

RAMOS FRANCO, Albaluz; ARMENTERAS PASCUAL, Dolors
INTERCEPTACIÓN Y ESCORRENTÍA DEL BOSQUE ALTOANDINO
EN LA RESERVA FORESTAL PROTECTORA "EL MALMO"

Acta Biológica Colombiana, vol. 24, núm. 1, 2019, Enero-Abril, pp. 97-108
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Biología

DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v24n1.67039>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=319059543008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

INTERCEPTACIÓN Y ESCORRENTÍA DEL BOSQUE ALTOANDINO EN LA RESERVA FORESTAL PROTECTORA “EL MALMO”

Interception and Runoff of High Andean Forest in the Protective Forest Reserve “El Malmo”

Albaluz RAMOS FRANCO¹, Dolors ARMENTERAS PASCUAL².

¹ Investigadora Grupo de Investigación Biología para la Conservación, Escuela de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Avenida Central de Norte n°. 39 – 115, edificio Centro de Laboratorios LS-215. Tunja, Colombia.

² Grupo de Ecología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Carrera 30 n°. 45-03, edificio 421, oficina 223. Bogotá, Colombia.

*For correspondence. albaluz.ramos@uptc.edu.co

Received: 14th August 2017, Returned for revision: 12th April 2018, Accepted: 23th August 2018.

Associate Editor: John Charles Donato.

Citation/Citar este artículo como: Ramos Franco AL, Armenteras Pascual D. Interceptación y escorrentía del bosque altoandino en la reserva forestal protectora “El Malmo”. *Acta biol. Colomb.* 2019;24(1): 97-108. DOI:<http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n1.67039>

RESUMEN

Los bosques tropicales son importantes a nivel mundial por su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proveen, son claves en el ciclo global del agua. Los cambios y presiones de origen antrópico que afectan a los bosques tropicales inciden en el papel fundamental de estos en la provisión de agua. En este trabajo se evalúa la relación de las coberturas vegetales presentes en el Bosque altoandino de la Reserva Forestal Protectora “El Malmo” con la calidad y cantidad de interceptación y escorrentía; la zona de vida analizada comprende cuatro tipos de coberturas: bosque denso altoandino, vegetación secundaria baja, plantación de latifoliadas y mosaico de pastos con espacios naturales. Se instalaron ocho montajes (dos por cobertura) compuestos cada uno de una parcela de escorrentía y un medidor de precipitación bajo el dosel; el levantamiento de datos se efectuó cada ocho días durante 24 semanas. Los resultados indican que la interceptación de la precipitación no difiere en cada cubierta, mientras que si se ve afectada la escorrentía superficial y su calidad respecto a sedimentos, cambios que obedecen fuertemente a las diferencias en las condiciones físicas del suelo. La cobertura que permite las mejores dimensiones de calidad y cantidad de agua es el bosque denso altoandino. La influencia de la intervención antrópica en el área y la presencia de invasoras afectan negativamente estas variables. Este trabajo aporta conocimiento sobre el comportamiento hidrológico de la Reserva, para su uso en la gestión forestal. Así mismo, genera información, hasta el momento inexistente, sobre la relación interceptación/escorrentía en bosques de la región Cundiboyacense, convirtiéndose en punto inicial de comparación para nuevas investigaciones en ecosistemas altoandinos.

Palabras clave: Calidad de agua, cantidad de agua, cobertura vegetal, suelo.

ABSTRACT

Tropical forests are important globally for their biodiversity and the ecosystem services they provide are key to the global water cycle. The changes and pressures of anthropic origin that affect tropical forests affect the fundamental role of these in the provision of water. In this work the relationship between the vegetation cover in the High Andean Forest of the Protective Forest Reserve “El Malmo” with the quality and quantity of interception and runoff is evaluated; the life zone analyzed includes four types of cover: dense high Andean forest, low secondary vegetation, broadleaf planting and mosaic of pastures with natural spaces. Eight assemblies were installed (two per cover) each composed of a runoff plot and a pluviometer under the canopy; the data was collected every eight days for 24 weeks. The results indicate that the interception of precipitation does not differ in each cover, whereas if surface runoff and its quality with respect to sediments are affected, changes that are strongly related to differences in soil physical conditions. The coverage that allows the best dimensions of quality and quantity of water is the high Andean dense forest. The influence of anthropic intervention on the area and the presence of invasive species adversely affect these variables. This work provides knowledge about



the hydrological behavior of the Reserve, for its use in forest management. Also, it generates information, until the moment nonexistent, on the interception / runoff relationship in forests of the Cundiboyacense region, becoming an initial point of comparison for new research in High Andean ecosystems.

Keywords: Soil, vegetation cover, water quality, water quantity.

INTRODUCCIÓN

El agua se considera un bien natural con valor económico desde la Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro en 1992 (Van der Zaag y Savenije, 2006), es valorado como un recurso finito, vulnerable y esencial que debe ser gestionado de forma integral (ICWE, 1992). La provisión de agua dulce para consumo humano, riego de cultivos, producción industrial e hidroeléctrica, es un factor prioritario en la economía mundial. A pesar de esto, aproximadamente el 60 % de los ecosistemas analizados en la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment, 2005a), están siendo degradados o usados de manera insostenible, aumentando la probabilidad de cambios no lineales en los servicios de provisión y por tanto en el bienestar humano de quienes los reciben. Los impactos en estos ecosistemas muchas veces se evidencian a cierta distancia de donde ocurren, i.e en la provisión de agua dulce a partir de sistemas de alta montaña, los cambios ocurridos en la parte alta de las cuencas se potencian en las zonas bajas de las mismas (Millennium Ecosystem Assessment, 2005b).

Los bosques tropicales son ecosistemas importantes por su elevada biodiversidad y por los servicios ecosistémicos que proveen, tienen un papel clave en el ciclo global del agua, entre otros favorecen la infiltración, incrementando la humedad del suelo, la recarga de acuíferos, contribuyendo a la liberación gradual de agua en los ecosistemas (Calder y Aylward, 2006; Carvalho-Santos *et al.*, 2014). El suministro de agua es un servicio ecosistémico de aprovisionamiento, tanto en sus atributos de cantidad y calidad como en el de temporalidad. Estos surgen a partir de los procesos ecológicos específicos de cada lugar que representan más que la suma de sus partes; a partir de dichos procesos, emergen atributos hidrológicos que caracterizarán al servicio que brinda el ecosistema (Brauman *et al.*, 2007).

La interceptación es un factor de gran relevancia para comprender los servicios ecosistémicos relacionados con el agua en zonas boscosas. La cobertura vegetal es impactada por la precipitación en forma de lluvia, la cual puede permanecer en el follaje, bajar por el tronco, caer desde las hojas por goteo, o en última instancia, no chocar con ningún elemento vegetal hasta tocar el suelo (Téllez, 2003; David *et al.*, 2005). Cuando la precipitación se manifiesta en forma de rocío, se forman cúmulos que atraviesan el dosel, las gotas microscópicas se adhieren a las superficies foliares y leñosas, se unen con otras hasta formar una gota lo suficientemente grande como para deslizarse hasta el suelo (Holder, 2004). Una vez allí, penetra la capa de hojarasca y llega hasta la superficie del suelo. Las gotas pueden quedar retenidas en los poros del sustrato y cuando éste alcanza su

máxima saturación, el exceso de agua es arrastrado por la inclinación del terreno. La velocidad en la que esta saturación es liberada por medio de la escorrentía superficial, depende de las características del suelo (IDEAM, 2004).

La estructura del bosque, como la distribución de la cubierta y densidad, el balance hídrico de las especies y su tasa de crecimiento también influencian el balance de agua en un ecosistema. En general, las especies de árboles de hoja caduca interceptan menores cantidades de agua que las especies de hoja perenne, interceptación que está alrededor del 18 % y el 31 % de total de precipitaciones respectivamente (Carvalho-Santos *et al.*, 2014). Existe también un efecto de la densidad del dosel en la interceptación de precipitación (Livesley *et al.*, 2014); índices de área foliar más altos, han sido asociados a una reducción del 45 % del volumen de agua que llega a la superficie del suelo, minimizando así la erosividad del líquido. En los bosques tropicales la abundancia de epifitismo también incrementa la interceptación de agua en forma de niebla, que de otra manera no sería recuperada (Holder, 2004).

El tipo de cobertura vegetal asociada al uso del suelo influye en la textura del mismo y determina la estructura edáfica que a su vez modifica sus propiedades hídricas (Sánchez *et al.*, 2015); las características físicas, químicas y biológicas de los suelos bajo cubiertas forestales son especialmente adecuados para proveer agua de alta calidad a los arroyos, moderar la hidrología de la cuenca y proporcionar diversos hábitats acuáticos; sus altos contenidos orgánicos contribuyen a una abundante y diversa microfauna; los sistemas radiculares bajo los bosques son extensos y relativamente profundos en comparación con las tierras agrícolas y los pastizales; en conjunto, estas condiciones biológicas crean suelos con alta macroporosidad, baja densidad aparente, conductividades hidráulicas altamente saturadas y elevadas tasas de infiltración (Neary *et al.*, 2009). Un cambio en dicha cobertura podría generar pérdidas de materia orgánica, incremento en la densidad del suelo y de la erosión, disminución en la continuidad de los flujos hídricos e incremento de la escorrentía superficial. Este tipo de incremento, no solo amenaza el cambio en la calidad del agua cuenca abajo, aportando sedimentos y nutrientes lixiviados (Rodríguez *et al.*, 2009), sino que aumenta el riesgo por inundación en las poblaciones circundantes (Henríquez *et al.*, 2006).

La Reserva Forestal Protectora El Malmo, categorizada dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (Herrera, 2005), es uno de los pocos remanentes de bosque altoandino cercanos a la ciudad de Tunja, allí nacen las quebradas Barón y Verbenal, que abastecen los acueductos

rurales de las veredas Barón, Runta y Chorro Blanco. Esta reserva se encuentra bajo una alta intervención antrópica y presenta gran presencia de pasturas y de *Chusquea scandens* Kunth, especie que puede reducir la regeneración natural del bosque e incluso, detener la sucesión vegetal (Trujillo y Vargas, 2004; Montenegro y Vargas, 2008; Cantillo *et al.*, 2009). Así mismo, dentro del área declarada se encuentra una plantación no documentada de *Acacia melanoxylon* R.Br. y *Acacia mearnsii* De Wild., esta última especie catalogada dentro de las 100 más invasivas del mundo (Lowe *et al.*, 2000). *Acacia melanoxylon* puede llegar a afectar la supervivencia y el crecimiento de las especies nativas y convertirse en fuerte competidor reduciendo las áreas ocupadas por las especies nativas (Arán *et al.*, 2013). La hipótesis planteada es que la zona puede presentar cambios importantes en la cobertura original del Bosque Altoandino, afectando negativamente las tasas de retención e interceptación de las precipitaciones, y por tanto, alterando algunas dimensiones de los servicios hidrológicos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la cantidad y calidad de agua de interceptación y escorrentía y su relación con las diferentes coberturas vegetales presentes en el Bosque Altoandino de la Reserva Forestal Protectora El Malmo; se espera aportar valiosa información a los escasos registros que cruzan las variables precipitación/escorrentía, así como

realizar comparaciones entre cubiertas intermedias, que no se encuentran en la literatura. Esta investigación pretende sentar un precedente comparable, sobre los fenómenos que pueden estar ocurriendo en los bosques del altiplano Cundiboyacense y que aún no han sido explorados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La Reserva Forestal Protectora El Malmo se localiza a 8 kilómetros de Tunja (Boyacá), en la vía Tunja-Bogotá, en la vereda Barón Germania ($05^{\circ}29'59''$ N y $73^{\circ}25'00''$ W), entre 3050 y 3200 m s.n.m. y sobre la falda sur-occidental de la cuchilla Alto del Muerto (Fig.1) (Herrera, 2005). Fue declarada Reserva Forestal Protectora, a través de la Resolución Ejecutiva No. 362 del 17 de diciembre de 1976 y el Acuerdo No. 36 del 28 de octubre de 1976, con una extensión de 159 hectáreas (CorpoBoyacá, 2011). Según Herrera (2005) hay presencia de bosque altoandino, herbazal alto, zonas eriales y cultivos. Cabrejo y González (2002), encontraron mediante perfiles fisonómicos, un gradiente de distribución de especies características de bosque húmedo montano, convirtiéndose en arbustales y pastizales típicos de Subpáramo a medida que se incrementa la altitud; la especie dominante (con predominio fisonómico del 90 %)

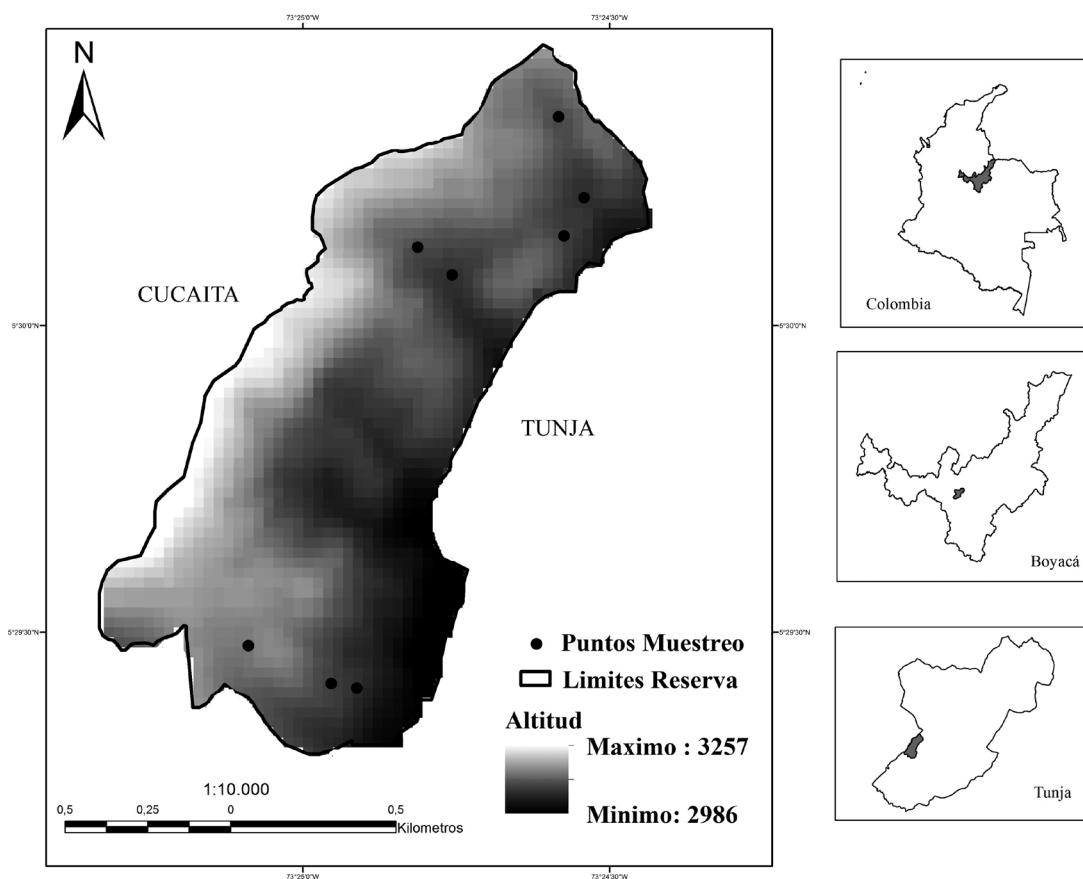


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo dentro de la Reserva Forestal Protectora “El Malmo”.

es *Weinmannia tomentosa* L.f., seguida por *Myrcianthes leucoxyla* (Ortega) McVaugh; con abundante epifitismo del estrato arbóreo con géneros como *Polytrhicum* sp. (musgos), *Odontoglossum* sp. (orquídeas) y *Tillandsia* sp. (bromelias). Las condiciones climáticas reportadas por la estación IDEAM UPTC indican un promedio anual de precipitación entre 800-1000 mm y temperaturas entre los 6-12 °C; atendiendo al régimen bimodal de la región Andina Colombiana, con dos picos lluviosos comprendidos de abril a mayo y de octubre a noviembre. Sin embargo, el presente estudio fue realizado en un año con influencia del fenómeno El Niño, durante el periodo febrero-agosto de 2016.

Diseño muestral

Para el establecimiento de los montajes de medición, se realizó una visita previa de verificación de coberturas presentes, se encontraron cuatro tipos de coberturas principales: bosque nativo maduro, plantación de *Acacia melanoxylon* y *Acacia mearnsii*, vegetación de sucesión secundaria dominada por *Chusquea scandens* y pastizales de *Pennisetum clandestinum* (Chiov.) Morrone. Posteriormente, se instalaron un total de ocho puntos de muestreo con dos montajes en cada uno de ellos, distribuidos de tal manera que se abarcara la extensión de la Reserva (Fig. 1), eligiendo lugares donde la topografía del terreno y la distribución de *C. scandens* permitieran su correcta instalación.

Medición y análisis de las variables

Para conocer el área y distribución de las coberturas vegetales presentes y poder hacer el diseño muestral, primero se realizó una clasificación supervisada de coberturas bajo el sistema Corine Land Cover para Colombia (IDEAM, 2010). Esta clasificación se realizó a partir de una imagen Spot-5 con resolución espacial de 5x5 m en las bandas 1, 2, 3 utilizando el programa de Sistema de Información Geográfica ArcGIS® (ESRI, 2015). Posteriormente, en los ocho puntos de muestreo seleccionados, se midió la densidad del dosel con ayuda de un densímetro forestal convexo (Densímetro Esférico Forestry Suppliers Modelo A Convexo) obteniendo con esto una estimación del porcentaje de cobertura. Esta información fue analizada con la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($p<0,05$) y test de Dunnett para detectar diferencias entre la densidad del dosel de cada cobertura; con ayuda del programa SPSS® (IBM, 2013).

Para esta investigación, la función interceptora del dosel fue medida como la precipitación interna, interpretada como aquella porción de lluvia que logra atravesar o resbalar del dosel hasta llegar al suelo (León *et al.*, 2010). Para su medición, se instalaron cinco pluviómetros digitales inalámbricos en cada punto de muestreo, con 5 m de separación entre ellos. Se ha reportado que el flujo del fuste y ramas no alcanza el 2 % del total interceptado por el follaje (Livesley *et al.*, 2014), por tanto no fue tomado en cuenta en este estudio. De forma paralela se

registró la precipitación reportada en la Estación Climatológica del IDEAM ubicada en el Campus de la UPTC (Tunja).

También se sitió una parcela convencional cerrada de escorrentía de 1 m² con recipiente colector en cada punto de muestreo, a 2 m de distancia del montaje de interceptación. Cada parcela fue construida en dirección a la pendiente (menor al 1 %) con láminas galvanizadas enterradas a 10 cm de profundidad en el terreno. El flujo almacenado en el recipiente colector fue medido semanalmente con un instrumento calibrado, desocupando el recipiente después de cada lectura. Para conocer la relación de humedad del suelo con la escorrentía superficial, se analizaron textura, densidad real, aparente y porosidad del suelo de cada tipo de cobertura (Kaúrichev, 1984; Rios *et al.*, 2006). Para los valores de porosidad, se utilizó el índice de porosidad de Kaúrichev (1984) el cual indica que los suelos con valores menores a 40 % tienen una porosidad muy baja, seguidos por aquellos entre 40 y 50 como baja, de 50 a 55 satisfactoria, de 55 a 70 excelente y por último, los valores de más del 70 % tienen porosidad excesiva.

La precipitación interna (Pi) y la escorrentía superficial (Es) se midieron durante un periodo de 24 semanas, comprendidas entre febrero y agosto de 2016. Esta información fue analizada con la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($p<0,05$) y test de Dunnett para encontrar diferencias significativas con ayuda del programa SPSS® (IBM, 2013).

Para el estudio de la calidad de agua se tomaron dos réplicas con muestras de 500 ml de la escorrentía almacenada en el tanque colector de cada punto de muestreo para su examen en laboratorio certificado, donde se realizaron pruebas de sólidos suspendidos totales (SST). Los resultados se analizaron bajo los parámetros del IDEAM (2011) usando el Índice de Calidad del Agua (ICAsst) que califica los rangos tolerables de sedimentos en el agua como calidad muy mala (0), mala, regular, aceptable y buena (1). Para encontrar relación entre las variables medidas, se utilizó el estadístico Rho (ρ) de Spearman, ideal en el tratamiento de datos no paramétricos, con ayuda del programa SPSS® (IBM, 2013).

Finalmente, una de las formas más sencillas de saber cuántos metros cúbicos de agua está aportando un terreno a su cuenca, es conocer el escurrimiento medio, que utiliza los valores de área, precipitación y coeficiente de escorrentía para indicar el aporte del líquido al afluente, si en el transcurso de un año lloviera de manera idéntica cada día sobre una hectárea. El cálculo del coeficiente de escorrentía (C) que expresa la porción de lluvia que se convertirá en caudal, se obtuvo dividiendo la precipitación interna media en Es de cada tipo de vegetación.

RESULTADOS

Coberturas vegetales

En la Reserva hay presentes seis tipos de cobertura diferentes denominados por Corine LandCover (IDEAM, 2010) (Fig.3) como Bosque Denso Altoandino con 76,04

ha (bosque nativo maduro), Vegetación Secundaria Baja con 52,62 ha (sucesión secundaria de *C. scandens*), Mosaico de Pastos con Espacios Naturales con 17,46 ha (pastizal de *P. clandestinum*), y Plantación de Latifoliadas con 1,01 ha (*A. melanoxylon* y *A. mearnsii*).

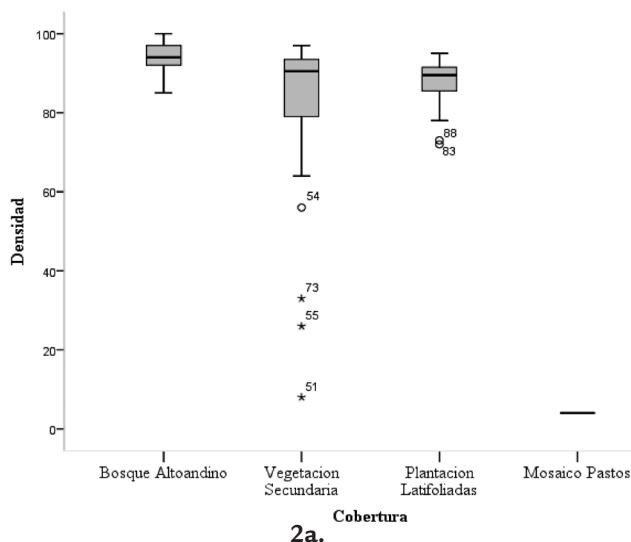
Arbustal Denso de Subpáramo (9,04 ha) y Tierras Desnudas o Degradas (1,63 ha) no fueron incluidas en el análisis por no corresponder a la zona de vida evaluada (bosque Altoandino); para un total de 157,80 hectáreas delimitadas en la cartografía oficial. En referencia a la cobertura del dosel, el Bosque Denso Altoandino es el más denso con un 94,07 %, seguido de la cobertura Vegetación Secundaria Baja con un 87,31 % y la Plantación de Latifoliadas con 81,38 % (Tabla 1). No se encontró diferencia significativa entre la densidad de Vegetación Secundaria Baja y Plantación de Latifoliadas (Fig. 2a).

Interceptación de la precipitación

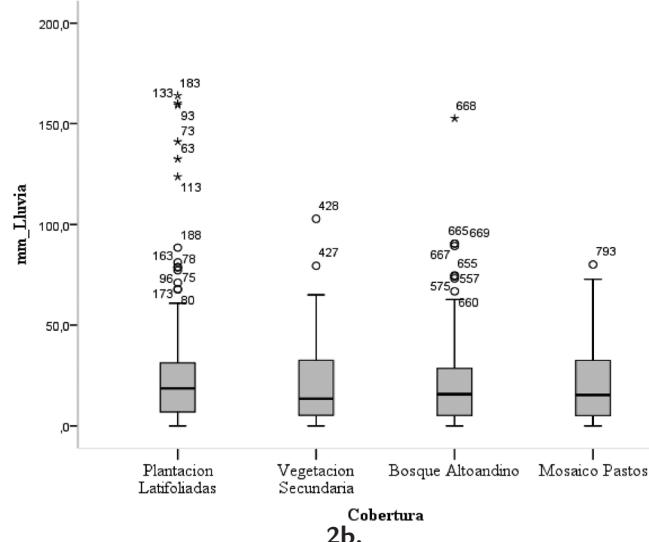
La prueba de Kruskal-Wallis indica que no existe diferencia significativa entre la interceptación en cada tipo de vegetación ($p>0,10$) (Fig. 2b) con rangos promedio de 395 a 420 mm de lluvia en los seis meses evaluados. Los registros pluviométricos tomados en cada punto muestran dos picos para los meses de abril-mayo (120 mm/mes en promedio) y julio (alrededor de 160 mm/mes) que coinciden con los datos climáticos reportados en la estación de IDEAM de Tunja.

Escorrentía superficial

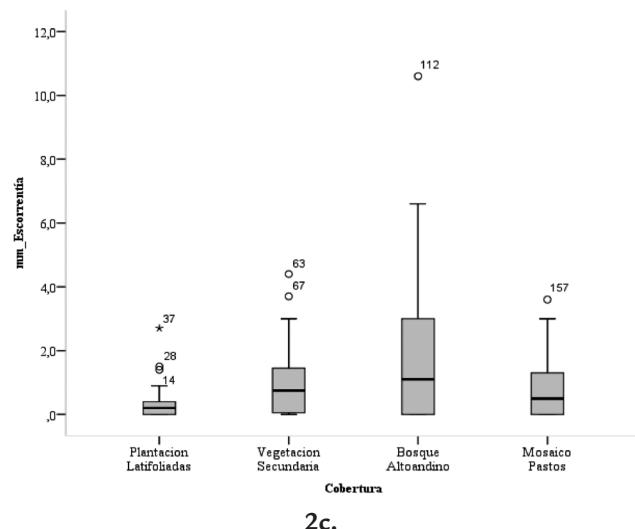
Los datos obtenidos a partir de las parcelas de escorrentía indican que las coberturas de Bosque Denso Altoandino y Vegetación Secundaria se comportan de manera similar (96,73 y 88,79 mm respectivamente, en los seis meses evaluados), la lámina superficial de Plantación de Latifoliadas



2a.



2b.



2c.

Figura 2. Análisis de Varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis; 2a. Las densidades de cobertura en cada sitio de muestreo se agrupan en tres: Bosque Denso Altoandino, con la mediana más alta, Plantación de Latifoliadas y Vegetación Secundaria sin diferencia entre ellas y por último Mosaico de Pastos con la mediana más baja; 2b. No se encontraron diferencias significativas entre la interceptación de la precipitación en cada sitio de muestreo; 2c. Las láminas de escorrentía superficial presentan diferencias mínimas en su volumen, siendo Plantación de Latifoliadas el más bajo; Vegetación Secundaria y Bosque Altoandino son similares, mientras que Mosaico de Pastos no se diferencia de las anteriores.

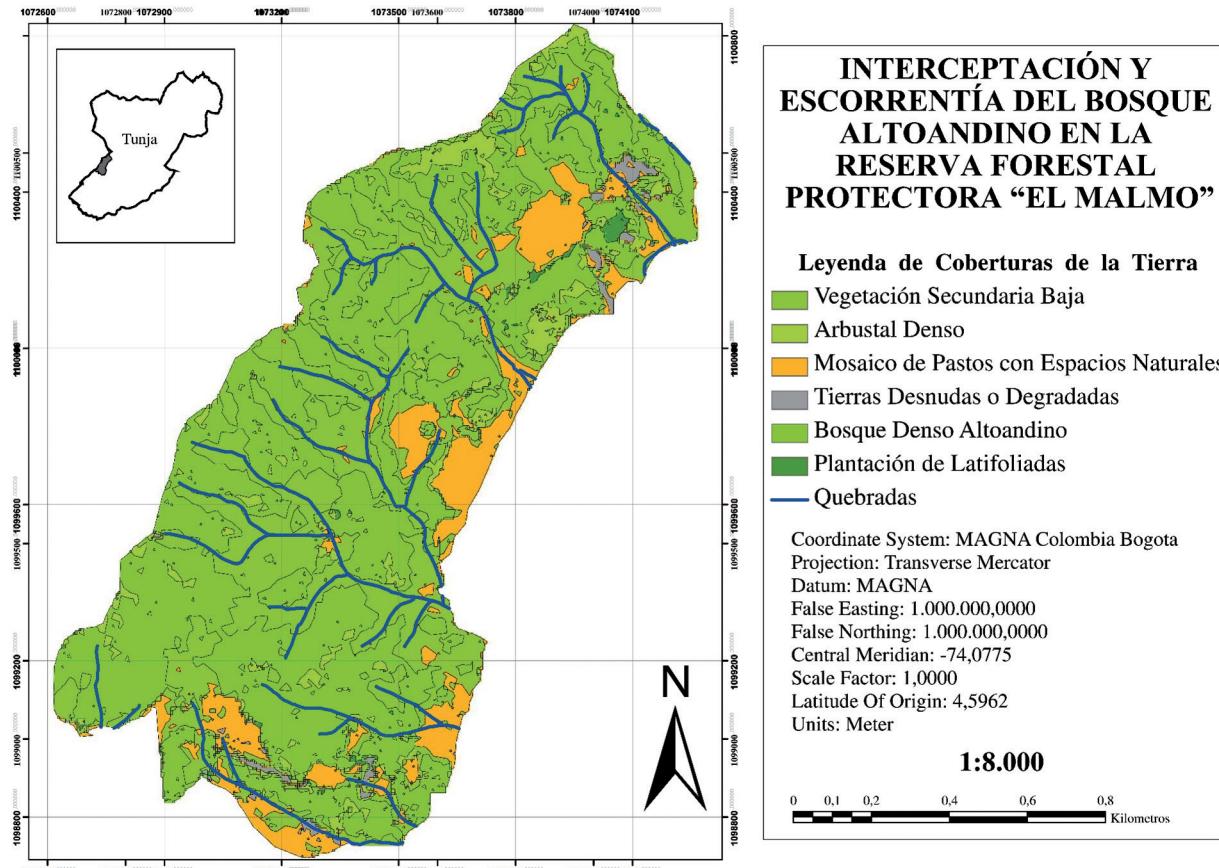


Figura 3. Clasificación supervisada de Coberturas de la Reserva Forestal Protectora El Malmo, según la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia.

Tabla 1. Extensión y densidad del dosel de Coberturas Vegetales en la Reserva Forestal Protectora El Malmo.

Cobertura	Extensión (ha)	% Extensión	% Densidad Dousel
Bosque Denso Altoandino	76,04	48,19	94,072
Vegetación Secundaria Baja	52,62	33,35	87,312
Mosaico Pastos con Espacios Naturales	17,46	11,06	0,16
Plantación de Latifoliadas	1,01	0,64	81,38
Total	147,13	93,24	--

presenta los valores más bajos (76,28 mm) y Mosaico de Pastos no se diferencia significativamente de las otras tres coberturas ($p>0,05$) (Fig. 2c). Los valores de escorrentía para cada cobertura muestran dos incrementos importantes que corresponden a los picos lluviosos registrados en abril-mayo y julio.

Calidad del agua de escorrentía

La Tabla 2 indica que la mejor calidad de agua fue obtenida en la cobertura de Bosque Altoandino con un promedio de 45,5 mg/l, mientras que la peor se encontró en la Plantación de Latifoliadas con 207 mg/l. Los promedios de Vegetación Secundaria y Mosaico de Pastos fueron de 107 y 115 mg/l respectivamente.

Parámetros físicos del suelo

Los resultados de textura, densidad real, aparente y porosidad del suelo de cada tipo de cobertura se muestran en la Tabla 2. Se observan los valores más críticos en la Plantación de Latifoliadas.

Relación entre variables

Inicialmente se evaluó la relación entre la densidad de cada cobertura con la cantidad de precipitación interna, con un resultado de -0,412 ($p<0,05$), es decir una correlación negativa débil; sucede lo contrario al analizar dicha relación entre la densidad del dosel y el volumen de lámina de escorrentía donde Rho es igual a 0,393 (positiva débil) y carece de significancia estadística ($p>0,10$).

La calidad del agua de escorrentía obtuvo un valor de 0,429 (positiva débil) igualmente sin significancia ($p>0,10$). Sin embargo, la correlación de Spearman entre la escorrentía y su calidad con el parámetro Densidad Aparente (DA) dio como resultado una relación negativa fuerte entre DA y Es ($\rho= -0,821$ y $p>0,05$). Por otro lado, DA y la calidad medida en ICAsst tienen una relación negativa fuerte ($\rho= -0,893$ y $p>0,05$).

Volumen medio de escorrentía

Los valores del volumen medio de escorrentía (Vm) en cada cobertura varían entre 1,30 y 6,93 m^3 (Tabla 2), con la mayor cantidad de agua del Bosque Denso Altoandino.

DISCUSIÓN

El Bosque Denso Altoandino es la cobertura con mayor presencia en la zona. No se han realizado investigaciones sobre el estado sucesional de la Reserva, pero es posible observar un avance de especies de sucesión secundaria como *C. scandens* que suelen iniciar su desarrollo en lugares donde el disturbio ha cesado y encuentran los recursos de luz y espacio ideales para establecerse, como por ejemplo, los bordes del bosque original (Montenegro y Vargas, 2008).

En la zona se observó una densa estructura que forma *C. scandens*, cuando sus tallos empiezan a superar el metro de altura. Estos suelen arquearse o adherirse a troncos de árboles cercanos, hasta sobrepasarlos y cubrir su copa o en los peores casos derribarlos con el excesivo peso de su biomasa. Aunque devastador para la flora nativa, *C. scandens* ha sido reportada como una planta ideal para la estabilización de taludes, puesto que disminuye la acción erosiva del agua y el viento en pendientes muy pronunciadas, en gran parte por el microclima creado a partir de su fisonomía (Montenegro

y Vargas, 2008). Esta especie, además contribuye a los balances de humedad en el suelo de los bordes de quebradas y ríos secundarios, evitando fenómenos de remoción en masa (Sarmiento y Torres, 2008). El mapa de coberturas de la tierra elaborado para este trabajo confirma la preferencia de esta hierba por los bordes de las quebradas que nacen en la Reserva, incrementando su abundancia en el sotobosque de *W. tomentosa* y *M. leucoxyla*, se espera que algunas investigaciones en curso puedan evaluar su distribución históricamente para saber si pueden llegar a ser reemplazadas por completo en el futuro (Fig.3).

A pesar de la presencia de cuatro tipos de cobertura, la poca diferencia entre las densidades de Bosque Denso Altoandino, Vegetación Secundaria y Plantación de Latifoliadas, es respuesta a la morfología de los árboles como *W. tomentosa*, *M. leucoxyla* y *A. mearnsii* de amplias y densas ramas cubiertas por completo de bromelias, orquídeas y briofitos, así como la superposición de tallos y nudos de *C. scandens* que forman el sustrato ideal para colchones de briofitos; aunque la proyección a suelo de las copas de *A. melanoxylon* no es mayor a 50 cm de diámetro, la abundancia de Bromeliaceae respalda sus altos valores de cierre del dosel. Este aumento en la superficie de contacto de la niebla y la lluvia permite que el proceso de interceptación en cada sitio sea tan similar, en especial por el aporte de los epífitos que puede acumular hasta tres veces su peso seco en agua y liberarla gradualmente, disminuyendo la energía cinética de su caída hasta el suelo (Levia *et al.*, 2011).

La Reserva Forestal Protectora El Malmo es rica en diversidad de epífitas vasculares y no vasculares (Cubrejo y Gonzalez, 2002; Álvaro *et al.*, 2006) y las características de su distribución dentro del bosque corresponden a bosque

Tabla 2. Parámetros físicos del suelo de cada cobertura; índice de calidad del agua por sólidos suspendidos y su categoría por cada tipo de vegetación y valores medios de escorrentía (Vm) para cada tipo de cubierta vegetal en la Reserva Forestal Protectora El Malmo.

Parámetro	Bosque Denso Altoandino	Vegetación Secundaria	Mosaico de Pastos	Plantación de Latifoliadas
Textura	Franco	Franco	Franco	Arcilloso
Densidad real	2,11	2,17	2,38	2,04
Densidad aparente	0,62	0,77	0,76	1,45
Porosidad	70,68 %	64,05 %	68,02 %	28,83 %
	Excelente	Excelente	Excelente	Muy Baja
ICAsst (replica 1)	0,852	0,75	0,546	0,75
	Aceptable	Aceptable	Regular	Mala
ICAsst (replica 2)	0,915	0,648	0,804	0,648
	Buena	Regular	Aceptable	Mala
C	0,08	0,05	0,03	0,01
Pi media (mm)	81,53	77,32	88,35	95,67
VM (m^3)	6,93	4,02	2,62	1,30

nublado motano alto (Bruijnzeel y Hamilton, 2000); encontrando ramas, tallos y hojas colmados de hepáticas, helechos, musgos, orquídeas y bromelias, en las cuales la precipitación horizontal forma microturbulencias que saturan su biomasa en el llamado “efecto esponja” (Levia *et al.*, 2011). Se destaca la participación de los epífitos de los bosques tropicales en los procesos biogeoquímicos, en el balance hídrico del mismo (Van Stan II y Pypker, 2015), la íntima relación entre la altísima diversidad, abundancia de epífitas y la niebla en el trópico Americano, donde su permanencia dependerá en gran mayoría de este fenómeno atmosférico, contribuyendo a la interceptación de agua en los períodos secos (Obregon *et al.*, 2011). Aunque se esperaría que Mosaico de Pastos tuviera valores distintos de interceptación, se puede concluir que la estructura en antena de las ramas e inflorescencias de especies como *P. clandestinum*, presente en la Reserva, permite una interceptación de lluvia y niebla similar a las ramas de árboles de pequeño porte (Ataroff y Naranjo, 2009), siempre y cuando la actividad ganadera no sea intensiva y permita el desarrollo sexual de la pastura; durante la fase de campo del presente estudio, la presencia de ganado bovino se vio limitado a un par de semanas, cuando la sequía de febrero llegaba a su fin, de esta forma, las especies lograron su desarrollo para el inicio de las lluvias, permitiendo medir las variables de interés sin alteraciones antrópicas.

La cobertura nativa densa presentó los datos más grandes de escorrentía superficial, que pueden ser explicados por la condición de saturación permanente del suelo gracias a un nivel freático alto; diversos trabajos demuestran el poder regulador de caudales por parte de la vegetación de alto y medio porte, facilitando la permanencia de acuíferos y niveles freáticos elevados que suministran la base de las quebradas nacientes (Villegas, 2004; Ríos *et al.*, 2006). Durante la realización de esta investigación, se observó un importante incremento en el nivel freático de la cobertura de Bosque Denso Altoandino, ocurrido a finales de Mayo cuando el pico de lluvias empezó a descender; aunque esta variable no fue incluida en el diseño experimental, las parcelas de escorrentía allí ubicadas, fueron levantadas del ras del suelo debido a la fuerza de empuje ejercida por el agua freática, y este fenómeno no se detuvo incluso al finalizar el periodo estudiado. Es probable que en el tiempo seco influenciado por el Fenómeno El Niño de fuerte intensidad registrado desde Diciembre de 2015, (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2016) disminuyeran las reservas subterráneas de agua en la zona y posteriormente, las fuertes precipitaciones en los meses de abril y mayo recargarán de nuevo el acuífero, devolviendo la humedad permanente al suelo franco de la cobertura, frenando la infiltración y aumentando la escorrentía superficial (Bruijnzeel, 1989). En diálogo con el encargado del Acueducto Veredal de Germania, se evidencia la importancia del acuífero a nivel local, ya que no se tuvieron que implementar estrategias de racionamiento de agua durante la fuerte sequía y la oferta del líquido fue

estable. La cobertura de Vegetación Secundaria tuvo un comportamiento similar, que puede estar influenciado por el mismo fenómeno. Así, se estaría apoyando parcialmente la hipótesis “*trade-off* infiltración-evapotranspiración” de la forma en que el bosque es capaz de permitir infiltración y recarga de acuíferos para producir un flujo lento y constante durante la sequía (Krishnaswamy *et al.*, 2013; Ogden *et al.*, 2013). Aunque se esperaría que la cobertura Mosaico de Pastos tuviese una mayor escorrentía, las propiedades físicas de su suelo se mantienen similares a los lugares más protegidos por el dosel, aún no se evidencia compactación, puesto que el pisoteo de ganado no es intensivo, disturbio que altera drásticamente la infiltración y flujo superficial (Ríos *et al.*, 2006). Los diversos usos y cubiertas de la tierra influencian la textura, densidad y cantidad de materia orgánica presente en el suelo, alterando las propiedades hidráulicas del mismo; e.g. la densidad aparente puede indicar la capacidad de retención de agua en el suelo (Sun *et al.*, 2015; Marín-Castro *et al.*, 2016). Además se ha establecido que el flujo de agua en la superficie del suelo en ecosistemas de montaña es fluctuante dentro de sí, es decir, entre diferentes tipos de vegetación del mismo sitio; haciendo que las predicciones y modelos muy generales para un mismo sitio puedan subestimar o sobreestimar la oferta hídrica (Marín-Castro *et al.*, 2016). Para los bosques de alta montaña tropical se han reportado bajos valores de escorrentía, relacionados con la densidad de la vegetación y alta tasa de infiltración en sus suelos de excelente porosidad y baja densidad aparente (Ruiz *et al.*, 2005; Corcega y Silva, 2011).

La fuerte presencia de areniscas de grano medio en la zona (Herrera, 2005) hace llamativa la posibilidad de explotación de material para construcción, sin ser exenta la Reserva antes de su declaración; dejando al menos una hectárea de material rocoso expuesto y suelo altamente modificado en sus características iniciales; dentro de estas, se destaca el cambio en la textura y porosidad que inciden de manera directa en la distribución del agua superficial durante los eventos de lluvia (Karlen *et al.*, 1997; Álvarez-Herrera y Fernández, 2009), dicho suelo sin cobertura tendría en teoría los valores más altos de escorrentía, sin embargo, la Plantación de Latifolias realizada como contingencia de abandono del aprovechamiento, disminuye sustancialmente el volumen de la lámina superficial de agua, influido por dos características: la morfología de las hojas jóvenes de *A. melanoxylon* de copiosa área foliar que frena la energía cinética de la lluvia y la forma totalmente plana que dejó la excavación minera en el sector, sin una pendiente que permita el flujo superficial.

Aunque la calidad del agua de las cuencas está relacionada con los tipos de cobertura que las componen (Ruiz *et al.*, 2005; Corcega y Silva, 2011; de Souza *et al.*, 2013), en la Reserva El Málmo se evidencia una proporción más estrecha con la calidad de los suelos. Las abundantes capas de hojarasca y el contenido de materia orgánica de los suelos boscosos crean condiciones físicas como baja densidad aparente y alta macroporosidad, que favorecen la filtración

y descontaminación del agua de escorrentía superficial y subsuperficial (Neary *et al.*, 2009). Las buenas condiciones físicas del suelo del bosque original de la Reserva apoyan estas afirmaciones.

Por otro lado, la literatura especializada se ha centrado en evaluar los dos extremos de la calidad del agua frente a la cubierta vegetal (Singh y Mishra, 2014), pero el término medio en los bosques tropicales representando en las áreas secundarias o de sucesión no tiene mucha información al respecto (de Souza *et al.*, 2013; Ogden *et al.*, 2013), este trabajo confirma que la vegetación secundaria e incluso las pasturas, pueden contribuir a la buena calidad del agua en la cuenca siempre y cuando los suelos mantengan sus características originales o tengan buena “salud”, así conservan su capacidad natural para retener nutrientes excesivos y contribuir a la recarga de acuíferos (Karlen *et al.*, 1997). En el caso contrario muestra la Plantación de Latifoliadas, un plan de contingencia de abandono de mina mal ejecutado, donde al finalizar la explotación de roca, se plantaron especies exóticas altamente invasivas (Lowe *et al.*, 2000) sobre arcilla y areniscas sin hacer un tratamiento previo para la restauración del horizonte orgánico del suelo, recuperación posible por métodos como la aplicación de compost para inducir el crecimiento de vegetación nativa, efectivo en áreas de minería a cielo abierto (Gutiérrez *et al.*, 2015; Lei *et al.*, 2016); *A. melanoxyylon* resistente a suelos arcillosos pobres en nutrientes (Corpoboyacá, 2016) creció de manera exitosa y se dispersó en la Reserva sobre los senderos de acceso e incluso algunos brotes ya se observan en zonas alejadas de la plantación inicial; las características físicas evaluadas pueden ser indicadoras de la calidad del suelo (Karlen *et al.*, 1997) tomando como punto de comparación las muestras de las coberturas nativa y secundaria, se infiere un pésimo estado del suelo o incluso ausencia del mismo donde la roca aflora y se desprende, promoviendo el transporte de sedimentos; estado reflejado en el Índice de Calidad del Agua.

El papel del “efecto esponja” en la saturación permanente del suelo debe ser estudiado con mayor detenimiento, probablemente el goteo constante producto de las microturbulencias de niebla puede estar contribuyendo al aumento de escorrentía en las coberturas donde ocurre (Levia *et al.*, 2011).

Por otra parte, aunque los espacios cubiertos por pasto no superan el 12 %, es preocupante su posible incremento debido a las actividades ganaderas, la Reserva tiene un carácter mixto en el cual se desconoce el área de los linderos privados, que pueden o no estar en inmediaciones de cobertura nativa, durante la fase de campo de este estudio, se encontró al menos una veintena de cabezas de ganado vacuno pastando sobre el borde del bosque de *W. tomentosa*; el aumento de la frontera pecuaria y la falta de gobernanza en las zonas protegidas, se han convertido en las causas más importantes de pérdida de vegetación boscosa nativa en Colombia (Nepstad *et al.*, 2013; Armenteras y Rodríguez, 2014).

Aunque la Plantación de Latifoliadas no abarca una gran extensión, es de vital importancia darle un manejo forestal adecuado, *A. mearnsii* catalogada dentro de las 100 especies mas invasoras del mundo (Lowe *et al.*, 2000) y *A. melanoxyylon* considerada pirófila (Arán *et al.*, 2013), tienen un alto potencial de dispersión y reproducción que se ve reflejado en la colonización de zonas apartadas a la plantación original y puede significar la llegada de un nuevo competidor para el bosque original.

La alta biodiversidad de este tipo de coberturas es la base fundamental para la provisión de servicios y se considera infraestructura y capital natural invaluable para el bienestar humano (Karevia *et al.*, 2011; Quin *et al.*, 2016).

A pesar de ser una zona protegida, la Reserva El Malmo requiere urgentemente la intervención de los entes del Estado en colaboración con los propietarios de áreas circundantes, para efectuar planes de manejo que contribuyan a la ampliación del bosque original y el control de las especies invasoras (exóticas o no) que pueden llegar a reemplazarlo por completo. Esto puede llevar a una disminución de la calidad y cantidad del aprovisionamiento actual. Es necesario concientizar a los campesinos sobre el costo-beneficio de sustituir el uso del suelo para ganadería por áreas de restauración, que a largo plazo permitirán una oferta hídrica constante de beneficio común para las tres veredas que abastecen sus acueductos a partir de las quebradas Barón y Verbenal (Millenium Ecosystem Assessment, 2005b; Brauman *et al.*, 2007). Una alternativa que pueden ofrecer los administradores del territorio, es la implementación de esquemas de pago por servicios ambientales hídricos (Borkley *et al.*, 2005; Decreto 953, 2013) brindando una salida económica viable para aquellos propietarios de predios aptos para la recarga y mantenimiento de acueductos municipales, cambiando la tradición ganadera o agrícola de sus terrenos a coberturas que cumplan con dicha misión (Blanco *et al.*, 2008).

Uno de los elementos poco mencionados dentro del capital natural es el suelo, por ser un recurso no renovable, su conservación es indispensable para garantizar la calidad en la provisión hídrica (Karlen *et al.*, 2003; FAO, 2015); la erosión, es uno de los problemas más graves de las últimas décadas en el mundo, pero no el único (Karlen *et al.*, 1997), la compactación y la mala explotación amenazan las bondades hídricas que brinda el suelo de la Reserva; la alteración de la calidad del líquido simboliza el aumento en los costos de tratamiento para uso humano (Karevia *et al.*, 2011) y la disminución de la cantidad obliga a tomar medidas de racionamiento con consecuencias económicas graves para los productores de la zona y de salubridad para los habitantes de la microcuenca; la enseñanza de buenas prácticas agropecuarias a las comunidades con influencia sobre el área protegida y la implementación de planes de restauración que involucren variables físicas del suelo, podrían garantizar las dos dimensiones del servicio a largo plazo.

CONCLUSIONES

El Bosque Denso Altoandino brinda la mejor calidad de agua de escorrentía y mayor cantidad de interceptación de precipitaciones en la Reserva, gracias al efecto esponja de su dosel y al buen estado de su suelo. Las coberturas de Vegetación Secundaria y Mosaico de Pastos otorgan características intermedias, no difieren entre ellas gracias a su densidad y rasgos edáficos; la Plantación de Latifolias presenta las dimensiones más bajas.

Se infiere que el tipo de cobertura vegetal influye de manera indistinta en la interceptación de las precipitaciones en bosques Altoandinos como el estudiado, donde la abundancia de organismos epífitos y estratos arbóreos de abundante follaje se combinan para formar una red que atrapa la lluvia y la niebla de manera eficiente, liberándola gradualmente. Por otra parte, las características físicas del suelo afectan fuertemente la escorrentía y la calidad del agua de la misma; aquellas formaciones vegetales que poseen un horizonte orgánico bien desarrollado, tendrán una lámina de agua superficial más limpia y abundante aunque no desplieguen un dosel prominente.

Las actividades de aumento de cubiertas vegetales para esta Reserva, como las propuestas en los esquemas de pago por servicios ambientales u otras actividades de gestión forestal, son ideales para restablecer, mantener e incrementar el Bosque Denso Altoandino y para mejorar las características físicas de los suelos alterados. Existen grandes vacíos de conocimiento respecto a las dinámicas hídricas del suelo y subsuelo en la zona, información que puede ser vital para la gestión del agua de sus habitantes rurales.

Es posible que los fenómenos aquí analizados, estén ocurriendo de forma similar en los remanentes de bosque Altoandino en todo el altiplano Cundiboyacense: es urgente desarrollar nuevas investigaciones que realicen una comparación entre cubiertas y relacionen, entre otras, las variables de interceptación y escorrentía; de esta manera, consolidar un concepto claro sobre la dinámica hídrica las áreas naturales de la región Cundiboyacense. Este trabajo es el primer paso para ello.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por la financiación a través de la Convocatoria 6 de 2015 “Proyectos de intervención de áreas estratégicas” y al grupo de investigación Biología para la Conservación por la confianza depositada en los investigadores para la realización de este trabajo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de interés.

REFERENCIAS

- Álvarez-Herrera J, Fernández J. Evaluación de la erosión de un Inceptisol de Tunja con diferentes coberturas al impacto de lluvias simuladas. Ing Inv. 2009;29(3):86-91.
- Álvaro W, Díaz M, Zabala J. Flórula de la Reserva Forestal Protectora El Malmo. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2006. 88 p.
- Arán D, García-Duro J, Reyes O, Casal M. Fire and invasive species: Modifications in the germination potential of *Acacia melanoxylon*, *Conyza canadensis* and *Eucalyptus globulus*. For Ecol Mana. 2013;302:7-13. Doi:10.1016/j.foreco.2013.02.030
- Armenteras D, Rodríguez Erazo N. Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latino América: una revisión desde 1990. Col For. 2014;17(2):233-246.
- Ataroff M, Naranjo M. Interception of water by pastures of *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. and *Melinis minutiflora* Beauv. Agric For Meteorol. 2009;149:1616-1620.
- Blanco J, Wunder S, Navarrete F. La Experiencia Colombiana en Esquemas de Pagos por Servicios Ambientales. In: Ortega S. Reconocimiento de los Servicios Ambientales: Una Oportunidad para la Gestión de los Recursos Naturales en Colombia. Bogotá D.C: Minambiente, UASPPN, WWF, CI, TNC. 2008. p. 109-170.
- Borken P, Cassar A, Meadors L, Saade L, Siebentritt M, Stein R, et al. Freshwater Ecosystem Services. In: M. E. Assessment, Ecosystems and Human Well-being: Policy Responses . Washington, DC.: Island Press. 2005. p 215-252.
- Brauman K, Daily G, Duarte T, Mooney H. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. Annu Rev Environ Resour 2007;32:67-98. Doi:10.1146/annurev.energy.32.031306.102758
- Bruijnzeel L. Deforestation and dry season flow in the tropics: a closer look. J Trop For Sci. 1989;1(3):229-243.
- Bruijnzeel L, Hamilton L. Decision time for cloud forest. Netherlands: UNESCO. 2000. 41 p.
- Cabrejo F, González G. Caracterización de la vegetación del bosque Altoandino del transecto Barón Germania de la Reserva Forestal “El Malmo” Tunja, Boyacá (Tesis de Especialización). Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2002. 130 p.
- Calder I, Aylward B. Forest and floods: moving to an evidence-based approach to watershed and integrated flood management. Water Int. 2006;3(1):87-99.
- Cantillo Higuera E, Lozada Silva A, Pinzón Gonzalez J. Caracterización sucesional para la restauración de la Reserva Forestal Cárpatos, Guasca, Cundinamarca. Col For. 2009;12(1):103-118.
- Carvalho-Santos C, Pradiño Honrado J, Hein L. Hidrological services and the role of forest: Conceptualization and indicator-based with an illustration at a regional scale. Ecol Complex. 2014;20:69-80. Doi: 10.1016/j.ecocom.2014.09.001

- Córcega E, Silva, O. Evaluación de la intercepción de lluvia, escorrentía y erosión hídrica en bosques de laderas subhúmedo-secas. XIX Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. 2011. [20 mayo 2016] Available in: <http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/congresos/CVCS19/>
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá- Corpoboyacá. Especies vegetales viveros Corpoboyaca. 2016. [21 abril 20016] Available in: http://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2016/01/capitulo_i_descripcion_de_las_especies_vegetales_producidas_en_los_viveros_de_la_corporacion_autonoma Regional_de_boyaca-corpoboyaca.pdf
- David J, Valente F, Gash J. Evaporation of intercepted rainfall. In: Andreson M, editor. Encyclopedia of Hydrological Sciences. Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley and Sons; 2005. p. 627-634.
- De Souza A, Fonseca D, Libório R, Tanaka M. Influence of riparian vegetation and forest structure on the water quality of rural low-order streams in SE Brazil. *For Ecol Manage*. 2013;298:12-18. Doi: 10.1016/j.foreco.2013.02.022
- Decreto 953. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 17 de Mayo de 2013.
- ESRI. ArcGIS Desktop [programa de ordenador]. Versión 10.3.1. Redlands, California: Environmental System Research Institute; 2015.
- Food and Agriculture Organization - FAO. El suelo es un recurso no renovable. Roma: FAO. 2015. [4 abril 20016] Available in: <http://www.fao.org/3/a-i4373s.pdf>
- Gutiérrez Acevedo E, Cortés Pérez F, Gómez Albarrán N. Compost como inductor de la sucesión vegetal en un área afectada por minería a cielo abierto en la microcuenca del río La Vega, Tunja, Boyacá. *Col For*. 2015;18(2):241-254.
- Henríquez C, Azócar G, Aguayo M. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Rev Geogr Norte Gd*. 2006;36:61-74.
- Herrera Y. Diagnóstico y concertación del Plan de Manejo de la Reserva Forestal Protectora El Malmo. Tunja. Corpoboyacá. 2005. 94 p.
- Holder C. Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *For Ecol Manage*. 2004;190:373-384.
- IBM (2013). IBM SPSS Statistics for Windows [programa de ordenador]. Version 23. Armonk, New York: International Business Machines Corp.
- International Conference on Water and the Environment - ICWE. International conference on water and the environment: development issues for the 21st century. Dublin: The Dublin Statement and report of the conference. 1992. [13 abril 2016] Available in: <https://www.ircwash.org/sites/default/files/71-ICWE92-9739.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. Metodología del cálculo del Índice de Escases. Bogotá, D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2004. 37 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá, D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2010. 199 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). En IDEAM, Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial. Bogotá, D.C: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2011. 10 p.
- Karevia P, Tallis H, Ricketts T, Daily G, Polasky S. Natural Capital, theory and practice of mapping Ecosystem Services. New York: Oxford University Press. 2011. 392 p.
- Karlen D, Ditzler C, y Andrews S. Soil quality: why and how? *Geoderma*. 2003;114:145-156.
- Karlen D, Mausbach M, Doran J, Cline R, Harris R, Schuman G. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Sci Soc Am J*. 1997;61:4-10.
- Kaúrichev I. Prácticas de Edafología. Moscú: Mir. 1984. 279 p.
- Krishnaswamy J, Bonell M, Venkatesh B, Purandara B, Lele S, Kiran M, et al. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. *J Hydrol*. 2013;498:191-209.
- Lei H, Peng Z, Yigang H, Yang, Z. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecol Eng*. 2016;94:638-646.
- León Peláez J, Gonzalez Hernandez M, Gallardo Lancho J. Distribución del Agua Lluvia en Tres Bosques Altoandinos de la Cordillera Central de Antioquia, Colombia. *Rev Fac Nac Agron*. 2010;63(1):5319-5336.
- Levia D, Carlyle-Moses D, Tanaka T. Forest Hydrology and Biogeochemistry, Synthesis of past research and future directions. New York: Springer. 2011. 740 p.
- Livesley S, Baudinette B, Glover D. Rainfall interception and stem flow by eucalypt street trees – The impacts of canopy density and bark type. *Urban For Urban Gree*. 2014;13:192-197. Doi: 10.1016/j.ufug.2013.09.001
- Lowe S, Browne M, Boudjelas S, De Poorter M. 100 of the World’s Worst Invasive Alien Species, A selection from the global invasive species database. New Zealand: Fondation D’Entreprise Total. 2000. 12 p.
- Marín-Castro B, Geissert D, Negrete-Yankelevich S, Gómez-Tagle Chávez A. Spatial distribution of hydraulic conductivity in soils of secondary tropical montane cloud forests and shade coffee agroecosystems. *Geoderma*, 2016;283:57-67.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC: Island Press. 2005a. 139 p.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington D.C: Island Press. 2005b. 245 p.

- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural- Minagricultura. Boletín Agroclimático Febrero de 2016. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [18 mayo 2016]. Available in: http://www.ideal.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-agroclimatico/-/document_library_display/o7HBhnNMuqY0/view/552413
- Montenegro A, Vargas Ríos O. Caracterización de bordes de bosque altoandino e implicaciones para la restauración ecológica en la Reserva Forestal de Cogua (Colombia). *Rev Biol Trop.* 2008;56(3):1543-1556.
- Neary D, Ice G, Jackson R. Linkages between forest soils and water quality and quantity. *For Ecol Manage.* 2009;258:2269-2281.
- Nepstad D, Bezerra T, Tepper D, McCaan K, Barrera M, Lowery S, et al. Cómo abordar los motores agrícolas de la deforestación en Colombia. San Francisco, California: Earth Innovation Institute. 2013. 107 p.
- Obregon A, Gehrig-Downie C, Gradstein R, Rollenbeck R, Bendix J. Canopy level fog occurrence in a tropical lowland forest of French Guiana as a prerequisite for high epiphyte diversity. *Agr Forest Meteorol.* 2011;151:290-300. Doi: 10.1016/j.agrformet.2010.11.003
- Ogden F, Crouch T, Stallard R, Hall J. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama. *Water Resour Res.* 2013;49:8443-8462.
- Quin Y, Gartner T, Minnemeyer S, Reig P, Sargent S. Global forest watch water metadata document, Technical Note. Washington D.C: World Resources Institute. 2016. 36p.
- Ríos N, Cárdenas A, Andrade H, Ibrahim M, Jiménez F, Sancho F, et al. Escorrentía superficial e infiltración en sistemas ganaderos convencionales y silvopastoriles en el trópico subhúmedo de Nicaragua y Costa Rica. *Agroforestería en las Américas.* 2006;45:66-71.
- Rodríguez A, Sepúlveda I, Camargo García J, Galvis Quintero J. Pérdidas de suelo y nutrientes bajo diferentes coberturas vegetales en la zona Andina de Colombia. *Acta Agron.* 2009;58(3):160-166.
- Ruiz Suescún O, Acosta Jaramillo J, León Pelaez J. Escorrentía superficial en bosques montanos naturales y plantados de Piedras Blancas, Antioquia (Colombia). *Rev Fac Nac Agron. Medellín.* 2005;58(1):2635-2649.
- Sánchez Nuñez D, Pinilla G, Mancera Pineda J. Efectos del uso del suelo en las propiedades edáficas y la escorrentía superficial en una cuenca de la Orinoquia Colombiana. *Col For.* 2015;18(2):255-272.
- Sarmiento Y, Torres N. Restauración en explotaciones de minas caliza. *Revista Luna Azul.* 2008;27:75-84.
- Singh S, Mishra A. Spatiotemporal analysis of the effects of forest covers on stream water quality in Western Ghats of peninsular India. *J Hydrol.* 2014;519:214-224.
- Sun F, Lu Y, Wang J, Hu J, Fu B. Soil moisture dynamics of typical ecosystems in response to precipitation: A monitoring-based analysis of hydrological service in the Qilian Mountains. *Catena.* 2015;129:63-75. Doi: 10.1016/j.catena.2015.03.001
- Tellez P. Simulación del ciclo hidrológico en tres tipos de uso del suelo de la Amazonía colombiana. (Trabajo de posgrado, Ingeniería de Recursos Hídricos). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 2003. 124 p.
- Trujillo L, Vargas Ríos O. Caracterización del borde de un relictico de bosque altoandino dominado por Chusquea Scandens y evaluación del efecto de disturbios experimentales sobre la regeneración natural en la Reserva Forestal Municipal de Cogua (Cundinamarca, Colombia). *Acta biol Colomb.* 2004;9(2):86-88.
- Van der Zaag P, Savenije H. Water as an economic good: the value of pricing and the failure of markets. Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education. 2006. 28 p.
- Van Stan IIJ, Pypker T. A review and evaluation of forest canopy epiphyte roles in the partitioning and chemical alteration of precipitation. *Sci Total Environ.* 2015;536:813-824. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.134
- Villegas J. Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el Departamento de Antioquia. *Revista EIA.* 2004;1:73-79.