{de}	0,0476 *	0,74 ^{cd}	1,05 ^{ab}	1,18 ^a	88e-05 ***
Ø (%)	74,62 ^a	72,40 ^{ab}	66,64 ^{bc}	0,0859	79,51 ^a	77,81 ^a	75,12 ^a	0,0525	79,26 ^a	78,68 ^a	77,73 ^a	0,0476 *	72,22 ^{ab}	60,34 ^{cd}	55,48 ^d	88e-05 ***
I (cm h ⁻¹)	N/A				12,60 ^{ab}				19,20 ^a				7,80 ^b			
Ksat (cm h ⁻¹)	12,48 ^a	9,19 ^{ab}	5,51 ^{bc}	0,0711	8,20 ^{abc}	5,89 ^{bc}	4,56 ^c	0,129	8,74 ^{ab}	8,04 ^{abc}	4,87 ^{bc}	0,0767	6,61 ^{bc}	5,54 ^{bc}	3,47 ^c	0,0596
CC (cm ³ cm ⁻³)	0,65 ^a	0,63 ^a	0,57 ^b	0,09	0,68 ^a	0,59 ^a	0,56 ^a	0,124	0,64 ^a	0,63 ^a	0,55 ^a	0,127	0,55 ^b	0,53 ^a	0,51 ^a	0,013 *
PMP (cm ³ cm ⁻³)	0,22 ^a	0,22 ^a	0,22 ^a	0,108	0,23 ^a	0,24 ^a	0,29 ^a	0,761	0,22 ^a	0,22 ^a	0,27 ^a	0,753	0,19 ^a	0,19 ^a	0,24 ^a	0,075
AD (cm ³ cm ⁻³)	0,43 ^a	0,41 ^a	0,35 ^a	0,13	0,45 ^a	0,35 ^a	0,27 ^a	0,845	0,42 ^a	0,41 ^a	0,28 ^a	0,868	0,36 ^a	0,34 ^a	0,27 ^a	0,083
mo (%)	26,63 ^a	10,40 ^{cd}	---	0,0142 *	20,10 ^{ab}	9,9 ^{cd}	---	0,00159 ***	20,40 ^{ab}	10,63 ^{cd}	---	4,99e-05 ***	18,07 ^{bc}	6,30 ^d	---	0,00976 **

pb: Densidad aparente; Ø: Porosidad; I: Infiltración; Ksat: Conductividad hidráulica; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; AD: Agua disponible; mo: Materia orgánica. / *($P < 0,05$), **($P < 0,01$), ***($P < 0,001$), a, b, c medias con letras diferentes dentro de una misma columna difieren entre sí, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Cuadro 4. Totales anuales de los componentes del balance hídrico determinados para cada cuenca hidrográfica.
 Annual totals of the water balance components determined for each watershed.

Cuencas hidrográficas	P (mm y ⁻¹)	Q _t (mm y ⁻¹)	ET _a (mm y ⁻¹)	Δ CHS (mm y ⁻¹)	Per (mm y ⁻¹)
El Silencio	2.715,77 _{ab}	1.626,9 _a	1.403,55 _a	-51,17 _a	365,85 _a
Montañita	2.859,6 _a	1.634,1 _a	1.417,71 _a	-67,33 _b	259,54 _b
Pastos	2.180,74 _b	1.470,49 _b	753,62 _b	-51,37 _a	94,7 _{4c}

P: Precipitación, Qt: Caudal total, Eta: Evapotranspiración real, ΔCHS: Delta de humedad, Per: Percolación profunda.

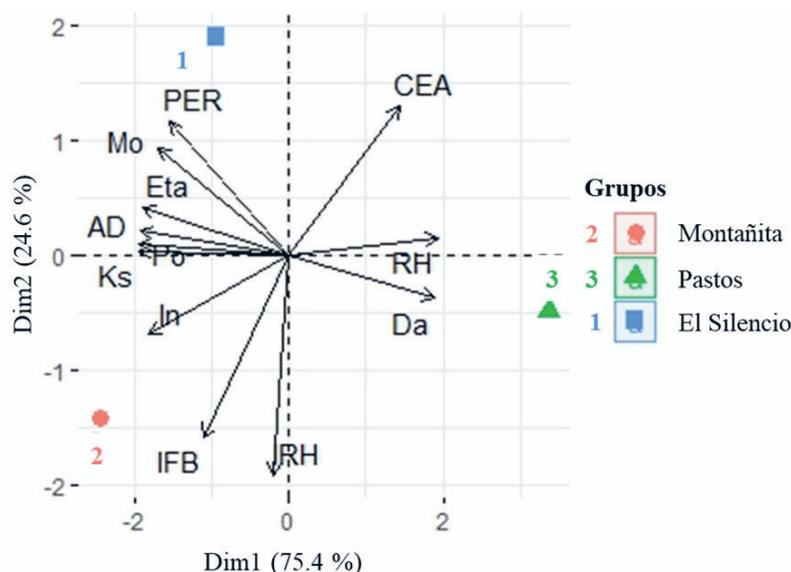


Figura 4. Análisis de componentes principales - ACP.
 Principal component analysis - PCA.

vez, facilita el incremento en el número de macroporos en el suelo y reduce la resistencia del suelo a la elongación de las raíces (Morikawa-Sakura y Yoshitakaba 2014, Vásquez Velázquez 2016, Nerhot *et al.* 2018).

Por otro lado, la cuenca con pastos (Pastos) con ganadería, presenta cambios hacia la degradación de los suelos. Esta situación probablemente está relacionada con el pisoteo del ganado, la remoción de cobertura vegetal por quemas y siembras intensivas de cultivos de papa (*Solanum Tuberosum* L.); lo que genera la disminución del volumen de vacíos y por ende afecta la recarga de aguas subterráneas y el drenaje interno, evidenciándose problemas de erosión, al aumentar el agua de escorrentía (Volveras-Mambuscay *et al.* 2016, Pereira *et al.* 2020).

El comportamiento del caudal en las tres cuencas no mostró diferencias estadísticamente significativas. No obstante, en la cuenca de Pastos se observó una mayor frecuencia de caudales pico. Esto se atribuye al deterioro que han experimentado las propiedades hidrofísicas del suelo debido a la conversión de bosques en pasturas. Tanto To-

bón *et al.* (2010) como Vásquez Velázquez (2016), afirman que este tipo de cambios de coberturas en los ecosistemas de bosques montaños tropicales causa la disminución de la infiltración y transmisibilidad del agua al interior del suelo, lo que genera este tipo de comportamiento. En las cuencas sometidas a procesos de restauración, las discrepancias en los valores absolutos señalan un claro indicio de que dichos lugares han iniciado su proceso de recuperación del régimen de caudales regulados. Este fenómeno surge como consecuencia de las mejoras en las propiedades físicas e hidráulicas del suelo, las cuales promueven la percolación del agua superficial a profundidades mayores, manteniendo velocidades que se adhieren a las leyes cinemáticas y que son de vital importancia en este contexto (Sánchez *et al.* 2015, Chandler *et al.* 2018).

Finalmente, como se presenta en los resultados del ACP donde se interrelacionan las variables ecohidrológicas con las propiedades físicas, químicas e hidráulicas del suelo y los índices de respuesta hidrológica, se evidencia que en la cuenca Montañita la conductividad hidráulica

(Ksat) e infiltración (IN) influyeron en el comportamiento del contenido de humedad del suelo (CHS) e índice de retención y regulación hídrica (IRH), lo que condicionó la respuesta del índice de estabilidad de caudales (IBF) y coeficiente de escorrentía anual (CEA). En relación con lo anterior, autores como Sánchez *et al.* (2015) afirman que el incremento de la materia orgánica mejora la infiltración y la conductividad hidráulica del suelo, debido a que esta se encarga de proporcionar energía a los microorganismos, los cuales en conjunto con los ácidos fúlvicos y húmicos logran darle una mayor estabilidad a la estructura del suelo desencadenando de este modo una mayor capacidad de infiltración y conductividad hidráulica (Blas y Mejía 2014).

En la cuenca Pastos el rendimiento hídrico (RH) estuvo condicionado por la magnitud de la evapotranspiración, lo que parece suceder igualmente en otros ambientes de bosque y otros usos del suelo (Blas y Mejía 2014, Frumau *et al.* 2006). Adicionalmente, los mayores valores densidad aparente que presentó esta cuenca en relación con las de restauración causó una disminución en la tasa de infiltración, generando que el agua proveniente de la precipitación se perdiera por escorrentía y aumentara el RH (Istedt *et al.* 2007).

Por otro lado, en la cuenca El Silencio el proceso de percolación de agua en el suelo estuvo afectado por evapotranspiración lo que a su vez generó variaciones en la HS y en los caudales en época de bajas precipitaciones. Sin embargo, el incremento de la infiltración debido al proceso de restauración favorece la recarga de los acuíferos y la regulación de los caudales base en esta época (Bonell y Bruijnzeel 2005).

CONCLUSIÓN

Se concluye que el proceso de restauración ecológica al que fueron sometidas las cuencas El Silencio y Montañita, en comparación con la cuenca Pastos, produjo el aumento de la evapotranspiración y la disminución del rendimiento hídrico. De igual manera, generó una mayor variación temporal de la humedad del suelo y la reducción de los caudales base en los periodos de bajas precipitaciones. Así mismo, incrementó el contenido de materia orgánica, mejoró la porosidad y redujo la densidad aparente del suelo. Estas condiciones favorecen el aumento de la conductividad hidráulica e infiltración, particularmente en Montañita; donde se evidenció una reducción considerable en la escorrentía que incide directamente en los caudales pico, permitiendo la recarga de los acuíferos y la regulación de los caudales base durante los periodos de bajas precipitaciones, logrando de este modo una mayor provisión de agua para las condiciones edafoclimáticas de la zona de vida de Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-MB). Adicionalmente, el tiempo del proceso de restauración en las cuencas El Silencio y Montañita es un factor que determina el comportamiento de los procesos ec hidrológicos y el estado de las propiedades físicas, hidráulicas y materia orgánica del suelo que controlan dichos procesos.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Marcela Mosquera-Vásquez realizó la investigación, la redacción del borrador original, el análisis de datos y la edición del manuscrito. Conrado Tobón Marín contribuyó al diseño de la metodología, la recolección de datos, la redacción y la revisión del manuscrito.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación contó con el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín), mediante el convenio 475-2017 financiaron la misma junto con Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE).

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Natura - Colombia, quienes proporcionaron el espacio de la Reserva Biológica El Silencio para desarrollar esta investigación y a la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en especial a los laboratorios de la Facultad de Ciencias Agrarias, por su apoyo en este proceso y permitir la ejecución de algunos análisis en sus áreas.

REFERENCIAS

- Allen RG, LS Pereira, D Raes, M Smith. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage 56. Rome, Italy. Food and Agriculture Organization. 300 p.
- Angulo-Jaramillo R, V Bagarello, M Iovino, L Lassabatere. 2016. Saturated soil hydraulic conductivity. In Angulo-Jaramillo R, V Bagarello, M Iovino, L Lassabatere eds. Infiltration measurements for soil hydraulic characterization. Cham, Switzerland. Springer International Publishing. p. 43-180.
- Beck HE, LA Bruijnzeel, AIJ Van Dijk, TR McVicar, FN Scatena, J Schellekens. 2013. The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(7): 2613-2635. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-2613-2013>
- Blas E, AR Mejía. 2014. Cobertura vegetal y capacidad de infiltración de agua en el suelo. Tesis Ingeniero Ambiental. Ancash, Perú. UNASAM. 177 p.
- Bonell M, L Bruijnzeel. 2005. Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management (International Hydrology Series). Cambridge, England. Cambridge University Press. 944 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535666>
- Bonilla-Bedoya S, A Estrella-Bastidas, JR Molina, MA Herrera. 2018. Socioecological system and potential deforestation in Western Amazon forest landscapes. *Science of the Total Environment* 644(10): 1044-1055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.028>
- Chandler KR, CJ Stevens, A Binley, AM Keith. 2018. Influence of tree species and forest land use on soil hydraulic conductivity and implications for surface runoff generation.

- Geoderma* 310: 120-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.011>
- FAO (Food and Agriculture Organization, IT). 2022. El estado de los bosques del mundo 2022. Vías forestales hacia la recuperación verde y la creación de economías inclusivas, resilientes y sostenibles. Roma, Italia. 181 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb9360es>
- Frumau KFA, LA Bruijnzeel, C Tobón. 2006. Hydrological Measurement Protocol for Montane Cloud Forests. Annex 2, Final Technical Report on DFID-FRP Project no. R7991. Amsterdam, Netherlands. Vrije Universiteit Amsterdam. 101 p.
- Fundación Natura. 2016. Caracterización, zonificación y monitoreo de carbono y biodiversidad del proyecto agrupado “recuperación de áreas degradadas con sistemas agroforestales en Colombia - instancia el silencio, bajo los estándares VCS y CCBS”. 60 p.
- Germer S, C Neill, AV Krusche, H Elsenbeer. 2010. Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. *Journal of Hydrology* 380(3-4): 473-480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.022>
- Holl KD. 2013. Restoring Tropical Forest. *Nature Education Knowledge* 4(4):4. Consultado 16 mar. 2020. Disponible en: <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/restoring-tropical-forest-97756726>
- Hurtado AB, JC Muñoz, MÁ Echeverry-Galvis, N Norden. 2022. Bosques sucesionales en Colombia: una oportunidad para la recuperación de paisajes transformados. *Caldasia* 44(2): 332-344. DOI: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n2.82255>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, CO). 2010. Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá, Colombia. IDEAM. 420 p.
- IDEAM, IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, CO), CORMAGDALENA (Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena, CO). 2008. Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Bogotá, Colombia. IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. 200 p.
- IGAC. 2007. Estudio general de suelos y zonificación de tierras: departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia. IGAC. 328 p.
- Ilstedt U, A Malmer, E Verbeeten, D Murdiyarsa. 2007. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 251(1-2): 45-51.
- IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, DE). 2019. Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Brondizio ES, J Settele, S Díaz, HT Ngo eds. Bonn, Germany. IPBES secretariat. 1144 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- Jaramillo JDF. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 613 p.
- Leite PAM, ES de Souza, ES dos Santos, RJ Gomes, JR Cantalice, BP Wilcox. 2018. The influence of forest regrowth on soil hydraulic properties and erosion in a semiarid region of Brazil. *Ecohydrology* 11(3): 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1910>
- Lozano-Baez SE, M Cooper, SFB Ferraz, RR Rodrigues, M Piarastru, S Di Prima. 2018. Previous Land Use Affects the Recovery of Soil Hydraulic Properties after Forest Restoration. *Water* 10(4): 453. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10040453>
- Lozano-Baez SE, Y Domínguez-Haydar, P Meli, I Van Meerveld, K Vásquez-Vásquez, M Castellini. 2021. Key gaps in soil monitoring during forest restoration in Colombia. *Restoration Ecology* 29(4): 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13391>
- Mendes MS, AE Latawiec, JB Sansevero, R Crouzeilles, LFD Moraes, A Castro. 2019. Look down – there is a gap – the need to include soil data in Atlantic Forest restoration. *Restoration Ecology* 27: 361-370.
- Morikawa-Sakura MS, K Yoshitaka. 2014. El vínculo de la conductividad hidráulica saturada con la velocidad de infiltración sub-superficial del suelo del bosque. *Revista de investigación de la Universidad Norbert Wiener* 3(1): 41-52. DOI: <https://doi.org/10.37768/unw.rinv.03.01.004>
- Muñoz-Villers LE, F Holwerda, MS Alvarado-Barrientos, D Geissert, B Marín-Castro, A Gómez-Tagle, J McDowell, H Asbjornsen, T Dawson, LA Bruijnzeel. 2015. Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque* 36(3): 395-407. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300007>
- Murcia C, MR Guariguata. 2014. La restauración ecológica en Colombia: Tendencias, necesidades y oportunidades. Documentos Ocasionales 107. Bogor, Indonesia. Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR). 86 p.
- Murcia C, MR Guariguata, Á Andrade, GI Andrade, J Aronson, EM Escobar, A Etter, FH Moreno, W Ramírez, E Montes. 2016. Challenges and Prospects for Scaling-up Ecological Restoration to Meet International Commitments: Colombia as a Case Study. *Conservation Letters* 9(3): 213-220. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.12199>
- Nathan RJ, T Macmahon. 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research* 26(7): 1465-1473. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Nerhot PR, DR Monzón, JR Alvarez, AE Rojas. 2018. Niveles de materia orgánica en distintos tipos de manejos / Levels of organic matter in different types of management. *Brazilian Journal of Development* 4(7): 3789-3800.
- Ochoa-Tocachi BF, W Buytaert, B De Bièvre, R Célleri, P Crespo, M Villacís, CA LLerena, L Acosta, M Villazón, M Guallpa, J Gil-Ríos, P Fuentes, D Olaya, P Viñas, G Rojas, S Arias. 2016. Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes* 30(22): 4074-4089. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Pereira NA, S Di Prima, RC Bovi, LFS da Silva, G de Godoy, RP Naves, M Cooper. 2020. Does the Process of Passive Forest Restoration Affect the Hydrophysical Attributes of the Soil Superficial Horizon?. *Water* 12(6): 1689. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12061689>
- Ramírez BH, AJ Teuling, L Ganzeveld, Z Hegger, R Leemans. 2017. Tropical Montane Cloud Forests: Hydrometeorological variability in three neighbouring catchments with different forest cover. *Journal of Hydrology* 552: 151-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.023>
- Sánchez ND, G Pinilla, JP Mancera. 2015. Efectos del uso del suelo en las propiedades edáficas y la escorrentía superficial en una cuenca de la Orinoquia colombiana. *Colombia Fo-*

- restal* 18(2): 255-272. DOI: <http://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2015.2.a06>
- Sánchez JA, Y Rubiano. 2015. Procesos específicos de formación en andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *Revista EIA* 12(2): 85-97.
- Suganuma MS, G Durigan. 2015. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. *Restoration Ecology* 23(3): 238–251. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12168>
- Tobón C, LA Bruijnzeel, KFA Frumau, JC Calvo-Alvarado. 2010. Changes in soil physical properties after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. In *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management* 502–515. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384.054>
- Tobón C, LA Bruijnzeel. 2021. Near-surface water fluxes and their controls in a sloping heterogeneously layered volcanic soil beneath a supra-wet tropical montane cloud forest (NW Costa Rica). *Hydrological Processes* 35(11):1-17. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.14426>
- Vásquez-Velázquez G. 2016. Influencia del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de cuencas de cabecera en los andes centrales de Colombia. Tesis Doctorado en Ecología. Medellín, Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. 146 p.
- Volveras-Mambuscay B, E Amézquita-Collazos, JM Campo-Quesada. 2016. Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 17(3): 361-377. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:513
- WWF (World Wide Fund for Nature, CH). 2021. ¿Qué representa el incremento del 8 % en la deforestación en Colombia? Nuestros expertos lo explican. Consultado 2 may. 2022. Disponible en: <https://www.wwf.org.co/?367792/Que-representa-el-incremento-del-8-en-la-deforestacion-en-Colombia-Nuestros-expertos-lo-explican>

Recibido: 21/12/22

Aceptado: 21/09/23

