



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación de la funcionalidad eco- hidrológica de intervenciones de restauración ecológica en áreas estratégicas para la conservación del recurso hídrico en zonas rurales de Medellín.**

**Evaluation of the eco-hydrological functionality of ecological restoration  
interventions in strategic areas for the conservation of water resources in  
rural areas of Medellín.**

**Laura Victoria Cano Arboleda**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medioambiente  
Medellín, Colombia

2018

# **Evaluación de la funcionalidad eco-hidrológica de intervenciones de restauración ecológica en áreas estratégicas para la conservación del recurso hídrico en zonas rurales de Medellín.**

**Laura Victoria Cano Arboleda**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Medio Ambiente y Desarrollo**

Directora:

Ph.D. Estela Quintero Vallejo

Codirector:

Ph.D. Juan Camilo Villegas Palacio

Codirectora:

Ph.D. Clara Inés Villegas Palacio

Línea de Investigación:

Gestión Ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2018

*A mi familia por ser fuerza, apoyo y amor incondicional.*



## **Agradecimientos**

A mis directores Estela Quintero Vallejo y Juan Camilo Villegas por sus enseñanzas, compromiso, acompañamiento y buena energía. Fue una gran experiencia compartir con ustedes este proceso.

A la profesora Clara Villegas por sus enseñanzas, apoyo y acompañamiento durante todo el proceso de la maestría y por sus gestiones respecto al proyecto del que hace parte esta tesis de maestría.

A mi compañera Beatriz Martínez y su familia: Adrián Perpiñán y Juanluis Perpiñán Martínez por el apoyo y amistad durante toda la maestría.

A las personas que nos apoyaron en campo, gracias por su valioso trabajo: Luisa Botero, Diego Soto, Cristina Vargas, Andrés Caballero, Ericka Guana, Juan Esteban García, Maria José, Paulina Bran. También a Lina, Angie, Estefanía, Cristian y Olga, guardabosques de la microcuenca San Pedro. También a mi papá por su apoyo en la construcción de los pluviómetros y logística de las salidas.

A la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín por la financiación de este trabajo de investigación y especialmente al Ingeniero Álvaro Guzmán por sus gestiones e interés respecto al tema.

A mi familia, a Jose, a Vale, a mis amigos, gracias por el apoyo, la paciencia, la fuerza y el amor.



## Resumen

La vegetación afecta la partición del balance hídrico por medio de efectos sobre la precipitación incidente, el balance de radiación local y la dinámica hidrológica del suelo. El alcance de estos efectos está determinado por los rasgos funcionales de las plantas. Por lo tanto, el grupo de rasgos funcionales de la vegetación en un sistema hidrológico, contribuye a su dinámica hidrológica y, de esta manera, determina los servicios ecosistémicos derivados de esta función ecosistémica. Como respuesta a la creciente degradación de los bosques, los proyectos de restauración ecológica tienen como propósito recuperar la cobertura boscosa, la funcionalidad ecológica y la provisión de servicios ecosistémicos. Sin embargo, rara vez se evalúa la funcionalidad ecosistémica dentro de estos proyectos y, de manera menos frecuente, las funciones hidrológicas. En un proyecto de restauración ecológica establecido hace 8 años en Medellín (Colombia), exploramos las relaciones entre rasgos funcionales de 10 especies de plantas y procesos eco-hidrológicos que determinan la partición de la precipitación en el dosel a través de flujos de escorrentía cortical y precipitación interna. Los rasgos que describen la estructura y morfología de las copas de los árboles, son los que se relacionan significativamente con la escorrentía cortical y la precipitación interna, procesos que potencialmente transfieren agua al suelo. Las especies estudiadas presentan diferencias en sus rasgos funcionales, generando un gradiente de efectos sobre procesos eco-hidrológicos: desde copas amplias y menos densas en *Alnus acuminata* a copas más pequeñas pero más densas en *Quercus humboldtii*, que influyen sobre la variabilidad temporal de la escorrentía cortical y precipitación interna, respectivamente. A partir de los resultados se proponen indicadores que permiten evaluar los efectos de especies plantadas sobre procesos eco-hidrológicos en proyectos de restauración ecológica. Estos indicadores aportan a una planificación más objetiva de estos proyectos, a partir del monitoreo y la optimización de funciones y servicios ecosistémicos.

**Palabras clave:** restauración ecológica, función eco-hidrológica, rasgos funcionales, monitoreo.

## Abstract

Vegetation affects water balance partitioning via effects on incoming precipitation, local radiation balance and hydrological dynamics of soil. The extent of these effects is determined by plant functional traits. Therefore, the collection of plant functional traits in a hydrological system, determines its hydrological dynamics, and therefore, ecosystem benefits derived from this functioning. As a response to ongoing forest degradation, ecological restoration projects are intended to regain forest cover, ecological functionality and provision of ecosystems services. However, restoration projects are rarely assessed in their functionality and even very infrequently hydrological functions. In an 8-year old ecosystem restoration project established in Medellín (Colombia), we explore the relations between plant functional traits of 10 species and ecohydrological processes that determine partitioning of precipitation in the canopy via stemflow and throughfall. Functional traits describing tree crowns are significantly related with stemflow and throughfall. Our species exhibit differences in their functional traits, generating a gradient of differential effects on ecohydrological processes: from the wide and less dense crowns in *Alnus acuminata* to the smaller but more dense crowns in *Quercus humboldtii*, that significantly influenced the temporal variability of stemflow and throughfall respectively. Based on our results, we propose some indicators for assessing the effects of species planted in ecological restoration projects over ecohydrological processes. These indicators allows for a more objective planification of restoration projects based on monitoring, and the optimization of ecosystem functions and services.

**Keywords:** ecological restoration, ecohydrological function, functional traits, monitoring.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XI</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XII</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Marco teórico</b> .....	<b>5</b>
1.1 Ecología funcional y funciones ecosistémicas .....	5
1.2 Función eco-hidrológica de la vegetación .....	6
1.3 Evaluación de la función eco-hidrológica .....	7
1.4 Restauración ecológica.....	8
1.4.1 El monitoreo de la restauración ecológica .....	9
<b>2. Metodología</b> .....	<b>11</b>
2.1 Área de estudio.....	11
2.2 Monitoreo de precipitación y clima.....	15
2.3 Selección de especies y rasgos funcionales de plantas.....	16
2.4 Monitoreo hidrológico.....	18
2.5 Análisis de datos.....	22
2.5.1 Efecto diferencial de las especies sobre procesos eco-hidrológicos....	22
2.5.2 Relación entre rasgos funcionales de plantas y procesos eco- hidrológicos .....	22
2.5.3 Grupos de especies con efectos similares sobre procesos eco- hidrológicos .....	23
2.5.4 Función eco-hidrológica a escala de comunidad vegetal.....	24
<b>3. Resultados</b> .....	<b>25</b>
3.1 Dinámica del clima y la precipitación en la microcuenca .....	25
3.2 Características de las especies estudiadas. ....	26
3.3 Efecto diferencial de las especies sobre procesos eco-hidrológicos .....	29
3.3.1 Escorrentía cortical .....	29
3.3.2 Precipitación interna.....	31
3.4 Relación entre rasgos funcionales y variables hidrológicas .....	33
3.4.1 Total semanas monitoreadas .....	34
3.4.2 Semanas húmedas .....	39
3.4.3 Semanas secas.....	42

3.5	Especies, sus rasgos funcionales y la influencia en procesos eco-hidrológicos.....	45
3.5.1	Grupos de especies con efectos similares sobre procesos eco-hidrológicos.....	49
3.6	Función eco-hidrológica a escala de comunidad vegetal.....	50
<b>4.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>55</b>
4.1	Rasgos funcionales de plantas y procesos eco-hidrológicos .....	55
4.2	La escala temporal y las relaciones entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos.....	57
4.3	Efectos diferenciales de las especies sobre procesos eco-hidrológicos .....	59
4.4	Función eco-hidrológica de la comunidad vegetal .....	60
4.5	Implicaciones para la restauración ecológica .....	62
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>65</b>
5.1	Conclusiones.....	65
5.2	Recomendaciones.....	66
<b>A.</b>	<b>Anexo: Indicadores físicos y bióticos como aproximación al estudio de la capacidad de regulación hídrica de la cobertura vegetal. ....</b>	<b>69</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Rasgos funcionales medidos y su relación con procesos ecosistémicos asociados a la regulación hidrológica. ....</b>	<b>74</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo: Protocolos de medición de rasgos funcionales .....</b>	<b>77</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo: Tabla distribución en las parcelas de los individuos instrumentados..</b>	<b>81</b>
<b>E.</b>	<b>Anexo: Composición y abundancia relativa de especies en las parcelas de monitoreo .....</b>	<b>82</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>83</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1:</b> Mapa de localización del área de estudio. ....	12
<b>Figura 2-2:</b> Plantaciones forestales en la microcuenca San Pedro, Santa Elena ....	14
<b>Figura 2-3:</b> Invasión de especies exóticas en parcelas de monitoreo.....	15
<b>Figura 2-4:</b> Biplot del análisis de componentes principales de especies y sus rasgos funcionales. ....	19
<b>Figura 2-5:</b> Instalación de collarines y pluviómetros en individuos plantados en la microcuenca San Pedro. ....	21
<b>Figura 3-1:</b> Series de tiempo de la precipitación incidente, la escorrentía cortical y la precipitación interna durante las semanas de monitoreo en la microcuenca San Pedro.	26
<b>Figura 3-2:</b> Caracterización de las especies de plantas objeto de estudio. ....	28
<b>Figura 3-3:</b> Diferencias entre especies respecto a promedio y coeficiente de variación de la escorrentía cortical. ....	30
<b>Figura 3-4:</b> Diferencias entre especies respecto al promedio y coeficiente de variación de la precipitación interna.....	32
<b>Figura 3-5:</b> Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y escorrentía cortical durante el total de semanas de monitoreo. ....	36
<b>Figura 3-6:</b> Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y precipitación interna durante el total de semanas de monitoreo. ...	38
<b>Figura 3-7:</b> Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y escorrentía cortical durante las semanas húmedas.....	40
<b>Figura 3-8:</b> Gráfica de dispersión y línea de ajuste de modelo de regresión lineal entre densidad de copa (%) y precipitación interna durante las semanas húmedas .....	41
<b>Figura 3-9:</b> Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y escorrentía cortical durante las semanas húmedas.....	43
<b>Figura 3-10:</b> Gráfica de dispersión y línea de ajuste de modelo de regresión lineal entre área foliar (cm <sup>2</sup> ) y precipitación interna promedio durante las semanas secas. ....	44
<b>Figura 3-11:</b> Biplot a partir análisis de componentes principales de las 10 especies seleccionadas, rasgos funcionales y variables hidrológicas.....	46
<b>Figura 3-12:</b> Esquema del gradiente de especies respecto a rasgos funcionales y variabilidad temporal de escorrentía cortical y precipitación interna. ....	47
<b>Figura 3-13:</b> Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y precipitación interna durante el total de semanas de monitoreo ....	54

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Número de individuos y abundancia relativa de las especies arbóreas plantadas en la microcuenca San Pedro.....	17
<b>Tabla 3-1:</b> Caracterización de las especies objeto de estudio a partir de sus rasgos funcionales. 27	
<b>Tabla 3-2:</b> Parámetros de análisis de regresión entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante el total de semanas de monitoreo.....	35
<b>Tabla 3-3:</b> Parámetros de análisis de regresión entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante semanas húmedas. ....	39
<b>Tabla 3-4:</b> Parámetros de análisis de regresión entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante semanas húmedas .....	42
<b>Tabla 3-5:</b> Autovectores análisis de componentes principales de rasgos funcionales y coeficiente de variación de escorrentía cortical y precipitación interna.....	45
<b>Tabla 3-6:</b> Valores promedio de rasgos funcionales para grupos de especies identificados. 49	
<b>Tabla 3-7:</b> Parámetros producto de análisis de regresión entre medias ponderadas por la comunidad de rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante el total de semanas de monitoreo.....	52

# Introducción

La vegetación, el clima y el suelo interactúan en el ciclo hidrológico. El clima y el suelo controlan la dinámica de la vegetación y ésta a su vez tiene influencia sobre el flujo de agua en la superficie y en la regulación de múltiples procesos de interacción con la atmósfera (Rodríguez-Iturbe & Porporato, 2004). En escalas locales, la vegetación afecta directamente los componentes del balance hídrico a partir de procesos de interceptación de la lluvia, interacción con el balance de radiación local y con la dinámica hidrológica del suelo (Brauman et al., 2007; Gerten et al., 2004). La influencia de las plantas sobre la hidrología está determinada por sus características fisiológicas, morfológicas y anatómicas (Cornelissen et al., 2003; de Bello et al., 2010; Gerten et al., 2004; Pérez-Harguindeguy et al., 2013), que en conjunto estructuran la dinámica eco-hidrológica de una comunidad, y en últimas de las cuencas hidrográficas. Esto, finalmente, define su capacidad de mantener servicios ecosistémicos de regulación hidrológica (Brauman et al., 2007; de Groot et al., 2002; Guo et al., 2000).

La regulación hidrológica en términos de función ecosistémica se define como el efecto de la cobertura vegetal en la regulación de la descarga a una corriente de agua (Asbjornsen et al., 2011; Brauman et al., 2007; de Groot et al., 2002; Ortega et al., 2014). Este efecto puede estar relacionado con la capacidad de la vegetación de redistribuir el agua lluvia incidente por medio de la interceptación (Ortega et al., 2014), la disminución de la pérdida de agua por escorrentía superficial, y el mejoramiento de la infiltración del suelo (Bruijnzeel, 2004; León, 2001), constituyendo así un efecto de “bosque embalse” que regula la descarga en los ríos, a partir de la atenuación de caudales extremos (Salazar et al., 2018).

La capacidad de regulación del ciclo hidrológico de los bosques andinos ha sido reconocida (Bruijnzeel, 2004; Licata et al., 2008; Vanclay, 2009). Esta capacidad de regulación eco-hidrológica varía entre diferentes coberturas vegetales, siendo, en general, las coberturas naturales las que ofrecen mayor capacidad de regulación hídrica en comparación con coberturas intervenidas como pastizales, plantaciones y cultivos permanentes (García-

Leoz et al., 2017; Ortega et al., 2014; Patiño et al., 2007; Ruiz et al., 2005; Suescún et al., Vásquez & Tobón, 2016)

Los bosques Andinos están cambiando rápidamente sus coberturas (IDEAM, 2014) y ante el panorama actual de degradación de estos bosques, se hace necesaria la ejecución de proyectos de restauración ecológica que busquen recuperar la biodiversidad, la funcionalidad ecológica y la capacidad de ofrecer servicios ecosistémicos (Guariguata & Ostertag, 2001; Knoke et al., 2016; Lamb et al., 2005; Montoya et al., 2012). La restauración ecológica se define como el proceso de asistir a la recuperación de un ecosistema que se ha degradado, dañado o destruido (Lamb et al., 2005; Society for Ecological Restoration, 2004; Vargas, 2007).

Es ampliamente reconocido que la restauración ecológica promueve en cierta medida la recuperación de la composición, estructura y función de ecosistemas degradados (Benayaset al., 2009; Meli et al., 2017; Meli et al., 2014; Society for Ecological Restoration, 2004). A pesar de la importancia de la restauración ecológica para recuperar la provisión de servicios ecosistémicos, existe cierta limitación en la ejecución de este tipo de proyectos, ya que implican una gran inversión de recurso técnico y económico (Birch et al., 2010; Holl & Howarth, 2000); además el éxito de las intervenciones de restauración ecológica es incierto debido a la complejidad de los ecosistemas a restaurar (Chazdon, 2008; Society for Ecological Restoration, 2004).

La incertidumbre ligada a los proyectos de restauración está relacionada además con la ausencia o poca planeación del monitoreo de la restauración, el cual es pieza fundamental en la evaluación de los proyectos, que permite aplicar correctivos o identificar estrategias exitosas (Block et al., 2001; Ruiz-Jaen & Aide, 2005; Society for Ecological Restoration, 2004; Vargas, 2011). Esta actividad no se realiza de manera frecuente en proyectos de restauración ecológica en general (Block et al., 2001); tampoco a nivel local como es el caso de Colombia (Murcia & Guariguata, 2014). Hasta el momento, el énfasis del monitoreo de proyectos de restauración ecológica ha sido en atributos físicos, biogeoquímicos y ecológicos, pero poco se ha hecho respecto al monitoreo de la recuperación de funciones ecosistémicas (Aguilar-Garavito & Ramírez, 2015; Evans & Guariguata, 2016; Murcia & Guariguata, 2014; Ruiz-Jaen & Aide, 2005; Vargas, 2011); esto debido a la alta

complejidad que implica la medición de funciones ecosistémicas en relación a aspectos logísticos y ecológicos (Block et al., 2001; Evans & Guariguata, 2016; Lavorel et al., 2011).

La funcionalidad de los ecosistemas está relacionada con la diversidad de rasgos funcionales en las comunidades bióticas, y su estudio puede contribuir potencialmente a la evaluación y manejo de funciones y servicios ecosistémicos (Díaz et al., 2007; Lavorel et al., 2007; Petchey & Gaston, 2006). Los rasgos funcionales son características de las especies que determinan sus estrategias ecológicas para adquirir y usar los recursos, lo cual determina su influencia sobre las propiedades de los ecosistemas y sus respuestas a las condiciones ambientales (de Bello et al., 2010; Westoby et al., 2002). De esta manera, identificar y cuantificar el conjunto de rasgos funcionales de plantas en una cuenca permitiría comprender el efecto de las plantas sobre su dinámica hidrológica y por lo tanto sobre los servicios ecosistémicos derivados de dicha funcionalidad.

Debido a que el servicio de provisión de agua es de vital importancia para las comunidades rurales, es necesario entender la relación entre la vegetación y los procesos de regulación hídrica, particularmente en proyectos de restauración ecológica en contextos rurales. Por lo tanto, en esta investigación se estudió la relación entre los rasgos funcionales de plantas y procesos eco-hidrológicos que determinan el ingreso de precipitación al suelo, en el marco de un proyecto de restauración ecológica en el que se plantaron especies nativas hace 8 años en sitios asociados a una cuenca abastecedora de un acueducto rural en el corregimiento de Santa Elena, Medellín, Colombia. De esta manera, se buscó responder a la pregunta ¿Cómo evaluar la funcionalidad eco-hidrológica de intervenciones de restauración ecológica en áreas de importancia estratégica para la conservación del recurso hídrico?

En la investigación se plantearon los siguientes objetivos:

General: Evaluar el efecto de la restauración ecológica sobre procesos eco-hidrológicos relacionados con la función de regulación hídrica en áreas rurales estratégicas para la conservación del recurso hídrico de Medellín.

Específicos: (i) Caracterizar funcionalmente las especies vegetales usadas en intervenciones de restauración ecológica e identificar grupos de especies que comparten

rasgos funcionales con efecto sobre procesos eco-hidrológicos. (ii) Evaluar el efecto diferencial de especies plantadas en proyectos de restauración ecológica sobre procesos eco-hidrológicos mediante el análisis de la relación entre rasgos funcionales de las plantas y variables hidrológicas a nivel de especie. (iii) Evaluar el efecto de la vegetación plantada sobre procesos eco-hidrológicos mediante la relación entre variables hidrológicas e índices de funcionalidad ecosistémica a escala de predio restaurado. (iv) Establecer indicadores de funcionalidad eco-hidrológica para el monitoreo de proyectos de restauración ecológica relacionados con la recuperación y protección del recurso hídrico.

Los resultados de la presente investigación proporcionan información sobre el efecto particular de especies plantadas sobre procesos que son indicadores de la función de regulación hídrica; además, permiten establecer indicadores de funcionalidad ecosistémica que puedan ser usados para monitorear un proyecto de restauración ecológica respecto a la recuperación de la función eco-hidrológica, y con ello concretar esquemas de monitoreo para funciones ecosistémicas, mejorar la planeación de intervenciones de restauración ecológica, así como proporcionar justificación ambiental de las inversiones públicas realizadas por las entidades territoriales en Colombia.

Esta investigación se enmarca en el proyecto “Evaluación de la efectividad ambiental de intervenciones forestales de restauración ecológica sobre la regulación hídrica de la microcuenca San Pedro, corregimiento de Santa Elena, Medellín, Colombia”, financiado por el convenio interadministrativo No. CI-004-17 suscrito entre la Reforestadora Integral de Antioquia S.A y la Universidad Nacional de Colombia.



# 1. Marco teórico

## 1.1 Ecología funcional y funciones ecosistémicas

Los rasgos funcionales son características morfológicas, fisiológicas y fenológicas de las especies que determinan sus estrategias ecológicas para adquirir y usar los recursos y esto influye sobre su crecimiento, reproducción y sobrevivencia (Díaz & Cabido, 2001). Los rasgos funcionales también son el mecanismo clave por el cual las especies y grupos de especies influyen los procesos y funciones ecosistémicas, de los cuales depende la provisión de servicios ecosistémicos (de Bello et al., 2010; Díaz et al., 2004, 2007; Hooper et al., 2005; Lavorel & Garnier, 2002; Luck et al., 2009; Westoby et al., 2002). Por ejemplo, algunos rasgos funcionales de plantas que tienen efectos sobre la regulación hídrica son la densidad y tamaño de la copa, área foliar, forma de crecimiento (anuales versus perennes), fenología, profundidad de la raíz, conductancia estomática, cantidad de hojarasca, entre otros (de Bello et al., 2010).

La forma en la que los rasgos funcionales de las especies se encuentran representados en una comunidad biótica determina su diversidad funcional. Esta diversidad funcional puede estudiarse, por un lado, a partir de grupos funcionales de plantas (GFP) que son agrupaciones discretas de especies que comparten un conjunto de rasgos y tienen respuestas al ambiente y efectos sobre procesos ecosistémicos similares (CATIE, 2011; Díaz et al., 2004; Díaz & Cabido, 2001; Poorter & Bongers, 2006). Por otro lado, la diversidad funcional puede abordarse a partir de índices de diversidad funcional que cuantifican el tipo, rango y abundancia relativa de rasgos funcionales en comunidades bióticas (Díaz et al., 2007; Lavorel et al., 2007; Petchey & Gaston, 2006). Ambos enfoques permiten evaluar la relación entre los rasgos funcionales de las comunidades vegetales con los procesos y servicios ecosistémicos (Mason et al., 2005; Pla et al., 2012); ya que, según la hipótesis “razón biomasa” (Grime, 1998), los rasgos funcionales particulares de especies abundantes en una comunidad son los que determinan los procesos

ecosistémicos (Garnier et al., 2004; Grime, 1998). Por ejemplo, los cambios en la abundancia de grupos funcionales y en valores de índices de diversidad funcional en el tiempo, es decir, entre diferentes estadios del procesos de restauración ecológica, pueden dar cuenta del cambio en la funcionalidad ecosistémica de la comunidad vegetal (Hedberg et al., 2013; Suganuma & Durigan, 2014).

## 1.2 Función eco-hidrológica de la vegetación

En el ciclo hidrológico clima, suelo y vegetación interactúan (Rodríguez-Iturbe & Porporato, 2004). Dicha interacción deriva en la función eco-hidrológica de la vegetación en una zona (Bruijnzeel, 2004). La función eco-hidrológica se divide en diversos procesos o vías de distribución de la precipitación incidente en un sitio. Estos procesos son interceptación, precipitación interna, escorrentía cortical, precipitación horizontal, escorrentía superficial, infiltración, evaporación y transpiración (Brauman et al., 2007; Wang et al., 2013). Las plantas pueden además contribuir dentro del ciclo hidrológico a la protección y sombreado de la superficie del suelo, estabilización del suelo, conducción de nutrientes hacia el suelo y amortiguamiento de la caída de lluvia que protege al suelo de la erosión (Brauman et al., 2007; Gerten et al., 2004).

La vegetación influye directamente sobre la entrada de agua al suelo a través de la distribución de la precipitación en interceptación, precipitación interna y escorrentía cortical (Li et al., 2016; Wang et al., 2013). La interceptación es la fracción de lluvia interceptada y retenida temporalmente por la superficie de hojas, ramas y tallos que se evapora, la precipitación interna es la parte de la precipitación incidente que atraviesa las copas de los árboles y llega al suelo, y la escorrentía cortical es la parte de la precipitación incidente que cae sobre el árbol y escurre a través de ramas y tronco (Chappell et al., 2001; Park & Cameron, 2008). La precipitación interna y la escorrentía cortical influyen directamente sobre la variabilidad espacio-temporal del contenido de humedad en el suelo (Wang et al., 2013), proceso clave del ciclo hidrológico que permite convertir la precipitación en agua disponible en el suelo para la planta y que además recarga los flujos subterráneos y el cauce principal (Brauman et al., 2007; Gerten et al., 2004; Legates et al., 2011). La influencia de las plantas sobre procesos eco-hidrológicos está determinada por sus rasgos funcionales (comportamiento estomático, transpiración, patrones de arquitectura y crecimiento de las raíces, área foliar, fenología, entre otros) (Cornelissen et al., 2003; de

Bello et al., 2010; Gerten et al., 2004; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Además, la composición de especies de la cobertura vegetal y los cambios en el uso del suelo afectan el balance entre los diferentes procesos eco-hidrológicos (Bruijnzeel, 2004).

A través de la influencia sobre procesos eco-hidrológicos, la vegetación puede regular el volumen de agua almacenado en una cuenca hidrográfica (Brauman et al., 2007; Gonzaga, 2002) y puede amortiguar el caudal o cantidad de agua en una corriente (Arroyave & Posada, 2010; Brauman et al., 2007; Ortega et al., 2014), esta función es clave para garantizar la provisión de agua para el consumo humano. Por tanto, la recuperación de la vegetación asociada a flujos de agua puede contribuir al mantenimiento de caudales medios necesarios para el suministro de agua, y a la regulación de la dinámica propia del caudal respecto a la sedimentación y posibles eventos de desbordamiento (Aronson, Milton, & Blignaut, 2007).

### **1.3 Evaluación de la función eco-hidrológica**

El efecto de diferentes coberturas vegetales sobre la dinámica hidrológica a escala de microcuenca ha sido evaluado en varios estudios a partir de aproximaciones eco-hidrológicas en bosques altoandinos (Ortega et al., 2014; Patiño et al., 2007; Ruiz et al., 2005; Suescún et al., 2015; Vásquez & Tobón, 2016). Para ello se instrumentan y monitorean las cuencas, se establecen parcelas de escorrentía superficial, infiltración, pluviómetros por debajo y por fuera de la cobertura vegetal, collarines de escorrentía cortical, se recopilan datos de precipitación de estaciones climáticas regionales, contenido de humedad en los suelos, porosidad del suelo, entre otros (Ortega et al., 2014; Patiño et al., 2007; Ruiz et al., 2005; Suescún et al., 2015; Vásquez & Tobón, 2016). Esto con el fin de relacionar la precipitación con el rendimiento hídrico, determinando luego el aporte diferencial de cada cobertura vegetal en la regulación de caudales (Ortega et al., 2014; García-Leoz et al., 2017).

En general, en las aproximaciones al estudio de la regulación hídrica se considera la cuenca hidrográfica como un sistema hidrológico en el cual se evalúa el balance hídrico a través de la medición de variables hidrológicas, hidroedáficas, climáticas, microclimáticas y, en algunos casos, de la vegetación (Brauman et al., 2007; Gonzaga, 2002). Sin embargo existen otras aproximaciones a partir de la medición de indicadores físicos (variables hidrológicas, edáficas y climáticas) y especialmente de indicadores bióticos, que son

*proxys* al efecto diferencial de las características particulares de cada especie y comunidad vegetal sobre la regulación hídrica. Algunos indicadores físicos y bióticos que pueden ser usados como aproximación al estudio de la capacidad de regulación hídrica de la vegetación se presentan en el Anexo A.

## 1.4 Restauración ecológica

En Colombia existen evidencias de la transformación de ecosistemas como consecuencia de la expansión de la frontera agrícola, así como la conversión de bosques a potreros para la ganadería (MADS & PNUD, 2014; Murcia & Guariguata, 2014). Específicamente, en la cordillera de los Andes se han asentado muchas de las principales ciudades, y es sustancial el cambio de la cobertura boscosa para otro tipo de usos como ganadería y agricultura (IDEAM, 2014). Es por ello que se plantea la necesidad de aumentar la cobertura en bosques mediante programas de restauración ecológica, que buscan restablecer la biodiversidad, la funcionalidad ecológica y la provisión de bienes y servicios ecosistémicos (Guariguata & Ostertag, 2001; Knoke et al., 2016; Lamb et al., 2005; Montoya et al., 2012). En el marco de la restauración ecológica se realizan actividades encaminadas a la superación de barreras de la restauración, todos aquellos factores que impiden, limitan o desvían la sucesión vegetal natural en áreas alteradas por perturbaciones naturales y antrópicos (Lamb et al., 2005; Vargas, 2007). Las actividades para superar dichas barreras incluyen: a) manipulación del ambiente físico, b) manipulación del ambiente químico, c) manipulación del ambiente biótico (Perrow & Davy, 2002; Vargas, 2011). Específicamente en la manipulación del ambiente biótico es común que se planten individuos de especies vegetales en diferentes arreglos como plantaciones lineales, islas arbóreas, plantas nodrizas, fajas, entre otras (Holl & Aide, 2010; Vargas, 2011).

La restauración ecológica promueve en cierta medida la recuperación de la composición, estructura y función de ecosistemas degradados (Meli et al., 2017; Meli et al., 2014; SER, 2004). Un meta-análisis de 89 proyectos de restauración en un amplio rango de ecosistemas en todo el planeta indica que la restauración ecológica incrementa en promedio la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos en 44% y 25%, respectivamente (Benayas et al., 2009). Pero no se presenta evidencia específica sobre el efecto de la restauración ecológica en la regulación hídrica. Sin embargo, según el informe

“La restauración ecológica en Colombia”, el 89 % (68 proyectos de 119) de los proyectos de restauración ecológica que se han realizado han tenido como objetivo la recuperación de la funcionalidad de cuencas, particularmente la oferta y regulación hídrica y el control de erosión, además el 86% de esos proyectos se realizaron en la zona Andina (Murcia & Guariguata, 2014).

### **1.4.1 El monitoreo de la restauración ecológica**

El monitoreo es uno de los aspectos más importantes de la restauración ecológica. Comúnmente se propone monitorear los objetivos de la restauración mediante el monitoreo de implementación y el monitoreo de efectividad. En el monitoreo de implementación se evalúa si las intervenciones de restauración se ejecutaron como fueron diseñadas y cuáles han sido sus efectos tempranos sobre el ecosistema a restaurar (Vargas, 2007). En el monitoreo de efectividad se evalúa si los principales patrones (estructura, riqueza de especies, abundancia) y procesos ecológicos (productividad, interacciones interespecíficas, ciclaje de nutrientes, entre otros) se han recuperado (Aguilar-Garavito & Ramírez, 2015; Vargas, 2007). En el monitoreo de efectividad se evalúan atributos del ecosistema por medio de diferentes métodos, con un énfasis específico en atributos físicos-químicos, de estructura ecológica y de composición de especies de los ecosistemas restaurados, pero poco se ha hecho respecto al monitoreo de la recuperación de funciones ecosistémicas (Aguilar-Garavito & Ramírez, 2015; Evans & Guariguata, 2016; Murcia & Guariguata, 2014; Ruiz-Jaen & Aide, 2005; Vargas, 2011). Ello posiblemente por la complejidad asociada a la medición de funciones ecosistémicas en relación a aspectos logísticos y ecológicos (Lavorel et al., 2011), y con la selección de variables adecuadas para la evaluación del atributo del ecosistema que se desea recuperar (Block et al., 2001; Evans & Guariguata, 2016).

La evaluación de la restauración ecológica usualmente se ha realizado a través de índices relacionados con atributos estructurales y de diversidad de especies de un ecosistema (Aguilar-garavito & Ramírez, 2015; Hedberg et al., 2013; Suganuma & Durigan, 2014). Aunque estos indicadores bióticos son fáciles de medir, no proveen información sobre el efecto de las especies usadas sobre funciones ecosistémicas particulares, tampoco sobre los procesos y mecanismos que controlan el reclutamiento de especies en comunidades en proceso de restauración (Hedberg et al., 2013). Así, se hace relevante el uso de los avances recientes en la evaluación rápida de funciones ecosistémicas y la biodiversidad

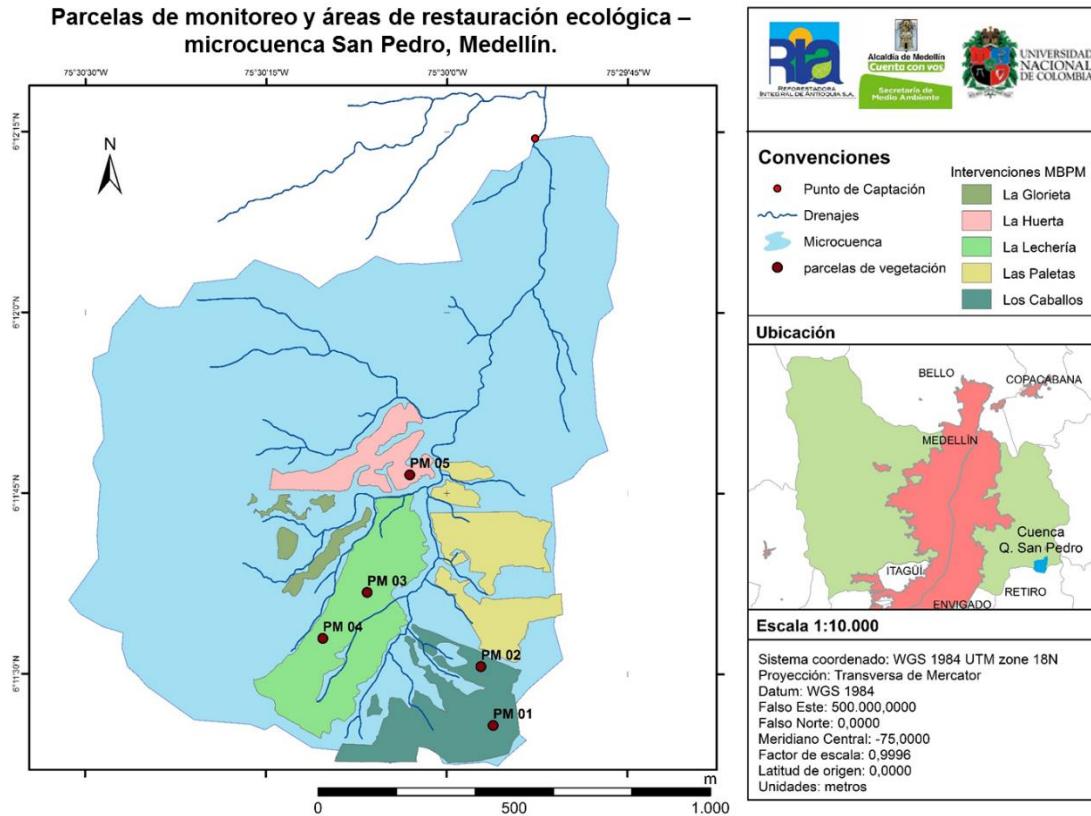
asociada (Burylo et al., 2014), como los rasgos funcionales de plantas e índices de diversidad funcional, indicadores que permiten analizar las funciones ecosistémicas de las especies (Mason et al., 2005), así como sus respuestas a las condiciones ambientales que varían durante la sucesión vegetal (Funk et al., 2008), constituyendo herramientas con importante potencial para guiar las prácticas de restauración ecológica (Burylo et al., 2014).

## **2. Metodología**

### **2.1 Área de estudio**

El área de estudio comprende 5 predios que corresponden a un área intervenida con restauración ecológica en la parte alta de la microcuenca San Pedro y que tienen una extensión total de 31,23 ha. El muestreo y monitoreo se realizó en 5 parcelas permanentes de monitoreo distribuidas en los predios de restauración ecológica. La cuenca de la Quebrada San Pedro está ubicada en el departamento de Antioquia, en la región nororiental del municipio de Medellín (Colombia), corregimiento de Santa Elena, limitando al sur con el municipio de Envigado. Está localizada entre las cotas 2.725 m.s.n.m en su punto más alto, hasta los 2.530 m.s.n.m en su desembocadura a la quebrada Santa Elena (Secretaría de Medio Ambiente de Medellín, 2011), que se encuentra a su vez dentro de la cuenca hidrográfica del río Aburrá (Figura 2-1).

La cuenca tiene un área total de 2,02 km<sup>2</sup> hasta su desembocadura en la Quebrada Santa Elena, y un área de 1,50 km<sup>2</sup> hasta el punto de captación de la Corporación del acueducto San Pedro, que abastece las veredas el Llano y El Plan del corregimiento de Santa Elena en el Municipio de Medellín y la vereda Perico del municipio de Envigado. La microcuenca hidrográfica es asimétrica, con la vertiente occidental más larga y la oriental más corta y de menor altura (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad Nacional de Colombia, CORANTIOQUIA, & CORNARE, 2007). En la vertiente occidental se concentra la mayor parte de la población que habita el territorio, en buena proporción, como segunda vivienda con fines recreativos, una de las mayores presiones que enfrenta la microcuenca (Secretaría de Medio Ambiente de Medellín, 2011).

Figura 2-1: Mapa de localización del área de estudio<sup>1</sup>.

En el área de estudio la precipitación presenta un comportamiento bimodal, con mayor precipitación durante los meses marzo a mayo y septiembre a noviembre (estaciones lluviosas) alternada con periodos de sequía durante los meses enero a marzo y junio a agosto (estaciones secas). Durante las semanas de monitoreo (Octubre de 2017 a Mayo de 2018), la temperatura máxima fue de 16°C, mínima 11°C y promedio 13°C, la humedad mínima 77%, máxima 96% y promedio 88%.

La geología de la cuenca de la quebrada San Pedro consiste principalmente en suelos de meteorización de la denominada Dunita de Medellín y una unidad aluvial alrededor de la

<sup>1</sup> El área de estudio corresponde a las parcelas de monitoreo ubicadas en áreas de restauración ecológica de la microcuenca San Pedro (en el mapa Intervenciones MBPM), ubicada en el corregimiento de Santa Elena, al oriente del municipio de Medellín, Colombia.



parte baja del drenaje. En gran parte de la cuenca se identifican claramente las capas de ceniza volcánica naturales de toda la región. La microcuenca se puede dividir en cinco secciones geomorfológicas, correspondientes a una zona de altiplano, dos de colinas (altas y medias), un escarpe principal que separa el altiplano de las colinas medias y una llanura aluvial, que se correlaciona con la unidad de depósitos aluviales. El marco geomorfológico en el que se encuentra inmersa la cuenca de la quebrada San Pedro consiste en el del sistema de altiplanos y cañones de la zona central de Antioquia (Universidad Nacional de Colombia, en preparación).

La vegetación presente en la microcuenca San Pedro pertenece a la Zona de Vida Bosque muy húmedo montano-bajo (bmh-MB), el cual se caracteriza por tener precipitaciones medias anuales de 2.000 a 4.000 mm, altitudes de 2.000 a 3.000 m y temperaturas medias anuales entre 12 y 18°C (Secretaría de Medio Ambiente de Medellín, 2011). Respecto a la cobertura del suelo, el 2,6% de la microcuenca corresponde a tejido urbano discontinuo, 43,2% corresponde a territorios agrícolas y el 53,98% a bosques y áreas seminaturales (Bosque ripario, plantación de especies nativas, plantación de coníferas, áreas en sucesión secundaria) (Universidad Nacional de Colombia, en preparación).

En la parte alta de la microcuenca se implementó desde el año 2010 un proyecto de restauración ecológica en áreas con uso del suelo en potreros y cultivos de flores, aromáticas y hortalizas, asociadas a la microcuenca San Pedro. Esta restauración ecológica ha sido ejecutada por la Alcaldía de Medellín, en el marco del programa “Más Bosques para Medellín”. Dentro de este programa se plantaron en arreglos espaciales tipo lineal o “tres bolillos” de individuos de 40 especies de árboles nativos de la zona clasificadas en diferentes grupos ecológicos (pioneras, secundarias y tolerantes a la sombra), con el propósito de acelerar el proceso de sucesión vegetal, mejorar las propiedades del suelo, aumentar la cobertura arbórea, conectar fragmentos de bosque, proteger las fuentes de agua y conservar la biodiversidad (Secretaría de Medio Ambiente de Medellín, 2011). En total, se han intervenido 31,23 ha dentro de la microcuenca, con alrededor de 54.000 árboles plantados entre los años 2010 y 2013 (Figura 2-2).

**Figura 2-2:** Plantaciones forestales en la microcuenca San Pedro, Santa Elena<sup>2</sup>

En la microcuenca se ha llevado a cabo un plan de monitoreo que consiste en el establecimiento de cinco parcelas circulares permanentes de monitoreo de 707 m<sup>2</sup> de área cada una, en las cuales se ha caracterizado la vegetación plantada en términos de composición y estructura y se ha hecho seguimiento a la mortalidad y sobrevivencia de individuos con un frecuencia anual desde el año 2012. Actualmente, aunque la mayoría de los árboles plantados han sobrevivido y alcanzado estados maduros, y en los sitios se está dando un proceso de regeneración natural, hay una presencia extensiva de las especies invasoras calabaza (*Cucurbita sp.*) y ojo de poeta (*Thunbergia alata*). Este es un factor de amenaza para los árboles dentro de las áreas restauradas, pues estas especies de hábito lianescente, logran establecerse sobre los individuos arbóreos al punto de cubrir completamente su copa y causar su supresión (Figura 2-3).

---

<sup>2</sup> Fotografías que evidencian el crecimiento de árboles plantados y cambio en cobertura y estructura vegetal en sitios donde se llevaron a cabo plantaciones forestales en la microcuenca San Pedro en los años 2010 a 2013 (izquierda) y el estado de las mismas en el año 2018 (derecha).

**Figura 2-3:** Invasión de especies exóticas en parcelas de monitoreo<sup>3</sup>.



A partir de las plantaciones realizadas en la zona, la cobertura boscosa ha aumentado de un 29,12 % en el año 2010 a 53,98% en 2018. Aunque el porcentaje de área cubierta por territorios agrícolas ha disminuido entre el 2010 y el 2018, el porcentaje de territorios artificializados (tejido urbano discontinuo) pasó de 0,12% en el 2010 a 2,6% en el 2018. La urbanización, es uno de los principales factores de cambio en la cobertura del suelo y una de las principales presiones sobre la protección del recurso hídrico en la microcuenca.

## 2.2 Monitoreo de precipitación y clima

La precipitación incidente en la microcuenca se monitoreó durante 10 meses (junio de 2017 a abril de 2018) con cinco pluviómetros de 160 mm de capacidad, dos localizados en la vertiente oriental en la parte alta y media de la cuenca, uno en la parte occidental y dos ubicados en la parte alta y baja de la microcuenca. Adicionalmente, se instaló una estación meteorológica *Davis Vantage pro 2*® en la vertiente noroccidental de la microcuenca San Pedro, por fuera de los predios restaurados. Con la estación climática se monitoreó

---

<sup>3</sup> Parcelas de monitoreo donde se presenta invasión de las especies *Cucurbita sp* y *Thunbergia alata*. Se observa que ambas especies ocupan un área considerable de las parcelas y han suprimido varios de los individuos plantados. Las poblaciones de estas especies continúan proliferando sobre otros individuos que se encuentran vivos.

temperatura, precipitación, humedad, radiación solar, velocidad y dirección del viento con registros cada 30 minutos durante 6 meses (Octubre de 2017 a Abril de 2018).

A partir de los datos de precipitación incidente en la cuenca se categorizaron las semanas en promedio, secas y húmedas. Semanas húmedas corresponden a aquellas en las que la precipitación fue igual o mayor a la precipitación promedio durante el tiempo de monitoreo + 1 desviación estándar; semanas secas corresponden a aquellas en las que la precipitación fue igual o menor a la precipitación promedio durante el tiempo de monitoreo - 1 desviación estándar. La categorización de las semanas en promedio, secas y húmedas se usó para comparar las relaciones entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos y en las diferencias interespecíficas en procesos eco-hidrológicos.

## 2.3 Selección de especies y rasgos funcionales de plantas

Las especies plantadas en la microcuenca fueron caracterizadas funcionalmente. Los rasgos seleccionados fueron aquellos que más directamente asociados con el efecto de las plantas sobre procesos eco-hidrológicos (Gerten et al., 2004; de Bello et al., 2010; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). De esta manera, se midieron 14 rasgos funcionales (área foliar, contenido de materia seca foliar, pubescencia, tipo de hoja, textura corteza, cobertura epífitas, densidad de madera, frecuencia vasos xilema, diámetro vasos de xilema, área de copa, densidad de copa, altura de copa, índice de ramificación, *densidad x volumen*) (Ver Anexo B para detalles sobre cada rasgo funcional). Los rasgos funcionales fueron medidos en 19 especies nativas que suman el 90% de abundancia relativa en las plantaciones (**Tabla 2-1**), este criterio se sustenta en la hipótesis “razón biomasa” (Grime, 1998). El cálculo de la abundancia por especie se realizó a partir de información previa obtenida de la última medición de 5 parcelas de monitoreo establecidas en el área de intervención (Febrero de 2017).

**Tabla 2-1:** Número de individuos y abundancia relativa de las especies arbóreas plantadas en la microcuenca San Pedro<sup>4</sup>.

Familia	Especie	Número de individuos	% Abundancia relativa
Meliaceae	<i>Cedrela montana</i>	36	9,30
Verbenaceae	<i>Citharexylum subflavescens</i>	36	9,30
Podocarpaceae	<i>Podocarpus rospigliosii</i>	34	8,79
Primulaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	29	7,49
Betulaceae	<i>Alnus acuminata</i>	28	7,24
Clusiaceae	<i>Clusia sp</i>	28	7,24
Lauraceae	<i>Persea caerulea</i>	28	7,24
Euphorbiaceae	<i>Croton magdalenensis</i>	26	6,72
Salicaceae	<i>Salix humboldtiana</i>	22	5,68
Fagaceae	<i>Quercus humboldtii</i>	21	5,43
Fabaceae	<i>Chamaesenna colombiana</i>	12	3,10
Asteraceae	<i>Montanoa quadrangularis</i>	12	3,10
Fabaceae	<i>Senna alata</i>	9	2,33
Lamiaceae	<i>Aegiphila novogranatensis</i>	7	1,81
Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	7	1,81
Myrtaceae	<i>Myrcia subsessilis</i>	5	1,29
Myrtaceae	<i>Myrcianthes sp</i>	4	1,03
Hypericaceae	<i>Vismia guianensis</i>	4	1,03
Cunoniaceae	<i>Weinmannia pubescens</i>	4	1,03
	<b>TOTAL</b>	<b>352</b>	<b>90,96</b>

<sup>4</sup> Porcentaje de abundancia relativa y número de individuos de especies de plantas usadas en plantaciones en la microcuenca San Pedro con base en los muestreos de parcelas de monitoreo durante el año 2017. Las especies listadas son las de mayores abundancias relativas, que en conjunto suman el 90% de las abundancias relativas en el sitio de estudio.

Los rasgos funcionales se midieron en 5 a 10 individuos por especie dependiendo del grado de dificultad para medir el rasgo (p.e índice de ramificación). El total de individuos se distribuyó en proporción a su abundancia en las 5 parcelas de monitoreo. Los rasgos funcionales se midieron en dos muestreos, el primero entre mayo y junio de 2017 y el segundo entre noviembre y diciembre de 2017. La medición de rasgos funcionales se realizó a partir de protocolos estandarizados (Cornelissen et al., 2003; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). En algunos casos estos protocolos fueron complementados o modificados (Ver Anexo C para protocolos detallados).

De los 14 rasgos funcionales medidos inicialmente, se seleccionaron 6 rasgos para realizar los análisis estadísticos. La selección de los seis rasgos funcionales para los análisis estadísticos se basó en que estos pueden intervenir sobre el flujo de agua en la superficie externa de la planta por las vías de escorrentía cortical y precipitación interna, que son las dos variables hidrológicas monitoreadas en la presente investigación. Estos rasgos son área de la copa, densidad de la copa, índice de ramificación, cobertura de epífitas y área foliar. Adicionalmente se calculó un rasgo funcional antes no reportado, que denominamos *Densidad x volumen*, este rasgo reúne la densidad y volumen de la copa (incluye altura y área de la copa), representando así a la copa como un “contenedor” de lluvia.

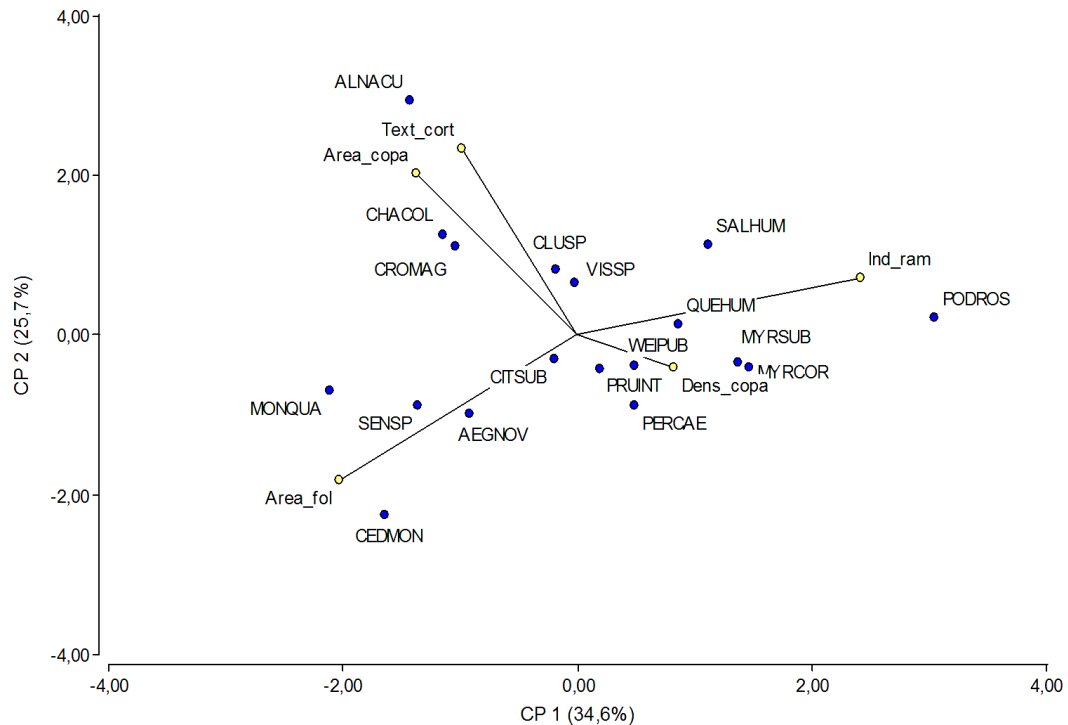
## 2.4 Monitoreo hidrológico

Se realizó el monitoreo hidrológico de las variables escorrentía cortical y precipitación interna en 10 de las 19 especies originales, esto debido a la complejidad de la logística para la instalación y monitoreo semanal de los individuos. El monitoreo se realizó durante 26 semanas entre octubre de 2017 y mayo de 2018.

La selección de las 10 especies se basó en la evaluación de un análisis de componentes principales realizado a partir de la caracterización funcional de las especies más abundantes en los predios restaurados (Figura 2-4). A partir de estos análisis se identificaron las especies que tienen rasgos funcionales contrastantes en relación al posible efecto sobre la regulación hídrica. Las especies seleccionadas se encuentran en un gradiente de Área foliar e índice de ramificación, y área y densidad de la copa, lo que permite tener un espectro amplio de diferentes efectos de las plantas sobre la regulación hídrica (Figura 2-4). Las especies seleccionadas son: *Cedrela montana*, *Citharexylum*

*subflavescens*, *Podocarpus rospigliosii*, *Myrsine coriacea*, *Alnus acuminata*, *Chamaesenna colombiana*, *Persea caerulea*, *Croton magdalenensis*, *Salix humboldtiana* y *Quercus humboldtii*.

**Figura 2-4:** Biplot del análisis de componentes principales de especies y sus rasgos funcionales<sup>5</sup>.



<sup>5</sup> Gráfica de los componentes 1 y 2 obtenidos a partir de un análisis de componentes principales de los rasgos funcionales de plantas Area\_fol: área foliar, Ind\_ram: índice de ramificación, Dens\_copa: densidad de la copa, Area\_copa: área de la copa y Text\_cort: textura de la corteza. Las especies se distribuyen en el espacio de variación de los rasgos funcionales. AEGNOV: *Aegiphila novogranatensis*, ALNACU: *Alnus acuminata*, CEDMON: *Cedrela montana*, CHACOL: *Chamaesenna colombiana*, CITSUB: *Citharexylum subflavescens*, CLUSP: *Clusia sp*, CROMAG: *Croton magdalenensis*, MONQUA: *Montanoa quadrangulares*, MYRCOR: *Myrsine coriacea*, MYRSP: *Myrcianthes sp*, MYRSUB: *Myrcia subsessilis*, PERCAE: *Persea caerulea*, PODROS: *Podocarpus rospigliosii*, PRUINT: *Prunus integrifolia*, QUEHUM: *Quercus humboldtii*, SALHUM: *Salix humboldtiana*, SENSP: *Senna alata*, VISSP: *Vismia guianensis*, WEIPUB: *Weinmannia pubescens*.

Se instrumentaron un total de 50 individuos de 10 especies (5 individuos por especie). La distribución de los 5 individuos por especie se hizo en proporción a la abundancia de la especie por parcela (Anexo D). Se instrumentaron 12 individuos en la parcela 1, 9 individuos en la parcela 2, 10 individuos en la parcela 3, 16 individuos en la parcela 4 y 3 individuos en la parcela 5. Para la selección de los individuos por especie a instrumentar, el criterio inicial fue que tuvieran un DAP mayor a 7 cm, por ser el diámetro mínimo al que puede instalarse el collarín de escorrentía cortical. A partir de esa primera selección, se dio prioridad a los individuos a los que se les habían tomado datos de rasgos funcionales.

La instrumentación de cada individuo incluyó la instalación de collarines para el monitoreo de la escorrentía cortical y de pluviómetros para el monitoreo de la precipitación interna (Figura 2-5). Los collarines de escorrentía cortical consisten en un segmento de manguera que se adhiere al tronco del árbol cubriendo su diámetro en forma de espiral, esta manguera colecta el agua que es interceptada por ramas y follaje y escurre por el tronco. La manguera se conecta a un recipiente que almacena el agua colectada (Figura 2-5). Los pluviómetros son recipientes de plástico cilíndricos de 8 cm de diámetro, sostenidos por un soporte de madera a 1,20 m de altura del suelo. Los pluviómetros se ubicaron debajo de la copa a un tercio del eje N - S de la copa y del eje E - W, ya que semanalmente se rotaron de dirección (Figura 2-5).



**Figura 2-5:** Instalación de collarines y pluviómetros en individuos plantados en la microcuenca San Pedro<sup>6</sup>.



El volumen de agua colectado por collarines y pluviómetros fue medido semanalmente durante 26 semanas. Las medidas volumétricas semanales de flujos de escorrentía cortical (ml) se convirtieron a lámina de agua (mm) dividiendo por el área individual de recepción de precipitación en forma de escorrentía cortical, que para el caso de los árboles instrumentados es el área de la copa por individuo ( $m^2$ ). El área de la copa se calculó a partir de las mediciones en campo de la longitud de los ejes norte – sur y este – oeste de la copa de cada individuo. Las medidas volumétricas semanales de precipitación interna se convirtieron a lámina de agua (mm) dividiendo por el área del recipiente cilíndrico colector de lluvia.

---

<sup>6</sup> Los collarines se instalan para para monitorear la escorrentía cortical y los pluviómetros para monitorear la precipitación interna en individuos plantados en la microcuenca San Pedro y presentes en parcelas de monitoreo. Izquierda: ubicación de collarín y pluviómetro respecto a la copa del individuo, derecha: detalle de instalación collarín y pluviómetro.

## **2.5 Análisis de datos**

Para el análisis de datos se usaron los programas Excel, InfoStat y R.

### **2.5.1 Efecto diferencial de las especies sobre procesos eco-hidrológicos**

Para evaluar la variación de la escorrentía cortical (promedio y coeficiente de variación) y la precipitación interna (promedio y coeficiente de variación) entre las especies, se realizaron análisis de varianza (datos normales) o pruebas de Kruskal-Wallis (datos no normales) por cada una de las tres temporalidades (total semanas, húmedas, secas). Para probar normalidad y homogeneidad de varianza de los datos se usaron las pruebas Shapiro–Wilk y Levene, respectivamente.

### **2.5.2 Relación entre rasgos funcionales de plantas y procesos eco-hidrológicos**

Los rasgos funcionales de plantas fueron estimados a nivel de individuo, en los casos en los que se tomaron varias muestras en un solo árbol, se calculó el valor promedio por individuo (Anexo C).

Se exploraron las posibles relaciones entre rasgos funcionales de las plantas y variables hidrológicas por medio de coeficientes de correlación de Spearman entre cada rasgo funcional y cada variable hidrológica. Esta exploración permitió seleccionar aquellos rasgos que mostraban patrones de correlación más claros entre variables. Debido a que en la evaluación de la regulación hidrológica tanto el valor promedio como la variación temporal de los flujos de agua son importantes, se decidió contrastar valores promedio y coeficientes de variación para las variables escorrentía cortical y precipitación interna con los rasgos funcionales de las especies.

El valor promedio y el coeficiente de variación de la escorrentía cortical y la precipitación interna se evaluaron por separado para el total de semanas, semanas húmedas y semanas secas. Semanas húmedas corresponden a aquellas en las que la precipitación fue igual o

mayor a la precipitación promedio durante el tiempo de monitoreo + 1 desviación estándar; semanas secas corresponden a aquellas en las que la precipitación fue igual o menor a la precipitación promedio durante el tiempo de monitoreo - 1 desviación estándar. La precipitación incidente en la microcuenca fue recopilada con una frecuencia diaria, sin embargo, para la determinación de semanas húmedas y secas se acumuló por semana.

Para evaluar estadísticamente la relación entre los rasgos funcionales de plantas y las variables hidrológicas evaluadas, se realizaron análisis de regresión lineal y no lineal entre los rasgos funcionales de plantas (variable independiente) y el valor promedio y coeficiente de variación de variables hidrológicas (escorrentía cortical y precipitación interna) por individuo (variable dependiente), para el total de semanas, las semanas húmedas y las semanas secas. Para evaluar cada relación se ajustó la función que mejor describiera el comportamiento de los datos. Se aplicaron tres tipos de análisis de regresión: lineal ( $y = a + b \cdot x$ ), lineal con transformación logarítmica ( $\log(y) = \log(x) + a$ ) y potencial ( $y = a + b \cdot \log(x)$ ), donde  $y$  = valor promedio y coeficiente de variación de la escorrentía cortical o de la precipitación interna,  $b$ : pendiente,  $a$ : intercepto y  $x$ : rasgos funcionales (área de la copa, densidad de la copa, índice de ramificación, cobertura de epífitas y área foliar). Para cada análisis se determinó el valor  $p$  (significancia estadística con un nivel de confianza del 95 %) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

### **2.5.3 Grupos de especies con efectos similares sobre procesos eco-hidrológicos**

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con datos estandarizados para examinar la distribución de las especies dentro del espacio de variación de los rasgos funcionales (área de copa, densidad de copa, altura de copa e índice de ramificación) y los coeficientes de variación de escorrentía cortical y precipitación interna. Se eligieron estos rasgos porque resultaron tener relaciones significativas con las variables hidrológicas evaluadas y son los que describen la copa de los árboles como “contenedor” de precipitación. Además, se seleccionó el coeficiente de variación porque este da cuenta de la variabilidad de la escorrentía cortical y la precipitación interna durante todo el tiempo de monitoreo, esta variabilidad es un indicador del efecto “regulador” de los árboles sobre procesos eco-hidrológicos.

Mediante la técnica de análisis de clúster, con el método de agrupamiento de Ward y la distancia Euclídea se definieron grupos de especies que comparten valores de rasgos funcionales (área de copa, densidad de copa, altura de copa e índice de ramificación) y valores de coeficiente de variación de escorrentía cortical y precipitación interna. Se realizó un análisis de la varianza multivariado (MANOVA) para verificar la diferencia estadística entre dichos grupos (prueba de Hotelling, nivel de significancia de 0.05). Estos análisis se realizaron en el programa estadístico InfoStat.

#### **2.5.4 Función eco-hidrológica a escala de comunidad vegetal**

Para explorar la función eco-hidrológica a escala de comunidad vegetal se calcularon a partir de la abundancia relativa de las especies en cada parcela de monitoreo (2017) y valores promedio de rasgos funcionales, medias ponderadas por la comunidad (MPC) para cada parcela, siguiendo la fórmula  $MPC = \sum W_i X_i$ , donde  $W_i$  es la abundancia relativa de cada especie y  $X_i$  es el valor del rasgos de cada especie (CATIE, 2011). La escorrentía cortical y la precipitación interna se trataron como rasgos funcionales en este caso. El producto  $W_i X_i$  se calculó para cada una de las 10 especies con monitoreo hidrológico y también para las 19 especies que se caracterizaron funcionalmente al inicio de la investigación. Las MPC de variables hidrológicas por parcela se relacionaron con las MPC de rasgos funcionales por parcela y se realizaron análisis de regresión para corroborar dichas relaciones.

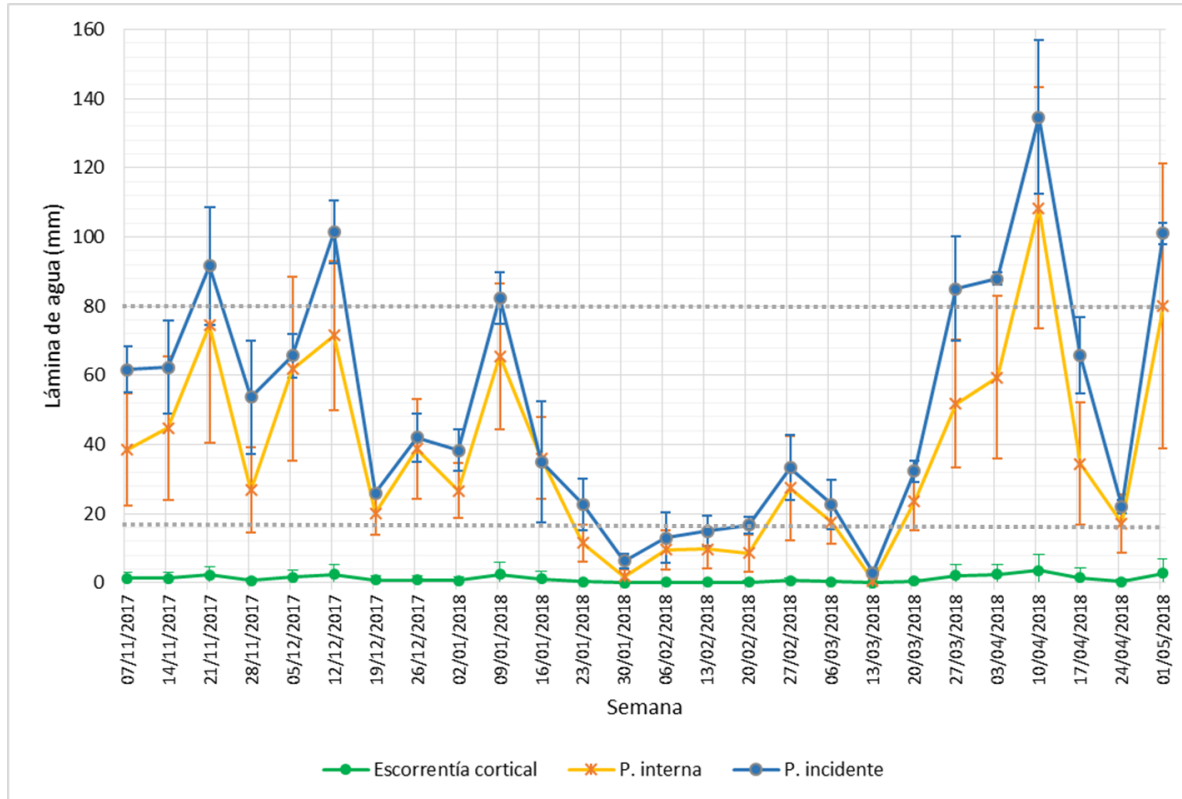
## **3.Resultados**

### **3.1 Dinámica del clima y la precipitación en la microcuenca**

En la Figura 3-1 se observa la dinámica de la precipitación incidente, la escorrentía cortical y la precipitación interna en las parcelas, durante las 26 semanas de monitoreo. La precipitación en la microcuenca disminuyó significativamente entre los meses de Enero y Marzo, lo que corresponde a una de las épocas secas del régimen bimodal propio de la zona (Universidad Nacional de Colombia, 2017). Se observa que parte de la precipitación incidente se particiona en tres vías: la precipitación interna, la escorrentía cortical y lo restante es interceptado por el dosel. La precipitación interna es un flujo mayor (entre el 22,8 y 94,2 % de la precipitación incidente) y por lo tanto de más importancia en términos hidrológicos, mientras que la escorrentía cortical es baja respecto al total de precipitación incidente (entre el 0,14 % y el 3,45 % de la precipitación incidente).

Durante el periodo de estudio la precipitación incidente semanal promedio fue de 49,8 mm, fluctuando desde un valor mínimo de 3 mm/semana a un máximo de 134,67 mm/semana. La precipitación interna semanal promedio fue de 37,17 mm fluctuando desde un valor mínimo de 0,68 mm a un valor máximo de 108,35 mm. La escorrentía cortical semanal promedio fue de 1,15 mm, fluctuando desde un valor mínimo de 0.0 mm/semana a un valor máximo semanal de 3,51 mm. Durante el tiempo de monitoreo se identificaron 7 semanas húmedas (distribuidas en noviembre, diciembre, enero, marzo y abril), 5 semanas secas (distribuidas en enero, febrero y marzo) y 14 semanas promedio distribuidas a lo largo de los meses de monitoreo (octubre de 2017 a Mayo de 2018) (Figura 3-1).

**Figura 3-1:** Series de tiempo de la precipitación incidente, la escorrentía cortical y la precipitación interna durante las semanas de monitoreo en la microcuenca San Pedro<sup>7</sup>.



### 3.2 Características de las especies estudiadas.

Las especies estudiadas presentan diferentes características en relación a la forma y estructura de la copa, área foliar, tipo de hoja, altura, densidad de follaje, índice de

<sup>7</sup> Precipitación incidente, escorrentía cortical y precipitación interna en la microcuenca San Pedro monitoreadas durante 26 semanas desde el mes de Octubre de 2017 al mes de Mayo de 2018. La precipitación incidente es el promedio semanal de la precipitación registrada en los cinco pluviómetros instalados en la microcuenca, por fuera de las parcelas. La escorrentía cortical y la precipitación interna corresponden a valores semanales promedio de los 50 individuos monitoreados. Las líneas punteadas denotan los límites de precipitación a partir de los cuales se consideran semanas húmedas (línea superior) y semanas secas (línea inferior). Las semanas húmedas fueron aquellas en las que la precipitación fue igual o mayor a la precipitación promedio durante el tiempo de monitoreo más una vez la desviación estándar, las semanas secas fueron aquellas en las que la precipitación fue igual o menor a la precipitación promedio durante el tiempo de monitoreo menos una vez la desviación estándar. Las fechas en el eje x corresponden a los días en los que se realizaron las mediciones en la respectiva semana.

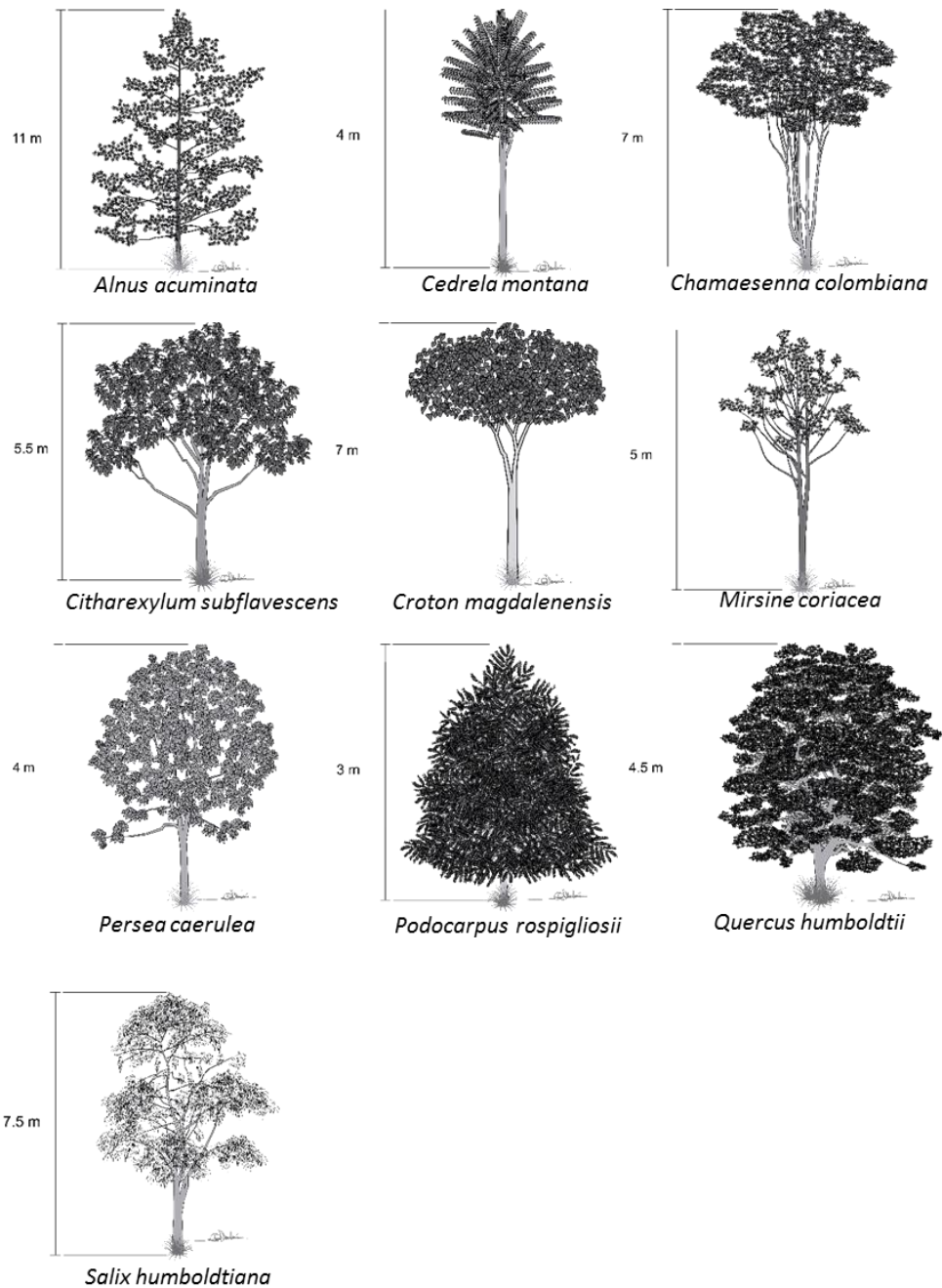
ramificación, entre otras. En la Tabla 3-1 se presentan los valores promedio de área foliar, área de copa, densidad de copa, índice de ramificación y tipo de hoja por especie. En la Figura 3-2 se observa una descripción gráfica de cada especie.

**Tabla 3-1:** Caracterización de las especies objeto de estudio a partir de sus rasgos funcionales<sup>8</sup>.

Especie	Tipo de hoja	Area_foliar (cm2)	Area_copa (m2)	Dens_copa (%)	Ind_ram (Num ramif/m)
<i>Alnus acuminata</i>	Simple	286,21	52,12	33,94	9,31
<i>Cedrela montana</i>	Compuesta	5540,21	9,90	77,91	10,21
<i>Chamaesenna colombiana</i>	Compuesta	1803,92	15,34	72,54	4,23
<i>Citharexylum subflavescens</i>	Simple	1532,50	18,65	68,28	3,67
<i>Croton magdalenensis</i>	Simple	1657,70	35,64	72,04	4,15
<i>Myrsine coriacea</i>	Simple	187,81	8,10	45,21	11,13
<i>Persea caerulea</i>	Simple	1214,05	4,78	63,76	3,62
<i>Podocarpus rospigliosii</i>	Simple	7,04	8,31	73,73	24,11
<i>Quercus humboldtii</i>	Simple	489,47	8,39	77,35	13,41
<i>Salix humboldtiana</i>	Simple	22,03	19,07	38,78	18,34

<sup>8</sup> En la tabla se presentan los valores promedio de rasgos funcionales que describen las copas de cada especie. A partir de la tabla se observa que las especies son diferentes respecto al tipo de hoja, área foliar, área de copa, densidad de copa y ramificación que presentan. Los rasgos funcionales presentados en la tabla se tomaron siguiendo los protocolos presentados en el Anexo C. Dens\_copa: densidad de la copa, Ind\_ram: índice de ramificación (número de ramificaciones por metro de longitud de la rama).

**Figura 3-2:** Caracterización de las especies de plantas objeto de estudio<sup>9</sup>.



---

<sup>9</sup> Las ilustraciones muestran las diferencias que presentan las especies objeto de estudio respecto a la forma y estructura de la copa, altura, área foliar, etc. Las ilustraciones se basan en fotografías actuales de los individuos, algunas especies pueden encontrarse en estado juvenil pues su edad es de 8 años. Las plantaciones iniciaron en el año 2010. Dens\_copa: densidad de la copa, Ind\_ram: índice de ramificación (número de ramificaciones por metro de longitud de la rama).



### 3.3 Efecto diferencial de las especies sobre procesos eco-hidrológicos

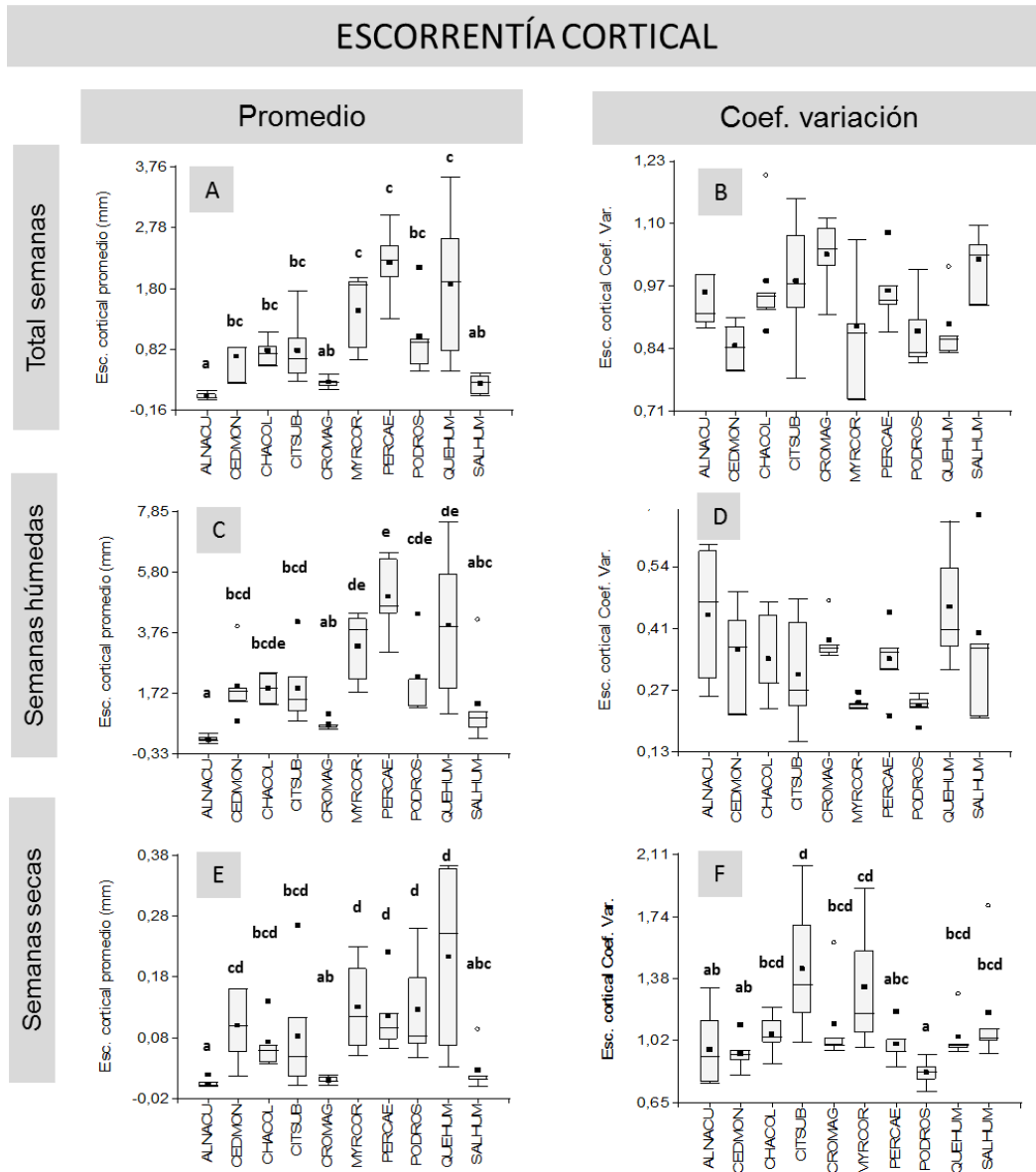
#### 3.3.1 Escorrentía cortical

Al evaluar las diferencias que presentan las especies respecto al valor promedio y coeficiente de variación de escorrentía cortical, se observa que las especies siguen un gradiente dentro del rango de los datos. Sin embargo, no todas las especies se diferenciaron entre ellas. Esta tendencia se observó tanto para las semanas totales como para las semanas secas y húmedas (Figura 3-3).

Al analizar el total de semanas monitoreadas, las especies estudiadas producen diferentes valores de escorrentía cortical promedio, siendo *Alnus acuminata*, la especie de menor escorrentía cortical promedio y *Myrsine coriacea*, *Quercus humboldtii* y *Persea caerulea* las de mayor (Figura 3-3 (A)). En semanas de máxima precipitación, la especie *Alnus acuminata* presentó la menor escorrentía promedio y la especie *Persea caerulea* presentó la mayor escorrentía promedio (Figura 3-3 (C)). En semanas de mínima precipitación, también se encuentra que las especies producen un rango de valores de escorrentía cortical promedio. *Alnus acuminata*, muestra los menores valores de escorrentía cortical promedio y las especies *Podocarpus rospigliosii*, *Persea caerulea*, *Myrsine coriacea* y *Quercus humboldtii* produjo la mayor cantidad de escorrentía cortical (Figura 3-3 (E)). Algunas especies producen valores promedio intermedios de escorrentía cortical (Figura 3-3 (A, C y E)).

El coeficiente de variación de la escorrentía cortical durante las semanas de mínima precipitación fue diferente entre algunas especies, *Podocarpus rospigliosii* es la especie que en la que se observó menor variabilidad y *Citharexylum subflavescens* la de mayor variabilidad (Figura 3-3 (F)). Algunas especies son intermedias respecto a la variabilidad temporal de escorrentía cortical que presentan (Figura 3-3 (F)).

**Figura 3-3:** Diferencias entre especies respecto a promedio y coeficiente de variación de la escorrentía cortical<sup>10</sup>.



<sup>10</sup> Diferencias en la escorrentía cortical promedio y coeficiente de variación de la escorrentía cortical entre las especies estudiadas, durante el total de semanas monitoreadas, las semanas húmedas y las semanas secas. Algunas especies presentan comportamiento similar en el total de semanas, las semanas húmedas y las semanas secas respecto a su efecto sobre la escorrentía cortical. A: Kruskal- Wallis, H:37,42 y  $p < 0,0001$ ; C: Kruskal- Wallis, H:35,92 y  $p < 0,0001$ ; E: Kruskal- Wallis, H:30,38 y  $p = 0,0004$ ; F:Kruskal- Wallis, H:24,31 y  $p = 0,0038$ . Las letras minúsculas que no son comunes denotan especies o grupos de especies significativamente diferentes.

En la Figura 3-3 se observa que hay especies que presentan menor variabilidad intraespecífica respecto a su efecto sobre la cantidad promedio de escorrentía cortical que conducen, tal es el caso de *Alnus acuminata*, *Croton magdalenensis* y *Salix humboldtiana*. Sin embargo otras como *Quercus humboldtii* muestra mayor variabilidad intraespecífica presenta respecto al valor promedio de escorrentía cortical que conduce.

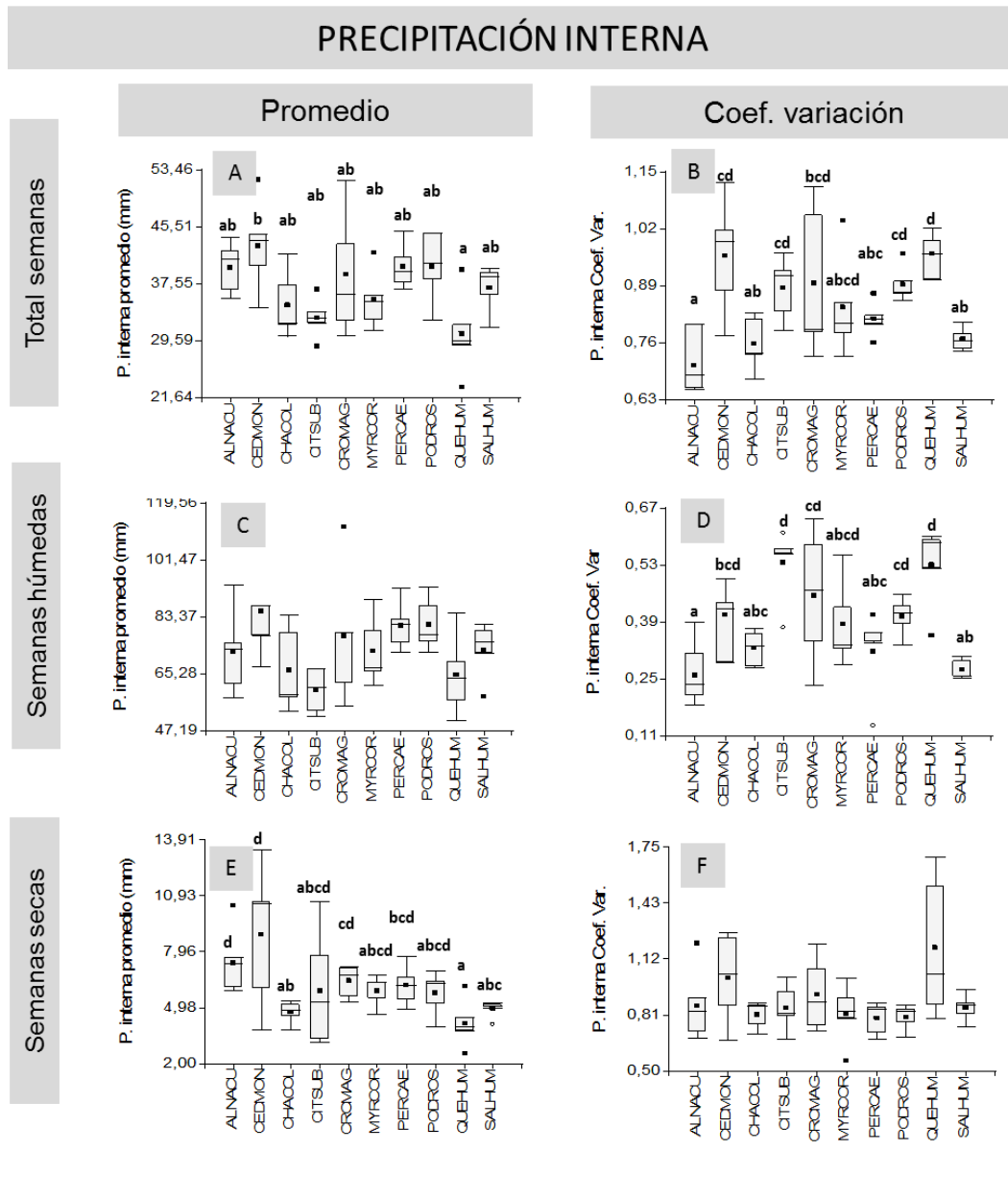
### 3.3.2 Precipitación interna

Similar a la escorrentía cortical sí hubo diferencias significativas en la precipitación interna entre especies (Figura 3-4). Sin embargo, solo unas se diferencian entre sí y presentan un gradiente de valores de precipitación interna promedio y variabilidad temporal durante el total de semanas, las semanas secas, y las semanas húmedas, solo algunas de las especies se diferenciaron significativamente de las demás. También se encontró un comportamiento diferente de algunas especies respecto a la precipitación interna que producen entre semanas secas y húmedas (Figura 3-4).

Durante el total de semanas, *Quercus humboldtii* es la especie que menor precipitación interna promedio presentó y *Cedrela montana* la de mayor. Las demás especies presentan valores intermedios de precipitación interna promedio (Figura 3-4 (A)). Durante las semanas húmedas no se presentaron diferencias significativas entre especies (Figura 3-4 (A)). Durante las semanas de menor precipitación, la menor precipitación interna promedio la presentó *Quercus humboldtii* y las de mayor *Alnus acuminata* y *Cedrela montana* (Figura 3-4 (E)). Las demás especies presentan valores intermedios de precipitación interna promedio (Figura 3-4).

Respecto a la variabilidad temporal de la precipitación interna, *Alnus acuminata* es la especie de menor coeficiente de variación y *Quercus humboldtii* la de mayor coeficiente de variación en el total de semanas monitoreadas (Figura 3-4 (B)). Durante las semanas de máxima precipitación, la mayor variabilidad de la precipitación interna la produjeron *Citharexylum subflavescens* y *Quercus humboldtii*, y la menor *Alnus acuminata* (Figura 3-4 (D)). Durante las semanas secas, no se presentaron diferencias significativas entre las especies. Algunas especies presentan efectos intermedios sobre el coeficiente de variación de la precipitación interna (Figura 3-4).

**Figura 3-4:** Diferencias entre especies respecto al promedio y coeficiente de variación de la precipitación interna<sup>11</sup>.



<sup>11</sup> Diferencias en el valor promedio y coeficiente de variación de la precipitación interna entre las especies estudiadas, durante el total de semanas monitoreadas, las semanas húmedas y las semanas secas. Algunas especies presentan comportamiento similar en el total de semanas, las semanas húmedas y las semanas secas respecto a su efecto sobre la precipitación interna. A: ANOVA, F: 3,09 y p = 0,006; B: Kruskal- Wallis, H: 29,14 y p = 0,0006; D: Kruskal- Wallis, H: 30,16 y p = 0,0004; E:Kruskal- Wallis, H: 20,57 y p = 0,0147. Las letras minúsculas que no son comunes denotan especies o grupos de especies significativamente diferentes.

También se encontró un comportamiento diferente de algunas especies respecto al valor de precipitación interna que presentan entre semanas secas y húmedas. *Persea caerulea* presenta el mayor valor promedio de precipitación interna solo durante las semanas húmedas (Figura 3-4 (C)). En semanas secas y totales *Cedrela montana* es la que mayor valor promedio presenta (Figura 3-4 (E)). *Croton magdalenensis* presenta el menor coeficiente de variación de la precipitación interna pero solo en semanas secas (Figura 3-4 (F)). *Citharexylum subflavescens* presenta coeficientes de variación altos en el total de semanas y semanas húmedas (Figura 3-4 (B y D)), mas no durante semanas secas.

### 3.4 Relación entre rasgos funcionales y variables hidrológicas

Existen relaciones significativas entre los procesos eco-hidrológicos y los rasgos funcionales de plantas evaluados en esta investigación, considerando el total de semanas monitoreadas, las semanas secas y las semanas húmedas (Tabla 3-2).

En general los rasgos de la copa como el área, densidad y *densidad x volumen* tienen un efecto sobre el comportamiento de la escorrentía promedio tanto en el total de semanas monitoreadas como en los máximos y mínimos de precipitación (semanas húmedas y secas). En particular el área y la *densidad x volumen* presentan relaciones con la escorrentía cortical promedio de tipo potencial negativo. Es decir, hay unos valores umbral de área de la copa y la *densidad x volumen*, a partir de los cuales las especies conducen una menor cantidad de agua a través de escorrentía cortical. El índice de ramificación y la cobertura de epífitas influyen sobre la variabilidad temporal de la escorrentía cortical. Estos resultados sugieren un efecto amortiguador o de regulación del flujo de la escorrentía cortical y por lo tanto del ingreso del agua al suelo. Otras relaciones entre rasgos y variables hidrológicas cambian entre estaciones y respecto al total de semanas monitoreadas, por ejemplo la cobertura de epífitas es significativa para determinar el coeficiente de variación de la escorrentía cortical durante las semanas secas y en semanas húmedas ninguno de los rasgos evaluados se relaciona con el coeficiente de variación de la escorrentía cortical.

Asimismo, los rasgos área de la copa, densidad de la copa, área foliar, índice de ramificación y *densidad x volumen* se relacionan con la variabilidad temporal de la precipitación interna. Estos rasgos son claves para la regulación temporal y de la cantidad de agua que ingresa al suelo vía precipitación interna. Durante las semanas húmedas cambian estas relaciones, siendo más importante el efecto de la densidad de la copa y del área foliar sobre el coeficiente de variación de la precipitación interna. En semanas secas el rasgo que se relaciona con la variabilidad temporal de la precipitación interna es el índice de ramificación.

A continuación se detallan las relaciones entre rasgos funcionales y variables hidrológicas según el tipo de semana: total, húmedas y secas.

### **3.4.1 Total semanas monitoreadas**

#### **Relación con la escorrentía cortical**

El área de la copa, la densidad de la copa, el índice de ramificación, la cobertura de epífitas y la *densidad x volumen* tienen un efecto significativo sobre el valor promedio y el coeficiente de variación de la escorrentía cortical (Tabla 3-2).

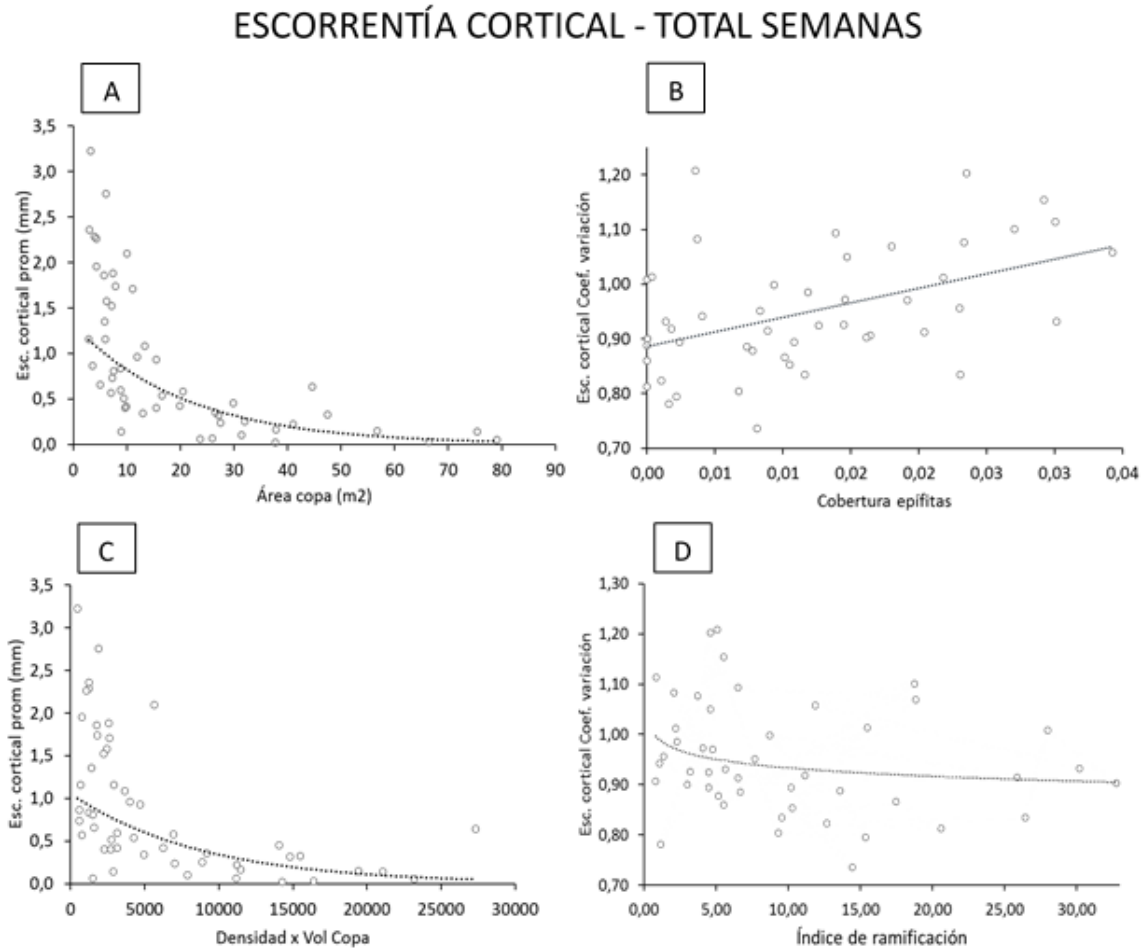
**Tabla 3-2:** Parámetros de análisis de regresión entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante el total de semanas de monitoreo.<sup>12</sup>.

TOTAL SEMANAS								
Escorrentía cortical								
Rasgos	Promedio				Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p
AC	<b>2.7533</b>	<b>-0.6953</b>	<b>0.533</b>	<b>1.2e-09<sup>c</sup></b>	1.0608	-0.025	0.01	0.405 <sup>b</sup>
DC	<b>-5.6416</b>	<b>1.2555</b>	<b>0.189</b>	<b>0.0014<sup>b</sup></b>	1.0220	-0.0010	0.023	0.2962 <sup>b</sup>
IR	1.0051	-0.0028	0.001	0.850 <sup>a</sup>	<b>1.0243</b>	<b>-0.0354</b>	<b>0.077</b>	<b>0.056<sup>c</sup></b>
CE	1.1402	-14.0768	0.023	0.285 <sup>a</sup>	<b>0.7909</b>	<b>5.62426</b>	<b>0.21</b>	<b>0.0006<sup>a</sup></b>
AF	-2.6e-05	1.010	0.002	0.728 <sup>c</sup>	9.7e-01	-1.0e-05	0.016	0.3908 <sup>a</sup>
DxV	<b>4.8246</b>	<b>-0.4707</b>	<b>0.358</b>	<b>3.6e-06<sup>c</sup></b>	1.1542	-0.0194	0.011	0.3255 <sup>a</sup>
Precipitación interna								
Rasgos	Promedio				Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p
AC	36.2752	0.0466	0.022	0.2788 <sup>a</sup>	<b>0.88502</b>	<b>-0.00302</b>	<b>0.282</b>	<b>8.5e-05<sup>a</sup></b>
DC	39.0392	-0.0301	0.008	0.518 <sup>a</sup>	<b>0.66611</b>	<b>0.00263</b>	<b>0.190</b>	<b>0.00171<sup>a</sup></b>
IR	36.30042	0.08651	0.015	0.3817 <sup>a</sup>	0.80174	0.00254	0.038	0.1789 <sup>a</sup>
AF	3.625e+01	7.42e-04	0.042	0.1373 <sup>a</sup>	<b>8.02e-01</b>	<b>2.11e-05</b>	<b>0.103</b>	<b>0.02442<sup>a</sup></b>
DxV	3.680e+01	6.158e-05	0.005	0.6203 <sup>a</sup>	<b>8.71e-01</b>	<b>-7.15e-06</b>	<b>0.195</b>	<b>0.00147<sup>a</sup></b>

El área de la copa explica un 53 % del comportamiento del valor promedio de la escorrentía cortical (Tabla 3-2), presentando una relación negativa de tipo potencial (Figura 3-5 (A)). Es decir, la escorrentía cortical disminuye rápidamente con un aumento leve del área de la copa. Por tanto, áreas de copa entre 10 y 20 m<sup>2</sup> pueden presentar valores de escorrentía cortical bajos, intermedios y altos, incluso los mayores valores, pero a partir de un umbral de área de copa (de 20 m<sup>2</sup> en adelante), la escorrentía cortical es muy baja. La densidad de copa explica un 19 % del valor promedio de la escorrentía cortical y presenta una relación positiva (Tabla 3-2).

<sup>12</sup> Coeficientes de regresión (intercepto y pendiente), R<sup>2</sup> y valor p a partir de análisis de regresión entre rasgos funcionales de plantas y el valor promedio y coeficiente de variación de escorrentía cortical y precipitación interna durante el total de semanas monitoreadas. Los análisis de regresión se realizaron para comprobar si los rasgos funcionales de las plantas pueden tener efectos sobre procesos eco-hidrológicos. AC: área copa, DC: densidad copa, IR: índice ramificación, CE: cobertura epífitas, AF: área foliar, DxV: Densidad x volumen copa. Color rojo: p < 0,05; color verde: 0,05 < p < 0,1. Las letras indican el tipo de análisis de regresión: a: regresión lineal, b: regresión lineal con transformación logarítmica y c: regresión potencial.

**Figura 3-5:** Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y escorrentía cortical durante el total de semanas de monitoreo<sup>13</sup>.



La *densidad x volumen* de la copa también mostró relaciones de tipo potencial negativa con la escorrentía promedio. Según el  $R^2$ , la *densidad x volumen* explica el 36 % de la

<sup>13</sup> Gráfica de dispersión y línea de ajuste a partir de análisis de regresión potencial y lineal entre la escorrentía cortical promedio y coeficiente de variación durante el total de semanas monitoreadas y rasgos funcionales. Se presentan las gráficas de algunas relaciones que fueron estadísticamente significativas. A: relación potencial negativa entre escorrentía cortical promedio (mm) y área de copa (m<sup>2</sup>), B: relación lineal positiva entre coeficiente de variación de la escorrentía cortical y la cobertura de epífitas, C: relación potencial negativa entre escorrentía cortical promedio (mm) y densidad x volumen, D: relación potencial negativa entre coeficiente de variación de la escorrentía cortical y el índice de ramificación.



escorrentía promedio. Los resultados sugieren que a mayor *densidad x volumen*, los árboles conducen menor cantidad promedio de escorrentía cortical. Además, copas de menor *densidad x volumen*, podrán presentar mayores valores promedio de escorrentía (Figura 3-5 (C)).

La cobertura de epífitas explica un 21 % de la variabilidad temporal de la escorrentía cortical, y la relación es de tipo lineal positiva, a mayor cobertura de epífitas, mayor variabilidad de la escorrentía cortical (Figura 3-5 (B)). El índice de ramificación presenta una relación potencial negativa con la variabilidad temporal de la escorrentía cortical (coeficiente de variación), a mayor índice de ramificación, menores valores de coeficientes de variación e índices de ramificación mayores pueden explicar coeficientes de variación mayores (Figura 3-5 (D)).

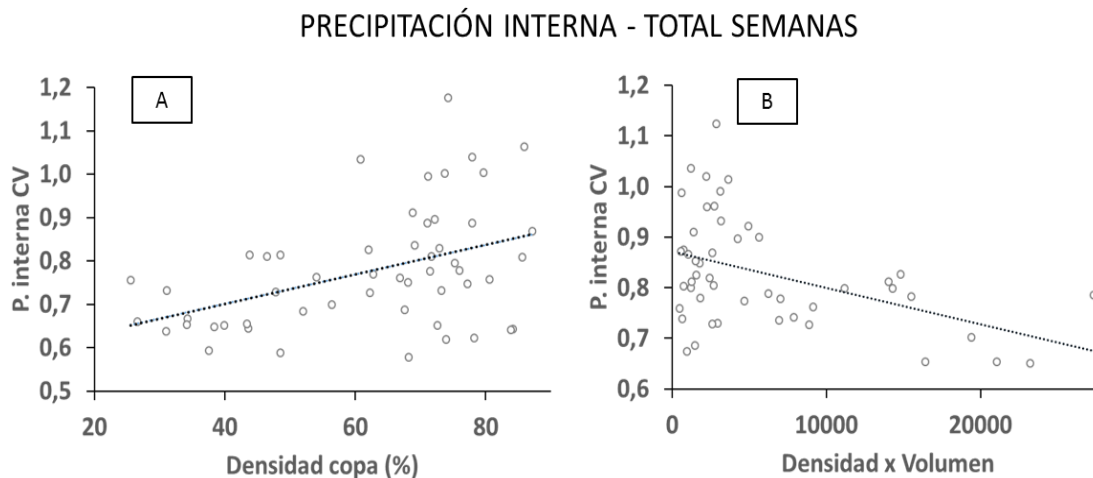
En síntesis, durante el total de semanas monitoreadas, la escorrentía cortical promedio se relaciona positivamente con la densidad de la copa y negativamente con área de la copa y *densidad x volumen*. El índice de ramificación, la cobertura de epífitas y el área foliar no tienen efectos sobre la escorrentía cortical promedio. La variabilidad temporal de la escorrentía cortical se relaciona positivamente con la cobertura de epífitas y negativamente con el índice de ramificación. El área de la copa, la densidad de la copa, el área foliar y la *densidad x volumen* no tienen efectos sobre la variabilidad temporal de la escorrentía cortical.

### **Relación con la precipitación interna**

Por otro lado, el área de la copa, la densidad de la copa, el área foliar y la *densidad x volumen* tienen un efecto significativo sobre la variabilidad temporal (coeficiente de variación) de la precipitación interna, aunque no sobre su valor promedio (Tabla 3-2). La densidad de la copa se relaciona de manera lineal y positiva con la variabilidad temporal (coeficiente de variación) de la precipitación interna (**Figura 3-6 (A)**) Es decir, entre más densa sea una copa, mayor variabilidad temporal producirá en el flujo de precipitación interna. La relación entre el área foliar y el coeficiente de variación de la precipitación interna también es de tipo lineal y positiva (Tabla 3-2). La *densidad x volumen* explica el 19 % de la variabilidad temporal de la precipitación interna y la relación es de tipo lineal negativa (Tabla 3-2), a mayor *densidad x volumen*, menor variabilidad temporal de la

precipitación interna (**Figura 3-6 (B)**). El área de la copa se relaciona también de manera lineal y negativa con el coeficiente de variación de la precipitación interna.

**Figura 3-6:** Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y precipitación interna durante el total de semanas de monitoreo<sup>14</sup>.



En síntesis, durante el total de semanas monitoreadas, la precipitación interna promedio no se relaciona con ninguno de los rasgos funcionales evaluados. En contraste, la variabilidad temporal de la precipitación interna se relaciona positivamente con la densidad de copa y el área foliar y negativamente con área de la copa y la *densidad x volumen*. El índice de ramificación no tiene efecto sobre la variabilidad temporal de la precipitación interna.

---

<sup>14</sup> Gráfica de dispersión y línea de ajuste a partir de análisis de regresión lineal entre el coeficiente de variación de la precipitación interna (P. interna CV) durante el total de semanas monitoreadas y rasgos funcionales. Se presentan las gráficas de algunas relaciones que fueron estadísticamente significativas. A: Relación lineal positiva entre el coeficiente de variación de la precipitación interna y la densidad de copa (%) y B: relación lineal negativa entre el coeficiente de variación de la precipitación interna y la densidad x Vol copa

### 3.4.2 Semanas húmedas

#### Relación con la escorrentía cortical

Considerando solo las semanas húmedas, se encontró que el área de la copa, la densidad de la copa y la *densidad x volumen* tienen un efecto sobre el valor promedio de la escorrentía cortical (Tabla 3-3).

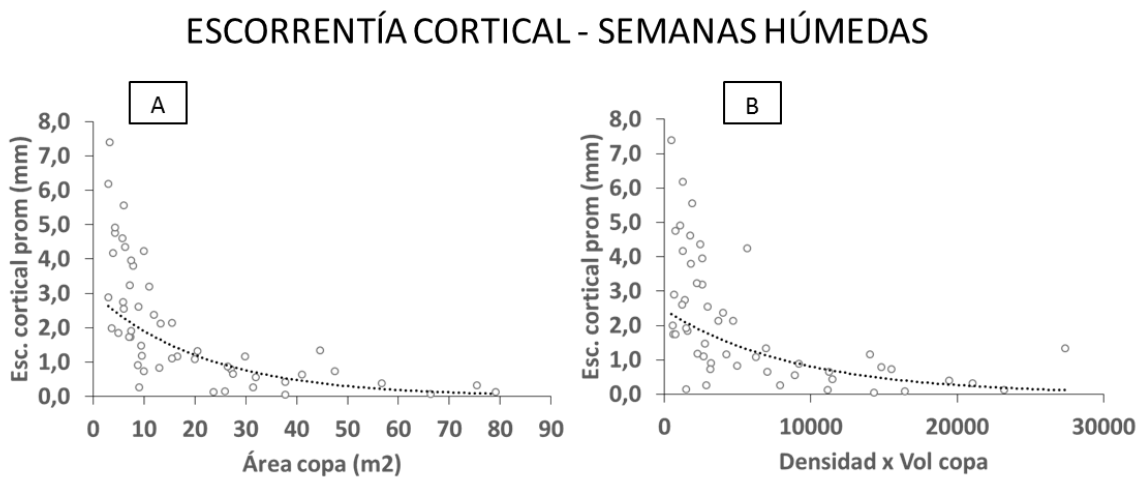
**Tabla 3-3:** Parámetros de análisis de regresión entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante semanas húmedas<sup>15</sup>.

SEMANAS HÚMEDAS								
Escorrentía cortical								
Rasgos	Promedio				Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto o	Pendiente	R2	Valor p
AC	<b>6.2531</b>	<b>-1.5880</b>	<b>0.584</b>	<b>6.8e-11<sup>c</sup></b>	0.375928	0.0001876	0.0004	0.884 <sup>a</sup>
DC	<b>-4.7237</b>	<b>1.2312</b>	<b>0.1808</b>	<b>0.0018<sup>b</sup></b>	0.467197	-0.001422	0.0245	0.2724 <sup>a</sup>
IR	2.3341	-0.0720	0.0013	0.797 <sup>c</sup>	0.396022	-0.001643	0.0063	0.5788 <sup>a</sup>
CE	2.4974	-25.980	0.0033	0.3677 <sup>a</sup>	0.39569	-1.38799	0.0057	0.5955 <sup>a</sup>
AF	2.2999	-0.00008	0.0052	0.6142 <sup>a</sup>	3.666e-01	1.035e-05	0.0099	0.4868 <sup>a</sup>
DxV	<b>11.023</b>	<b>-1.0798</b>	<b>0.3952</b>	<b>7.8e-07<sup>c</sup></b>	3.870e-01	-1.19e-06	0.0021	0.7451 <sup>a</sup>
Precipitación interna								
Rasgos	Promedio				Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto o	Pendiente	R2	Valor p
AC	73.58796	-0.02869	0.018	0.7826 <sup>a</sup>	4.36e-01	-4.98e-06	0.035	0.1768 <sup>a</sup>
DC	74.14328	-0.01786	0.001	0.8733 <sup>a</sup>	<b>0.185032</b>	<b>0.003613</b>	<b>0.153</b>	<b>0.00736<sup>a</sup></b>
IR	69.8061	0.3203	0.036	0.1751 <sup>a</sup>	0.414567	-0.000545	0.001	0.8544 <sup>a</sup>
AF	71.17061	0.001508	0.030	0.2101 <sup>a</sup>	<b>3.684e-01</b>	<b>3.290e-05</b>	<b>0.093</b>	<b>0.0257<sup>a</sup></b>
DxV	91.061	-2.208	0.030	0.2140 <sup>c</sup>	4.396e-01	-4.986e-06	0.035	0.1768 <sup>a</sup>

<sup>15</sup> Coeficientes de regresión (intercepto y pendiente), R<sup>2</sup> y valor p a partir de análisis de regresión entre rasgos funcionales de plantas y el valor promedio y coeficiente de variación de escorrentía cortical y precipitación interna durante las semanas húmedas. Los análisis de regresión se realizaron para comprobar si los rasgos funcionales de las plantas pueden tener efectos sobre procesos eco-hidrológicos. AC: área copa, DC: densidad copa, IR: índice ramificación, CE: cobertura epífitas, AF: área foliar, DxV: Densidad x volumen copa. Color rojo: p < 0,05; color verde: 0,05 < p < 0,1. Las letras indican el tipo de análisis de regresión: a: regresión lineal, b: regresión lineal con transformación logarítmica y c: regresión potencial.

El tipo de relación entre el área de la copa y la *densidad x volumen* y la escorrentía cortical durante las semanas húmedas es de tipo potencial negativa y estos dos rasgos explican el 58 % y 39 % del comportamiento del valor promedio de escorrentía cortical. De esta manera, la escorrentía cortical promedio que puede conducir un árbol durante semanas de precipitación máxima puede disminuir significativamente a partir de ciertos valores de área de la copa y de *densidad x volumen*. Áreas de copa más pequeñas y con *densidad x volumen* bajo, tienen la capacidad de conducir diversas cantidades promedio de escorrentía cortical, incluso los mayores valores registrados (Figura 3-7 (A) y Figura 3-7 (B)). Similar a lo observado durante el total de semanas monitoreadas, entre mayor área y volumen tenga una copa, menor cantidad de agua podrá conducir a través de escorrentía cortical.

**Figura 3-7:** Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y escorrentía cortical durante las semanas húmedas<sup>16</sup>.



En síntesis, durante las semanas húmedas, la escorrentía cortical promedio se relaciona positivamente con la densidad de la copa y negativamente con área de la copa y *densidad x volumen*. El índice de ramificación, la cobertura de epífitas y el área foliar no tienen

---

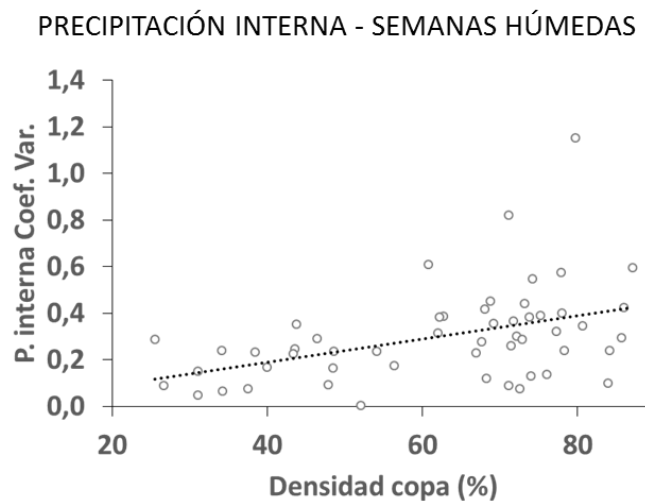
<sup>16</sup> Gráfica de dispersión y línea de ajuste a partir de análisis de regresión lineal entre la escorrentía cortical promedio durante las semanas húmedas y rasgos funcionales. Se presentan las gráficas de algunas relaciones que fueron estadísticamente significativas. A: Relación potencial negativa entre la escorrentía cortical promedio y el área de la copa (m<sup>2</sup>) y B: relación potencial negativa entre la escorrentía cortical promedio y la densidad x volumen de la copa.

efectos sobre la escorrentía cortical promedio. La variabilidad temporal de la escorrentía cortical no se relaciona con alguno de los rasgos funcionales evaluados.

### **Relación con la precipitación interna**

Respecto a la precipitación interna, la densidad de la copa y el área foliar explican la variabilidad temporal de este proceso eco-hidrológico (Tabla 3-3). Durante las semanas en las que se presentaron máximos de precipitación, la densidad de la copa se relacionó con la variabilidad temporal en la cantidad de precipitación interna. Como se observa en la Figura 3-8, la relación entre la densidad de la copa y la variabilidad temporal de la precipitación interna es de tipo lineal y positiva, a mayor densidad de copa, mayor variabilidad temporal en la precipitación interna.

**Figura 3-8:** Gráfica de dispersión y línea de ajuste de modelo de regresión lineal entre densidad de copa (%) y precipitación interna durante las semanas húmedas<sup>17</sup>



En síntesis, durante las semanas húmedas, la precipitación interna promedio no se relaciona con ninguno de los rasgos funcionales evaluados. En contraste, la variabilidad temporal de la precipitación interna se relaciona positivamente con la densidad de copa y

<sup>17</sup> Gráfica de dispersión y línea de ajuste a partir de análisis de regresión lineal entre la precipitación interna durante las semanas secas y la densidad de copa. Se presenta la gráfica de la relación con el mayor  $R^2$  (0.15). Existe una relación lineal positiva entre la variabilidad temporal de la precipitación interna (coeficiente de variación) y la densidad de copa de los árboles.

el área foliar y no tiene relación con área de copa, índice de ramificación y *densidad x volumen*.

### 3.4.3 Semanas secas

#### Relación con la escorrentía cortical

El área de la copa, la densidad de la copa y la *densidad x volumen* de copa tienen un efecto sobre el comportamiento del valor promedio de la escorrentía cortical en las semanas secas. La cobertura de epífitas tiene un efecto sobre la variabilidad temporal de la escorrentía cortical (Tabla 3-4).

**Tabla 3-4:** Parámetros de análisis de regresión entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante semanas húmedas<sup>18</sup>

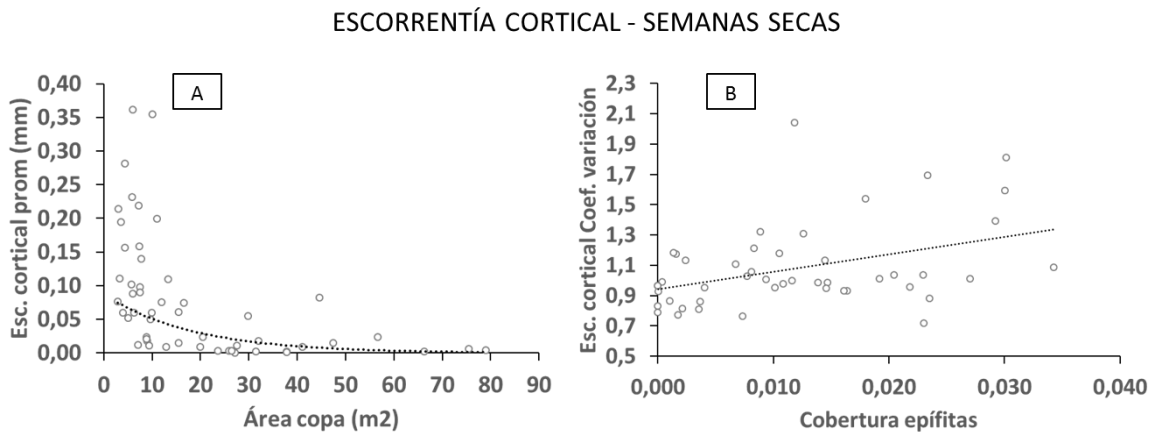
SEMANAS SECAS								
Escorrentía cortical								
Rasgos	Promedio				Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p
AC	<b>0.24181</b>	<b>-0.06000</b>	<b>0.338</b>	<b>7.5e-06<sup>c</sup></b>	1.00623	0.03460	0.0114	0.4549 <sup>a</sup>
DC	<b>-0.00923</b>	<b>0.00158</b>	<b>0.123</b>	<b>0.0228<sup>a</sup></b>	1.22718	-0.002151	0.0189	0.3356 <sup>a</sup>
IR	0.07869	0.00097	0.0074	0.5465 <sup>c</sup>	1.13108	-0.003640	0.0104	0.4746 <sup>a</sup>
CE	0.10819	-1.69590	0.0287	0.2346 <sup>a</sup>	<b>0.9702</b>	<b>10.7111</b>	<b>0.1164</b>	<b>0.0142<sup>a</sup></b>
AF	9.17e-02	-2.57e-06	0.0020	0.7529 <sup>a</sup>	1.11e+00	-1.493e-05	0.0069	0.5605 <sup>a</sup>
DxV	<b>0.41845</b>	<b>-0.04036</b>	<b>0.2242</b>	<b>0.0004<sup>c</sup></b>	1.08e+00	1.492e-06	0.0011	0.8137 <sup>a</sup>
Precipitación interna								
Rasgos	Promedio				Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p
AC	5.83984	0.01147	0.011	0.462 <sup>a</sup>	0.9044017	-0.000881	0.006	0.5693 <sup>a</sup>
DC	5.948090	0.001815	0.0003	0.9142 <sup>a</sup>	0.754235	0.002148	0.032	0.1947 <sup>a</sup>
IR	5.95543	0.01043	0.0016	0.7709 <sup>a</sup>	<b>0.701408</b>	<b>0.006249</b>	<b>0.053</b>	<b>0.0525<sup>a</sup></b>
AF	<b>5.5179148</b>	<b>0.0004387</b>	<b>0.1146</b>	<b>0.0131<sup>a</sup></b>	8.671e-01	1.642e-05	0.016	0.3618 <sup>a</sup>

<sup>18</sup> Coeficientes de regresión (intercepto y pendiente), R<sup>2</sup> y valor p a partir de análisis de regresión entre rasgos funcionales de plantas y el valor promedio y coeficiente de variación de escorrentía cortical y precipitación interna durante las semanas secas. Los análisis de regresión se realizaron para comprobar si los rasgos funcionales de las plantas pueden tener efectos sobre procesos eco-hidrológicos. AC: área copa, DC: densidad copa, IR: índice ramificación, CE: cobertura epífitas, AF: área foliar, DxV: densidad x volumen copa. Color rojo: p < 0,05; color verde: 0,05 < p < 0,1. Las letras indican el tipo de análisis de regresión: a: regresión lineal, b: regresión lineal con transformación logarítmica y c: regresión potencial.

DxV	5.9994990	0.0000100	0.0009	0.8238a	9.022e-01	-2.414e-06	0.005	0.5874 <sup>a</sup>
-----	-----------	-----------	--------	---------	-----------	------------	-------	---------------------

La relación entre el área de la copa y la *densidad x volumen* de copa y la escorrentía cortical durante las semanas secas es del tipo potencial negativa (**Figura 3-9 (A)**). Durante semanas de menor precipitación, áreas de copa y *densidad x volumen* mayores conducen menor cantidad de escorrentía promedio. La cobertura de epífitas se relaciona de manera lineal positiva con la variabilidad temporal de la escorrentía cortical, a mayor cobertura de epífitas, mayor variabilidad de la escorrentía cortical durante las semanas secas (**Figura 3-9 (B)**).

**Figura 3-9:** Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y escorrentía cortical durante las semanas húmedas<sup>19</sup>



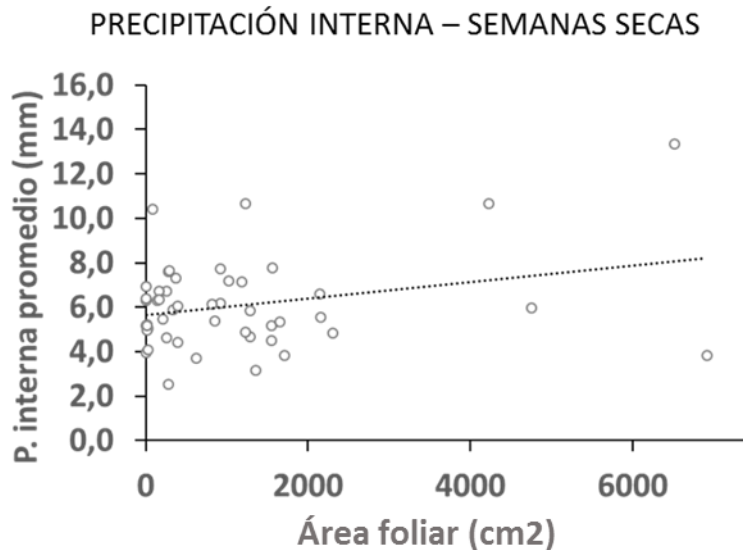
En síntesis, durante las semanas secas, la escorrentía cortical promedio se relaciona positivamente con la densidad de la copa y negativamente con área de la copa y *densidad x volumen*. El índice de ramificación, la cobertura de epífitas y el área foliar no tienen efectos sobre la escorrentía cortical promedio. La variabilidad temporal de la escorrentía cortical se relaciona positivamente con la cobertura de epífitas y no se relaciona con el área de la copa, la densidad de la copa, el índice de ramificación, el área foliar y la *densidad x volumen*.

<sup>19</sup> Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de relaciones estadísticamente significativas a partir de análisis de regresión entre escorrentía cortical durante semanas secas y rasgos funcionales. A: relación potencial negativa entre la escorrentía cortical promedio (mm) y el área de la copa (m²), B: relación lineal positiva entre el coeficiente de variación de la escorrentía cortical y la cobertura de epífitas.

### **Relación con la precipitación interna**

El área foliar se relaciona con el valor promedio de la precipitación interna y el índice de ramificación influye sobre la variabilidad temporal de la precipitación (Tabla 3-4). La precipitación interna promedio durante las semanas de mínimos de precipitación es influida por el área foliar de los árboles, esta relación es de tipo lineal positiva, a mayor área foliar, mayor precipitación interna promedio (Figura 3-10).

**Figura 3-10:** Gráfica de dispersión y línea de ajuste de modelo de regresión lineal entre área foliar (cm<sup>2</sup>) y precipitación interna promedio durante las semanas secas<sup>20</sup>.



En síntesis, durante las semanas secas, la precipitación interna promedio se relaciona positivamente con el área foliar y no se relaciona con área de la copa, densidad de copa, índice de ramificación y *densidad x volumen*. La variabilidad temporal de la precipitación interna se relaciona positivamente con el índice de ramificación y no se relaciona con área de copa, densidad de copa, área foliar y *densidad x volumen*.

---

<sup>20</sup> Gráfica de dispersión y línea de ajuste a partir de análisis de regresión lineal entre la precipitación interna durante las semanas secas y el área foliar (cm<sup>2</sup>). Se presenta la gráfica de la relación con el mayor R<sup>2</sup> (0.11) para la precipitación interna. Existe una relación lineal positiva entre la precipitación interna promedio y el área foliar (cm<sup>2</sup>).



### 3.5 Especies, sus rasgos funcionales y la influencia en procesos eco-hidrológicos.

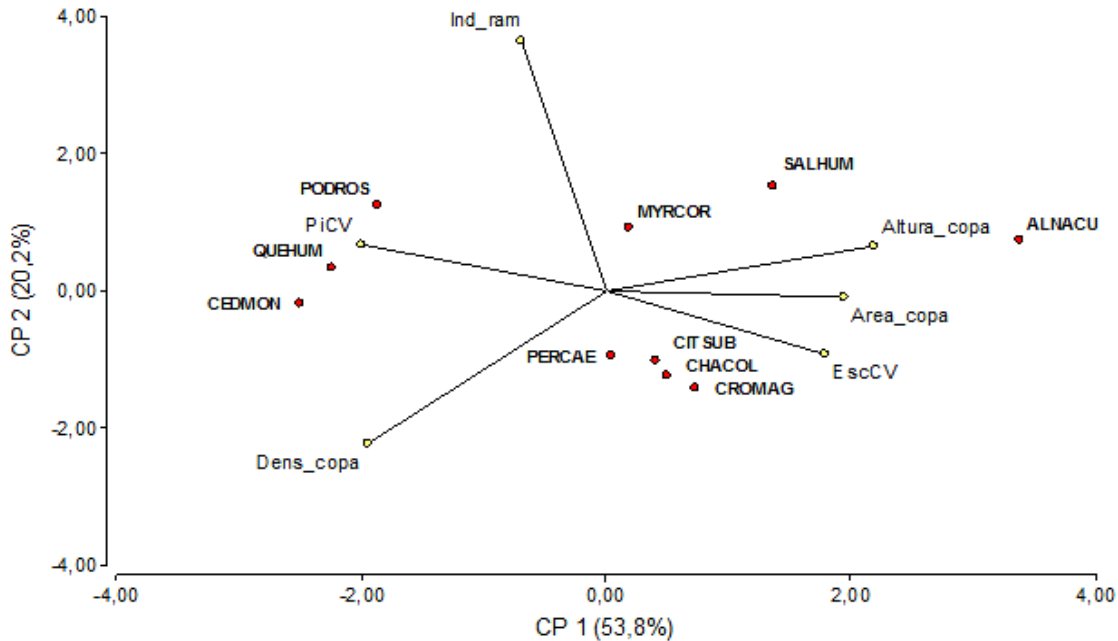
A partir del análisis de componentes principales de los rasgos funcionales que mostraron relación significativa con los procesos eco-hidrológicos, se encuentra que los dos primeros componentes explican el 74 % de la variabilidad de los datos (Figura 3-11). El primer componente representa el 53,9 % y las variables más importantes en este eje son el coeficiente de variación de la escorrentía cortical, coeficiente de variación de la precipitación interna, área de la copa y altura de la copa, con vectores propios de 0.40, -0.45, 0.43 y 0.49, respectivamente (Tabla 3-5). Este eje corresponde a la conformación de la copa como estructura que intercepta y conduce la precipitación y, por lo tanto, estos rasgos están relacionados con la variabilidad temporal de la escorrentía cortical y la precipitación interna. El segundo componente representa el 20,2 % de la variabilidad; las variables más importantes para este eje son el índice de ramificación y la densidad de la copa con vectores propios de 0,82 y - 0,50 respectivamente, sin embargo las especies no se distribuyen ampliamente en este eje (Figura 3-11 y Tabla 3-5).

**Tabla 3-5:** Autovectores análisis de componentes principales de rasgos funcionales y coeficiente de variación de escorrentía cortical y precipitación interna<sup>21</sup>.

Variables	e1	e2
Densidad copa	-0,43	-0,50
Índice ramificación	-0,16	0,82
Área copa	0,43	-0,02
Altura copa	0,49	0,14
Precipitación interna coeficiente de variación	-0,45	0,15
Escorrentía cortical coeficiente de variación	0,40	-0,21

<sup>21</sup> e1: autovector 1 y e2: autovector 2.

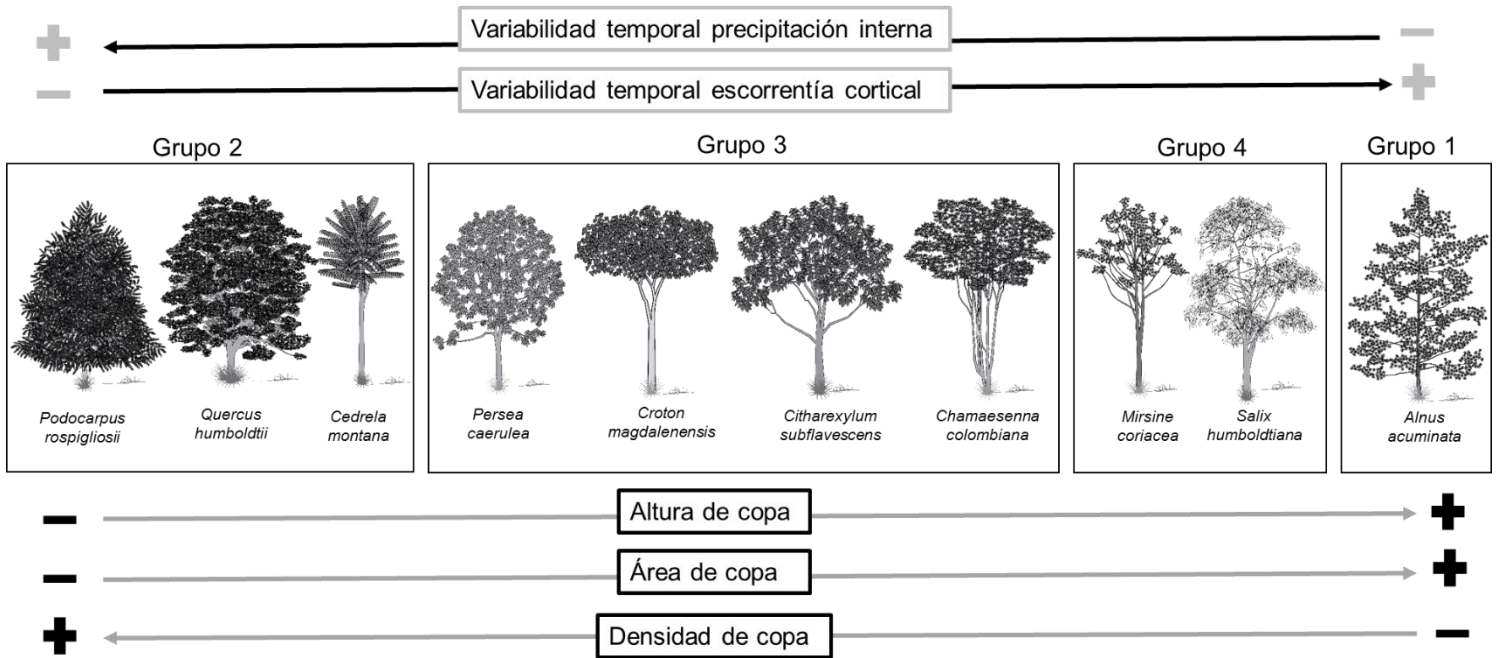
**Figura 3-11:** Biplot a partir análisis de componentes principales de las 10 especies seleccionadas, rasgos funcionales y variables hidrológicas<sup>22</sup>.



Según el análisis de componentes principales, las especies se ubican en un gradiente de efectos sobre la variabilidad temporal de la precipitación interna y la escorrentía cortical en relación a la combinación de los rasgos funcionales que presentan, dichos efectos son contrarios (Figura 3-11). En la Figura 3-12 se esquematiza este gradiente y la ubicación de las especies en el mismo.

<sup>22</sup> Gráfica de los componentes principales 1 y 2 resultado del análisis de componentes principales para los rasgos funcionales y las variables hidrológicas coeficiente de variación de la escorrentía cortical y la precipitación interna. Las especies se distribuyen en los rangos de variación de rasgos funcionales y variables hidrológicas. PiCV: Coeficiente de variación precipitación interna, EscCV: coeficiente de variación escorrentía cortical. ALNACU: *Alnus acuminata*, CEDMON: *Cedrela montana*, CHACOL: *Chamaesenna colombiana*, CITSUB: *Citharexylum subflavescens*, CROMAG: *Croton magdalenensis*, MYRCOR: *Myrsine coriacea*, PODROS: *Podocarpus rospigliosii*, PERCAE: *Persea caerulea*, QUEHUM: *Quercus humboldtii*, SALHUM: *Salix humboldtiana*.

**Figura 3-12:** Esquema del gradiente de especies respecto a rasgos funcionales y variabilidad temporal de escorrentía cortical y precipitación interna<sup>23</sup>.



En un extremo del gradiente, las especies que presentan copas densas y pequeñas, de poca altura como en *P. rospigliosii*, *C. montana* y *Q. humboldtii*, producen mayor variabilidad temporal de la precipitación interna pero menor variabilidad de la escorrentía cortical (Figura 3-11 y Figura 3-12). Esto puede relacionarse principalmente con el área de la copa y la densidad de la copa, las copas de las especies mencionadas arriba, son más cerradas y tienen menor área de captación de lluvia, es probable que la precipitación encuentre más obstáculos en su trayectoria e incluso termine conduciéndose por ramas y tronco hacia el suelo. Además estas copas tienen menos espacios libres a través de los cuales pueden pasar sin barreras las gotas de lluvia. En el caso de *Q. humboldtii* el follaje es denso y es muy ramificado, además de que la copa constituye la mayor parte del eje longitudinal en cada individuo, aunque sus copas son de las de menor altura en comparación con las demás especies (Figura 3-12). *P. rospigliosii*, a pesar de tener hojas

<sup>23</sup> Este esquema resume cómo se ubican las especies en el gradiente de variación de rasgos funcionales, así como de la variabilidad temporal de la escorrentía cortical y la precipitación interna. Las ilustraciones de las especies se basaron en fotos actuales de las mismas, por lo tanto algunas pueden encontrarse en un estadio juvenil aún.

muy pequeñas, si tiene muchas ramas horizontales que se insertan en diferentes posiciones en el tronco, lo que hace que su copa sea densa (Figura 3-12). *C. montana*, a pesar de no tener copas muy altas y que estas son poco ramificadas, sus hojas son compuestas y alcanzan longitudes considerables, haciendo que su copa sea densa (Figura 3-12).

En el otro extremo del gradiente, se encuentra *A. acuminata*, una especie de mayor área y altura de copa pero de baja densidad, pues tiene pocas hojas y estas no son de gran tamaño, que asimismo producen una mayor variabilidad temporal de la escorrentía cortical pero una menor variabilidad temporal de la precipitación interna (Figura 3-12). Este efecto puede relacionarse con el hecho de que una copa muy poco densa permite el paso de la precipitación interna sin muchos obstáculos que amortigüen su caída, así su área y altura sean grandes. Adicionalmente, las copas grandes como la de *A. acuminata* se estructuran a partir de ramas que se insertan principalmente de forma horizontal, de esta manera es probable que la lluvia una vez llega a la copa, parte se deposita en las ramas y termina fluyendo por gravedad hacia el suelo, pues no existe la inclinación adecuada para que fluya hacia el tronco y luego al suelo (Figura 3-12).

En el intermedio del gradiente encontramos a *C. magdalenensis*, *P. caerulea*, *C. subflavescens* y *C. colombiana*, especies que presentan valores intermedios tanto en área, densidad y altura de copa, y que además producen la mayor variabilidad temporal de la escorrentía cortical y una menor variabilidad temporal de la precipitación interna (Figura 3-11 y Figura 3-12). Estas especies presentan copas de poca altura, que se ramifican más en el extremo superior del árbol y de forma casi vertical, sus tamaños de hojas son más o menos similares, incluido el de *C. colombiana* que posee hojas compuestas (Figura 3-12). Así mismo, en el intermedio, encontramos a *M. coriacea* y *S. humboldtiana*, ambas especies de muy baja densidad de copa aunque muy ramificadas, pero en el caso de la primera pocas hojas y copas muy pequeñas y de poca altura, y en el caso de la segunda, hojas lineales pequeñas y copas muy variables en área, a veces poco ramificadas, e incluso sin ramificar formando una copa lineal. Estos rasgos se relacionan con una mayor variabilidad temporal de la escorrentía cortical y una menor variabilidad temporal de la precipitación interna (Figura 3-12).

### 3.5.1 Grupos de especies con efectos similares sobre procesos eco-hidrológicos

A partir de análisis de clúster se identifican 4 grupos de especies que comparten valores similares de los rasgos evaluados y por lo tanto comparten diferentes efectos sobre la variabilidad temporal de la escorrentía cortical y de la precipitación interna. Grupo 1: *Alnus acuminata*, Grupo 2: *Quercus humboldtii*, *Podocarpus rospigliosii* y *Cedrela montana*, Grupo 3: *Croton magdalenensis*, *Persea caerulea*, *Citharexylum subflavescens* y *Chamaesenna colombiana* y Grupo 4: *Salix humboldtiana*, *Myrsine coriacea*. Según el análisis de varianza multivariado los grupos identificados se diferencian significativamente entre sí ( $p < 0,05$ ) (Tabla 3-6).

**Tabla 3-6:** Valores promedio de rasgos funcionales para grupos de especies identificados<sup>24</sup>.

Grupo	Dens_copa	Ind_ram	Area_copa	Altura_copa	PiCV	EscCV	
4	41,40	16,27	15,25	5,93	0,78	0,90	A
3	68,94	3,89	18,77	5,14	0,75	0,90	B
2	76,22	15,69	8,87	3,47	0,87	0,78	C
1	33,94	9,31	52,12	8,51	0,69	0,87	D

El **Grupo 1**, es decir, la especie *A. acuminata* es la especie de menor densidad de copa, mayor área de copa y altura de copa, además presenta la menor variabilidad temporal de la precipitación interna pero alta variabilidad temporal de la escorrentía cortical (Figura 3-12)

<sup>24</sup> Valores promedio de rasgos funcionales para cada grupo de especies, obtenidos a partir de análisis de clúster. Letras diferentes denotan grupos de especies significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ) según valores promedio de rasgos funcionales.

El **Grupo 2**, está compuesto por *P. rospigliosii*, *C. montana* y *Q. humboldtii*. Estas especies presentan la mayor densidad de copa, índice de ramificación alto, y la menor altura y menor área de copa. Adicionalmente, estas especies presentan la mayor variabilidad temporal de la precipitación interna pero la menor variabilidad temporal de la escorrentía cortical (Figura 3-12).

El **Grupo 3**, conformado por *C. magdalenensis*, *P. caerulea*, *C. subflavescens* y *C. colombiana*. Estas especies presentan el menor índice de ramificación y la mayor variabilidad temporal de la escorrentía cortical, los valores de densidad de copa, área de copa, altura de copa y la variabilidad temporal de la precipitación interna son intermedios (Figura 3-12).

El **Grupo 4**, conformado por *M. coriacea* y *S. humboldtiana*. Estas especies presentan el mayor índice de ramificación y una alta variabilidad temporal de la escorrentía cortical. Los valores de altura de copa, área de copa, densidad de copa y variabilidad temporal de precipitación interna son intermedios (Figura 3-12).

### **3.6 Función eco-hidrológica a escala de comunidad vegetal**

En las secciones anteriores el objetivo fue comprender los efectos diferenciales de las especies sobre los procesos eco-hidrológicos estudiados, así como comprender los mecanismos - rasgos funcionales- por los cuales las especies presentan diferentes efectos sobre dichos procesos. En esta sección el objetivo es evaluar la funcionalidad eco-hidrológica a escala de comunidad vegetal escalando las relaciones encontradas entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos. Para escalar dichas relaciones se ponderan los rasgos funcionales por la abundancia relativa de las especies presentes en cada comunidad (MPC).

La funcionalidad ecológica a escala de comunidad vegetal, se evaluó inicialmente mediante análisis de regresión entre la media ponderada por la comunidad (MPC) de los rasgos hidrológicos (calculada con 10 especies) con los rasgos funcionales de la vegetación (calculado con 19 especies) y no se encontraron relaciones significativas.

Además, se contrastaron las MPC de las 10 especies monitoreadas con las MPC de las 9 especies restantes y se encontraron relaciones lineales negativas y significativas, es decir, hay una relación inversa entre los efectos a nivel de la comunidad entre las 10 especies evaluadas hidrológicamente y las 9 especies restantes. Esto demuestra que los efectos hidrológicos a nivel de la comunidad no pueden predecirse totalmente a partir de los efectos de las 10 especies evaluadas en este aspecto. Sin embargo, ya que estas 10 especies suman el 77,5% de la abundancia relativa en el sitio de estudio, se considera una aproximación importante para describir el comportamiento de la comunidad en el sitio de estudio.

Las MPC calculadas por parcela de monitoreo presentaron diferencias entre sí pues las parcelas presentan diferente composición y abundancia de especies. Particularmente la parcela 5 presenta solo 5 de las 10 especies evaluadas. Decidimos no incluir la parcela 5 dentro de los análisis para evaluar la relación entre las MPC de variables hidrológicas y las MPC de rasgos funcionales ya que 5 especies junto con el número de individuos de cada una no son representativas de la funcionalidad a nivel de la comunidad (Ver Anexo E composición y abundancia relativa de parcelas de monitoreo). Adicionalmente, esta parcela es más joven, fue establecida en un predio que plantaron en el año 2011, las demás parcelas están en predios que fueron plantados en el año 2010. La composición y abundancia de individuos de la parcela 5 es diferente a las de las otras parcelas porque se plantaron los individuos según la disponibilidad del material vegetal en el momento de establecimiento de la plantación. En la parcela la mayoría de los individuos no han alcanzado más de 4 metros de altura, solo la especie *Alnus acuminata* ha tenido un crecimiento mayor de más de 10 metros de altura. Por esta razón, la parcela 5 aún está muy abierta en términos de cobertura de dosel y el pasto aún domina mucho.

A partir de análisis de regresión se encontraron relaciones significativas entre los rasgos funcionales y las variables hidrológicas a nivel de comunidad vegetal (Tabla 3-7). Esto da cuenta de un efecto de la vegetación a escala de comunidad sobre los procesos eco-hidrológicos de escorrentía cortical y precipitación interna. Similar a lo encontrado a nivel de especie, los rasgos que configuran la copa se relacionan con los procesos eco-hidrológicos (Tabla 3-2). Los rasgos funcionales área de la copa, índice de ramificación y cobertura de epífitas se relacionan con la variabilidad temporal de la escorrentía cortical. El área de la copa y el índice de ramificación afectan la precipitación interna promedio (Tabla 3-7). El coeficiente de variación de la precipitación interna se relaciona con el área

52 Evaluación de la funcionalidad eco-hidrológica de intervenciones de restauración ecológica en áreas estratégicas para la conservación del recurso hídrico en zonas rurales de Medellín.

de la copa, la densidad de la copa, el índice de ramificación y la *densidad x volumen* de copa.

**Tabla 3-7:** Parámetros producto de análisis de regresión entre medias ponderadas por la comunidad de rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos durante el total de semanas de monitoreo<sup>25</sup>.

TOTAL SEMANAS								
Escorrentía cortical								
Rasgos	MPC Escorrentía promedio				MPC Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p
MPC_AC	68.4103	-0.0015	0.00677	0.917	<b>30.510407</b>	<b>0.028137</b>	<b>0.9075</b>	<b>0.0473</b>
MPC_DC	68.1118	-0.00033	0.00055	0.976	-4.14036	0.01556	0.5216	0.2778
MPC_IR	70.3046	-0.00489	0.0334	0.817	<b>35.141072</b>	<b>0.034968</b>	<b>0.8147</b>	<b>0.0359</b>
MPC_CE	70.241	-3.743	0.0307	0.824	<b>28.185</b>	<b>33.055</b>	<b>0.9514</b>	<b>0.0046</b>
MPC_AF	7.126e+01	-5.297e-05	0.0330	0.818	66.07159	-0.000100	0.0502	0.716
MPC_DxV	6.797e+01	-3.237e-06	0.0030	0.945	3.109e+01	7.699e-05	0.7239	0.1492
Precipitación interna								
Rasgos	MPC Precipitación interna promedio				MPC Coeficiente variación			
	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p	Intercepto	Pendiente	R2	Valor p
MPC_AC	<b>1284.4026</b>	<b>1.0285</b>	<b>0.9474</b>	<b>0.0266</b>	<b>31.364592</b>	<b>0.019368</b>	<b>0.9786</b>	<b>0.0107</b>
MPC_DC	-91.3025	0.5951	0.5964	0.227	<b>2.438241</b>	<b>0.011922</b>	<b>0.7419</b>	<b>0.0606</b>
MPC_IR	<b>1520.8964</b>	<b>1.1915</b>	<b>0.7553</b>	<b>0.0557</b>	<b>34.385946</b>	<b>0.023300</b>	<b>0.7318</b>	<b>0.0645</b>
MPC_AF	2.729e+03	-4.326e-03	0.07318	0.729	5.636e+01	-5.562e-05	0.0352	0.8123
MPC_DxV	1.282e+03	2.876e-03	0.7893	0.111	<b>3.985e+01</b>	<b>2.287e-05</b>	<b>0.856</b>	<b>0.0747</b>

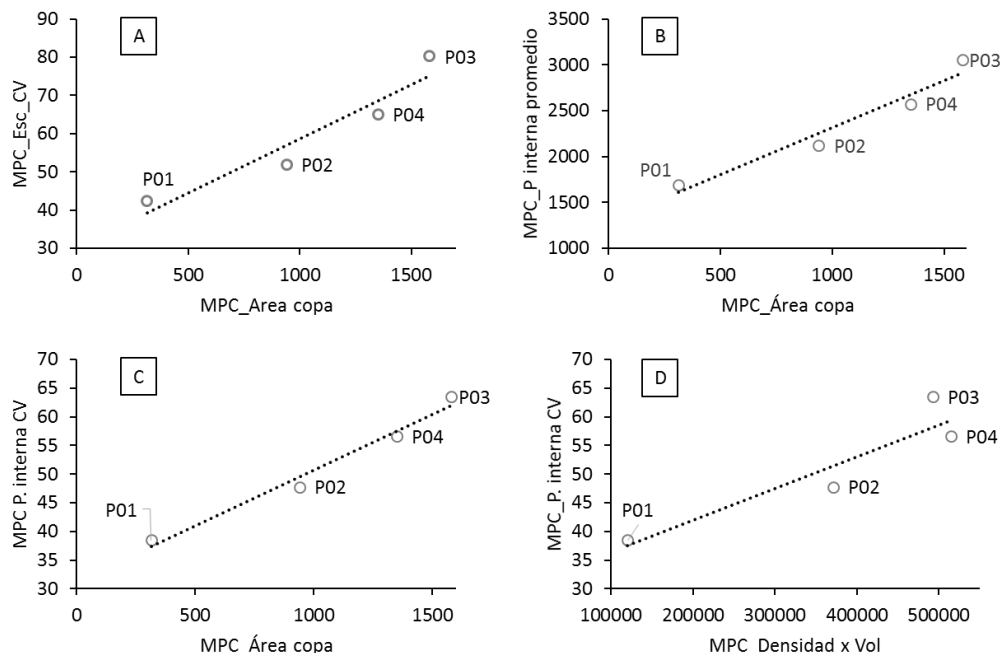
<sup>25</sup> Coeficientes de regresión (intercepto y pendiente), R<sup>2</sup> y valor p a partir de análisis de regresión lineal entre media ponderada por la comunidad (MPC) de rasgos funcionales de plantas y MPC del valor promedio y coeficiente de variación de escorrentía cortical y precipitación interna durante el total de semanas monitoreadas. Los análisis de regresión se realizaron para comprobar si los rasgos funcionales de las plantas tienen efecto sobre procesos eco-hidrológicos a escala de comunidad vegetal. MPC\_AC: media ponderada por la comunidad del área de copa, MPC\_DC: media ponderada por la comunidad de densidad copa, MPC\_IR: media ponderada por la comunidad de índice ramificación, MPC\_CE: media ponderada por la comunidad de cobertura epífitas, MPC\_AF: media ponderada por la comunidad del área foliar, MPC\_DxV: media ponderada por la comunidad de Densidad x volumen copa. Color rojo: p < 0,05; color verde: 0,05 < p < 0,1.



---

El tipo de relación entre las MPC de variables hidrológicas y MPC de los rasgos funcionales seleccionados de las relaciones a nivel de especies individuales es de tipo lineal y positivo en todos los casos (Figura 9), a medida que aumenta el valor ponderado del rasgo en la comunidad, aumenta la variabilidad temporal de la esorrentía cortical, la precipitación interna promedio y la variabilidad de la precipitación interna. Las parcelas evaluadas muestran comportamiento similar en diferentes relaciones evaluadas, por ejemplo la parcela 1 es la que presenta menores valores de MPC de rasgos funcionales y de variables hidrológicas, la parcela 3 es la de mayores valores de MPC de rasgos funcionales y variables hidrológicas. Las parcelas de monitoreo presentan diferente composición y abundancia relativa (Anexo E), los individuos de todas las parcelas fueron plantados el mismo año (2010).

**Figura 3-13:** Gráficas de dispersión y líneas de ajuste de modelos de regresión entre rasgos funcionales y precipitación interna durante el total de semanas de monitoreo<sup>26</sup>



<sup>26</sup> Líneas de ajuste relaciones estadísticamente significativas a partir de análisis de regresión entre media ponderada por la comunidad (MPC) de variables hidrológicas durante total de semanas y MPC de rasgos funcionales a nivel de la comunidad. Se presentan los códigos para las 4 parcelas evaluadas ya que la parcela 5 (P05) no se usó para estos análisis (ver texto). A: regresión lineal modelo  $MPC\_Esc\_CV = 0,028137(MPC\_Área\ copa) + 30,510407$  y  $R^2= 0,86$ ; B: regresión lineal modelo  $MPC\_P\ interna\ promedio = 1,0285(MPC\_Área\ copa) + 1284,4$  y  $R^2= 0,92$ ; C:  $MPC\_P\ interna\ CV = 0.019368(MPC\_Área\ copa) + 31.364592$  y  $R^2= 0,97$ ; D: regresión lineal modelo  $MPC\_P\ interna\ CV = 2.287e-05 (MPC\_Densidad\ x\ Vol) + 3.985e+01$  y  $R^2= 0,86$ . MPC\_Área copa: media ponderada por la comunidad del área de copa, MPC\_Densidad x Vol: media ponderada por la comunidad de Densidad x volumen copa, MPC\_Esc\_CV: media ponderada por la comunidad coeficiente variación escorrentía cortical, MPC\_P. Interna prom: media ponderada por la comunidad precipitación interna promedio, MPC\_P. Interna CV: media ponderada por la comunidad coeficiente variación precipitación interna. Las gráficas presentadas son las correspondientes a las relaciones significativas entre MPC de rasgos funcionales y MPC de variables hidrológicas.

## **4. Discusión**

### **4.1 Rasgos funcionales de plantas y procesos eco-hidrológicos**

Los rasgos funcionales relacionados con la configuración morfológica y estructural de la copa, así como la cobertura de epífitas son algunos de los mecanismos por los cuales los árboles influyen sobre procesos eco-hidrológicos. Esto se soporta en el hecho de que dichos rasgos funcionales tienen efecto sobre el valor promedio y la dinámica temporal de dos procesos eco-hidrológicos relacionados con la entrada de agua al suelo, y que hacen parte del ciclo hidrológico: escorrentía cortical y precipitación interna.

En este estudio, los procesos eco-hidrológicos se vieron afectados por los rasgos funcionales ya que el agua interactúa directamente con las características de las plantas, mientras fluye entre la atmósfera y el suelo. Específicamente, la copa de un árbol puede actuar como un contenedor que intercepta, almacena y conduce la precipitación hacia el suelo. Estudios previos demuestran que las características de la copa determinan la cantidad y variabilidad temporal de flujos superficiales de agua como la escorrentía cortical y la precipitación interna: arquitectura de la copa, áreas superficiales de hojas y troncos, fenología foliar de especies de bosques tropicales de China (Xiao et al., 2000), altura y densidad de la copa de cuatro especies nativas y una exótica en un bosque tropical de Panamá (Park & Cameron, 2008), diámetro y densidad de la copa de especies de bosques deciduos de Alemania (Kramer & Holscher, 2009).

Existen otros rasgos funcionales que tienen influencia sobre estos dos procesos eco-hidrológicos y que no fueron medidos en este estudio: índice de área foliar (Park & Cameron, 2008), forma y orientación foliar (Crockford & Richardson, 2000), área foliar total, área de superficie leñosa, área superficial total, ángulo de inserción de la rama,

biomasa foliar, longitud total de la rama, etc (Li et al., 2015). Sin embargo, su poder de predicción respecto a la escorrentía cortical y la precipitación interna es similar al de los rasgos funcionales evaluados en esta investigación. Adicionalmente, algunos de los rasgos medidos en otros estudios pretenden relacionar los procesos a una escala más detallada (flujo de una gota de lluvia) que no corresponden con los objetivos del presente estudio. Por lo tanto aquí se amplía la escala para entender el efecto de los árboles sobre procesos eco-hidrológicos, al considerar toda la copa como contenedor de la precipitación incidente.

Por otro lado, otras variables tales como intensidad, duración y distribución temporal de la precipitación tienen efectos en la interceptación de la lluvia por las copas y por lo tanto en la escorrentía cortical y la precipitación interna, explicando así parte de la variabilidad no explicada por los rasgos funcionales. Además, parte de la lluvia interceptada por las copas se evapora y la tasa a la cual esto ocurre depende de factores como temperatura, humedad relativa, radiación neta y velocidad del viento (Xiao & McPherson, 2011).

Al analizar específicamente el flujo de escorrentía se encontró que a mayor área de copa o mayor *densidad x volumen*, menor valor promedio y mayor variabilidad temporal de la escorrentía cortical, pues entre más grande sea una copa es más probable que las ramas estén dispuestas horizontalmente a manera de soporte, y con este ángulo de inserción de las ramas, el flujo de agua hacia al tronco por gravedad se dificulta, como se observa en nuestro estudio en *A. acuminata*. Es posible que el agua que llega a estas ramas más horizontales caiga debajo de la copa sin llegar al tronco. Esto soporta lo hallado en otros estudios en los que se encuentra que el volumen de escorrentía cortical que produce una especie depende del tamaño de la copa, la forma y orientación de las hojas, el ángulo de inserción de las ramas y la rugosidad del tronco (Levia & Frost, 2003).

En cuanto a la precipitación interna, el volumen y complejidad estructural de la copa pueden disminuir la variabilidad temporal y espacial que puede presentar el fenómeno de precipitación. El volumen de la copa puede modificar la variabilidad espacial de la precipitación y la complejidad estructural puede modificar la velocidad de caída de la precipitación (Park & Cameron, 2008), ambos rasgos pueden modificar además la trayectoria de la precipitación (Goebes et al., 2015), funcionando como conductores de

precipitación hacia el suelo y por tanto regulando la velocidad de llegada del agua al suelo y, posteriormente, al cauce de la quebrada (Brauman et al., 2007; Gonzaga, 2002).

## **4.2 La escala temporal y las relaciones entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos**

A pesar de que la lluvia sea un fenómeno variable en espacio y tiempo (Buytaert et al., 2006), el presente estudio encontró que a una escala semanal es posible detectar relaciones entre rasgos funcionales y la dinámica de la escorrentía cortical y la precipitación interna. Sin embargo, la captura de información semanal no logra detectar el efecto que pueden tener los rasgos de los árboles en eventos de precipitación súbita que solo se detectan con mediciones a escalas temporales más pequeñas como diariamente. Evaluar cómo varían las relaciones halladas dependiendo de la intensidad de la lluvia es clave pues la escorrentía cortical se relaciona de manera positiva con la cantidad de precipitación. A partir de cierta intensidad de precipitación, la escorrentía cortical empieza a disminuir pues las áreas involucradas en este flujo (hojas, ramas, tronco), se pueden saturar y este flujo se convierte en precipitación interna (Ahmed et al., 2015; Levia & Frost, 2003). En este sentido pueden existir otros efectos de los árboles sobre la dinámica de las variables hidrológicas que no fueron evaluados en esta investigación.

Los árboles plantados tienen efectos importantes en los procesos eco-hidrológicos - durante periodos de varios meses (total semanas monitoreadas), pero también durante las semanas de mayor (semanas húmedas) y menor precipitación (semanas secas). La precipitación es un fenómeno que varía considerablemente en el tiempo y los efectos de las plantas sobre este fenómeno también lo hacen. Entre estaciones seca y húmeda, cambia la importancia de los rasgos funcionales respecto a la relación con la escorrentía cortical y la precipitación interna. En semanas de máxima precipitación, ningún rasgo evaluado se relaciona con la variabilidad temporal de la escorrentía cortical, posiblemente porque la cantidad de agua que llega satura la superficie del árbol rápidamente, y termina llegando por gravedad al suelo sin necesariamente ser conducida por el árbol en su totalidad.

En contraste, la cobertura de epífitas es un rasgo con carácter regulador durante las semanas totales y particularmente durante las semanas secas, pues se relaciona con el coeficiente de variación de la escorrentía cortical. La cobertura de epífitas en ramas y tronco almacena temporalmente el agua que escurre por el tronco, lo que contribuye a la regulación temporal del flujo de escorrentía cortical. En semanas secas la cobertura de epífitas puede ser clave para almacenar y regular el flujo de un volumen mínimo de agua que fluye por escorrentía cortical.

En nuestro sitios de estudio, el porcentaje de cobertura de epífitas es muy bajo aún, pues es una plantación de 8 años de edad en la cual apenas están colonizando especies de epífitas como musgos y líquenes, sin embargo ya está teniendo un efecto regulatorio sobre la escorrentía cortical. Se espera que el efecto encontrado acá cambie a medida que colonicen otras epífitas de mayor complejidad como bromelias, orquídeas, aráceas, helechos, etc. pues tendrían mayor capacidad de almacenamiento de agua y esto podría modificar tanto la cantidad como la variabilidad temporal de la escorrentía cortical. Además, las epífitas son claves en la interceptación de lluvia y en la captura de la precipitación vía neblina o precipitación horizontal (Veneklaas & Vanek, 1990), un flujo que tiene importancia considerable en los bosques altoandinos o bosques de niebla.

Por otro lado, los rasgos de la copa como el área, la densidad y la *densidad x volumen*, determinan específicamente la cantidad de agua que fluye por escorrentía cortical, más no su variabilidad temporal, independiente de la estación. Al parecer la variabilidad temporal de la escorrentía está sujeta principalmente a la frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación que inciden sobre los árboles.

En cuanto a la precipitación interna, es de resaltar que los rasgos de la copa tienen un efecto más importante sobre la variabilidad temporal que sobre la cantidad promedio de este flujo de agua. Y este efecto se da incluso en semanas húmedas y secas. Esto porque la copa puede funcionar como una barrera física a la caída del agua, en la cual el flujo del agua puede tomar diversas rutas: parte de la precipitación interna pasa directamente hacia el suelo a través de los espacios abiertos de la copa, otra parte se puede devolver a la atmósfera vía evaporación y otra parte se almacena temporalmente en la copa y luego cae al suelo, cumpliendo así un papel de regulación del flujo de agua.

### **4.3 Efectos diferenciales de las especies sobre procesos eco-hidrológicos**

Las relaciones entre rasgos funcionales y procesos eco-hidrológicos pudieron comprobarse al considerar en conjunto los datos de todas las especies evaluadas. Sin embargo, un resultado importante de nuestra investigación es que las especies pueden presentar efectos diferenciales sobre los procesos eco-hidrológicos evaluados debido a que cada una presenta una combinación diferente de rasgos funcionales (Lavorel & Garnier 2002; Díaz et al., 2004, 2007). Esto además se refuerza cuando al realizar un análisis de ordenación (análisis de componentes principales) y un análisis de clúster, las especies se ubican en un gradiente de variación tanto de rasgos como de la variabilidad temporal de escorrentía cortical y precipitación interna y se pueden agrupar según valores similares de rasgos funcionales.

Puntualmente, las especies estudiadas forman un gradiente de efectos a partir de la variación en rasgos relacionados con la estructura y morfología de la copa, dichos efectos son contrarios. El gradiente de efectos va desde especies que presentan copas de mayor área y altura en relación con una mayor variabilidad temporal en la escorrentía cortical pero menor variabilidad de la precipitación interna, hasta especies de copas de menor área, y menor altura, en relación a mayor variabilidad temporal de la precipitación interna pero menor variabilidad temporal de la escorrentía cortical.

Este resultado complementa los resultados de otros estudios en los cuales también se han encontrado diferencias entre los efectos que pueden tener las especies sobre procesos eco-hidrológicos (Xiao et al. 2000, Kramer & Holscher, 2009; Ahmed et al., 2015), incluso cuando son especies plantadas (Park & Cameron, 2008), como es el caso del presente estudio. En todos los estudios se reconoce que las características particulares de las especies (rasgos funcionales) como área y densidad de copa, patrones de ramificación, orientación de las hojas e índice de área foliar, determinan sus efectos diferenciales sobre procesos eco-hidrológicos. Además, ya es ampliamente reconocido que los rasgos funcionales son el mecanismo clave por el cual las especies influyen sobre procesos y funciones ecosistémicas (Lavorel & Garnier, 2002; Westoby et al., 2002; Díaz et al., 2004, 2007; Hooper et al., 2005; Luck et al., 2009; de Bello et al., 2010).

Como se observa, las especies presentan efectos inversos sobre la variabilidad temporal de la escorrentía cortical y la precipitación interna, esto da cuenta de que posiblemente las especies se complementan en los efectos sobre los procesos eco-hidrológicos; esta complementariedad de las especies se ha encontrado para otros procesos y funciones ecosistémicas como la producción primaria (Loreau & Hector, 2001; Morin et al., 2011) y se relaciona con la diversidad de especies y las interacciones interespecíficas en un ecosistema (Cardinale et al., 2002; Hooper et al., 2005). La diversidad de especies influye sobre los procesos ecosistémicos a partir de los rasgos funcionales particulares de cada especie (Diaz & Cabido, 2001; de Bello et al., 2010). Por tanto, es fundamental recuperar la diversidad de especies en el marco de proyectos de restauración con el fin de garantizar la recuperación de funciones ecosistémicas.

#### **4.4 Función eco-hidrológica de la comunidad vegetal**

Los efectos de los rasgos funcionales sobre los procesos eco-hidrológicos se pueden escalar en cierta medida a nivel de la comunidad, y dan cuenta de la función eco-hidrológica de las plantaciones. Los procesos eco-hidrológicos de escorrentía cortical y precipitación interna, hacen parte de la función de regulación hídrica que es mediada por los árboles en los ecosistemas nativos y específicamente en bosques andinos (Brujinzeel, 2004), y que implica la regulación a largo plazo de los flujos máximos y mínimos en una cuenca, lo que garantiza la provisión continua de agua para el consumo humano. Esta capacidad regulatoria se ha comprobado en sitios que se encuentran en sucesión secundaria (García-Leoz et al., 2017), y pocas veces se ha evaluado en sitios sometidos a restauración ecológica por medio de plantaciones (Brujinzeel, 2004, Park & Cameron, 2008).

Las plantaciones en términos eco-hidrológicos pueden comportarse de manera diferente, pues su composición, estructura y función están mediadas por arreglos de especies artificiales producto de la intervención del proyecto *per se*, que en muchos casos no tienen fundamento ecológico sino que se definen a partir de aspectos logísticos y de presupuesto como la disponibilidad de plántulas para la siembra (Murcia & Guariguata, 2014). Esto se evidenció en nuestros resultados, pues cada parcela presentó diferentes MPC de rasgos funcionales pero también MPC de variables hidrológicas, debido a que todas presentan diferente composición y abundancia. Las relaciones entre rasgos funcionales y procesos



eco-hidrológicos halladas en este estudio representan un momento puntual en el proceso de restauración ecológica de un ecosistema. Las relaciones entre las MPC de rasgos funcionales y MPC de variables hidrológicas pueden cambiar a medida que crecen los árboles plantados, avanza la regeneración natural y la sucesión vegetal, pues se espera que la diversidad y abundancia por especie cambien a medida que avanza el proceso de restauración. De ahí la importancia de evaluar la funcionalidad ecosistémica a través del monitoreo a largo plazo.

Otro resultado clave fue encontrar que los efectos hidrológicos a escala de comunidad son significativos y pueden predecirse a partir de los efectos de las 10 especies evaluadas en este aspecto, aunque debe tenerse en cuenta que especies menos abundantes pueden tener efectos importantes sobre las funciones ecosistémicas. Todas las especies pueden tener efectos particulares según la combinación de rasgos funcionales que presenten, incluso aquellas que no son las más abundantes, esto evidencia la importancia de las funciones de las especies raras dentro de los ecosistemas (Hooper et al., 2005; Jain et al., 2014; Lyons, Brigham, Traut, & Schwartz, 2005; Schwartz et al., 2000). El hecho de que las 9 especies a las que no se les evaluaron atributos hidrológicos se comporten de manera contraria en términos de sus rasgos funcionales, soporta nuevamente la complementariedad de las especies en sus efectos sobre la funcionalidad eco-hidrológica y refuerza la importancia de los arreglos con diversas especies en los proyectos de esta índole.

Más aún, es posible que la complementariedad de especies encontrada en este estudio aplique para otro tipo de funciones ecosistémicas, pues los árboles no solo influyen sobre la dinámica de escorrentía cortical y precipitación interna sino que además pueden amortiguar la velocidad de caída de la lluvia (Goebes et al., 2015), generan sombra que evita la rápida evaporación del agua que llega al suelo, manteniendo regulados los niveles de humedad en el suelo (Villegas et al., 2010; Wang et al., 2013) y generan con sus raíces espacios por los que el agua se infiltra en el suelo y recarga por flujos subsuperficiales el cauce de la quebrada (Brauman et al., 2007; Legates et al., 2011). Además, las plantas pueden disminuir la erosión (Aronson et al., 2007; Goebes et al., 2015; Suescún et al., 2015) y conducir hacia el suelo nutrientes a través del agua que fluye por escorrentía cortical (Ahmed et al., 2015).

## 4.5 Implicaciones para la restauración ecológica

Nuestros resultados demuestran que la evaluación de los rasgos funcionales de las especies plantadas en proyectos de restauración permite conocer sus funciones diferenciales en estos sistemas ecológicos artificiales y por tanto son una herramienta fundamental tanto para el monitoreo de las funciones ecosistémicas como para la planeación y diseño de un proyecto de restauración ecológica que busque la recuperación de funciones y por tanto de servicios ecosistémicos como la regulación hidrológica y la provisión de agua.

Por un lado, se propone que en la planeación e implementación de un proyecto de restauración siempre se priorice la diversidad de especies, pues se observó una complementariedad de las mismas en los efectos sobre la funcionalidad eco-hidrológica. Más aún, conocer los rasgos funcionales por los cuales las especies presentan efectos diferenciales sobre procesos eco-hidrológicos permiten priorizar aquellos rasgos que optimicen ciertas funciones ecosistémicas, de esta manera se tiene un criterio robusto para determinar la abundancia de las especies a plantar en un proyecto de restauración ecológica. De esta manera, si se desea optimizar la función eco-hidrológica a partir de la entrada de agua al suelo, se propone plantar más especies que presenten un valor promedio mayor y menor variabilidad temporal de la escorrentía cortical y la precipitación interna. Si en un proyecto de restauración ecológica se desea priorizar la función biogeoquímica se propone plantar mayor abundancia de especies que presenten menor variabilidad temporal y mayor valor promedio de escorrentía cortical, pues este flujo es un medio importante de transporte de nutrientes al suelo.

Por otro lado, para la fase de monitoreo de un proyecto de restauración ecológica, se propone el uso de rasgos funcionales como indicadores de la funcionalidad eco-hidrológica. Estos indicadores son los rasgos funcionales asociados a la configuración de la copa: área de la copa, densidad de la copa, índice de ramificación, junto con cobertura de epífitas y área foliar. Además, proponemos un nuevo rasgo funcional: *densidad x volumen*, este rasgo describe la copa como un contenedor de agua pues incluye el área de la copa, densidad de copa y altura de copa. Adicionalmente, es preciso monitorear

variables hidrológicas que acá proponemos como rasgos funcionales eco-hidrológicos: escorrentía cortical y precipitación interna.

El monitoreo de los rasgos funcionales deberá hacerse en el 90% o el total de las especies plantadas en el proyecto de restauración ecológica. Para escalar los efectos a nivel de la comunidad vegetal de los rasgos funcionales de las plantas sobre los procesos eco-hidrológicos es necesario incluir dentro del monitoreo la medición de la abundancia de las especies, así como su altura y su diámetro a la altura del pecho.



## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

A partir de nuestros resultados se valida que los rasgos funcionales de especies plantadas son una herramienta útil para el monitoreo de la funcionalidad eco-hidrológica en proyectos de restauración ecológica. Específicamente el área, densidad y *densidad x volumen* de la copa, índice de ramificación, área foliar y cobertura de epífitas. Todos estos rasgos son de fácil medición y por tanto podrán ser incorporados en programas de monitoreo. Adicionalmente, los valores promedio y coeficientes de variación de la escorrentía cortical y la precipitación interna varían entre especies y por lo tanto pueden considerarse rasgos funcionales de plantas.

Por otro lado, las especies nativas plantadas tienen diferentes efectos sobre la dinámica de los dos procesos eco-hidrológicos evaluados, dichos efectos pueden ser inversos. Este hecho da cuenta de la importancia de la complementariedad de las especies sobre las funciones que cumplen en procesos ecosistémicos de los que se desprenden servicios ecosistémicos, como la regulación hidrológica y la provisión de agua para comunidades que se abastecen de acueductos veredales. De esta manera, es fundamental incluir en proyectos de restauración diversas especies de plantas nativas con el fin de asegurar diferentes efectos sobre procesos eco-hidrológicos y de esta manera garantizar la recuperación de funciones ecosistémicas en el tiempo.

Los efectos de las especies sobre procesos eco-hidrológicos a nivel de la comunidad no pueden predecirse completamente a partir de una muestra de especies, pues cada especie plantada puede tener efectos particulares sobre la dinámica de los procesos eco-hidrológicos, debido a sus rasgos funcionales y su abundancia en cada parcela. Por lo tanto, al evaluar un proceso de restauración ecológica respecto a la funcionalidad eco-hidrológica, es necesario medir y monitorear los rasgos funcionales de la mayor cantidad de especies, incluso de todas, si es posible.

Esta investigación presenta un avance en la comprensión de los mecanismos por los cuales las especies influyen sobre procesos eco-hidrológicos y de la funcionalidad eco-hidrológica a nivel de comunidad vegetal. Además aporta al conocimiento ecológico de las especies nativas que son usadas comúnmente en proyectos de restauración ecológica.

Finalmente, los resultados de esta investigación, además de proponer herramientas para la optimización de proyectos de restauración ecológica, brindan información clave para justificar inversiones públicas en la compra y restauración de predios asociados a microcuencas abastecedoras de acueductos veredales y podrá ser útil para estudios sobre servicios ecosistémicos.

## 5.2 Recomendaciones

Para futuros estudios se recomienda evaluar otros rasgos funcionales que por estudios previos se ha encontrado tienen efectos sobre procesos eco-hidrológicos como el índice de área foliar, el ángulo de inserción de las ramas, la orientación de las hojas, la humectabilidad de las hojas, entre otros. Además, evaluar si las relaciones entre dichos rasgos y procesos a nivel de especie se pueden escalar a nivel de comunidad con el fin de determinar si estos pueden ser usados como indicadores para el monitoreo de la funcionalidad eco-hidrológica de proyectos de restauración ecológica.

También se recomienda medir los rasgos funcionales de más especies usadas comúnmente en proyectos de restauración ecológica de bosque altoandino, con el fin de complementar el conocimiento obtenido en este estudio sobre los efectos diferenciales de las plantas sobre procesos eco-hidrológicos, que puede ser muy útil para la selección de especies para la restauración ecológica.

Adicionalmente, dado que la precipitación es un fenómeno muy variable espacial y temporalmente es necesario monitorear durante más tiempo las variables hidrológicas (mínimo un año), de tal manera que se pueda evaluar el efecto de las especies sobre los procesos eco-hidrológicos de manera más robusta en términos estadísticos. Incluso, se podría monitorear las variables hidrológicas a escala diaria para evaluar el efecto de la intensidad de los eventos de lluvia sobre las relaciones entre rasgos funcionales y procesos

eco-hidrológicos y con esto poder evaluar además otras funciones ecosistémicas como control de la erosión y de inundaciones.

Finalmente, una perspectiva a futuro es monitorear la humedad del suelo y relacionarla con los rasgos funcionales de la vegetación plantada, pues esta variable es clave para evaluar la entrada de agua al suelo, que dentro del ciclo hidrológico, es un compartimiento importante pues allí se almacena y conduce el agua que eventualmente podrá recargar los afluentes.





## A. Anexo: Indicadores físicos y bióticos como aproximación al estudio de la capacidad de regulación hídrica de la cobertura vegetal.

Autor y año	Título	Tipo de Indicador	Variables
Aronson et al., 1993	Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semi-arid lands	Físico	Cantidad máxima de agua disponible en el suelo
		Físico	Coeficiente de eficiencia de la precipitación
		Físico	Eficiencia de uso de la precipitación
		Físico	Duración del período de disponibilidad de agua

Autor y año	Título	Tipo de Indicador	Variables
Aronson et al., 2007	Restoring natural capital: science, business, and practice	Físico, biótico	Patrón y velocidad de movimientos de agua y nutrientes. Medidas de la circulación del agua en una cuenca hidrográfica, incluyendo patrones de precipitación y escorrentía superficial, dinámica del nivel freático.
CAF, 2014	Guía para la gestión de recursos hídricos en cuencas de montaña bajo el efecto del cambio climático	Físico	Análisis estadístico de precipitación y escorrentía.
		Físico	Análisis de precipitación-escorrentía, balance hídrico actual, balance hídrico y análisis de sensibilidad al cambio climático.
		Físico	Análisis de las rupturas de homogeneidad del registro de precipitación y de temperatura, y análisis del cambio de medias estadísticas en el registro.
		Físico	Análisis de tendencias regionales en la concentración de la precipitación a través de registro pluviográfico de precipitación.

Autor y año	Título	Tipo de Indicador	Variables
CATIE, 2011	Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos	Biótico	Índices de diversidad funcional o grupos funcionales a partir de la medición de rasgos funcionales: forma y tasa de crecimiento, longevidad de la planta, arquitectura de la copa, clonalidad, rugosidad del tronco, características del xilema, tamaño, ángulo y longevidad de las hojas, contenido de materia seca, lignina, nitrógeno, fósforo o compuestos tóxicos activos en hojas, presencia de cubiertas de las hojas (pelos, etc.), dureza de las hojas, área foliar específica (SLA) o masa foliar por área (LMA), tasa de descomposición potencial de hojas y tallos, y arquitectura y profundidad de raíces. Todos estos atributos relacionados con procesos del ciclo hidrológico: evapotranspiración, interceptación, escurrimiento por el fuste, retención de agua en el suelo, retención de agua en la vegetación, retención de agua en hojarasca, balance entre evaporación, infiltración y escorrentía.
		Biótico	Índice de diversidad funcional basados en un rasgo, multirasgo incluyendo abundancia, multirasgo sin incluir abundancia, multirasgo multidimensionales.

Autor y año	Título	Tipo de Indicador	Variables
de Bello et al., 2010	Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits.	Biótico	Densidad y tamaño del dosel, área foliar, forma de crecimiento (anual versus perenne, vascular versus no vascular, leñosa versus hierbas, C4 versus C3), fenología foliar, profundidad de las raíces, conductancia estomática. Estos rasgos relacionados con el efecto de las plantas sobre la evapotranspiración, parte del ciclo hidrológico.
		Biótico	Densidad y tamaño del dosel, forma de crecimiento, cantidad de hojarasca. Rasgos relacionados con los procesos de infiltración y mantenimiento de humedad en el suelo, parte del ciclo hidrológico.
		Biótico	Complejidad y tamaño del dosel, diversidad y composición de las formas de crecimiento. Rasgos relacionados con el flujo superficial de agua y la escorrentía, procesos del ciclo hidrológico.
Pla et al., 2012	Quantifying functional biodiversity	Biótico	Determinación de grupos funcionales de plantas y su cambio a través de gradientes ponderando por aspectos ecológicos como área basal, abundancia o frecuencia de las especies.

<b>Autor y año</b>	<b>Título</b>	<b>Tipo de Indicador</b>	<b>Variables</b>
		Biótico	Índices de diversidad funcional monorasgo o multirasgo, ponderados o no. Permiten cuantificar el valor, rango, distribución y abundancia relativa de las características funcionales de las especies en una comunidad relacionadas con un proceso ecosistémico en particular

## B. Anexo: Rasgos funcionales medidos y su relación con procesos ecosistémicos asociados a la regulación hidrológica.

Rasgo funcional	Descripción	Proceso ecosistémico relacionado	Obtención	Referencias bibliográficas
<b>FOLIARES</b>				
Pubescencia	Presencia o ausencia de tricomas en la superficie de la hoja	Flujo de agua superficial, interceptación, escorrentía cortical, evapotranspiración	Información secundaria, campo	CATIE, 2011; Betts, 2013
Tipo de hoja	Morfología de la hoja: simple si es una sola lámina y compuesta si está dividida en secciones llamadas folíolos.	Flujo de agua superficial, interceptación, escorrentía cortical, evapotranspiración	Información secundaria, campo	CATIE, 2011; Betts, 2013; Salgado Negret, 2015
Área foliar (mm <sup>2</sup> )	Área de la lámina foliar proyectada	Flujo de agua superficial, interceptación, escorrentía cortical, evapotranspiración	Campo y laboratorio	Betts, 2013; Salgado-Negret, 2015; Pérez-Harguindeguy et al., 2016
Contenido de materia seca de la hoja (mg/g)	Masa seca al horno dividida entre masa fresca de una hoja saturada de agua.	Flujo de agua superficial, interceptación, escorrentía cortical, evapotranspiración	Campo y laboratorio	CATIE, 2011; Engst et al., 2016; Salgado-Negret, 2015; Pérez-Harguindeguy et al., 2016

Rasgo funcional	Descripción	Proceso ecosistémico relacionado	Obtención	Referencias bibliográficas
<b>ESTRUCTURALES</b>				
Textura corteza	Nivel de rugosidad de la corteza, medida como contraste entre píxeles de una fotografía en escala de grises de la corteza	Flujo de agua superficial y escorrentía cortical	Información secundaria, campo	Cabrera, 2006; CATIE, 2011,
Cobertura epífitas	Área de cobertura de epífitas (cm <sup>2</sup> ) dividida entre el área superficial del tronco principal del árbol	Interceptación de precipitación y neblina, escorrentía cortical	Campo	Pérez-Harguindeguy et al., 2016
Área de la copa (m <sup>2</sup> )	Área superficial de la copa calculada como el área de una elipse a partir de la longitud de un eje menor y uno mayor	Interceptación, escorrentía cortical, precipitación interna, evapotranspiración	Campo	de Bello et al., 2010; Castellanos, 2011
Densidad de la copa (%)	Cuánto representa el follaje respecto a los espacios abiertos en una fotografía del plano horizontal de la copa	Interceptación, escorrentía cortical, precipitación interna, evapotranspiración	Campo	de Bello et al., 2010; Pérez-Harguindeguy et al., 2016
Altura de la copa (m)	Distancia vertical del punto más alto de crecimiento al punto inferior de follaje vivo de la copa	Interceptación, escorrentía cortical, precipitación interna, evapotranspiración	Campo	Presente estudio
Densidad x Volumen de copa	Producto entre la densidad y el volumen de la copa. El volumen se calcula asumiendo que la copa de un árbol se asemeja a una forma cilíndrica.	Interceptación, escorrentía cortical, precipitación interna, evapotranspiración	Campo	Presente estudio

<b>Rasgo funcional</b>	<b>Descripción</b>	<b>Proceso ecosistémico relacionado</b>	<b>Obtención</b>	<b>Referencias bibliográficas</b>
Índice de ramificación (número ramificaciones/cm)	Número de ramificaciones vivas por unidad de longitud de la rama	Interceptación, escorrentía cortical, precipitación interna,	Información secundaria, campo	CATIE, 2011; Castellanos, 2011; Pérez-Harguindeguy et al., 2016
Densidad de la madera (mg/mm <sup>3</sup> )	Masa seca dividida entre el volumen fresco de la madera	Flujo de agua interno en la planta, transpiración	Campo y laboratorio	CATIE, 2011; Salgado-Negret, 2015
Frecuencia de vasos xilema (N° vasos/mm <sup>2</sup> )	Número de vasos de xilema en un área determinada.	Flujo de agua interno en la planta, transpiración	Campo y laboratorio	CATIE, 2011; Salgado-Negret, 2015
Diámetro de vasos xilema (mm)	Longitud entre extremos de la pared de los vasos de xilema medida en el plano transversal	Flujo de agua interno en la planta, transpiración	Campo y laboratorio	CATIE, 2011; Salgado-Negret, 2015



## C. Anexo: Protocolos de medición de rasgos funcionales

A continuación se detallan los protocolos para la medición de rasgos funcionales en campo y laboratorio que se emplearon en esta investigación.

**Pubescencia:** Se tomaron algunas muestras de hojas por especie, se secaron previamente al horno y se observaron por haz y envés a través del microscopio digital en un aumento de 40X para identificar la presencia de tricomas. Se registró presente para tricomas en haz y/o envés, ausente para hojas sin tricomas.

**Tipo de hoja:** en campo se observaron las hojas de varios individuos por especie y se determinó su complejidad a partir de la ubicación de la yema axilar. Se registró hoja simple para especies cuyas hojas tienen una sola lámina y compuesta si la hoja está dividida en secciones más pequeñas o folíolos (Salgado-Negret, 2015).

**Área foliar (mm<sup>2</sup>):** se tomaron 10 hojas de diferentes partes de la copa de 10 individuos por especie, se seleccionaron hojas totalmente expandidas y sin daños por herbívoros o patógenos. Las hojas colectadas se almacenaron temporalmente en bolsas plásticas resellables a las que se les retiró todo el aire para evitar que las hojas se desecaran rápidamente. El mismo día del muestreo se escanearon en un escáner de oficina y se analizaron posteriormente en el programa *Image J* (Schneider et al., 2012), en el cuál se calculó el área por hoja. Luego se calculó el valor promedio de área foliar de las 10 hojas por individuo. Para hojas compuestas se determinó el área de folíolos y peciolos por hoja compuesta y se sumaron para obtener el área foliar total de la hoja.

**Contenido de materia seca de la hoja (mg/g):** Se colectaron 10 hojas por individuo y se pesaron inmediatamente después de haber sido colectadas en una balanza de 0,01 g de

precisión. Posteriormente, las hojas fueron almacenadas en bolsas resellables y llevadas al laboratorio para ser escaneadas y luego secadas al horno a 60 °C durante 72 horas. Las hojas se pesaron nuevamente inmediatamente después de ser sacadas del horno y verificar que estuvieran secas completamente. Los valores de peso en fresco y peso seco se promediaron entre las 10 hojas por individuo. El contenido de materia seca se calculó dividiendo la masa seca entre la masa fresca de la hoja (Salgado-Negret, 2015; Pérez-Harguindeguy et al., 2016).

**Textura corteza:** Para determinar la textura de la corteza se tomaron fotografías de la corteza en las cuatro caras del tronco (norte, este, sur, oeste) de 5 individuos por especie. La fotografía se tomó a una altura de 1.30m y a una distancia de 7 cm desde el lente hasta la corteza. Las fotografías se procesaron con el programa *Image J* (Schneider et al., 2012), usando el plug in *GLCM texture analyzer* (Cabrera, 2005). A partir de este plugin se calculó el parámetro contraste, que consiste en la diferencia en niveles de gris entre píxeles en la fotografía que se convirtió previamente a 256 niveles de gris.

**Cobertura epífitas:** se midió la cobertura de epífitas en el tronco por medio de un acetato de 28 cm x 20 cm dividido en una cuadrícula con cuadros de 3 cm x 3cm. La cuadrícula fue ubicada a 1.30 m de altura y se estimó en cada una de las cuadrículas el porcentaje de cobertura de epífitas, luego se sumó la proporción de epífitas por cada cuadrícula. El procedimiento se realizó en todo el perímetro del tronco. El porcentaje de cobertura se extrapoló al área superficial del tronco dividiendo entre el área basal del individuo.

**Área de la copa (m<sup>2</sup>):** se midieron el eje mayor y el eje menor de la copa con una lienza en 5 individuos por especie. A partir de los ejes medidos se calculó el área de la copa con la fórmula del área de una elipse.

**Densidad de la copa (%):** se tomaron fotografías debajo de la copa de cada individuo en los cuatro puntos cardinales, a 1.30 m de altura al lado del tronco con la cámara frontal de un celular. Se usó un nivel de mano para garantizar que el celular quedara totalmente horizontal. Se tomaron fotos de 5 individuos por especie. Posteriormente las imágenes se procesaron en el programa *Image J* (Schneider et al., 2012), en el cual se convirtieron a imagen binaria y se midió el porcentaje de área en color negro (follaje).

**Altura de la copa (m):** se midió la altura de copa de 5 individuos por especie por medio de un Hipsómetro láser *Nikon Forestry Pro*.

**Densidad x Volumen de copa:** a partir de los datos de altura y área de la copa se calculó el volumen de la copa siguiendo la fórmula del volumen de un cilindro. Posteriormente el volumen de copa se multiplicó por la densidad de la copa descrita más arriba.

**Índice de ramificación:** Se midió la longitud de tres ramas por individuo y se contó el número de ramificaciones de primer nivel en la extensión de la rama medida previamente. Para calcular el índice se dividió el número de ramificaciones entre la longitud de la rama en metros (Pérez-Harguindeguy et al., 2016). El rasgo fue medido en 5 individuos por especie.

**Densidad de la madera (mg/mm<sup>3</sup>)** se tomó 1 trozo de una rama madura de 3 individuos por especie de aproximadamente 2 cm de diámetro, se removió la corteza inmediatamente y se almacenó en bolsas resellables (Chave, 2006). En el laboratorio se determinó el volumen verde de los trozos de madera por medio de una probeta con agua sobre una balanza, sumergiendo totalmente el trozo de madera en la probeta por medio de una aguja metálica y registrando el peso que marca la balanza. Este peso se puede convertir a volumen asumiendo que la densidad del agua es de 1 g/cm<sup>3</sup>. Posteriormente se llevaron los trozos de madera al horno a 60 °C durante 72 horas y se pesaron secos. Se llevaron nuevamente al horno por 24 horas y se pesaron otra vez, y se repitió este procedimiento hasta encontrar un peso estable. Para calcular la densidad de la madera se dividió el peso seco del trozo de madera entre su volumen (Salgado-Negret, 2015).

**Frecuencia de vasos xilema (N° vasos/mm<sup>2</sup>):** se tomó 1 trozo de una rama madura de aproximadamente 2 cm de diámetro de 3 individuos por especie, se removió la corteza inmediatamente y se almacenó en bolsas resellables (Chave, 2006). Posteriormente se secaron en el horno a 65 ° C durante 72 horas y se les realizó un corte transversal hasta que quedaran a nivel y se pulieron con papel de lija. Por medio de un microscopio digital y a un aumento de 40X se tomaron 5 fotografías del plano transversal del trozo donde se identifican vasos de xilema y se contó manualmente el número de vasos de xilema en el área de la fotografía. La frecuencia de vasos de xilema se promedió en cada fotografía y luego entre las 5 fotografías tomadas por individuo. El número de vasos de xilema se dividió entre el área del campo visual del microscopio digital.

**Diámetro de vasos xilema (mm):** se tomó 1 trozo de una rama madura de aproximadamente 2 cm de diámetro de 3 individuos por especie, se removió la corteza inmediatamente y se almacenó en bolsas resellables (Chave, 2006). Posteriormente se secaron en el horno a 65 ° C durante 72 horas y se les realizó un corte transversal hasta que quedaran a nivel y se pulieron con papel de lija. Por medio de un microscopio digital y a un aumento de 40X se tomaron 5 fotografías del plano transversal del trozo donde se identifican vasos de xilema. Usando la herramienta de medición del programa *Image J* (Schneider et al., 2012), se midió el diámetro de cada vaso de xilema en el área de fotografía desde los extremos de la pared celular. Se promedió el diámetro de todos los vasos de xilema de una misma fotografía.

## D. Anexo: Tabla distribución en las parcelas de los individuos instrumentados

Número de individuos instrumentados por parcela, distribuidos a partir de la abundancia relativa por especie en cada parcela. En total se instrumentaron 5 individuos por especie para un total de 50 individuos.

Especie	Número de individuos					
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4	Parcela 5	TOTAL
<i>Cedrela montana</i>	0	3	0	2	0	5
<i>Citharexylum subflavescens</i>	0	2	1	2	0	5
<i>Podocarpus rospigliosii</i>	1	0	2	2	0	5
<i>Myrsine coriacea</i>	4	0	0	1	0	5
<i>Alnus acuminata</i>	0	0	1	1	3	5
<i>Chamaesenna colombiana</i>	0	1	0	4	0	5
<i>Persea caerulea</i>	5	0	0	0	0	5
<i>Croton magdalenensis</i>	0	2	0	3	0	5
<i>Salix humboldtiana</i>	0	0	5	0	0	5
<i>Quercus humboldtii</i>	2	1	1	1	0	5
<b>TOTAL</b>	12	9	10	16	3	

## E. Anexo: Composición y abundancia relativa de especies en las parcelas de monitoreo

Abundancia total y relativa por parcela de 19 especies plantadas en predios de restauración ecológica, microcuenca San Pedro.

Especie	PARCELA										TOTAL
	1		2		3		4		5		
	Abund.	Abund relativa (%)	Abund.	Abund relativa (%)	Abund.	Abund relativa (%)	Abund.	Abund relativa (%)	Abund.	Abund relativa (%)	
<i>Aegiphila novogranatensis</i>	20	10,15	0	0	0	0	0	0	0	0	20
<i>Alnus acuminata</i>	0	0	2	1,61	6	6,52	7	8,64	16	19,75	31
<i>Cedrela montana</i>	13	6,60	17	13,71	3	3,26	6	7,41	0	0	39
<i>Chamaesenna colombiana</i>	0	0	6	4,84	6	6,52	15	18,52	1	1,23	28
<i>Citharexylum subflavescens</i>	7	3,55	13	10,48	8	8,70	10	12,35	13	16,05	51
<i>Clusia sp</i>	8	4,06	8	6,45	1	1,09	1	1,23	13	16,05	31
<i>Croton magdalenensis</i>	0	0	21	16,94	0	0	13	16,05	20	24,69	54
<i>Montanoa quadrangularis</i>	68	34,52	8	6,45	0	0	0	0	5	6,17	81
<i>Myrcia subsessilis</i>	0	0	6	4,84	0	0	0	0	0	0	6
<i>Myrcianthes sp</i>	0	0	3	2,42	0	0	3	3,70	0	0	6
<i>Myrsine coriacea</i>	27	13,71	2	1,61	3	3,26	6	7,41	0	0	38
<i>Podocarpus rospigliosii</i>	9	4,57	9	7,26	8	8,70	6	7,41	2	2,47	34
<i>Persea caerulea</i>	30	15,23	2	1,61	0	0	0	0	0	0	32
<i>Prunus integrifolia</i>	0	0	9	7,26	0	0	0	0	0	0	9
<i>Quercus humboldtii</i>	12	6,09	8	6,45	5	5,43	6	7,41	0	0	31
<i>Salix humboldtiana</i>	0	0	0	0	49	53,26	0	0	0	0	49
<i>Senna alata</i>	0	0	0	0	0	0	4	4,94	11	13,58	15
<i>Vismia guianensis</i>	1	0,51	10	8,06	2	2,17	0	0	0	0	13
<i>Weinmannia pubescens</i>	2	1,02	0	0	1	1,09	4	4,94	0	0	7
<b>Total individuos por parcela</b>	<b>197</b>	<b>100</b>	<b>124</b>	<b>100</b>	<b>92</b>	<b>100</b>	<b>81</b>	<b>100</b>	<b>81</b>	<b>100</b>	<b>630</b>

## Bibliografía

- Aguilar-garavito, M., & Ramírez, W. (2015). *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH).
- Ahmed, A., Tomar, J. M. S., Mehta, H., Alam, N. M., & Chaturvedi, O. P. (2015). Influence of canopy architecture on stemflow in agroforestry trees in Western Himalayas. *Current Science*, 109(4), 759–764.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad Nacional de Colombia, CORANTIOQUIA, & CORNARE. (2007). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá*. Retrieved from <http://www.metropol.gov.co/Planeacion/Paginas/pomca.aspx>
- Aronson, J., Milton, S. J., & Blignaut, J. N. (2007). *Restoring natural capital: science, business, and practice*. Society for Ecological Restoration. Washington DC: Island Press.
- Arroyave, M. del P., & Posada, M. I. (2010). Interacciones agua-suelo-vegetación. In A. del P. Contreras (Ed.), *Actualización del estado del arte del recurso hídrico en el departamento de Antioquia 2007 - 2009* (pp. 107–133). Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA.
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado-Barrientos, M. S., Rebel, K., Van Osch, F. P., Rietkerk, M., ... Dawson, T. E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant–water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1–3), 3–22. <http://doi.org/10.1093/jpe/rtr026>
- Benayas, R. J. M., Newton, A. C., Diaz, A., & Bullock, J. M. (2009). Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 325(5944), 1121–4. <http://doi.org/10.1126/science.1172460>
- Birch, J. C., Newton, a. C., Aquino, C. a., Cantarello, E., Echeverria, C., Kitzberger, T., ... Garavito, N. T. (2010). Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21925–21930. <http://doi.org/10.1073/pnas.1003369107>

- Block, W., Franklin, A., Ganey, J. L., Ward, J., & White, G. (2001). Design and Implementation of Monitoring Studies to Evaluate the Success of Ecological Restoration on Wildlife. *Restoration Ecology*, 9(3), 293–303.
- Brauman, K., Daily, G., Duarte, T., & Mooney, H. (2007). The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 67–98. <http://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Bruijnzeel, L. A. (2004). *Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment* (Vol. 104). <http://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>
- Burylo, M., Dutoit, T., & Rey, F. (2014). Species Traits as Practical Tools for Ecological Restoration of Marly Eroded Lands. *Restoration Ecology*, 22(5), 633–640. <http://doi.org/10.1111/rec.12113>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Cardinale, B. J., Palmer, M. A., & Collins, S. L. (2002). Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecies facilitation. *Nature*, 415(January), 426–429.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. (2011). *Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos*. (F. Casanoves, L. Pla, & J. Di Rienzo, Eds.) (Serie técn). Turrialba, Costa Rica.
- Chappell, N. A., Bidin, K., & Tych, W. (2001). Modelling rainfall and canopy controls on net-precipitation beneath selectively-logged tropical forest. *Plant Ecology*, 153(1–2), 215–229. <http://doi.org/10.1023/A:1017532411978>
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science (New York, N.Y.)*, 320(5882), 1458–60. <http://doi.org/10.1126/science.1155365>
- Cornelissen, J. H. C., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., ... Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement



- of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51(4), 335–380. <http://doi.org/10.1071/BT02124>
- Crockford, R. H., & Richardson, D. P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(April 1999), 2903–2920. [http://doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6](http://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6)
- de Bello, F., Lavorel, S., Díaz, S., Harrington, R., Cornelissen, J. H. C., Bardgett, R. D., ... Harrison, P. A. (2010). Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. *Biodiversity and Conservation*, 19(10), 2873–2893. <http://doi.org/10.1007/s10531-010-9850-9>
- de Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408. [http://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](http://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Díaz, S., & Cabido, M. (2001). Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(11), 646–655.
- Díaz, S., Hodgson, J. G., Thompson, K., Cabido, M., Cornelissen, J. H. C., Jalili, a., ... Zak, M. R. (2004). The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science*, 15(3), 295. [http://doi.org/10.1658/1100-9233\(2004\)015\[0295:TPTTDE\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1658/1100-9233(2004)015[0295:TPTTDE]2.0.CO;2)
- Díaz, S., Lavorel, S., de Bello, F., Quétier, F., Grigulis, K., & Robson, T. M. (2007). Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20684–9. <http://doi.org/10.1073/pnas.0704716104>
- Engst, K., Baasch, A., Erfmeier, A., Jandt, U., May, K., Schmiede, R., ... Souza, L. (2016). Functional community ecology meets restoration ecology: Assessing the restoration success of alluvial floodplain meadows with functional traits. *Journal of Applied Ecology*, 53(3), 751–764. <http://doi.org/10.1111/1365-2664.12623>
- Evans, K. ., & Guariguata, M. R. (2016). *Success from the ground up: Participatory monitoring and forest restoration* (Ocasional). Bogor, Indonesia: CIFOR. Retrieved from <http://www.cifor.org/library/6284/success-from-the-ground-up-participatory-monitoring-and-forest-restoration/>
- Funk, J. L., Cleland, E. E., Suding, K. N., & Zavaleta, E. S. (2008). Restoration through reassembly: plant traits and invasion resistance. *Trends in Ecology and Evolution*,

- 23(12), 695–703. <http://doi.org/10.1016/j.tree.2008.07.013>
- García-Leoz, V., Camilo Villegas, J., Suescún, D., Flórez, C. P., Merino-Martín, L., Betancur, T., ... Ignacio Lopez Moreno, J. (2017). Land cover effects on water balance partitioning in the Colombian Andes: improved water availability in early stages of natural vegetation recovery, (52). <http://doi.org/10.1007/s10113-017-1249-7>
- Garnier, E. R. I. C., Ortez, J. A. C., & Ille, G. E. B. (2004). Plant functional markers capture ecosystem properties. *America*, 85(9), 2630–2637.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.09.029>
- Goebes, P., Bruelheide, H., Härdtle, W., Kröber, W., Kühn, P., Li, Y., ... Scholten, T. (2015). Species-specific effects on throughfall kinetic energy in subtropical forest plantations are related to leaf traits and tree architecture. *PLoS ONE*, 10(6), 1–13. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0128084>
- Gonzaga, L. (2002). *Memorias: Hidrología Forestal (Influencia de los bosques)*. Medellín.
- Grime, J. P. (1998). Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. *Journal of Ecology*, 86, 902–910.
- Guariguata, M. R., & Ostertag, R. (2001). Neotropical secondary forest succession : changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management*, 148, 185–206.
- Guo, Z., Xiao, X., & Li, D. (2000). An assessment of ecosystem services: Water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications*, 10(3), 925–936. [http://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0925:AAOESW\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0925:AAOESW]2.0.CO;2)
- Hedberg, P., Saetre, P., Sundberg, S., Rydin, H., & Kotowski, W. (2013). A functional trait approach to fen restoration analysis. *Applied Vegetation Science*, 16(4), 658–666. <http://doi.org/10.1111/avsc.12042>
- Holl, K. D., & Aide, T. M. (2010). When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1558–1563. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004>
- Holl, K. D., & Howarth, R. B. (2000). Paying for restoration. *Restoration Ecology*, 8(3), 260–

267. <http://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2000.80037.x>
- Hooper, D. U., Chapin III, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti P., Lavorel, S., ... Wardle, D. A. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3–35. <http://doi.org/10.1890/04-0922>
- IDEAM. (2014). *Memoria técnica de la Cuantificación de la superficie de bosque natural y deforestación a nivel nacional. Actualización Periodo 2012 – 2013*. Bogotá D.C.
- Jain, M., Flynn, D. F. B., Prager, C. M., Hart, G. M., Devan, C. M., Ahrestani, F. S., ... Naeem, S. (2014). The importance of rare species: A trait-based assessment of rare species contributions to functional diversity and possible ecosystem function in tall-grass prairies. *Ecology and Evolution*, 4(1), 104–112. <http://doi.org/10.1002/ece3.915>
- Knoke, T., Paul, C., Hildebrandt, P., Calvas, B., Castro, L. M., Härtl, F., ... Bendix, J. (2016). Compositional diversity of rehabilitated tropical lands supports multiple ecosystem services and buffers uncertainties. *Nature Communications*, 7(September), 11877. <http://doi.org/10.1038/ncomms11877>
- Kramer, I., & Holscher, D. (2009). Rainfall partitioning along a tree diversity gradient in a deciduous old-growth forest in Central Germany. *Ecohydrology*, 2, 102–114. <http://doi.org/10.1002/eco>
- Lamb, D., Erskine, P. D., & Parrotta, J. a. (2005). Restoration of Degraded Tropical Forest Landscapes. *Science*, 310(December), 1628–1632. <http://doi.org/10.1126/science.1111773>
- Lavorel, S., Díaz, S., Cornelissen, J. H. C., Garnier, E., Harrison, S. P., McIntyre, S., ... Carlos, R. (2007). Plant Functional Types : Are We Getting Any Closer to the Holy Grail ? *Ecosystems*, (i).
- Lavorel, S., & Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16, 545–556.
- Lavorel, S., Grigulis, K., Lamarque, P., Colace, M. P., Garden, D., Girel, J., ... Douzet, R. (2011). Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. *Journal of Ecology*, 99(1), 135–147. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01753.x>
- Legates, D. R., Mahmood, R., Levia, D. F., DeLiberty, T. L., Quiring, S. M., Houser, C., & Nelson, F. E. (2011). Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 35(1), 65–86.

<http://doi.org/10.1177/0309133310386514>

- León, J. D. (2001). Estudio y control de la erosión hídrica.
- Levia, D. F., & Frost, E. E. (2003). A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *Journal of Hydrology*, 274(1–4), 1–29. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00399-2](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00399-2)
- Li, X., Xiao, Q., Niu, J., Dymond, S., van Doorn, N. S., Yu, X., ... Li, J. (2016). Process-based rainfall interception by small trees in Northern China: The effect of rainfall traits and crown structure characteristics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218–219, 65–73. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.017>
- Licata, J. A., Gyenge, J. E., Fernández, M. E., Schlichter, T. M., & Bond, B. J. (2008). Increased water use by ponderosa pine plantations in northwestern Patagonia, Argentina compared with native forest vegetation. *Forest Ecology and Management*, 255(3–4), 753–764. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.061>
- Loreau, M., & Hector, A. (2001). Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412(6842), 72–76. <http://doi.org/10.1038/35083573>
- Luck, G. W., Harrington, R., Harrison, P. A., Kremen, C., Berry, P. M., Bugter, R., ... Zobel, M. (2009). Quantifying the contribution of organisms to the provision of Ecosystem Services. *BioScience*, 59(3), 223–234. <http://doi.org/10.1025/bio.2009.59.3.7>
- Lyons, K. G., Brigham, C. A., Traut, B. H., & Schwartz, M. W. (2005). Rare species and ecosystem functioning. *Conservation Biology*, 19(4), 1019–1024. <http://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00106.x>
- MADS, & PNUD. (2014). *Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Colombia ante el Convenio de Diversidad Biológica*. Bogotá D.C., Colombia. Retrieved from <https://www.cbd.int/doc/world/co/co-nr-05-es.pdf>
- Mason, N. W. H., Mouillot, D., Lee, W. G., & Wilson, J. B. (2005). Functional richness, functional and functional evenness divergence: the primary of functional components diversity. *Oikos*, 111(1), 112–118. <http://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13886.x>
- Meli, P., Benayas, J. M. R., Balvanera, P., & Ramos, M. M. (2014). Restoration enhances wetland biodiversity and ecosystem service supply, but results are context-dependent: A meta-analysis. *PLoS ONE*, 9(4). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0093507>
- Meli, P., Holl, K. D., Rey Benayas, J. M., Jones, H. P., Jones, P. C., Montoya, D., ...

- Clarkson, B. (2017). A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *Plos One*, 12(2), e0171368. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0171368>
- Montoya, D., Rogers, L., & Memmott, J. (2012). Emerging perspectives in the restoration of biodiversity-based ecosystem services. *Trends in Ecology and Evolution*, 27(12), 666–672. <http://doi.org/10.1016/j.tree.2012.07.004>
- Morin, X., Fahse, L., Scherer-Lorenzen, M., & Bugmann, H. (2011). Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecology Letters*, 14(12), 1211–1219. <http://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01691.x>
- Murcia, C., & Guariguata, M. (2014). *La Restauración Ecológica en Colombia: Estado actual, tendencias, necesidades y oportunidades*. Center for International Forestry Research CIFOR).
- Ortega, L. F., León, J. D., & Villegas, J. C. (2014). *Evaluación comparativa del papel de diferentes coberturas vegetales sobre algunos servicios ecosistémicos en los Andes colombianos*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/49306/>
- Park, A., & Cameron, J. L. (2008). The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. *Forest Ecology and Management*, 255(5–6), 1915–1925. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.025>
- Patiño, J. F., León Peláez, J. D., Montes, L. A., & Hernández, L. C. (2007). Propuesta metodológica para comparar el efecto de diferentes coberturas vegetales en la regulación de caudales en cuencas hidrográficas. Aplicación en la microcuenca de la quebrada La Murciélago, Antioquia. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 15(Mayo), 89–100.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., ... Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 61, 167–234.
- Perrow, M., & Davy, A. (2002). *Handbook of Ecological Restoration, Restoration in practice*. *Journal of Environment Quality* (Vol. 2). Cambridge University Press. <http://doi.org/10.2134/jeq2004.2389>
- Petchey, O. L., & Gaston, K. J. (2006). Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecology Letters*, 9(6), 741–58. <http://doi.org/10.1111/j.1461->

0248.2006.00924.x

- Pla, L., Casanoves, F., & Di Rienzo, J. (2012). *Quantifying Functional Biodiversity* (Vol. 7). Springer. <http://doi.org/10.1007/978-94-007-2648-2>
- Poorter, L., & Bongers, F. (2006). Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species. *Ecology*, *87*(7), 1733–1743. [http://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[1733:LTAGPO\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[1733:LTAGPO]2.0.CO;2)
- Rodríguez-Iturbe, I., & Porporato, A. (2004). *Ecohydrology of Water-Controlled Ecosystems. Soil Moisture and Plant Dynamics*. New York: Cambridge University Press.
- Ruiz-Jaen, M. C., & Aide, T. M. (2005). Restoration success: How is it being measured? *Restoration Ecology*, *13*(3), 569–577. <http://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00072.x>
- Ruiz, O. A., Acosta, J. J., & León, J. D. (2005). Escorrentía superficial en bosques montanos naturales y plantados de Piedras Blancas, Antioquia (Colombia). *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín*, *58*(1), 2635–2649.
- Salazar, J. F., Villegas, J. C., Rendón, A. M., Rodríguez, E., Hoyos, I., Mercado-Bettín, D., & Poveda, G. (2018). Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a “forest reservoir.” *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(3), 1735–1748. <http://doi.org/10.5194/hess-22-1735-2018>
- Salgado Negret, B. (2015). *La Ecología Funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones. La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones*. IAvH.
- Schwartz, M. W., Brigham, C. A., Hoeksema, J. D., Lyons, K. G., Mills, M. H., & Van Mantgem, P. J. (2000). Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia*, *122*(3), 297–305. <http://doi.org/10.1007/s004420050035>
- Secretaría de Medio Ambiente de Medellín. (2011). *Proyecto “Más bosques para Medellín”, bajo las premisas de los incentivos ambientales tales como el pago por servicios ambientales, los mecanismos de desarrollo limpio dentro del protocolo de Kioto, entre otros*. Alcaldía de Medellín.

- Society for Ecological Restoration. (2004). *Principios de SER International sobre la Restauración Ecológica*. Society for Ecological Restoration International. Retrieved from [www.ser.org](http://www.ser.org)
- Suescún, D., León, J. D., & Villegas, J. C. (2015). *Pérdida de nutrientes en escorrentía y erosión: efecto combinado de la precipitación y cobertura vegetal en ecosistemas intervenidos de montañas tropicales*. Universidad Nacional de Colombia.
- Suganuma, M. S., & Durigan, G. (2014). Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. *Restoration Ecology*, 23(3), 238–251. <http://doi.org/10.1111/rec.12168>
- Vanclay, J. (2009). Managing water use from forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 257(2), 385–389. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.003>
- Vargas, O. (2007). *Guía metodológica para la restauración del Bosque Alto Andino*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Vargas, O. (2011). Restauración Ecológica: Biodiversidad y conservación. *Acta Biológica Colombiana*, 16(2), 221–246. Retrieved from <http://www.revista.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/19280>
- Vásquez, G. L., & Tobón, C. (2016). *Influencia del uso de la tierra en la respuesta hidrológica de cuencas de cabecera en Los Andes centrales de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Veneklaas, E. J., & Vanek, R. (1990). Rainfall Interception in 2 Tropical Montane Rain-Forests, Colombia. *Hydrological Processes*, 4(4), 311–326. <http://doi.org/10.1002/hyp.3360040403>
- Wang, S., Fu, B., Gao, G., Liu, Y., & Zhou, J. (2013). Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 101, 122–128. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.006>
- Westoby, M., Falster, D. S., Moles, A. T., Vesk, P. A., & Wright, I. J. (2002). P LANT E COLOGICAL S TRATEGIES: Some Leading Dimensions of Variation Between Species. *Most*. <http://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150452>
- Xiao, Q., McPherson, E. G., Ustin, S. L., & Grismer, M. E. (2000). A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research*, 105(D23), 29173–29188. <http://doi.org/10.1029/2000JD900343>
- Xiao, Q., & McPherson, G. G. (2011). Rainfall interception of three trees in Oakland, California. *Urban Ecosystems*, 14(4), 755–769.