

# Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical

J. Valencia-Leguizamón<sup>1,\*</sup>, C. Tobón<sup>2</sup>

(1) Área Curricular en Bosques y Conservación Ambiental, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, 050034, Medellín, Colombia.

(2) Grupo de investigación en Hidrología y Modelación de Ecosistemas, Universidad Nacional de Colombia, 050034, Medellín, Colombia.

\* Autor de correspondencia: J. Valencia-Leguizamón [[jmvalencial@unal.edu.co](mailto:jmvalencial@unal.edu.co)]

> Recibido el 23 de diciembre de 2016 - Aceptado el 31 de mayo de 2017

**Valencia-Leguizamón, J., Tobón, C. 2017. Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Ecosistemas* 26(2): 10-17. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.02**

Los humedales de alta montaña tropical se enfrentan a presiones antropogénicas que impactan irreversiblemente el suelo y la vegetación natural de sus áreas adyacentes; en consecuencia, alteran sus funciones hidrológicas, específicamente la regulación y oferta hídrica. Por lo anterior, resulta importante entender el efecto de la vegetación y el clima sobre los flujos hidrológicos en humedales del norte de los Andes. Se estimó la capacidad de interceptación de lluvia por las coberturas vegetales dominantes mediante experimentos de precipitación inducida; asimismo, se calculó la evapotranspiración de referencia ( $E_{T_0}$ ) con la ecuación de Penman-Monteith. El estudio se realizó en dos cuencas de páramo; Lagunas de Buitrago y Pantanos del Quindío. La interceptación asociada a eventos de lluvia de baja intensidad fue mayor que ante eventos de alta intensidad. Las coberturas frailejonal-FRJ y chuscal-CHS presentaron mayor capacidad de interceptación con respecto a pajonal-PAJ. La pérdida neta por interceptación de lluvia en la cuenca de las Lagunas de Buitrago fue de 181 mm de 3930 mm de precipitación registrados, mientras que en la cuenca de los Pantanos del Quindío fue de 106 mm de 2400 mm. Por su parte, la  $E_{T_0}$  en el primer sitio fue de 354 mm, con pérdidas máximas de 1.6 mm/día, mientras que en el segundo fue de 601 mm, con pérdidas máximas de 3.4 mm/día. En ambos sitios las salidas por  $E_{T_0}$  más sobresalientes ocurrieron en el trimestre diciembre-enero-febrero (DEF).

**Palabras clave:** coberturas vegetales; evapotranspiración ( $E_{T_0}$ ); interceptación; páramo

**Valencia-Leguizamón, J., Tobón, C. 2017. Influence of vegetation on the hydrological functioning of tropical high mountain wetlands basins. *Ecosistemas* 26(2): 10-17. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.02**

High mountain wetlands in Colombia face large anthropogenic pressures which impact the soil and vegetation of the associated basins, affecting their hydrological functioning, mainly the water supply and water regulation. Accordingly, it is important to understand the effect of vegetation and climate on the hydrological dynamics of these ecosystems. The capacity of rainfall interception by dominant vegetation was determined by induced precipitation experiments; Likewise, the evapotranspiration was calculated with the Penman-Monteith equation ( $E_{T_0}$ ). The study was carried out in two wetlands of páramo ecosystems: Lagunas de Buitrago and Pantanos del Quindío (Colombia). The interception associated with low intensity rainfall events was higher than for high intensity events. The cover of frailejonal-FRJ and chuscal-CHS exhibited larger capacity of interception with respect to pajonal-PAJ. The net rainfall interception loss of the vegetation cover in the basin of Buitrago wetland was 181 mm out of 3930 mm of total rainfall; while in the basin of the wetland of Pantanos del Quindío this was 106 mm of 2400 mm. On the other hand,  $E_{T_0}$  at the first site was 354 mm, with maximum losses of 1.6 mm / day, while in the second it was 601 mm, with maximum losses of 3.4 mm / day. In both wetland basins the largest value of  $E_{T_0}$  occurred in the quarter December-January-February (DEF).

**Key words:** ground cover; evapotranspiration ( $E_{T_0}$ ); interception; paramo

## Introducción

La vegetación y el ciclo del agua están intrínsecamente acoplados (Gerten et al. 2004). Esta relación, denominada conectividad hidrológica, se define por la interacción entre determinados niveles y flujos en los ecosistemas (Mao et al. 2013). La importancia de este acoplamiento en los humedales se demuestra al examinar sus vínculos con las áreas aledañas al humedal o cuenca circundante, entendidas como unidades del paisaje individuales y a través de la función de dichas tierras adyacentes en la hidrología de los humedales (Shedlock et al. 1993).

El acoplamiento hidrológico entre las unidades del paisaje ejerce un control significativo sobre el movimiento del agua en las cuencas

de drenaje y en la respuesta de los caudales (Todd et al. 2006) a través de diversas relaciones recíprocas. Así, por ejemplo, la estructura y actividad biótica regulan los procesos hidrológicos y, del mismo modo, los procesos hidrológicos moderan la estructura y actividad biótica, la cual, finalmente, determina las funciones y servicios ecosistémicos a múltiples escalas (Asbjornsen et al. 2011; Wei et al. 2011).

Tanto los humedales como sus tierras adyacentes comprenden un mosaico de comunidades vegetales que responden a procesos ecohidrológicos determinados por la interacción entre factores como precipitación, evapotranspiración, escorrentía, agua subterránea, química del agua y microtopografía, así como de la competencia entre las plantas y su retoolimentación con el ambiente físico (Acreman y McCartney 2009).

Los procesos ecohidrológicos reflejan los vínculos e interacciones entre la vegetación de los humedales y sus cuencas con la hidrología y el clima a diferentes escalas espacio-temporales (Asbjornsen et al. 2011). Así, se destaca la importancia que tiene el mantenimiento de los niveles de flujo entre los humedales y sus cuencas circundantes, para efectos de gestión o restauración ecológica y de recursos hídricos (Mao et al. 2013).

Por otra parte, las comunidades vegetales de los humedales y sus cuencas, juegan un rol clave en la regulación de los flujos hidrológicos (Muneeppeerakul et al. 2008). De hecho, las plantas son uno de los principales conductos para el retorno de agua terrestre a la atmósfera, a través de la evapotranspiración (Asbjornsen et al. 2011) y mediante la interceptación del dosel, que es la proporción de agua lluvia retenida por las hojas y ramas y, que finalmente, se evapora desde sus superficies (Deguchi et al. 2006; Ataroff y Naranjo 2009). La interceptación por el dosel de la vegetación determina la cantidad de agua que llega a la superficie del suelo (Levia y Frost 2003), en las tierras adyacentes a un humedal y directamente sobre él.

A pesar de que la interceptación de la precipitación y la evapotranspiración son considerados procesos ecohidrológicos cruciales en el funcionamiento, estructura y balance hídrico de los humedales y sus cuencas (Mitsch y Gosselink 2015), poco es el conocimiento acerca de estos procesos en ecosistemas terrestres, específicamente en aquellos de alta montaña tropical, como son los páramos andinos. El estudio de los ecosistemas de alta montaña, encierra las claves de multitud de procesos, que pueden abrir infinitas posibilidades en el manejo, control y predicción de los cambios en muchos otros ecosistemas cuyo funcionamiento está alterado por la actividad humana (Morales et al. 2001).

El entendimiento del balance hídrico y los principales flujos de agua es necesario para evaluar los efectos de los cambios de vegetación sobre los humedales, su hidrología y el aporte de éstos a las cuencas asociadas (Ataroff y Naranjo 2009). Por ello, cualquier modificación de la vegetación por la acción humana dentro de una cuenca, al menos a pequeña escala, puede alterar significativamente los procesos hidrológicos y el balance hídrico de los humedales (Bullock y Mccartney 1996).

Diversos estudios han evaluado la evapotranspiración y la interceptación en bosques y humedales de diferentes regiones biogeográficas (Tobón et al. 2000; Frumau et al. 2006; Headley et al. 2012; Carlson et al. 2014). Lo anterior ha tenido lugar debido a la facilidad para la instalación de estaciones meteorológicas y pluviógrafos dentro de los bosques y a que los métodos de monitoreo se ajustan a las condiciones estructurales de estos ecosistemas (Crockford y Richardson 2000; Levia y Frost 2003). En cambio, en ecosistemas de páramo del norte de los Andes, la interceptación es difícil de medir, como consecuencia de la complicada arquitectura foliar de estos ecosistemas, caracterizados por presentar vegetación de porte bajo y dosel abierto con predominio de gramíneas (Hedberg y Hedberg 1979; Cleef 1981; Sklenár y Balslev 2005; Ataroff y Naranjo 2009). Adicionalmente, la información climática disponible para estimar la evapotranspiración es escasa y en algunos casos de mala calidad debido en la mayoría de los casos, a que la alta montaña tropical y las condiciones abruptas del relieve han complicado la instalación de estaciones de monitoreo (Cordova et al. 2015).

De acuerdo con lo anterior, el propósito de esta investigación fue determinar el efecto de la vegetación y las variables climáticas en la hidrología de humedales de cabecera de cuenca en los Andes colombianos; en consecuencia, se buscó entender su influencia sobre los flujos de agua, particularmente en la interceptación y la evapotranspiración de referencia, mecanismos en permanente interacción con la dinámica del nivel de agua de los humedales.

## Metodología

### Sitio de estudio

Este estudio fue llevado a cabo en dos cuencas de humedales de alta montaña en Colombia; la primera presenta un área de 32 ha y está ubicada en la cordillera oriental, en el páramo de Chingaza, en el sector conocido como Lagunas de Buitrago (Parque Nacional Natural Chingaza), entre las coordenadas 4°46'19" N, 4°43'52" S, 73°48'31 E y 73°51'00" W, a 3616 msnm y la segunda en el flanco occidental de la cordillera central, en el páramo de Romerales, sobre el sector de los Pantanos del Quindío (Parque Nacional Natural de los Nevados) con un área de 343 ha, entre las coordenadas 4°43'57" N, 4°40'49" S, 75°21'56" E y 75°25'33" W, a una altitud de 4150 msnm (Fig. 1). El monitoreo de la precipitación y del clima (temperatura, humedad relativa del aire, radiación solar y dirección y velocidad del viento), se realizó a partir de dos estaciones meteorológicas automáticas (Davis y Campbell, Sci), instaladas sobre las cuencas de cada humedal. Los datos se registraron a una escala temporal horaria y posteriormente se llevaron escala diaria. Antes de su instalación, cada uno de los instrumentos de las estaciones fueron calibrados en laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia. El periodo de registro en la cuenca de las Lagunas de Buitrago fue desde marzo de 2013 a septiembre 2014, mientras que en la cuenca de los Pantanos del Quindío el monitoreo se realizó desde septiembre de 2013 a junio de 2015.

gaza, en el sector conocido como Lagunas de Buitrago (Parque Nacional Natural Chingaza), entre las coordenadas 4°46'19" N, 4°43'52" S, 73°48'31 E y 73°51'00" W, a 3616 msnm y la segunda en el flanco occidental de la cordillera central, en el páramo de Romerales, sobre el sector de los Pantanos del Quindío (Parque Nacional Natural de los Nevados) con un área de 343 ha, entre las coordenadas 4°43'57" N, 4°40'49" S, 75°21'56" E y 75°25'33" W, a una altitud de 4150 msnm (Fig. 1). El monitoreo de la precipitación y del clima (temperatura, humedad relativa del aire, radiación solar y dirección y velocidad del viento), se realizó a partir de dos estaciones meteorológicas automáticas (Davis y Campbell, Sci), instaladas sobre las cuencas de cada humedal. Los datos se registraron a una escala temporal horaria y posteriormente se llevaron escala diaria. Antes de su instalación, cada uno de los instrumentos de las estaciones fueron calibrados en laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia. El periodo de registro en la cuenca de las Lagunas de Buitrago fue desde marzo de 2013 a septiembre 2014, mientras que en la cuenca de los Pantanos del Quindío el monitoreo se realizó desde septiembre de 2013 a junio de 2015.

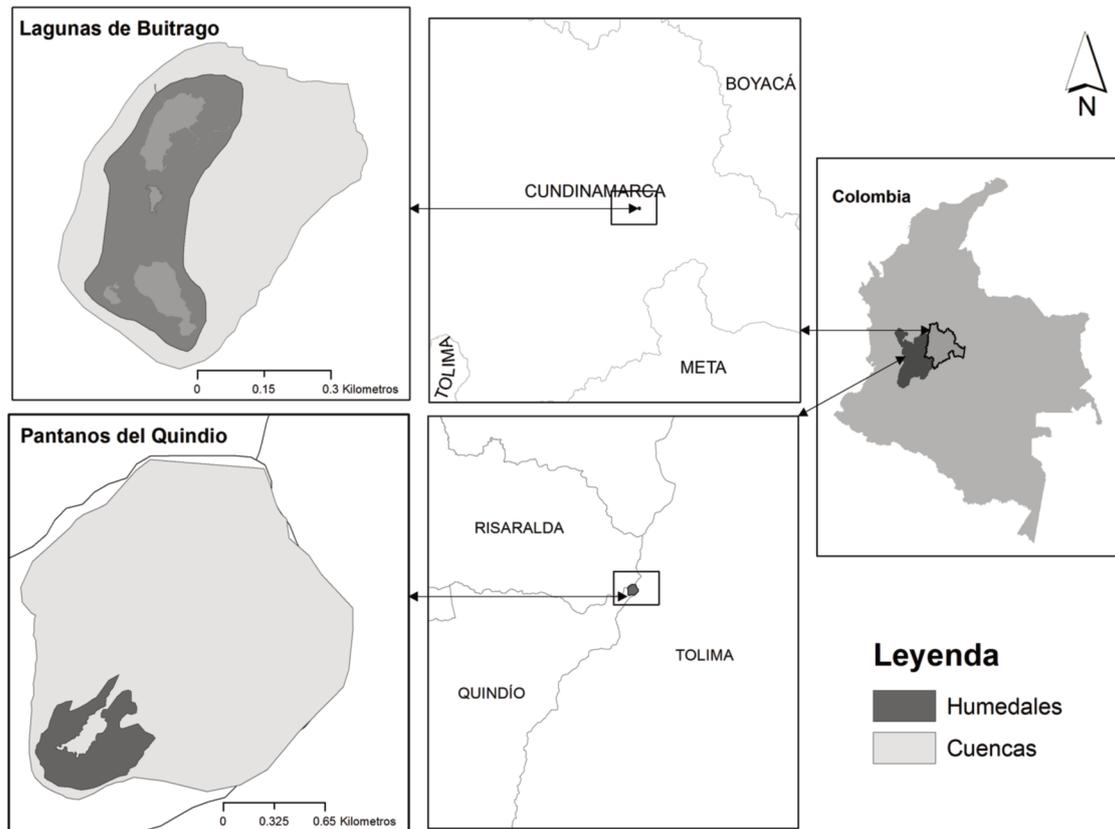
### Interceptación de la precipitación

Para determinar la cantidad de agua que es interceptada por la vegetación, se realizaron experimentos de precipitación simulada sobre las coberturas vegetales predominantes de cada área de estudio: Frailejón (FRJ), Chuscal (CHS) y Pajón (PAJ) (Fig. 2) para hallar su capacidad de interceptación de lluvia bajo condiciones de dosel seco (máxima) y húmedo (mínima). La lluvia simulada se generó por medio de un artefacto plástico con una boquilla; cuyo diámetro fue semejante al área foliar de los individuos de las especies utilizadas en las pruebas.

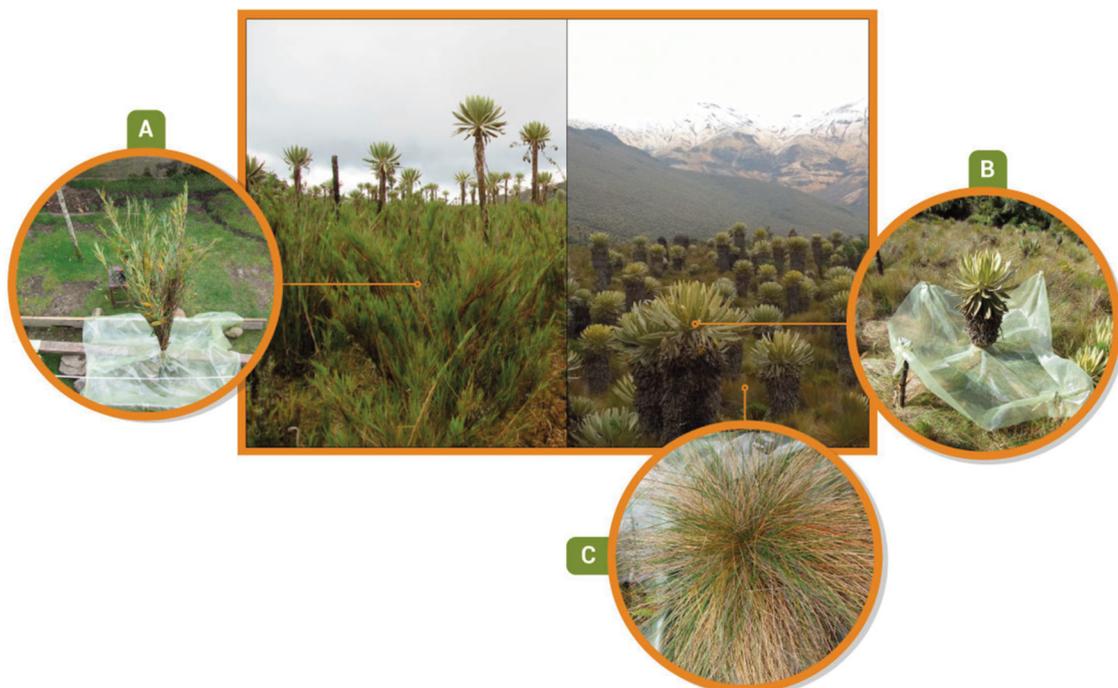
En la cuenca de los Pantanos del Quindío las especies seleccionadas, por su abundancia, fueron *Espeletia hartwegiana* y *Calamagrostis effusa*; y, en la cuenca de las Lagunas de Buitrago, *Espeletia Uribei* y *E. killipii*, *Chusquea tessellata* y *Calamagrostis effusa*. Las especies del género *Espeletia* son rosetas caulecetes con hojas grandes de pubescencia marcada, mientras que *Calamagrostis* y *Chusquea* son pastos de hojas angostas y rígidas que difieren en su estructura. Teniendo en cuenta que la cantidad de interceptación de lluvia y la saturación del dosel dependen de la fenología de las especies, del índice del área foliar, y de su estructura (Perez et al. 2014; Deguchi et al. 2006), se estimó el área foliar de los individuos de las especies estudiadas. Para ello, se midió el radio de 130 individuos por especie de manera aleatoria y se utilizó el valor de la mediana obtenida de los estadísticos básicos, así como el valor de la mediana de los registros pluviométricos históricos de cada zona para la estimación del volumen de agua aplicado.

$$V = \pi \times r^2 \times h \quad (1)$$

Dónde,  $V$ = volumen,  $h$ = altura de la lámina de agua (mediana de los registros pluviométricos históricos de cada zona),  $r$ = radio del área foliar (mediana del radio de individuos muestreados). Las pruebas se realizaron directamente en campo sobre tres individuos por especie; para el caso de *Espeletia* las aplicaciones se hicieron directamente sobre individuos vivos, utilizando un montaje plástico en la base de cada individuo para coleccionar el volumen de agua que pasó a través de las ramas, hojas y tallos y, en el caso de *Chusquea* y *Calamagrostis*, se realizaron sobre macollas enteras, coleccionadas y ubicadas dentro de cajas plásticas, lo que permitió conservar su estructura. Con el fin de reducir errores en los datos generados, se retiró cuidadosamente la capa de suelo adherido a las raíces. El número de aplicaciones del volumen de lluvia hallado dependió del estado de saturación de agua de la planta; la primera aplicación se hizo bajo condiciones de dosel seco; las aplicaciones posteriores correspondieron a eventos de lluvia simulada bajo condiciones de dosel húmedo, hasta llegar al punto de saturación de la planta.



**Figura 1.** Ubicación de las cuencas de los humedales sobre las cordilleras Central y Oriental de Colombia.  
**Figure 1.** Location of the wetlands basins on the Central and Eastern Cordillera of Colombia.



**Figura 2.** Coberturas vegetales predominantes en las áreas de estudio: (a) Chuscal-CHS, (b) Frailejón-FRJ, (c) Pajonal-PAJ.  
**Figure 2.** Predominant ground cover in the study areas (a) Chuscal-CHS, (b) Frailejón-FRJ, (c) Pajonal-PAJ.

Finalmente, los valores de volumen obtenidos fueron llevados a unidades de lámina de agua en mm, con el fin de ser relacionados con los eventos de lluvia registrados en las cuencas de los humedales durante el periodo de estudio, los cuales fueron previamente descritos en términos de cantidad y duración. Lo anterior, con el fin de extrapolar la capacidad de interceptación de lluvia por cada cobertura hallada en los experimentos. En este caso, se entendió como "evento", los periodos continuos de lluvia consecutiva cuya cantidad de agua fue mayor o igual a 0.4 mm y se consideró "no evento" el periodo comprendido entre el final de un evento y el inicio del otro.

### Evapotranspiración de referencia ( $E_{T0}$ )

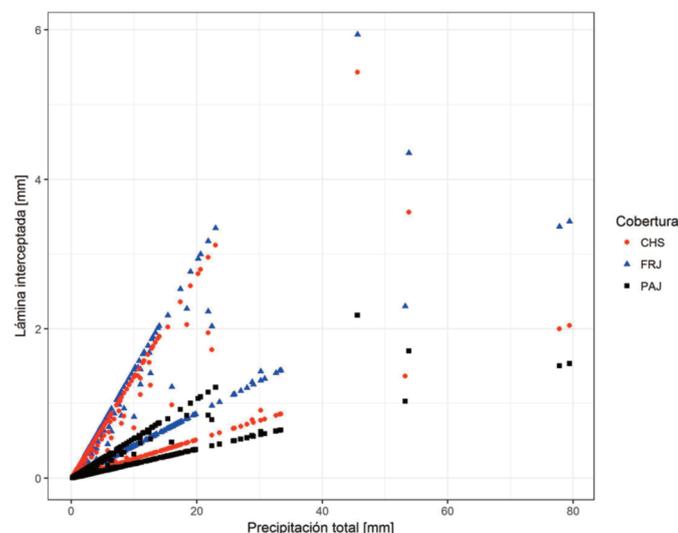
Para calcular la  $E_{T0}$  en cada cuenca se empleó el método FAO Penman-Monteith. Consideramos que este modelo puede ser aplicado en la alta montaña tropical donde la cobertura vegetal predominante son las gramíneas de porte bajo. Este método tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos (Allen et al. 1998). Las variables climáticas usadas fueron: temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento; algunos parámetros como albedo (0.23), resistencia superficial ( $70 \text{ sm}^{-1}$ ), altura de la vegetación (0.12 m) y altura de la rugosidad (0.02 m) fueron estándar del modelo, mientras que la elevación (msnm) y la ubicación geográfica (radianes) fueron específicos de cada sitio.

$$E_{T0} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1+0.34 U_2)} \quad (2)$$

Dónde:  $E_{T0}$ : evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $R_n$ : radiación neta en la superficie de la vegetación ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $R_a$ : radiación extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $G$ : densidad del flujo de calor del suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),  $T$ : temperatura media diaria del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) a una altura de 2 m,  $U_2$ : velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) a una altura de 2 m,  $e_s$ : presión de vapor de saturación (kPa),  $e_a$  presión real de vapor (kPa),  $e_s - e_a$ : déficit de presión de vapor de saturación (kPa),  $\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$ : constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

### Resultados

La precipitación media anual en la cuenca de las Lagunas de Chingaza fue de  $2600 \text{ mm año}^{-1}$ , cuya distribución evidenció un ré-



**Figura 3.** Capacidad de interceptación de las coberturas vegetales experimentales (FRJ-CHS-PAJ) en la cuenca de las Lagunas de Buitrago.

**Figure 3.** Intercepting capacity of experimental ground cover (FRJ-CHS-PAJ) in the Lagunas de Buitrago basin.

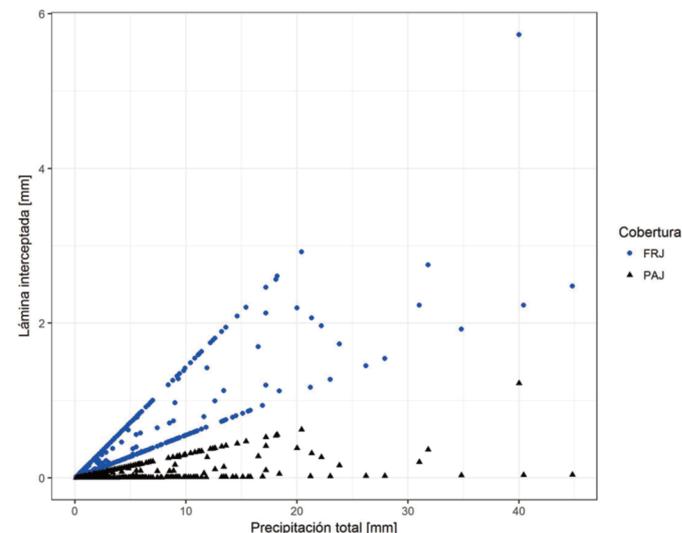
gimen unimodal caracterizado por lluvias de baja intensidad. Se registraron 1369 eventos de los cuales el 95.5% fueron de baja cantidad ( $<15 \text{ mm}$ ) y el 4.5% restante presentaron entre 15 y  $79.4 \text{ mm}$ ; con respecto a la duración, el 76% duraron entre (0-3 horas) y el 24% restante entre (3-48 horas). Por su parte, en la cuenca de los Pantanos del Quindío la precipitación fue de  $1400 \text{ mm año}^{-1}$ , cuya distribución mostró un régimen bimodal caracterizado por lluvias de baja intensidad. En este sitio se registraron 830 eventos, el 94% fueron menores a  $11 \text{ mm}$  y el 6% restante presentaron entre 11 y  $44.8 \text{ mm}$ ; en cuanto a la duración, el 83% duraron entre (0-3 horas) y el 17% entre (3 y 13 horas).

Ambas cuencas presentaron alta humedad atmosférica; en el páramo de Chingaza la humedad media en horas día fue 94% y en el páramo de Romerales 85.5% con valores máximos que alcanzaron el 100%. La mayor intensidad de radiación solar se presentó en los trimestres JJA y DEF, periodos en los que se alcanzaron valores máximos en cada sitio ( $1177 \text{ W/m}^2$  y  $1265 \text{ W/m}^2$ ). No obstante, la mayor parte de la serie de tiempo la radiación fue muy baja; oscilando entre 1.8 y  $200 \text{ W/m}^2$  en las Lagunas de Buitrago y entre 0.25 y  $300 \text{ W/m}^2$  en los Pantanos del Quindío, esto reflejó la baja radiación solar recibida sobre las coberturas vegetales de estas cuencas (Fig. 3 y Fig. 4).

Del mismo modo que la radiación, la velocidad del viento fue alta en los dos páramos, los valores máximos ( $>13 \text{ km/h}$ ) se distribuyeron con mayor frecuencia en los trimestres JJA y DEF; a pesar de que a lo largo de la serie variaron en la velocidad, la mayoría de los días se mantuvieron altos. En los Pantanos del Quindío, se presentaron dos picos prolongados particularmente entre los últimos días de diciembre de 2014 y los primeros días de enero de 2015, así como la mayor parte del mes de febrero de 2015 (Fig. 4).

### Interceptación de la vegetación en la cuenca Lagunas de Buitrago

Las coberturas que presentaron mayor capacidad de interceptación fueron FRJ y CHS y la de menor capacidad PAJ; la máxima interceptación de todas las coberturas vegetales se evidenció ante ocho de 1369 eventos registrados, cuyas cantidades fueron mayores a  $17.4 \text{ mm}$  en un rango de duración entre 2 y 7 horas (Tabla 1 y Fig. 3). Los eventos mencionados ocurrieron en diferentes épocas del periodo de estudio y estuvieron precedidos de más de cuatro horas sin lluvia. La interceptación más relevante (FRJ  $5.9$ , CHS  $5.4$  y PAJ  $2.1 \text{ mm}$ ) se presentó ante un evento ocurrido durante el periodo de bajas lluvias; con una cantidad de  $45.6 \text{ mm}$  durante 12 horas, precedido de 7 horas de no lluvia (Tabla 1).



**Figura 4.** Capacidad de interceptación de las coberturas vegetales experimentales (FRJ-PAJ) en la cuenca de los Pantanos del Quindío.

**Figure 4.** Intercepting capacity of experimental ground cover (FRJ-PAJ) in the Pantanos del Quindío basin.

**Tabla 1.** Capacidad máxima de interceptación de las coberturas vegetales en la cuenca de las Lagunas de Buitrago.**Table 1.** Maximum capacity of interception of ground cover in the Lagunas de Buitrago basin.

No. Evento	Fecha	Tiempo	Cantidad (mm)	Duración Evento (h)	No Evento (h)	I <sub>FRJ</sub> (mm)	I <sub>CHS</sub> (mm)	I <sub>PAJ</sub> (mm)
99	27-04-2013	día	20.2	4	17	2.9	2.7	1
106	30-04-2013	día	20.6	4	8	3	2.8	1
108	01-05-2013	día	23	5	10	3.3	3.1	1.2
143	17-05-2013	día	19.8	7	5	2.8	2.6	1
		noche	34	9	5	1.4	0.8	0.6
422	12-08-2013	día	21.8	5	4	3.1	2.9	1.1
673	18-11-2013	día	17.4	2	10	2.5	2.3	0.9
<b>864</b>	<b>01-03-2014</b>	<b>día</b>	<b>38.8</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>5.6</b>	<b>5.2</b>	<b>2</b>
		<b>noche</b>	<b>6.8</b>	<b>3</b>		<b>0.3</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>
881	08-03-2014	día	19	5	9	2.7	2.5	1

La interceptación de FRJ, CHS y PAJ ante eventos de baja cantidad (<15 mm) fue 2.9%, 2.7% y 1% respectivamente, en condiciones de dosel seco y 2.3%, 1.3% y 1% en condiciones dosel húmedo. Sin embargo, para eventos de alta cantidad (15- 79.4 mm) el porcentaje de interceptación fue más bajo 0.9% FRJ, 0.6% CHS y 0.4% PAJ en condiciones de dosel seco y 0.7% 0.6% y 0.2% para dosel húmedo.

Una vez determinada la capacidad de interceptación de lluvia y extrapolada a la cantidad (mm) de cada evento, encontramos que dicha interceptación, en términos de lámina de agua, por evento, bajo condiciones de dosel seco fue de 0.42, 0.39 y 0.15 mm para FRJ, CHS y PAJ respectivamente; mientras que bajo condiciones de dosel húmedo fue de solo 0.1, 0.06 y 0.05 mm.

#### Interceptación cuenca Pantanos del Quindío

En esta cuenca la cobertura con mayor capacidad de interceptación fue FRJ, seguida de PAJ; la máxima interceptación de ambas coberturas se observó en 5 de los 830 eventos registrados (Tabla 2 y Fig. 4). Dichos eventos ocurrieron en diferentes épocas del período de estudio, con cantidades que excedieron los 17.8 mm de precipitación, en un rango de duración que osciló entre 3 y 7 horas, precedidos de más de siete horas sin lluvia. La interceptación más significativa se presentó ante un evento de 40 mm, ocurrido en diciembre de 2014, cuya duración fue de 7 horas precedido de 18 horas de no lluvia. En este caso la máxima capacidad de interceptación del FRJ fue de 5.7 mm y la de PAJ de 1.2 mm.

La interceptación por parte de FRJ y PAJ ante el total de eventos de baja cantidad (< 11 mm) fue 3.6 % y 0.77% respectivamente, en condiciones de dosel seco y 2.2% y 0.03% en condiciones dosel húmedo. Mientras que para eventos de alta cantidad (11-44.8 mm), la interceptación fue inferior 1.1% por FRJ y 0.4% por PAJ en condiciones de dosel seco y 2% y 0.01% para condiciones de dosel húmedo. El promedio de la lámina de agua interceptada, ante los

830 eventos registrados fue de 0.37 mm para FRJ y 0.07 para PAJ bajo condiciones de dosel seco.

Los resultados mostraron que la porción de la precipitación total interceptada por los doseles de las coberturas vegetales en estos ecosistemas es muy baja; en ninguno de los casos superó el 4%. No obstante, dentro de esta pequeña proporción, los mayores valores se dan ante eventos de baja cantidad en condiciones de dosel seco. La alta frecuencia de eventos de baja intensidad, combinada con eventos esporádicos de intensidades mayores, no permitió que se generaran condiciones de dosel aptas para interceptar grandes cantidades de agua.

La mayor capacidad de interceptación que mostraron las coberturas de cada cuenca, dependió en cierta medida de la cantidad de agua aportada por la precipitación, pero sobre todo del tiempo precedido entre eventos. Un ejemplo de esto, se evidencia en marzo de 2014 (evento 864; Tabla 1) en el humedal de las Lagunas de Buitrago en el páramo de Chingaza y en diciembre del mismo año (evento 595; Tabla 2) en el humedal de los Pantanos del Quindío, caracterizados por ocurrir dentro de las épocas más secas de cada serie de tiempo.

En este sentido, la pérdida neta por interceptación de lluvia de las coberturas vegetales en la cuenca de las lagunas de Buitrago fue 181 mm de los 3930 mm de precipitación registrados en todo el período de estudio; lo que representó 120 mm año<sup>-1</sup> respecto a la precipitación media anual (2600 mm); para el caso de la cuenca de los Pantanos del Quindío dicha pérdida fue de 106 mm de los 2400 mm registrados, lo que representó 62 mm año<sup>-1</sup> con respecto a la precipitación media anual (1400 mm). En consecuencia, la mayor parte de la lluvia caída sobre estos ecosistemas llegó al suelo de las cuencas y a la superficie de los humedales. En el caso de las Lagunas de Buitrago en el páramo de Chingaza 3750 mm llegaron a la superficie como precipitación neta y en la cuenca del humedal del páramo de Romerales 2293 mm.

**Tabla 2.** Capacidad máxima de interceptación de las coberturas vegetales en la cuenca de los Pantanos del Quindío.**Table 2.** Maximum capacity of interception of ground cover in the Pantanos del Quindío basin.

No. Evento	Fecha	Tiempo	Cantidad (mm)	Duración Evento (h)	Duración no Evento (h)	I <sub>FRJ</sub> (mm)	I <sub>PAJ</sub> (mm)
87	24-11-2013	día	17.8	6	7	2.6	0.5
502	08-10-2014	día	18.2	3	19	2.6	0.5
<b>595</b>	<b>10-12-2014</b>	<b>día</b>	<b>40</b>	<b>7</b>	<b>18</b>	<b>5.7</b>	<b>1.2</b>
680	08-02-2015	día	18.2	4	8	2.6	0.5
739	30-03-2015	día	20.4	4	7	2.9	0.6

## Evapotranspiración de referencia ( $E_{T0}$ ) cuenca Lagunas de Buitrago

La evapotranspiración de referencia en esta cuenca durante el período de estudio fue de 354 mm. Los valores bajos (<0.8 mm/día) fueron muy frecuentes a lo largo de la serie. El período que presentó los picos más altos (>1.3 mm) fue DEF y marzo, con algunos eventos esporádicos (>1.4 mm) en diciembre de 2013, mayo y agosto de 2014. Estas observaciones se relacionaron con los máximos valores de radiación solar registrados en DEF y de manera particular en el mes de marzo, en donde ocurrieron los picos más altos de radiación (1.2 y 1.3 MJ/m<sup>2</sup>) (Fig. 5).

## Evapotranspiración de referencia ( $E_{T0}$ ) cuenca Pantanos del Quindío

La evapotranspiración de referencia en esta cuenca durante toda la serie de estudio fue de 601 mm. Las salidas menores a 0.6 mm/día fueron muy frecuentes, aunque se observaron de manera particular durante los meses de octubre y noviembre. Las mayores salidas (>2.4 mm/día) ocurrieron en el último trimestre DEF (Fig. 6) y estuvieron asociadas al aumento de la velocidad del viento e intensidad de radiación solar registrados en esta misma época.

## Discusión

### Interceptación

La mayor capacidad de interceptación que mostraron las coberturas vegetales respondió a eventos lluviosos extremos en términos de cantidad, que ocurrieron dentro de las épocas más secas de cada serie de tiempo. Esto indicó que las condiciones ambientales que prevalecieron en dichos periodos (alta radiación solar, baja nubosidad, baja humedad relativa, alta velocidad del viento), disminuyeron la humedad de las superficies vegetales y potencializaron su capacidad de interceptación. No obstante, los eventos lluviosos de alta cantidad parecen haber influenciado la capacidad de interceptación únicamente cuando dichas condiciones ambientales se mantuvieron durante períodos prolongados con órdenes de magnitud de mínimo 3 días, más que de horas.

La cobertura que mostró mayor capacidad de interceptación tanto en condiciones de dosel seco como húmedo fue Frailejónal-FRJ, con pequeñas diferencias entre sitios; estas diferencias se deben muy posiblemente a que el área foliar de esta cobertura en la cuenca de las Lagunas fue levemente mayor que en la cuenca de los Pantanos. La respuesta de FRJ en la interceptación se asocia a la morfología y forma de crecimiento de los individuos del género *Espeletia*. Estas rosetas caulescentes con hojas grandes de pubescencia marcada y tallos emergentes que conservan las hojas muertas (Fig. 2), les permite capturar mayor parte del agua lluvia

(Sklenár y Balslev 2005) en comparación con las otras coberturas. Acorde con lo enunciado por Crockford y Richardson (2000), las hojas planas orientadas horizontalmente pueden interceptar la precipitación con más eficacia que las hojas angostas orientadas en ángulos pronunciados.

En cuanto a la capacidad de interceptación que mostraron las especies de pastos, se destaca la del Chuscal-CHS por haber sido semejante a la del Frailejónal-FRJ, debido a que la forma y el ángulo de las hojas de la especie *Chusquea tessellata* conforman una estructura más compleja, en relación con otras especies de pastos (Fig. 2). Por el contrario, la mínima capacidad de interceptación del Pajonal-PAJ, se vincula a que *Calamagrostis effusa* presenta hojas angostas, rígidas e involutas, orientadas en ángulos pronunciados y apretados entre sí (Cleef 1981) muy poco efectivos en la interceptación (Crockford y Richardson 2000).

La porción de la precipitación total interceptada por los doseles de las coberturas vegetales en ambas cuencas, en ninguno de los casos superó el 4%. Esta mínima proporción está influenciada por las características de dosel típico de los ecosistemas de páramos, en donde dominan gramíneas, hierbas, arbustos esclerófilos, rosetas caulescentes y rosetas acaulescentes y plantas formadoras de cojín (Hedberg y Hedberg 1979; Sklenár y Balslev 2005), cuya estructura y masa foliar es diferente a la de doseles de zonas más bajas, inclusive de los bosques alto andinos adyacentes.

Por consiguiente, la forma de las hojas, el ángulo y la inclinación de las ramas, el índice de área foliar (Crockford y Richardson 2000) de las especies vegetales de los páramos andinos influyen en la baja capacidad de interceptación. En este sentido, existe conformidad con lo propuesto por Ataroff y Naranjo (2009) en cuanto a que la interceptación depende tanto de las características de la precipitación como de los doseles de la vegetación.

### Evapotranspiración de referencia ( $E_{T0}$ )

Las plantas son uno de los principales conductos para el retorno de agua terrestre a la atmósfera; a través de la evapotranspiración (Asbjornsen et al. 2011), la cual a su vez, es un componente clave en el balance hídrico de los humedales y sus cuencas. Así, la baja evapotranspiración de referencia calculada en los páramos estudiados (356 mm) en la cuenca de las Lagunas de Buitrago y (601 mm) en la de los Pantanos Quindío, determina la gran oferta hídrica que ofrecen estos ecosistemas.

La baja  $E_{T0}$  en ambas cuencas fue semejante a la reportada por Cleef (1981) en páramos dominados por coberturas de *Chusquea tessellata*-CHS (400-600 mm/año); y en páramos dominados por *Calamagrostis effusa*-PAJ (700-1000 mm/año). Estos valores pueden ser relacionados con la presencia de un cinturón de condensación creado por la persistencia de la niebla en este piso

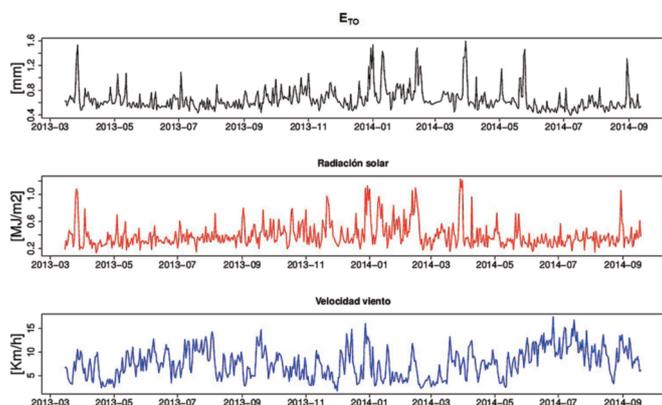


Figura 5. Evapotranspiración de referencia, radiación solar y velocidad del viento en la cuenca de las Lagunas de Buitrago, Páramo de Chingaza.

Figure 5. Reference evapotranspiration, solar radiation and wind speed in the Lagunas de Buitrago basin, Páramo de Chingaza.

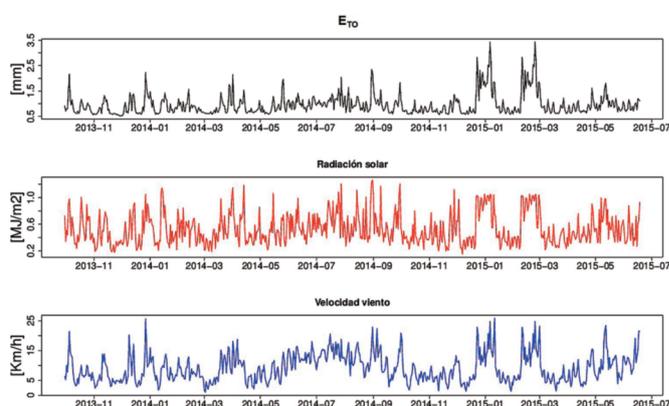


Figura 6. Evapotranspiración de referencia, radiación solar y velocidad del viento en la cuenca de los Pantanos del Quindío, Páramo de Romerales.

Figure 6. Reference evapotranspiration, solar radiation and wind speed in the Pantanos del Quindío basin, Páramo de Romerales.

altitudinal, que aumenta y mantiene constante la humedad relativa Cleef (1981), lo cual disminuye la demanda de evapotranspiración de la atmósfera. De acuerdo con Guhl (1974) en estos cinturones de nubes ecuatoriales además de alta humedad hay alta precipitación, nubosidad y niebla y, por el contrario, se presentan condiciones de baja cantidad de brillo y radiación solar, velocidad del viento y evaporación.

Otro aspecto importante que influyó la baja  $E_{T0}$  calculada en la mayor parte de la serie de tiempo, son las masas de aire húmedo que traen los vientos que llegan a cada área, los cuales mostraron una actividad sostenida durante todo el periodo. Estos vientos vienen cargados de masas de vapor de agua desde la cuenca del Amazonas y el Orinoco, aportando grandes cantidades de humedad a la atmósfera en los páramos (Hofstede et al. 2003) e influyendo en su saturación de vapor, como lo indican las mediciones de humedad relativa del aire. Adicionalmente, de acuerdo con Allen et al. (1998), si bien la transpiración y la evaporación del agua libre en el dosel dependen principalmente de la cantidad de calor absorbido por la vegetación y de la disponibilidad de agua en el suelo, la velocidad del viento determina la permanencia y cantidad de agua sobre la superficie de la vegetación. Cuanto más rápido se mueva el aire, más rápidamente se renueva el aire humedecido que está en contacto con el follaje, el cual en este caso parece haber sido reemplazado por aire húmedo proveniente de las partes más bajas de las cuencas.

Las mayores salidas de agua a través de  $E_{T0}$  (>1.3 y 2.4 mm/día) ocurridas durante el trimestre DEF se relacionaron con la elevada cantidad de radiación solar incidente (1177 y 1265 W/m<sup>2</sup>), que llegó a las cuencas de los humedales durante dicho periodo, la cual es cercana al valor máximo teórico de radiación solar registrado en el planeta 1367 W/m<sup>2</sup> (Sharma y Marwaha 2015), situación que se vincula con la ubicación de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), muy al sur de Colombia, sobre la cuenca Amazónica y el Ecuador durante este trimestre (Poveda et al. 2007), que probablemente causó la disminución de la nubosidad en las áreas de estudio y por lo tanto aumento la demanda de evapotranspiración de la atmósfera. En algunos casos la radiación registrada en el páramo Andino, es mayor comparada con el resto de zonas montañosas, debido a que la capa atmosférica es menor que en zonas más bajas y a el hecho de que los páramos se encuentran cerca de la línea ecuatorial (Hofstede et al. 2003). No obstante, la frecuente y abundante niebla y nubosidad que se presenta en estos ecosistemas, no permitió que la alta intensidad de la radiación solar llegara en su totalidad a la superficie del suelo (Hedberg y Hedberg 1979) la mayor parte de la serie de tiempo estudiada, lo cual tienen incidencia directa sobre el balance hídrico de los humedales y sus cuencas, dado el control que ejerce el clima y las plantas en los mecanismos de transferencia de agua, particularmente sobre la evapotranspiración e interceptación.

Por lo anteriormente expuesto, se evidencia que en las cuencas de humedales de alta montaña tropical el costo hídrico en términos de evapotranspiración e interceptación de agua por la vegetación es reducido; esto sumado a la alta pluviosidad y a su ubicación geográfica, incide sustancialmente en el rendimiento y regulación hídrica tanto de los humedales como de sus cuencas asociadas.

## Conclusiones

La cobertura que mostró mayor capacidad de interceptación fue FRJ y la mínima PAJ. Sin embargo, se destaca que la capacidad de interceptación de CHS en la cuenca de las Lagunas de Buitrago fue casi igual a la de FRJ. No obstante, la porción de la precipitación total interceptada por los doseles de las coberturas vegetales en ambas cuencas de páramo fue muy baja, en ninguno de los casos superó el 4%, en consecuencia, la mayor parte de la lluvia caída sobre estos ecosistemas llegó al suelo de las cuencas y a gran parte de la superficie de los humedales como precipitación neta.

Las pérdidas hidrológicas por  $E_{T0}$  e interceptación de agua por la vegetación en las cuencas de los humedales de páramo estu-

diados fueron muy bajas, debido a que las condiciones climáticas locales redujeron la demanda de evapotranspiración de la atmósfera y a que las características de dosel de estos ecosistemas, dominados por gramíneas y rosetas fueron poco efectivas en la interceptación. Asimismo, la alta frecuencia de eventos lluviosos de baja intensidad, combinada con eventos esporádicos de intensidades mayores, no permitió que se generaran condiciones de dosel aptas para interceptar grandes cantidades de agua.

Los resultados expuestos, reflejan la crucial importancia de la conservación de los vínculos y retroalimentaciones entre el suelo, las plantas y la atmósfera, los cuales son fundamentales en el funcionamiento hidrológico de las cuencas de humedales de alta montaña tropical, dado el control que ejercen en el mantenimiento y regulación de los flujos hidrológicos que determinan el balance hídrico de estos ecosistemas.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, a Colciencias por la financiación de la investigación y al instituto de Ecohidrología de la Universidad de Davis, California por las estaciones de monitoreo en el páramo de Chingaza.

## Referencias

- Acreman, M., McCartney, M. 2009. Hydrological Impacts in and around Wetlands. En: Maltby, E., Barker, T. (eds.), *The Wetlands Handbook*. Wiley-Blackwell. Chichester, Reino Unido.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56.
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G., Alvarado-Barrientos, M., Rebel, K., Van Osch, F., Rietkerk, M., Dawson, T. 2011. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: A review. *Journal of Plant Ecology* 4:1–22.
- Ataroff, M., Naranjo, M. 2009. Interception of water by pastures of *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. and *Melinis minutiflora* Beauv. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(10): 1616–1620.
- Bullock, A., McCartney, M. 1996. Wetland and river flow interactions in Zimbabwe. *Tropical hydrology: Geoscience and tool for developing*. Actes de la conférence de Paris. IAHS. no. 238. Francia.
- Carlson, M., Wiley, M., Wilcox, D. 2014. Estimating evapotranspiration and groundwater flow from water-table fluctuations for a general wetland scenario. *Ecohydrology* 7(2): 378–390.
- Cordova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., Celleri, R. 2015. Evaluation of the penman-monteith (FAO 56 PM) method for calculating reference evapotranspiration using limited data application to the wet páramo of Ecuador. *Mountain Research and Development* 35(3): 230–239.
- Cleef, A. 1981. *The vegetation of the páramos of the Colombian Cordillera Oriental. Dissertationes Botanicae*. (Vol. 61) Gantner Verlag K.G. Alemania.
- Crockford, R., Richardson, D. 2000. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14: 2903–2920.
- Deguchi, A., Hattori, S., Park, H. 2006. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model. *Journal of Hydrology* 318(1–4): 80–102.
- Frumau, A., Bruijnzeel, L., Tobon, C. 2006. *Hydrological measurement protocol for montane cloud forest. Annex 2, Final Technical Report DFID-FRP Project R7991*. Vrije Universiteit, Amsterdam, 105 pp.
- Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W., Sitch, S. 2004. Terrestrial vegetation and water balance - Hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology* 286(1–4): 249–270.
- Guhl, E. 1974. Las lluvias en el clima de los Andes ecuatoriales húmedos de Colombia. *Cuadernos Geografía n° 1*. Universidad Nacional de Colombia. CID. Bogotá, Colombia.
- Headley, T., Davison, L., Huett, D., Müller, R. 2012. Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia. *Water Research* 46(2): 345–354.

- Hedberg, I., Hedberg, O. 1979. Tropical-alpine life-forms of vascular plants. *Oikos* 33(2): 297–307.
- Hofstede, R., Segarra, P., Mena, P. 2003. Los Páramos del Mundo. Proyecto Atlas Mundial de Los Páramos. In *Global Peatland Initiative/NC-IUCN/EcoCiencia*. Quito. Ecuador.
- Levia, D., Frost, E. 2003. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology* 274: 1–29.
- Mao, X., Cui, L., Wang, C. 2013. Exploring the hydrologic relationships in a swamp-dominated watershed—A network-environment-analysis based approach. *Ecological Modelling* 252: 273–279.
- Mitsch, W., Gosselink, J. 2015. *Wetlands* (Fifth ed.). John Wiley and Sons, Inc. Hoboken, NJ, Estados Unidos.
- Morales, R., Pérez, C., Reche, I. 2001. Ecosistemas de alta montaña, las atalayas de la troposfera. *Ecosistemas* 10 (3): 1-5.
- Muneepeerakul, C., Miralles-Wilhelm, F., Tamea, S., Rinaldo, A., Rodríguez-Iturbe, I. 2008. Coupled hydrologic and vegetation dynamics in wetland ecosystems. *Water Resources Research* 44(7): 1–15.
- Perez, M., Arredondo, J., Huber, E., Serna, A. 2014. Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. *Ecohydrology* 7(2): 532–543.
- Poveda, G., Vélez, J., Mesa, O., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R., Mejía, J., Hoyos, C. et al. 2007. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrological Engineering* 12(1): 4-13.
- Sharma, A., Marwaha, B. 2015. Development of simulation weather data for Hour wise Daily Diffused and Direct Solar Radiation from Hourly Global Radiation using statistical estimation method for Subtropical region. *International Journal of Renewable Energy Research* 5(4), 1231–1240.
- Shedlock, R., Wilcox, D., Thompson, T., Cohen, D. 1993. Interactions Between Ground Water and Wetlands, Southern Shore of Lake Michigan, USA. *Journal of Hydrology* 141:127–155.
- Sklenár, P., Balslev, H. 2005. Superpáramo plant species diversity and phytogeography in Ecuador. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 200(5): 416–433.
- Tobón, C., Bouten, W., Sevink, J. 2000. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology* 237(1–2): 40–57.
- Todd, A., Buttle, J., Taylor, C. 2006. Hydrologic dynamics and linkages in a wetland-dominated basin. *Journal of Hydrology* 319(1–4): 15–35.
- Wei, X., Sun, G., Vose, J., Otsuki, K., Zhang, Z., Smetterm, K. 2011. Forest ecohydrological processes in a changing environment. *Ecohydrology* 4(2): 143–347.