



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Hidrología mención en Ecohidrología

**Interacciones entre índice de área foliar, densidad del dosel y precipitación efectiva de un bosque de *Polylepis reticulata* ubicado en un ecosistema de páramo.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magíster en Hidrología mención en Ecohidrología

**Autora:**

Amanda Magali Suqui Velásquez

CI: 1721055026

Correo electrónico: amandasuq.25@gmail.com

**Director:**

Ing. Galo José Carrillo Rojas, PhD.

CI: 0101799096

**Co-director:**

Ing. Rolando Enrique Célleri Alvear

CI: 0602794406

**Cuenca, Ecuador**

10-febrero-2021

**Resumen:**

La medición de la cobertura vegetal es fundamental para conocer qué porcentaje de la precipitación queda interceptada sobre la misma. Las técnicas más utilizadas para medir la cobertura *in situ* son: el índice de área foliar (IAF) y la densidad del dosel (DD). Sin embargo, no se ha puesto atención en las diferencias registradas en el uso de las dos técnicas ni cómo estas variables influyen sobre el balance hidrológico particularmente sobre la precipitación efectiva (PE). Por tal motivo, el objetivo del estudio es evaluar la relación entre las mediciones de la cobertura vegetal realizadas por los métodos de IAF y DD e identificar cómo se relacionan con la PE, importante para aplicaciones hidrológicas. El estudio se desarrolló en un bosque de *Polylepis reticulata* de 15633 m<sup>2</sup>, ubicado en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, sur de Ecuador, en un rango altitudinal de 3765 a 3809 m s.n.m. El IAF se midió con el equipo CI-110 Plant Canopy Imager y la DD con un densiómetro esférico, cubriendo un amplio rango de valores de cobertura de dosel. Para medir la PE se instrumentó al sitio de estudio con 9 pluviógrafos. Los resultados indican que el IAF y DD son en promedio 2.43 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> y 88% respectivamente; cuya relación resulta ser significativa ( $R^2= 0.913$ ;  $p<0.05$ ). La PE media anual es de 773.2 mm, que tiende a disminuir con el incremento del IAF y DD; aunque, su relación resulta estadísticamente no significativa (valores  $p>0.05$ ). Nuestro estudio muestra la importancia de caracterizar la cobertura vegetal, para entender la interacción con la PE.

**Palabras claves:** *Polylepis reticulata*. Índice de área foliar. Densidad del dosel. Precipitación efectiva.

**Abstract:**

The measurement of vegetation cover is fundamental to quantify the percentage of precipitation intercepted by it. The most widely techniques used to measure the cover in situ are: the leaf area index (LAI) and the canopy density (CD). However, no attention has been paid to the differences recorded in the use of the two techniques or how these variables influence the hydrological balance particularly on the throughfall (TF). For this reason, the objective of the study is to evaluate the relationship between vegetation cover measurements realized by the LAI and CD methods and to identify how they relate with the TF, important for hydrological applications. The study was developed in a *Polylepis reticulata* forest of 15633 m<sup>2</sup>, located at the Zhuruca Ecohydrological Observatory, south of Ecuador, in an altitudinal range of 3765 to 3809 m a.s.l. The LAI was measured with the CI-110 Plant Canopy Imager equipment and CD with a spherical densiometer, covering a wide range of canopy cover values. The study site was instrumented with 9 tipping-bucket rain gauges to measure TF. The results indicate that LAI and CD averages are 2.43 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> y 88% respectively; whose relationship is significant ( $R^2= 0.913$ ;  $p<0.05$ ). Mean annual TF is 773.2 mm, which tends to decrease with the increase of the LAI and CD; although, their relationship is not statistically significant ( $p\text{-value}>0.05$ ). Our study shows the importance of characterizing the vegetation cover, to understand the interaction with TF.

**Keywords:** *Polylepis reticulata*. Leaf area index. Canopy density. Throughfall.



## Índice

<b>Resumen:</b> .....	2
<b>Abstract:</b> .....	3
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	10
<b>2. SITIO DE ESTUDIO</b> .....	13
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	14
<b>3.1. Diseño del estudio</b> .....	14
<b>3.2. Medición de la densidad del dosel</b> .....	15
<b>3.3. Medición del índice de área foliar</b> .....	15
<b>3.4. Medición de precipitación efectiva</b> .....	16
<b>3.5. Relación entre DD, IAF y PE</b> .....	17
<b>4. RESULTADOS</b> .....	17
<b>4.1. Densidad del dosel</b> .....	17
<b>4.2. Índice de área foliar</b> .....	19
<b>4.3. Precipitación efectiva</b> .....	19
<b>4.4. Relación entre DD, IAF y PE</b> .....	21
<b>5. DISCUSIÓN</b> .....	22
<b>5.1. Caracterización de la cobertura del dosel</b> .....	22
<b>5.1.1. Estudios de índice de área foliar</b> .....	24
<b>5.1.2. Estudios de densidad del dosel</b> .....	24
<b>5.2. Variabilidad de la precipitación efectiva y relación con la cobertura del dosel</b> .....	26
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	29
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	31
<b>8. ANEXOS</b> .....	39



## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Área de estudio localizada en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay al Sur de Ecuador. ....	13
<b>Figura 2.</b> Variabilidad espacial de la densidad del dosel por el método de interpolación Kriging y sitios de muestreo de precipitación efectiva. ....	18
<b>Figura 3.</b> Porcentaje de densidad de dosel. ....	18
<b>Figura 4.</b> Índice de área foliar. ....	19
<b>Figura 5.</b> Precipitación efectiva diaria. ....	20
<b>Figura 6.</b> Relación entre índice de área foliar (IAF) y densidad del dosel (DD) (1-9 sitios de muestreo). ....	21
<b>Figura 7.</b> Relación entre a) índice de área foliar (IAF), b) densidad del dosel (DD) con la precipitación efectiva (PE) anual (1-9 sitios de muestreo). ....	22



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Amanda Magali Suqui Velásquez en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Interacciones entre índice de área foliar, densidad del dosel y precipitación efectiva de un bosque de *Polylepis reticulata* ubicado en un ecosistema de páramo**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 10 de febrero 2021

---

Amanda Magali Suqui Velásquez

C.I: 1721055026



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Amanda Magali Suqui Velásquez autora del trabajo de titulación “Interacciones entre índice de área foliar, densidad del dosel y precipitación efectiva de un bosque de *Polylepis reticulata* ubicado en un ecosistema de páramo”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, de 10 febrero de 2021

---

Amanda Magali Suqui Velásquez

C.I: 1721055026



## DEDICATORIA

Este logro va dedicado a Dios por darme fortaleza para seguir adelante e iluminar mi camino. A mis padres Benito y Enma por el apoyo incondicional brindado en cada momento de mi vida y durante el transcurso de este proceso de aprendizaje y crecimiento personal. A mis hermanos Marco, Jenniffer y a mi sobrino Liam que con su compañía ayudaron a amenizar mis situaciones de estrés. Finalmente, a mis amigos que me brindaron frases de aliento para animarme en los momentos difíciles.



## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio es el resultado de la Maestría en Hidrología con mención en Ecohidrología del Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Cuenca. Este estudio se ejecutó en el marco del proyecto “The Ecohydrologic functions of *Polylepis* forests within the Andean páramo and their resilience and their vulnerability to climate change”, financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y la Universidad de New Hampshire.

Quiero expresar mi más grande y profundo agradecimiento a los PhD. Galo Carrillo, Rolando Céleri y Patricio Crespo; quienes con su dirección, conocimiento y enseñanza me han encaminado durante el desarrollo y culminación de este trabajo de investigación. Un agradecimiento especial al Ing. Franklín Marín y al Blgo. Aldemar Carabajo por la ayuda y apoyo brindado durante las campañas de campo y principalmente por sus consejos. De igual manera, mis agradecimientos al Ing. Oswaldo Jadán de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Cuenca por su colaboración con los equipos para medir la cobertura del dosel.



## 1. INTRODUCCIÓN

La cobertura vegetal es un factor clave para comprender los ecosistemas tanto desde el punto de vista hidrológico y ecológico, pues desempeña un papel significativo en las relaciones bosque-agua (Levia et al., 2011), como en la transformación de energía solar en producción primaria (Hernández et al., 2003). De hecho, los bosques al presentar una amplia cobertura del dosel y alta rugosidad aerodinámica, provocan altas tasas de evaporación potencial (Gerrits et al., 2010). Esto quiere decir que la densidad de la cobertura, índice de área foliar, ángulo de inclinación y forma de las hojas inciden sobre los procesos hidrológicos como la intercepción (Crockford & Richardson, 2000; Fleischbein et al., 2005; Gerrits, 2010; Levia et al., 2011), evaporación, precipitación efectiva, e infiltración. La distribución heterogénea del dosel afecta la disposición de agua dentro del área forestal; en otras palabras, en algunos lugares dentro del bosque la lluvia puede alcanzar el suelo en mayor cantidad que en otros, pudiendo exceder la cantidad de precipitación bruta (Gerrits, 2010), debido a que el dosel y la estructura de las ramas canalizan la lluvia formando puntos de goteo que causan mayor intensidad de precipitación efectiva local (Germer et al., 2006; Gerrits, 2010).

Uno de los bosques más emblemáticos de los altos Andes son los bosques de *Polylepis*, los cuales se observan como ecotonos dispersos en el límite arbóreo. Aparecen en un rango altitudinal de 3000 a 5000 m s.n.m., especialmente en lugares protegidos por rocas o a lo largo de las riveras de los ríos (Domic et al., 2014), bajo condiciones ambientales extremas; el clima y la topografía han marcado la existencia de estos bosques como pequeños parches aislados (Rangel & Arellano, 2010; Renison et al., 2006). Bosques que por su alto endemismo son sensibles a cambios (Gareca et al., 2010), encontrándose dentro del grupo de ecosistemas con mayor amenaza (Herzog et al., 2002). Por lo que, es importante conocer su aporte en el balance hídrico dentro del páramo, puesto que la vegetación forestal es capaz



de interceptar mayor cantidad de agua que el pajonal, inclusive la que proviene de la neblina (Nisbet, 2005).

Es esencial la caracterización del dosel forestal dado que juega un papel fundamental en la partición de la precipitación bruta (precipitación efectiva, escorrentía cortical e intercepción) (Johnson & Lehmann, 2006; Levia & Herwitz, 2005; Park & Cameron, 2008), en el control de la evaporación y almacenamiento de agua (Levia et al., 2011). Además, una descripción detallada del dosel ha facilitado la predicción de las pérdidas de agua por intercepción (Molicova & Hubert, 1994). Existen dos métodos básicos de medición: a) el índice de área foliar (IAF) se refiere a la unidad de superficie ( $m^2 m^{-2}$ ) del suelo que se encuentra cubierto por la proyección vertical del dosel o área de las hojas (Jennings et al., 1999), b) densidad del dosel (DD) o cierre del dosel (%) es la proporción observada desde un punto único del hemisferio del cielo oscurecido por la vegetación (Jennings et al., 1999). Las mismas que difieren según el tipo de bosque, densidad, distribución espacial de los árboles, tipo y estructura de copa, estado fenológico de las especies, edad y tipo de manejo (Lieberman et al., 1989; Pukkala et al., 1991). En el caso de bosques de *Polylepis* estas variables han sido determinadas como parte de investigaciones. Por ejemplo, el IAF ha sido asociada a estudios de caída y descomposición de hojarasca (Pinos et al., 2017). Mientras, la DD ha permitido identificar: el efecto de la cobertura del dosel en la dinámica de las plantas (Cierjacks et al., 2007), su influencia en la avifauna (Tinoco et al., 2013) o la complejidad estructural del paisaje (Renison et al., 2011). Puesto que un sin número de estudios se han enfocado en temas como: su distribución en la Cordillera de los Andes (Gosling et al., 2009), historia y causas de fragmentación (Hoch & Körner, 2005; Kessler, 2002; Valencia et al., 2018), características morfológicas (Montalvo et al., 2018), composición florística, y problemas de regeneración (Domic et al., 2014; Morales et al., 2018) con la finalidad de entender y conocer las diferencias morfológicas entre especies de *Polylepis*; así también, conocer las condiciones ecológicas, climáticas en las que estos bosques se desarrollan y actividades que a través del tiempo han causado su fragmentación.

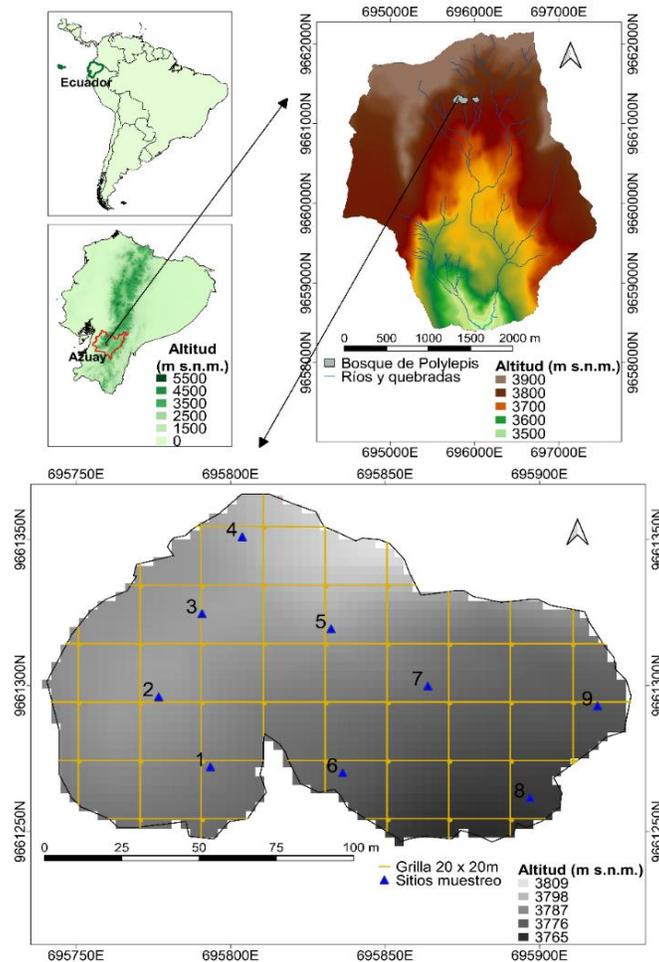


A escala de dosel ocurre dos procesos hidrológicos tan importantes como la precipitación: a) precipitación efectiva (PE) es la cantidad de agua que llega al suelo atravesando el dosel y/o la que cae por goteo después de haber estado en contacto con el follaje (Levia & Frost, 2006), y b) la intercepción es el agua retenida por hojas y ramas de la vegetación, reduciendo la cantidad de agua que alcanza el suelo (Gerrits, 2010). Las propiedades del evento de lluvia también inciden sobre estos procesos (Crockford & Richardson, 2000; Murakami, 2006); Por ejemplo, una sucesión de eventos con intervalos de periodo seco puede interceptar más agua que una tormenta, ya que parte del agua retenida en el dosel se vacía por evaporación, generando espacio para mayor almacenamiento (Levia et al., 2011). Algunos autores han encontrado que la PE varía de 60 a 95% de la precipitación bruta (Berger et al., 2008; Brauman et al., 2010; Germer et al., 2006; Zimmermann et al., 2007), mientras la intercepción puede representar una variación del 10 al 50% de la misma (Roth et al., 2007; Zhang et al., 2006). Variabilidad que afecta la infiltración, escorrentía, caudal y almacenamiento de agua; procesos consecutivos para completar el ciclo hidrológico (Tsiko et al., 2012). Escasos estudios han mostrado el rol de los bosques de *Polylepis* en la hidrología como el realizado por Alfaro (2015) en Perú y el de Harden et al. (2013) en Ecuador, que indican la influencia de bosques de *Polylepis racemosa* (especie introducida y con manejo) sobre la infiltración de agua en el suelo. Investigaciones sobre la precipitación efectiva y la intercepción de agua en el dosel han puesto mayor énfasis en bosques alto andino (Ramos & Armenteras, 2019), bosques montano bajo (Fleischbein et al., 2005; Wullaert et al., 2009), bosques montano tropical (Gomez-Peralta et al., 2008; Zimmermann et al., 2007) y bosque tropical templado (Oyarzún et al., 2011), facilitando la comprensión del balance hidrológico.

En síntesis, existe muy poca información sobre la relación entre características del dosel y estas a su vez con la cantidad de agua que alcanza el suelo en bosques altoandinos y más aún en bosques que se encuentran en el límite arbóreo, por lo que se desconoce el rol de la cobertura vegetal de los bosques de *Polylepis* en los procesos hidrológicos que se dan a escala de dosel. Por este motivo, el presente

estudio tiene como objetivo evaluar la relación entre las mediciones de la cobertura vegetal realizadas por los métodos de IAF y DD e identificar como se relaciona con la PE, lo cual es importante para aplicaciones hidrológicas.

## 2. SITIO DE ESTUDIO



**Figura 1.** Área de estudio localizada en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay al Sur de Ecuador.

El estudio fue ejecutado en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay donde existe un bosque de *Polylepis* de 15633 m<sup>2</sup>, que se encuentra en un rango altitudinal de 3765 a 3809 m s.n.m., con pendientes que varían de 10 a 50 %. La especie vegetal dominante es *Polylepis reticulata*, encontrando otras especies arbóreas como *Escallonia myrtiloides*, *Oreopanax* sp., *Weinmannia* sp., *Gynoxys* sp., especies de la familia de las Melastomataceae y arbustos como *Valeriana* sp. Los árboles de *Polylepis reticulata* pueden alcanzar una altura de 15 m, presentan troncos tortuosos



con varias ramificaciones, un diámetro altura al pecho de 33.58 cm y un área basal de 925.64 cm<sup>2</sup>. Las hojas son alternas que miden hasta 2.5 cm de largo y crecen conglomeradas en las puntas de las ramas, están conformadas por 3 o 5 folíolos elípticos.

El clima está influenciado por el régimen de humedad del Pacífico y masas de aire continentales que provienen de la cuenca del Amazonas (Córdova et al., 2013). La precipitación interanual se caracteriza por ser altamente uniforme, siendo ligeramente mayor en los meses de Enero a Julio; la precipitación media anual es de 1300 mm (Ochoa-Sánchez et al., 2018). La precipitación ocurre frecuentemente como llovizna que representa el 80% de los días lluviosos (Padrón et al., 2015). El rango medio de temperatura diaria es de 0.4 °C a 14.2 °C, con promedio anual de 6.1°C. La humedad relativa promedio anual es de 93.6%. El nivel de radiación solar es de 4942 MJm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> con una media diaria de 13.73 MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. La velocidad del viento sigue un patrón estacional con una media mensual de 3.21 m s<sup>-1</sup> para los meses de Octubre a Marzo y 4.77 m s<sup>-1</sup> de Junio a Septiembre (Carrillo et al., 2019). Esta zona presenta una evapotranspiración de referencia anual de 723 mm a una altitud de 3780 m s.n.m. (Córdova et al., 2015) y una evapotranspiración actual anual (Eta) de 622 mm (tasa media diaria de 1.7 mm) (Ochoa-Sánchez et al., 2019).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Diseño del estudio**

Como actividades previas a la ubicación y selección de los sitios definitivos para la medición de la PE, IAF y DD dentro del bosque de *Polylepis* y posteriormente para identificar las relaciones existentes entre estas variables, se realizó lo siguiente:

a) El área del bosque fue dividida en una grilla de 20 m x 20 m para determinar en cada punto de intersección el porcentaje de DD (proporción de cielo cubierto por la vegetación) con un densiómetro esférico cóncavo a la altura de los codos (1.20 m



sobre el suelo) y a una distancia de 30 cm del operador, método que se describe en la sección 3.2.

b) Con los valores obtenidos se caracterizó la variabilidad espacial de la DD del bosque, mediante varios métodos de interpolación como: Kriging ordinario (modelo esférico), ponderación de distancia inversa (IDW) y polígonos de Thiessen, se analizaron los errores de cada uno, seleccionando al método que se ajuste de mejor manera para representar la variabilidad de la DD.

c) A partir del mapa de la variabilidad espacial obtenido anteriormente se identificó la ubicación espacial de 9 sitios de muestreo distribuidos en valores bajos, medios y altos de DD, considerando a su vez el efecto de borde (Figura 1).

### **3.2. Medición de la densidad del dosel**

Una vez establecidos los sitios de muestreo para la medición de la PE se midió el porcentaje de DD sobre cada pluviógrafo. Para determinar esta variable se utilizó un densiómetro esférico constituido por un nivel de burbuja y un espejo cóncavo dividido por una grilla de 24 celdas cuadradas que refleja la luz incidente en un ángulo de 180°. Cada lectura consiste en la subdivisión mental de cada celda en 4 cuadrados que se representan mediante un punto imaginario en el centro, dando un total de 96 puntos centrales, que al encontrarse cubiertos por el reflejo de la cobertura vegetal son contabilizados. Se obtuvo un valor promedio de cuatro lecturas por sitio (dirección de los puntos cardinales), el mismo que para obtener el porcentaje de dosel se multiplica por 1.04 ( $1/96 \cdot 100$ ) (Cook et al., 1995; Lemmon 1956; 1957).

### **3.3. Medición del índice de área foliar**

La medición de IAF ( $m^2 m^{-2}$ ) se realizó en cada sitio donde fue medida la DD. Se usó el equipo óptico CI-110 Plant Canopy Imager, que consiste de una cámara de 8 megapíxeles equipada con un lente hemisférico (ojo de pez) de un ángulo de 170°. El software se basa en el cálculo de la fracción del cielo visible bajo el dosel



utilizando el procedimiento de Gap-Fraction Inversion (Norman y Campbell, 1989), de acuerdo a tres ecuaciones principales: coeficiente de transmisión para el ingreso de radiación difusa, coeficientes de extinción del dosel (IAF) y el ángulo medio de inclinación del follaje. Las imágenes del dosel se fraccionan en divisiones cenital y azimutal (sectores de dosel). La fracción de cielo (coeficiente de transmisión del haz solar) visible en cada división se analiza contando la porción de cielo de los píxeles de la imagen. Entonces, el equipo captura imágenes de amplio ángulo del dosel mientras estima el IAF y mide los niveles de radiación fotosintéticamente activa (PAR) por sitio de muestreo. Las imágenes se actualizan en vivo en el monitor incorporado, proporcionando datos instantáneos para verificación y análisis con el software integrado. El IAF se representa por valores que varían de 0 a 10, donde 0 equivale a un área sin dosel o suelo desnudo y 10 representa un dosel denso (Bio-Science, 2016). Las condiciones óptimas del cielo para las mediciones deben ser bajo una cubierta uniforme de nubes durante la mañana o al final de la tarde (cantidad de radiación baja) (Bio-Science, 2016).

### **3.4. Medición de precipitación efectiva**

Para medir la PE se instalaron 9 pluviógrafos automáticos de resolución de 0.2 mm a una altura sobre el suelo de 1.20 m. Los registros fueron agregados para tener una base de datos con frecuencia de 5 minutos. Los pluviógrafos fueron calibrados *in situ* y sobre cada uno se colocó una malla plástica para recoger la hojarasca y así evitar su taponamiento. La descarga de datos, mantenimiento y limpieza de los equipos instalados se realizó semanalmente a partir del 9 de Marzo de 2019 hasta el 8 de Marzo de 2020.

La cantidad de PE corresponde a la acumulación diaria y anual de los valores registrados por los pluviógrafos en cada punto de muestreo dentro del bosque. En caso de pérdida de datos por falla en la descarga o por taponamiento, se realizó un relleno de datos diarios mediante el método de regresión lineal de los valores del pluviógrafo que presentó pérdida de datos con el pluviógrafo que mostró la mejor



correlación. El mayor porcentaje de datos perdidos se encontró en el pluviógrafo del sitio 2 con un 3.6%, cabe recalcar que este procedimiento no afectó los resultados debido a que no sobrepasa el límite aceptable de datos perdidos (10%).

### 3.5. Relación entre DD, IAF y PE.

Primero se comparó la DD con el IAF mediante correlación. Esto con el objeto de conocer si estas dos variables muestran la misma información con respecto a la cobertura del dosel. Luego se realizaron correlaciones y regresiones lineales de la DD y el IAF con la PE para conocer qué variable permite identificar la variabilidad de la PE referente al dosel del bosque.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Densidad del dosel

La variabilidad espacial del dosel modelada, mediante el uso de los 37 puntos de intersección de una grilla de 20 x 20, demostró mejor ajuste y fidelidad con las características del terreno al emplear interpolación por el método de Kriging que con respecto a IDW y a Polígonos de Thiessen (grilla 10 x 10 m). Tal método se ajustó de mejor manera a los datos, presentando los errores más bajos (Tabla 1).

**Tabla 1.** Índices de eficiencia de métodos de interpolación

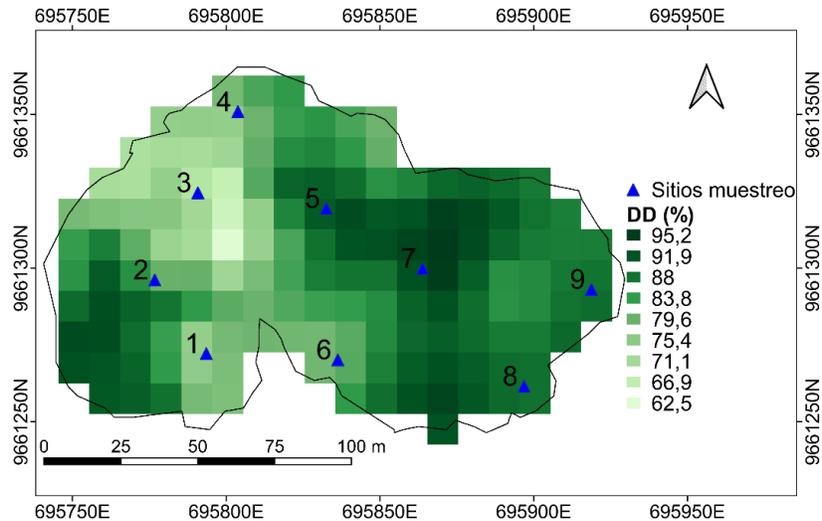
Índices de eficiencia	Kriging ordinario	IDW	Thiessen
<b>MSE</b>	56.59	57.8	58.56
<b>r obs-pred</b>	0.49	0.48	0.47
<b>RMSE</b>	7.52	7.60	7.65
<b>Varianza residual</b>	58.15	59.4	60.18

\*r obs-pred= correlación entre datos observados y predichos.

\* MSE= error medio cuadrático.

\*RMSE= raíz del error medio cuadrático.

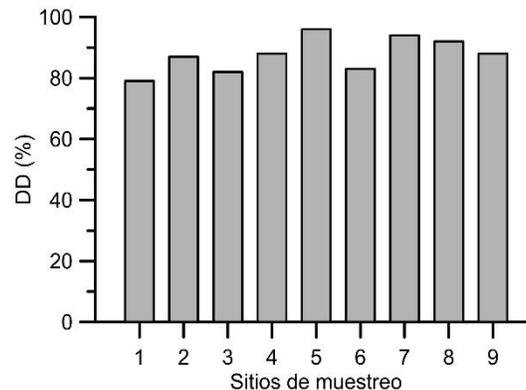
En la Figura 2 se observa que la DD del bosque de *Polylepis* presenta un rango de variación espacial entre 62.5% hasta 95.2%. En ciertas zonas predominan valores entre 87 a 91%, que representan aproximadamente un área de 550 m<sup>2</sup>.



**Figura 2.** Variabilidad espacial de la densidad del dosel por el método de interpolación Kriging y sitios de muestreo de precipitación efectiva.

Como se indicó en la sección 3.4, se consideraron 9 sitios de muestreo para PE, donde también se midió la DD e IAF (Sitios muestreo 1-9; Figura 2).

En la Figura 3 se observa que el porcentaje de DD en los 9 sitios varía en un rango de 79% (sitio 1) a 96% (sitio 5). El valor promedio del porcentaje de DD fue de  $88 \pm 5.8$  %. El coeficiente de variación resultó bajo, sin superar el 10%, lo cual indica homogeneidad en los datos.



**Figura 3.** Porcentaje de densidad de dosel.

## 4.2. Índice de área foliar

Tal como se muestra en la Figura 4 el IAF estimado en los 9 sitios de muestreo varía entre  $2.05 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  (sitio 1) y  $2.79 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  (sitio 5), con un promedio de  $2.43 \pm 0.25 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ . De manera análoga con la DD, el coeficiente de variación fue de 10%, confirmando una baja variabilidad de IAF dentro del bosque.

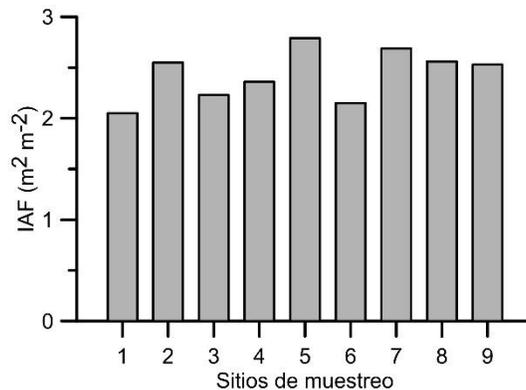


Figura 4. Índice de área foliar.

## 4.3. Precipitación efectiva

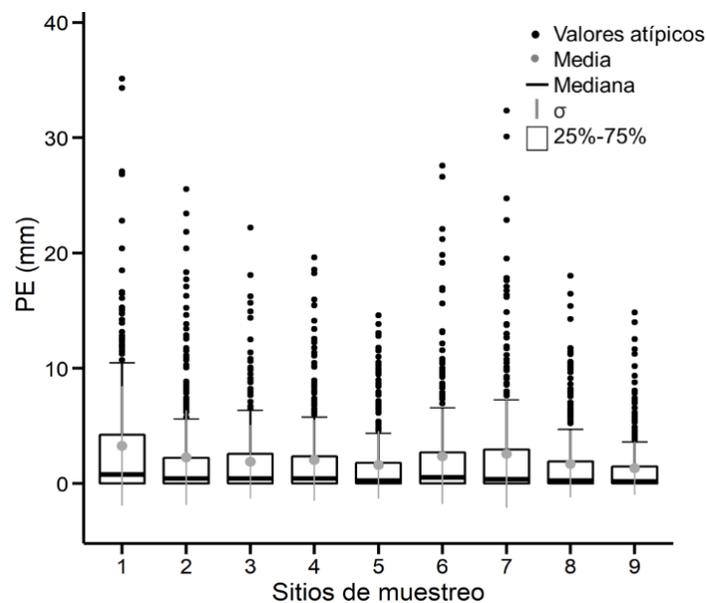
La PE media anual estimada mediante pluviógrafos en 9 sitios del bosque de *Polylepis* (periodo de 9 de Marzo de 2019 al 8 de Marzo de 2020) fue de  $773.2 \text{ mm año}^{-1} \pm 212.6$  con una media diaria de  $2.1 \pm 0.58 \text{ mm día}^{-1}$  (Tabla 1). La cantidad anual de PE varía entre 484.9 a  $1191.6 \text{ mm año}^{-1}$ , y la cantidad media diaria anual presentó una variación de 1.3 a  $3.3 \text{ mm día}^{-1}$ , valores que corresponden al sitio 9 y 1 respectivamente (Tabla 2 y Figura 5).

El coeficiente de variación tanto para valores acumulados anual como para valores de media diaria anual de todos los sitios representa el 28% de variabilidad. Al analizar la PE diaria anual en cada sitio de muestreo se observa que los datos reportan un CV de 160% (sitio 1) hasta 180% (sitios 2, 5 y 8), lo que indica que la PE en el bosque en estudio presenta alta heterogeneidad.

**Tabla 2.** Precipitación efectiva (PE) acumulada anual, media diaria anual, desviación estándar ( $\sigma$ ) diaria anual y coeficiente de variación (CV) diario anual.

Sitio de muestreo	PE anual (mm año <sup>-1</sup> )	PE media diaria anual (mm día <sup>-1</sup> )	$\sigma$ diaria anual	CV diario anual (%)
1	1191.6	3.3	5.2	160
2	825.4	2.3	4.1	180
3	694.5	1.9	3.2	170
4	743.0	2.0	3.5	170
5	592.7	1.6	2.9	180
6	862.5	2.4	4.1	170
7	944.9	2.6	4.7	180
8	619.1	1.7	2.9	170
9	484.9	1.3	2.3	170
$\bar{x}$	773.2	2.1		
$\sigma$	212.6	0.58	3.8	
CV	28	28		180

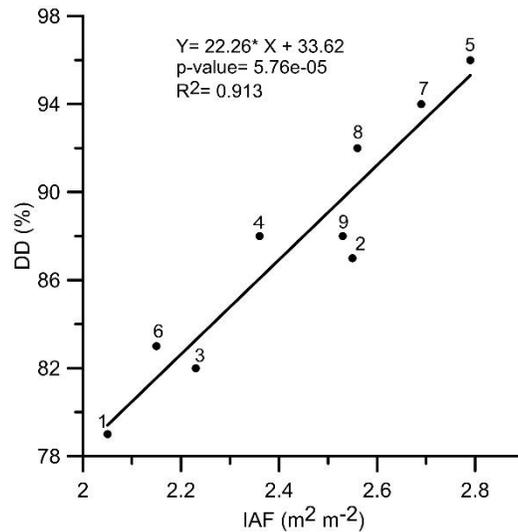
En la Figura 5 se observa que los diagramas de caja para los sitios de estudio presentan valores atípicos que se concentran sobre el límite superior, posiblemente como respuesta a eventos particulares de precipitación, que en este caso son eventos diarios que superan los 10mm.



**Figura 5.** Precipitación efectiva diaria.

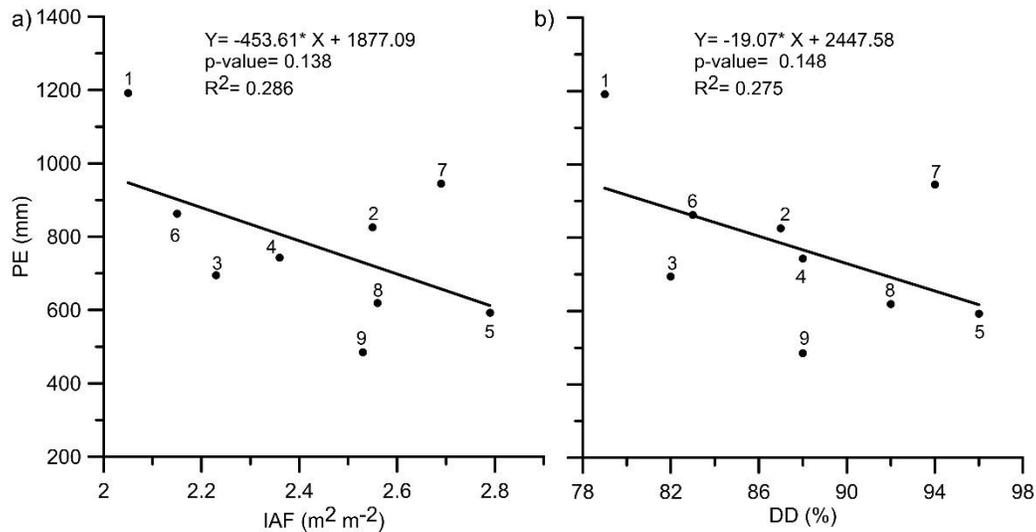
#### 4.4. Relación entre DD, IAF y PE

Como se esperaba, la correlación entre el IAF y la DD es altamente significativa con un valor  $p < 0.05$  y un coeficiente  $R^2$  de 0.913. En la Figura 6 se observa que la DD tiende a incrementar con el aumento del IAF.



**Figura 6.** Relación entre índice de área foliar (IAF) y densidad del dosel (DD) (1-9 sitios de muestreo).

Los coeficientes de correlación indican la existencia de una relación inversa entre las variables de cobertura vegetal (IAF y DD) con la PE, reportando valores de -0.535 y -0.524 respectivamente; como se esperaba, la PE tiende a disminuir con el incremento de la DD o IAF (Figura 7). Sin embargo, los valores  $p > 0.05$  de la correlación con la PE anual indican que la relación resulta ser no significativa. Al aplicar el método de regresión lineal se encontró coeficientes  $R^2$  bajos de 0.286 y 0.275 que indican la poca dependencia o respuesta de la PE anual a estas variables de cobertura del dosel.



**Figura 7.** Relación entre a) índice de área foliar (IAF), b) densidad del dosel (DD) con la precipitación efectiva (PE) anual (1-9 sitios de muestreo).

Por otro lado, la correlación entre la cobertura del dosel con la PE diaria refleja que solo el 18% de los días (65 días) con respecto al periodo de muestreo (366 días, presenta una relación inversa significativa con la DD y el 21% (76 días) con el IAF (Anexo 1 y 2), reportando valores  $p < 0.05$ . A una resolución mensual la PE únicamente 4 meses (Marzo, Abril, Octubre, Noviembre) se correlacionan significativamente con la DD y IAF (Anexo 3).

## 5. DISCUSIÓN

La información sobre el IAF, DD, PE y la relación existente entre tales variables para el bosque de *Polylepis reticulata* analizado, se convierte en información importante para los bosques altoandinos; facilita la comprensión y sienta una línea base sobre el rol que tiene la vegetación en procesos hidrológicos que suceden en bosques de páramo.

### 5.1. Caracterización de la cobertura del dosel

Múltiples investigaciones realizadas en bosques de ecosistemas andinos revelan valores de IAF y DD (Tabla 2). Tales estudios también caracterizan la cobertura del dosel y la relación con diferentes funciones ecológicas.

**Tabla 2.** IAF y DD de bosques localizados en ecosistemas andinos.

<b>Ecosistema y tipo de bosque</b>	<b>Sitio de estudio y elevación (m s.n.m.)</b>	<b>Medición IAF (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Medición DD (%)</b>	<b>Referencia</b>
Páramo: Bosque de <i>Polylepis reticulata</i>	Ecuador, Cuenca del Río Zhurucay, (3765 – 3809)	2.05 - 2.79	79 - 96	Presente estudio
Páramo: Bosque <i>Polylepis reticulata</i>	Ecuador, Parque Nacional Cajas, (3735 – 3930)	2.60 - 6.17		Pinos et al., 2017
Páramo: Bosque de <i>Polylepis pauta e incana</i>	Ecuador, Papallacta, (3500 – 4100)		46.7 - 75	Cierjacks et al., 2007
Páramo: Bosque de <i>Polylepis australis</i>	Argentina, Córdoba, (1400 – 2500)		8 - 72	Renison et al., 2011
Páramo: Plantación de pino	Ecuador, Azuay, (3500 – 3700)	0.23 - 2.22	5.5 - 74.7	Alvarado & Muñoz, 2017
Páramo: Plantación de pino	Ecuador, Azuay, (3600 – 3800)		19.3 - 64.8	Quiroz et al., 2019
Páramo: Plantación de pino Bosque montano alto	Ecuador, Azuay, (3800 y 2500)	5.5 y 0.2		Jadán et al., 2019
Bosques siempreverdes montano alto y bajo	Ecuador, Azuay, (2000 – 3800)	1.6 - 2.5	53 - 72	Alvarado & Cobos, 2019
Bosque montano bajo	Ecuador, Loja - Zamora, (1900 – 2000)	5.2 - 9.3		Fleischbein et al., 2005
Bosque montano tropical	Ecuador, Loja, (1050 – 3060)	5.1 - 2.9		Moser et al., 2007
Bosque montano tropical nublado	Perú, Parque Nacional Yanachaga-Chemillén, (2815 – 2468)	2.5 - 2.9	87.9 - 90.7	Gomez-Peralta et al., 2008



### 5.1.1. Estudios de índice de área foliar

Los valores de IAF del bosque de *Polylepis* estudiado se encuentran dentro de los valores inferiores reportados por Pinos et al. (2017) para bosques de *Polylepis reticulata* en el Parque Nacional Cajas, que presentan un IAF entre 2.60 a 6.17 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> (media de 3.96 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>). Esta diferencia puede deberse al método utilizado para la determinación del IAF, ya que el autor empleó área foliar específica y densidad de árboles por parcela de estudio. En estudios realizados en plantaciones de pino establecidas en ecosistemas de páramo, Alvarado & Muñoz (2017) reportan un rango de IAF de 0.23 a 2.22 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> (media de 0.92 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), valores que resultan ser menores a los encontrados en este estudio, posiblemente debido a la forma de las hojas y densidad de la plantación. Así también, Jadán et al. (2019) registraron valores muy bajos de IAF (0.2 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>) en plantaciones de similar especie y un IAF de 5.5 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> en bosques montano alto, que resulta mayor a lo encontrado. En un estudio realizado en bosques siempreverdes montano alto y bajo localizados al sur de Ecuador, Alvarado & Cobos (2019) reportan resultados de IAF con una variabilidad menor a la del presente estudio. Fleischbein et al. (2005) indican que un bosque montano bajo al sur de Ecuador presenta un IAF entre 5.2 y 9.3 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup> (media de 7.3 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>), valores más altos que los identificados en el presente estudio. Moser et al. en el 2007 en bosques montano tropical al sur de Ecuador, indican que al incrementar la altitud el tamaño de las hojas es menor; por consiguiente, el IAF disminuye. Gomez-Peralta et al. (2008) en bosques montano tropical del Perú, encontraron que el IAF es de 2.5 ± 0.7 a 2.9 ± 0.2 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, valores que resultan ser mayores a los encontrados en el bosque de *Polylepis*.

### 5.1.2. Estudios de densidad del dosel

Estudios realizados en *Polylepis* han determinado un porcentaje de DD; como es el caso del estudio desarrollado por Cierjacks et al. (2007) en bosques de *Polylepis pauta* e *incana*, en los que se encontró valores de 46.7 % cerca del borde y de 65 - 75 % en la parte interna del bosque, datos que resultan ser menores a los de nuestro



estudio tanto cerca del borde (79, 83 y 88%; sitios 1,6 y 9) como en la parte interna del bosque (94 - 96%; sitio 7 y 5). De igual manera, Renison et al. (2011) en un bosque de *Polylepis australis* identificaron que la variabilidad de DD es menor a la encontrada en el presente estudio con porcentajes de 8, 23, 54 y hasta un 72%. Esto puede deberse a que los resultados de los estudios mencionados presentan un sesgo de subjetividad que los obtenidos en nuestro estudio, debido a que fueron determinados de forma visual, método que depende completamente de la experiencia del técnico. En plantaciones de pino ubicadas en ecosistemas de páramo, Alvarado & Muñoz (2017) reportan que estos bosques presentan un rango de DD de 5.5 a 74.7 % (media de 44.5 %). Al igual, Quiroz et al. (2019) en su investigación presenta porcentajes de DD (19.3% - 64.8%) menores a los encontrados en el sitio de estudio. En bosques siempreverdes montano alto y bajo localizados al sur de Ecuador, se registraron promedios de DD de  $53 \pm 4\%$  y  $72 \pm 3.2\%$  valores más bajos a los encontrados en el presente estudio (Alvarado & Cobos, 2019). El estudio realizado por Gomez-Peralta et al. (2008), en un bosque montano tropical del Perú presenta similitudes en los valores de DD ( $87.9\% \pm 6.2$  a  $90.7\% \pm 1.6$ ) con los datos reportados en el bosque de *Polylepis*.

De acuerdo a lo observado, la poca similitud tanto del IAF como del porcentaje de DD entre bosques, se debe a que tales variables dependen de condiciones propias del sitio, las que generalmente influyen sobre el desarrollo y características de cada especie arbórea. Parámetros influyentes son: El tamaño de hoja, densidad de árboles por unidad de superficie, arquitectura y estructura de ramas y la topografía; por lo que pueden variar significativamente de un sitio a otro, así se trate de la misma especie forestal.

La estrecha relación entre IAF y DD queda evidenciada mediante análisis de regresión, revelando una fuerte proporcionalidad entre ambas variables, lo que concuerda con el estudio realizado por Buckley et al. en 1999, en el que reportan un  $R^2$  de 0.93 y 0.99 en bosques de roble y pino, explicando que esto es debido a que los bosques de estudio presentan una estructura uniforme. Sin embargo, este



autor también comenta que la relación entre las variables puede cambiar cuando existe diferencias entre las especies forestales, arquitectura de la copa y etapa de desarrollo.

## **5.2. Variabilidad de la precipitación efectiva y relación con la cobertura del dosel**

En este estudio se evidenció que la PE dentro del bosque de *Polylepis* fue heterogénea. La literatura no reporta otro estudio de PE realizado en bosques de *Polylepis*. Estudios realizados en bosques tropicales premontano (Teale et al., 2014), bosque montano bajo (Fleischbein et al. 2005) y en un bosque mixto de roble (Staelens et al. 2006), también encontraron que la PE es muy variable. Estos estudios dan una posible explicación de que esta variable se encuentra influenciada por la arquitectura del dosel, características morfológicas de las hojas y en algunos casos por una mayor carga de epífitas sobre el dosel que pueden generar más puntos de goteo, lo que conlleva a una mayor variabilidad de PE. De igual manera el estudio realizado por Zimmermann et al. (2007) explica que la variabilidad espacial depende principalmente de la complejidad del dosel y es influenciada por el número de especies por área, altura irregular, presencia de epífitas, edad, estructura y disposición de los árboles. Otra posible explicación es que la PE también depende de la profundidad de los eventos de precipitación, razón por la que la variabilidad espacial de PE incrementa, sugiriendo que los patrones espaciales del volumen de PE pueden ser independientes del ecosistema. Germer et al. (2006) y Roth et al. (2007) muestran que existe características como la diversidad en las especies, el tamaño y la estructura de la vegetación que dan como resultado la distribución de la lluvia, los puntos de goteo y almacenaje localizado en el dosel inferior produciendo patrones espacialmente heterogéneos. Algo similar muestran Zimmermann et al. (2009) y Macinnis et al. (2014) en sus estudios, pues es la vegetación la que influye en el movimiento del agua a través del dosel, ya que ciertas formas o su distribución dentro del área forestal pueden crear puntos de goteo. Además, otros estudios como el de Zimmermann et al. (2008) indican que la



PE se ve afectada por las condiciones antecedentes del dosel como es la humedad. En nuestro estudio, el coeficiente de variación diario anual resulta ser mayor que el acumulado anual. Carlyle-Moses & Price (2007) explica que cuando la PE se observa en una resolución temporal de menor agregación, como es el caso de una agregación diaria o por eventos, este valor se encuentra influenciado por las condiciones de intensidad de la precipitación bruta, e incluso llega a depender de las condiciones del viento. El coeficiente de variación de la PE puede incrementar o disminuir cuando la intensidad de la lluvia es su principal factor de cambio (Weiqing et al., 2007).

A pesar que en el presente estudio las correlaciones encontradas entre las variables IAF, DD y la PE no se muestran estadísticamente significativas, los resultados evidencian una proporcionalidad inversa entre las variables de cobertura del dosel y la PE, lo que concuerda con previas investigaciones en las que reportan que, a medida que aumenta IAF, la PE tiende a disminuir (Llorens & Gallart, 2000; Loescher et al., 2002; Nadkarni & Sumera, 2004). Del mismo modo, Holwerd et al. (2006) indican que la PE en un bosque de Puerto Rico fue mayor en zonas con bajas cantidades de dosel, debido a que una superficie de dosel más pequeña se correlaciona con una menor cantidad de agua interceptada. En el estudio realizado por Fleischbein et al. (2005) se reporta una correlación negativa entre IAF y PE (Pearson  $r = -0.49$ ) coeficiente ligeramente menor al encontrado en nuestro trabajo. Sin embargo, al comparar con la interceptación, Fleischbein et al. (2005) muestra que el IAF solamente explica el 12% de la variación, atribuyendo a que el área de cobertura vegetal medida sobre los colectores de PE es mayor al área del colector. De este modo, la diferencia de área de captura de los medidores de PE y el área cubierta por los equipos de IAF y DD podrían explicar la variabilidad de la interceptación, o en nuestro caso la variación de PE en valores similares de IAF y los bajos coeficientes de determinación entre las variables de cobertura de dosel con la PE. La comparación de los resultados con el estudio de Teale et al. (2014) en un bosque de Costa Rica, confirma que la relación entre IAF y PE es estadísticamente no significativa, probablemente debido a que las localidades con similar IAF pueden



tener diferente configuración del tipo de hoja, cobertura de madera, orientación del follaje y ramas entre otras características que forman puntos de retención y puntos de goteo. Por tal razón, es claro que la vegetación influye en la forma en que el agua se mueve a través del dosel; si bien la PE generalmente es menor que la precipitación bruta, ciertos arreglos y formas de vegetación pueden crear puntos de goteo logrando exceder en gran medida a la precipitación. En general, los resultados de los estudios que intentaron relacionar la cobertura del dosel o las características de la vegetación con la PE han sido débiles (Keim et al., 2005). De igual manera lo indica Zimmermann et al. (2009), al hablar de la relación entre la apertura del dosel y la PE en los puntos de medición, donde se observa más débil a medida que aumenta la magnitud del evento de precipitación. En un estudio realizado por Molina et al. (2019) en bosques de pino y roble, indica que la PE no presenta una relación significativa cuando los valores de DD son menores al 60%. Sin embargo, al incrementar esta variable en un rango de 60 a 100% se observa un patrón significativo de disminución de la PE con el incremento de la DD, mostrando una correlación negativa de 0.51 y 0.61 respectivamente. Autores como Park & Cameron (2008) encontraron que existe una interacción entre los impactos que producen las características del dosel en la PE con la influencia de las características del evento de precipitación; sin embargo, mediante el análisis estadístico no se pudo identificar ningún patrón. Levia et al. (2011) indica que los patrones espaciales de la PE varían notablemente entre ecosistemas por lo que no es posible identificar una relación entre el dosel y la PE.

Como anteriormente ha sido mencionado por varios autores, la posible explicación a la relación no significativa entre las variables de cobertura del dosel y la PE, es que este proceso hidrológico no depende solo de la DD o IAF, ya que existen otros factores tanto de la vegetación (estructura, arquitectura de las ramas, densidad, edad, ángulo de inclinación de las hojas) como climáticos (intensidad de la lluvia y viento).



Por otro lado, estudios realizados en bosques deciduos resaltan el efecto de la dinámica del follaje sobre la PE, debido a que presentan períodos notables de pérdida de hojas, siendo lo contrario en bosques perennifolios (permanecen con hojas durante todo el año) como es el caso de *Polylepis*. Sin embargo, es claro que su follaje presenta una dinámica que consiste en desfronde y renovación de las hojas, como lo indica Pinos en 2014, reportando que bosques de *Polylepis* presentan tasas de desfronde de  $0.61 \text{ año}^{-1}$  y el período de renovación foliar se da en 1.75 años. Por esta razón, esta dinámica debería ser tomada en cuenta para futuras investigaciones, con un mayor número de puntos de medición de cobertura del dosel, en diferentes épocas o temporadas del año.

## 6. CONCLUSIONES

Este estudio es pionero en comparar mediciones de IAF y DD para su relación con la PE en un bosque de *Polylepis*, que se caracteriza por ser parte de ecosistemas de páramo. El IAF y DD son variables que difieren de acuerdo a las condiciones a las que se encuentran expuestas las especies forestales durante su crecimiento, por ejemplo, nutrientes en el suelo, agua, viento, precipitación, temperatura. Así como de características propias de las especies que conforman el bosque como: forma y tamaño de la hoja, arquitectura y estructura de la ramificación, altura, edad, entre otras.

Se encontró una fuerte relación entre las variables de dosel medidas, que a su vez proporcionan similar información respecto a la cobertura, con lo cual se concluye que cualquiera de las dos técnicas podría ser utilizada para estimar la cobertura del dosel. Sin embargo, por su mayor comodidad, facilidad de operación y principalmente bajo costo, la técnica de medición del porcentaje de DD mediante el método del densiómetro esférico, resulta la más óptima para esta actividad.

Al estudiar la precipitación efectiva, uno de los principales procesos hidrológicos que se produce a nivel del dosel, se pudo constatar que no solo está influenciada



por las variables antes mencionadas, pues es el conjunto de características y distribución de las especies forestales, lo que incrementa la complejidad vegetal dentro del bosque y a su vez la heterogeneidad de la PE. Además, mientras más fina es la resolución temporal usada en la estimación de la PE (mensual, diario,), posiblemente está influenciada por condiciones ambientales como son la intensidad y duración de la precipitación, viento, radiación solar, condiciones antecedentes sean secas o de humedad del dosel.

La relación no significativa entre IAF y DD con la PE, se puede atribuir a la diferencia de áreas de medición de las 2 variables (cobertura del dosel y precipitación), ya que el área que abarcan los colectores de lluvia, en este caso los pluviógrafos, es mucho menor al área proyectada por los equipos utilizados para medir la cobertura del dosel. Por lo tanto, las mediciones de la cobertura vegetal – con cualquiera de las dos técnicas – resultan limitadas para caracterizar apropiadamente la variabilidad de la PE en el ecosistema estudiado.



## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, G. (2015). *Caracterización de la infiltración en bosques de *Polylepis* spp. de 11 y 29 años, Parque Nacional Huascarán, Quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash* (Tesis de pregrado). Universidad Agraria La Molina, Lima, Perú. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1852>
- Alvarado, A., & Muñoz, L. N. (2017). *Evaluación de la regeneración natural y su relación con la altitud y cobertura de dosel en plantaciones no manejadas de *Pinus patula* en zonas alto Andinas, en la provincia del Azuay* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28382>
- Alvarado, I., & Cobos, C. (2019). *Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33587>
- Berger, T. W., Untersteiner, H., Schume, H., & Jost, G. (2008). Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce – beech stand, 255, 605–618. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.030>
- Bio-Science. (2016). Manual CI-110 / 120 Plant Canopy Imager, 0–31.
- Brauman, K., Freyberg, D., & Daily, G. (2010). Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawaii. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (2), 265–275.
- Buckley, D. S., Isebrands, J. G., & Sharik, T. L. (1999). Practical Field Methods of Estimating Canopy Cover, PAR, and LAI in Michigan Oak and Pine Stands. *Northern Journal of Applied Forestry*, 16 (1), 25–32.
- Carlyle-Moses, D. E., & Price, A. G. (2007). Modelling canopy interception loss from a Madrean pine-oak stand, Northeastern Mexico. *Hydrological Processes*, 21, 2572–2580. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Céleri, R., & Bendix, J. (2019).



- Agricultural and Forest Meteorology The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the paramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>
- Cierjacks, A., Iglesias, J. E., Wesche, K., & Hensen, I. (2007). Impact of sowing, canopy cover and litter on seedling dynamics of two *Polylepis* species at upper tree lines in central Ecuador. *Journal of Tropical Ecology*, 23, 309–318. <https://doi.org/10.1017/S0266467407004051>
- Cook, J. G., Stutzman, T. W., Bowers, C. W., Brenner, K. A., & Irwin, L. L. (1995). Spherical densimeters produce biased estimates of forest canopy cover. *Wildlife Society Bulletin*, 23(4), 711–717.
- Córdova, A. M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., & Wilcox, B. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data, 35(3), 230–239.
- Córdova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). Errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia de una zona de páramo andino debidos al uso de datos mensuales, diarios y horarios. *Aqua-LAC*, 5(2), 14–22.
- 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, 2903–2920.
- Domic, A. I., Camilo, G. R., & Capriles, J. M. (2014). Small-scale Farming and Grazing Reduce Regeneration of *Polylepis tomentella* (Rosaceae) in the Semiarid Andes of Bolivia. *Biotropica*, 46(1), 106–113. <https://doi.org/10.1111/btp.12075>
- Fleischbein, K., Wilcke, W., Goller, R., Boy, J., Valarezo, C., Zech, W., & Knoblich, K. (2005). Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological Processes*, 19, 1355–1371. <https://doi.org/10.1002/hyp.5562>
- Gareca, E. E., Hermy, M., Fjeldså, J., & Honnay, O. (2010). *Polylepis* woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. *Biodiversity and Conservation*, 19(12), 3327–3346.



- Germer, S., Elsenbeer, H., & Moraes, J. M. (2006). Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondonia, Brazil). *Hydrology and Earth System Sciences*, *10*, 383–393.
- Gerrits, A., Pfister, L., & Savenije, H. (2010). Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. *Hydrological Processes*, *24*, 3011–3025. <https://doi.org/10.1002/hyp.7712>
- Gerrits, M. (2010). *The role of interception in the hydrological cycle* (Doctoral thesis) Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:7dd2523b-2169-4e7e-992c-365d2294d02e>
- Gomez-Peralta, D., Oberbauer, S. F., McClain, M. E., & Philippi, T. E. (2008). Rainfall and cloud-water interception in tropical montane forests in the eastern Andes of Central Peru. *Forest Ecology and Management*, *255*, 1315–1325. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.058>
- Gosling, W. D., Hanselman, J. A., Christopher, K., Valencia, B. G., & Bush, M. B. (2009). Long-term drivers of change in *Polylepis* woodland distribution in the central Andes. *Journal of Vegetation Science*, *20*(6), 1041–1052. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01102.x>
- Harden, C. P., Hartsig, J., Farley, K. A., Lee, J., & Bremer, L. L. (2013). Effects of Land-Use Change on Water in Andean Páramo Grassland Soils. *Annals of the Association of American Geographers*, *103*(2), 375–384.
- Hernández, M., Granados, D. & Sánchez, A. (2003). Productividad de los ecosistemas en las regiones áridas. *Chapingo. Serie Ciencia Forestales y Del Ambiente*, *9*(2), 113–123.
- Herzog, S., Cahill, J., Fjeldså, J., Kessler, M., Yensen, E., Tarifa, T., et al. (2002). Ecology and conservation of High-Andean *Polylepis* forests. *Ecotropica*, *8*, 93–95.
- Hoch, G., & Körner, C. (2005). Growth, demography and carbon relations of *Polylepis* trees at the world's highest treeline. *Functional Ecology*, *19*(6), 941–951. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01040.x>
- Holwerda, F., Scatena, F. N., & Bruijnzeel, L. A. (2006). Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: A comparison of sampling strategies. *Journal of*



- Hydrology*, 327, 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.014>
- Jadán, O., Cedillo, H., Pillacela, P., Gualpa, D., Gordillo, A., Zea, P., et al. (2019). Regeneración de árboles en ecosistemas naturales y plantaciones de *Pinus patula* (Pinaceae) dentro de un gradiente altitudinal andino (Azuay, Ecuador). *Biología Tropical*, 67(1), 182–195.
- Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. (1999). Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, 72(1), 59–73.
- Johnson, M. S., & Lehmann, J. (2006). Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow. *Ecoscience*, 13(3), 324–333.
- Kessler, M. (2002). The “*Polylepis* problem”: Where do we stand? *Ecotropica*, 8, 97–116.
- Lemon, Paul E. 1956. A Spherical Densimeter For Estimating Forest Overstory Density. *Forest Sci.* 2:314-320.
- Lemmon, P. E. (1957). Using Forest Densimeters. *Journal of Forestry*, 55(9), 1–2.
- Levia, D., & Herwitz, S. R. (2005). Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soils. *Catena*, 64, 117–137. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.001>
- Levia, D., & Frost, E. E. (2006). Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. *Progress in Physical Geography*, 30(5), 605–632. <https://doi.org/10.1177/0309133306071145>
- Levia, D. F., Keim, R. F., Carlyle-Moses, D. E., & Frost, E. E. (2011). Throughfall and Stemflow in Wooded Ecosystems, 425–443. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1363-5>
- Lieberman, M., Lieberman, D., & Peralta, R. (1989). Forests are Not Just Swiss Cheese: Canopy Stereogeometry of Non-Gaps in Tropical Forests. *Ecological*, 70(3), 550-552.
- Llorens, P., & Gallart, F. (2000). A simplified method for forest water storage capacity measurement. *Journal of Hydrology*, 240, 131–144.



- Loescher, H. W., Powers, J. S., & Oberbauer, S. F. (2002). Spatial variation of throughfall volume in an old-growth tropical wet forest, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 18(3), 949. <https://doi.org/10.1017/S0266467402002638>
- Macinnis-Ng, C. M. O., Flores, E. E., Müller, H., & Schwendenmann, L. (2014). Throughfall and stemflow vary seasonally in different land-use types in a lower montane tropical region of Panama. *Hydrological Processes*, 28(4), 2174–2184. <https://doi.org/10.1002/hyp.9754>
- Molicova, H., & Hubert, P. (1994). Canopy Influence on Rainfall Fields Microscale Structure in Tropical Forests. *Journal of Applied Meteorology*, 33(12), 1464–1467.
- Molina, A. J., Llorens, P., Garcia-Estringana, P., De, M. M., Cayuela, C., Gallart, F., & Latron, J. (2019). Science of the Total Environment Contributions of throughfall, forest and soil characteristics to near-surface soil water-content variability at the plot scale in a mountainous Mediterranean area. *Science of the Total Environment*, 647, 1421–1432. [doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.020](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.020)
- Montalvo, J., Minga, D., Verdugo, A., López, J., & Guazhambo, D. (2018). Características morfológico-funcionales, diversidad arbórea, tasa de crecimiento y de secuestro de carbono en especies y ecosistemas de *Polylepis* del sur de Ecuador. *Ecología Austral*, 28, 249–261.
- Morales, L. V., Sevillano-Rios, C. S., Fick, S., & Young, T. P. (2018). Differential seedling regeneration patterns across forest–grassland ecotones in two tropical treeline species (*Polylepis* spp.). *Austral Ecology*, 43(5), 514–526. <https://doi.org/10.1111/aec.12588>
- Moser, G., Hertel, D., & Leuschner, C. (2007). Altitudinal Change in LAI and Stand Leaf Biomass in Tropical Montane Forests: A Transect Study in Ecuador and a Pan-Tropical Meta-Analysis. *Ecosystems*, 10, 924–935. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9063-6>
- Murakami, S. (2006). A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation, 319, 72–82. [doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.002)
- Nadkarni, N. M. & Sumera, M. M. (2004) «Old-Growth Forest Canopy Structure and Its Relationship to Throughfall Interception», *Forest Science*, 50(3), 290-298.



- Nisbet, T. (2005). Water Use by Trees. *Forestry Commission*, 65, 1–8.
- Norman, J.M. and Campbell, G.S. (1989) Canopy Structure. In: Pearcy, R.W., Ehrlinger, J., Mooney, H.A. and Eundel, P.W., Eds., *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*, Chapman and Hall, London and New York, 301-325.
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., & Célleri, R. (2018). Quantification of rainfall interception in the high Andean tussock grasslands. *Ecohydrology*, 11(3), e1946.
- Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Carrillo, G., Sucozhañay, A., & Célleri, R. (2019). Actual Evapotranspiration in the High Andean Grasslands: A Comparison of Measurement and Estimation Methods. *Frontiers in Earth Science*, 7(55), 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00055>
- Oyarzún, C. E., Godoy, R., Staelens, J., Donoso, P. J., & Verhoest, N. E. C. (2011). Seasonal and annual throughfall and stemflow in Andean temperate rainforests. *Hydrological Processes*, 25, 623–633. <https://doi.org/10.1002/hyp.7850>
- Padrón, R., Wilcox, B., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 985–996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Park, A., & Cameron, J. (2008). The influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation, 255, 1915–1925. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.025>
- Pinos, J. (2014). *Biomasa foliar, desfronde y descomposición de la hojarasca en los rodales de Polylepis reticulata del Parque Nacional Cajas* (Tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21217>
- Pinos, J., Studholme, A., Carabajo, A., & Gracia, C. (2017). Leaf Litterfall and Decomposition of *Polylepis reticulata* in the Treeline of the Ecuadorian Andes. *Mountain Research and Development*, 37(1), 87–96.
- Pukkala, T., Becker, P., Kuuluvainen, T., & Oker-Blom, P. (1991). Predicting spatial distribution of direct radiation below forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55, 295–307.



- Quiroz, C., Marín, F., Arias, R., Crespo, P., Weber, M., & Palomeque, X. (2019). Comparison of Natural Regeneration in Natural Grassland and Pine Plantations across an Elevational Gradient in the Páramo Ecosystem of Southern Ecuador. *Forests*, 10, 1–30.
- Ramos, F., & Armenteras, P. (2019). Interceptación y escorrentía del bosque altoandino en la reserva forestal protectora “El Malmo.” *Acta Biológica Colombiana*, 24(1), 97–108.
- Rangel, O. y Arellano, H. (2010) «Bosques De *Polylepis*: Un Tipo de vegetación condenado a la extinción», en J. O. R.-C. (ed.), Colombia Diversidad Biótica X. Cambio Global (Natural) y Climático (Antrópico) en el páramo colombiano. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales-Facultad de Ciencias-Universidad Nacional de Colombia, 443-478.
- Renison, D., Hensen, I., & Suarez, R. (2011). Landscape structural complexity of high-mountain *Polylepis australis* forests: A new aspect of restoration goals. *Restoration Ecology*, 19(3), 390–398. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00555.x>
- Renison, D., Hensen, I., Suarez, R., & Cingolani, A. M. (2006). Cover and growth habit of *Polylepis* woodlands and shrublands in the mountains of central Argentina: human or environmental influence? *Journal of Biogeography*, 33(5), 876–887.
- Roth, B., Slatton, K., & Cohen, M. (2007). On the potential for high-resolution lidar to improve rainfall interception estimates in forest ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(8), 421–428. [doi.org/10.1890/060119.01](https://doi.org/10.1890/060119.01)
- Staelens, J., Schrijver, A. De, Verheyen, K., & Verhoest, N. E. C. (2006). Spatial variability and temporal stability of throughfall deposition under beech (*Fagus sylvatica* L.) in relationship to canopy structure, 142, 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.002>
- Teale, N., Mahan, H., Bleakney, S., Berger, A., Shibley, N., Frauenfeld, O. W., ... Washington-Allen, R. (2014). Impacts of Vegetation and Precipitation on Throughfall Heterogeneity in a Tropical. *Biotropica*, 46(6), 667–676.
- Tinoco, B. A., Astudillo, P. X., Latta, S. C., Strubbe, D., & Graham, C. H. (2013).



- Influence of patch factors and connectivity on the avifauna of fragmented *Polylepis* forest in the Ecuadorian Andes. *Biotropica*, 45(5), 602–611. <https://doi.org/10.1111/btp.12047>
- Tsiko, C. T., Makurira, H., Gerrits, A. M. J., & Savenije, H. H. G. (2012). Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem. *Physics and Chemistry of the Earth*, 47–48, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.009>
- Valencia, B. G., Bush, M. B., Coe, A. L., Orren, E., & Gosling, W. D. (2018). *Polylepis* woodland dynamics during the last 20,000 years. *Journal of Biogeography*, 45(5), 1019–1030. <https://doi.org/10.1111/jbi.13209>
- Weiqing, Z., Zhiqiang, Z., Jun, W., & Jinqiang, X. (2007). Spatial variability of throughfall in a Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis*) plantation in northern China. *Front. Forest. China*, 2(2), 169–173. [doi.org/10.1007/s11461-007-0027-y](https://doi.org/10.1007/s11461-007-0027-y)
- Wullaert, H., Pohlert, T., Boy, J., Valarezo, C., & Wilcke, W. (2009). Spatial throughfall heterogeneity in a montane rain forest in Ecuador: Extent, temporal stability and drivers. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.001>
- Zhang, G., Zeng, G. M., Jiang, Y. M., Huang, G. H., Li, J. B., Yao, J. M., ... Zhang, X. L. (2006). Modelling and measurement of two-layer-canopy interception losses in a subtropical evergreen forest of central-south China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(1), 65–77.
- Zimmermann, A., Germer, S., Neill, C., Krusche, A. V., & Elsenbeer, H. (2008). Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.028>
- Zimmermann, A., Wilcke, W., & Elsenbeer, H. (2007). Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology*, 343, 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.012>
- Zimmermann, A., Zimmermann, B., & Elsenbeer, H. (2009). Rainfall redistribution in a tropical forest: Spatial and temporal patterns. *Water Resources Research*, 45(11). <https://doi.org/10.1029/2008WR007470>



## 8. ANEXOS

### Anexo 1. Correlación significativa entre DD y PE diario

En la Figura A.1. se observa que solo la relación entre PE diaria de 65 días del periodo muestreado (9 de Marzo 2019 al 8 de Marzo del 2020) y la DD muestran coeficientes de correlación estadísticamente significativos con valores  $p < 0.05$ . Es decir, el 18% de los días muestreados la PE se encuentran influenciada principalmente por la DD.

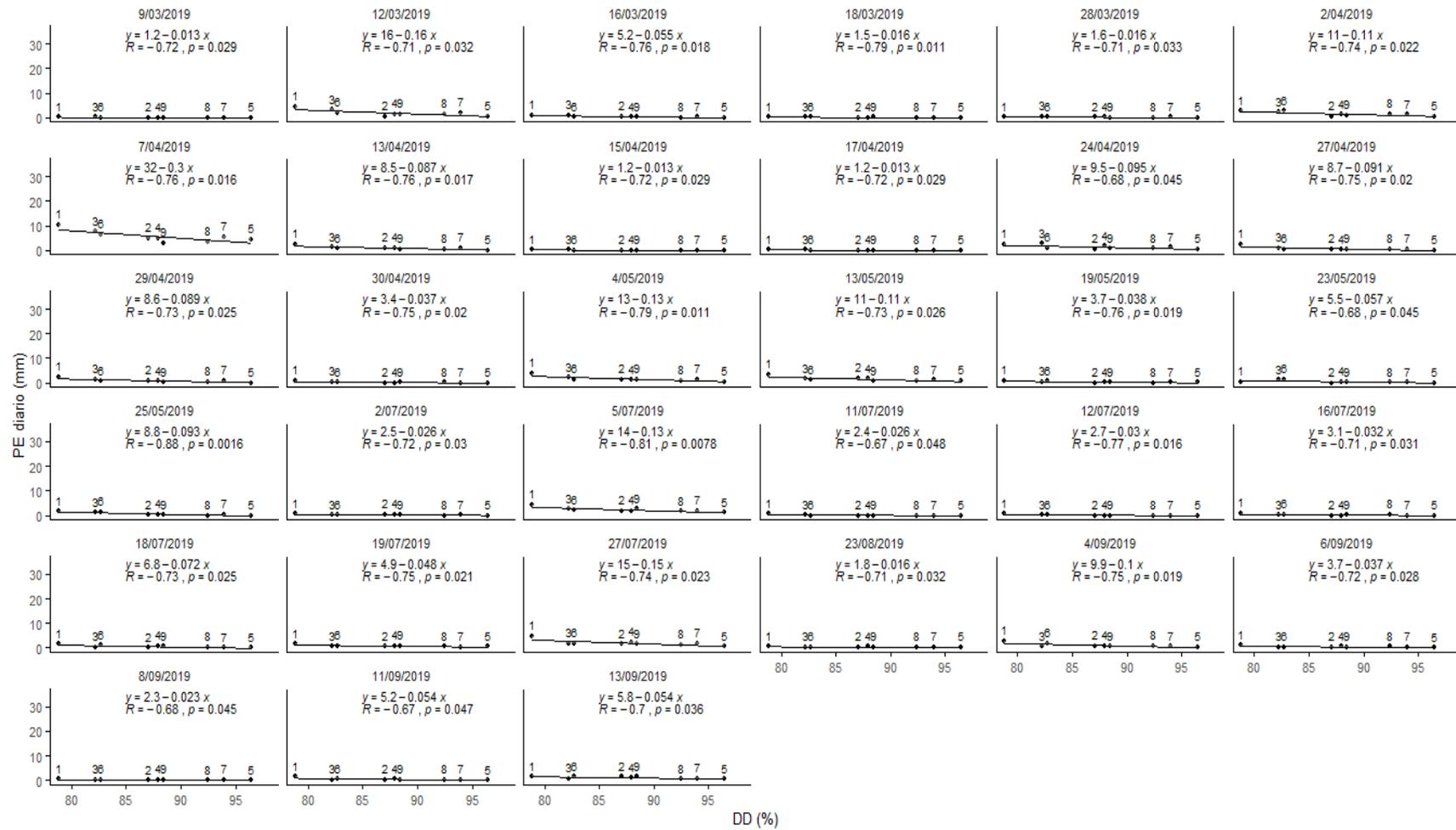


Figura A.1. Relación significativa entre la PE diaria (65 días) y la DD (1-9 sitios de muestreo).

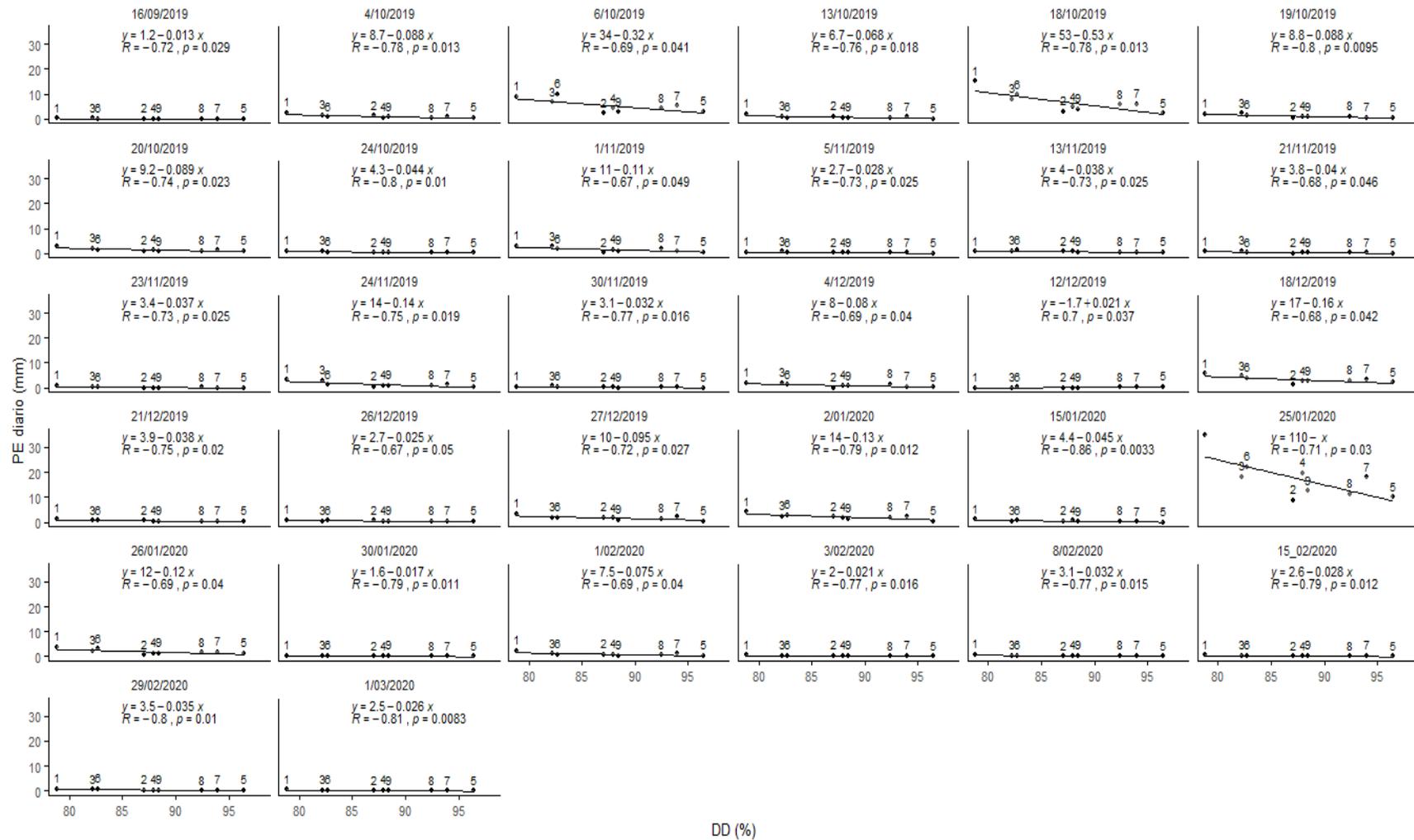


Figura A.1. Relación significativa entre la PE diaria (65 días) y la DD.



## Anexo 2. Correlación significativa entre IAF y PE diario

En la Figura A.2. se observa que solo la relación entre PE diaria de 76 días del periodo muestreado (9 de Marzo 2019 al 8 de Marzo del 2020) y la IAF muestran coeficientes de correlación estadísticamente significativos con valores  $p < 0.05$ . Es decir, el 21% de los días muestreados la PE se encuentran influenciada principalmente por la IAF.

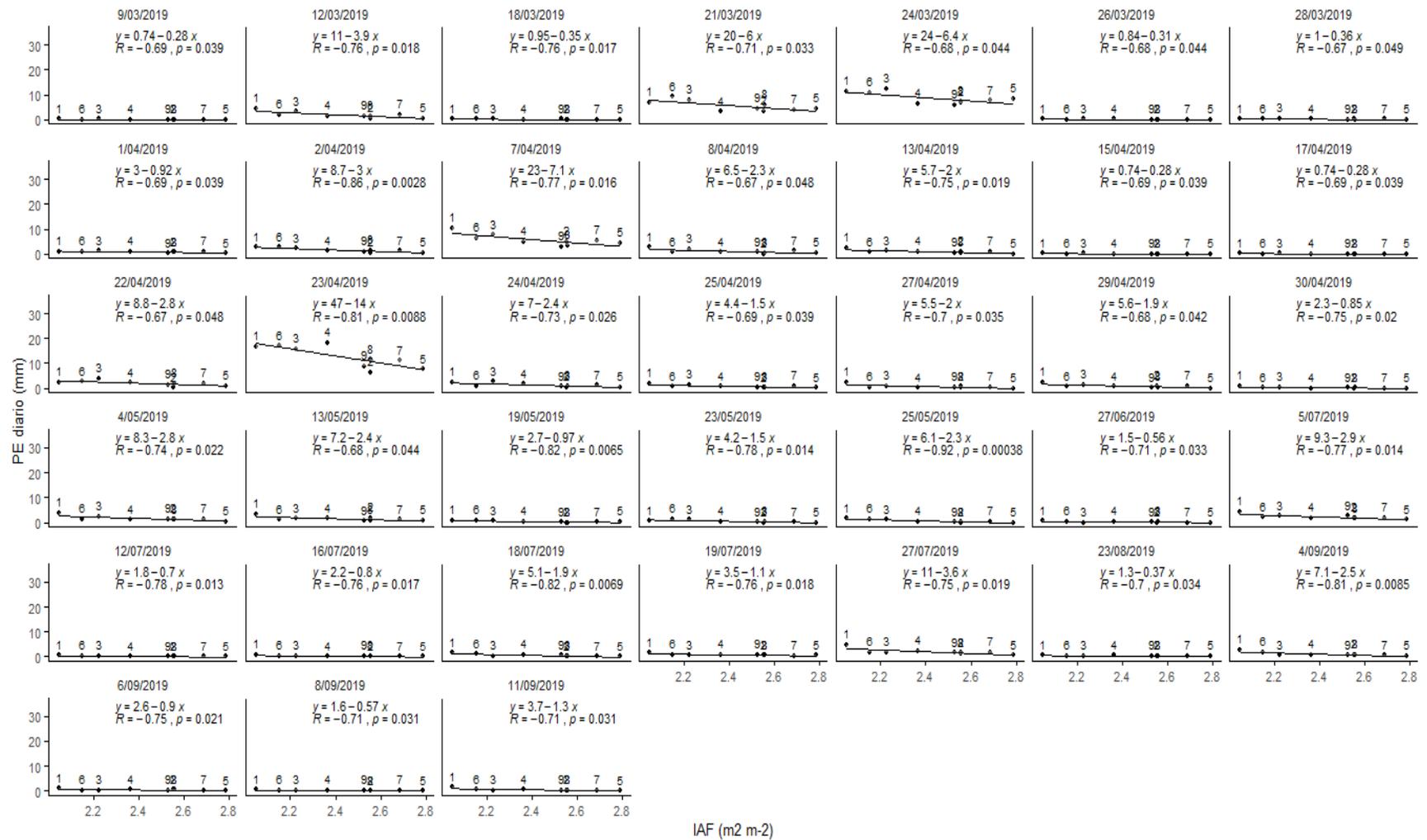


Figura A.2. Relación significativa entre la PE diaria (76 días) y la IAF de 9 sitios de muestreo.

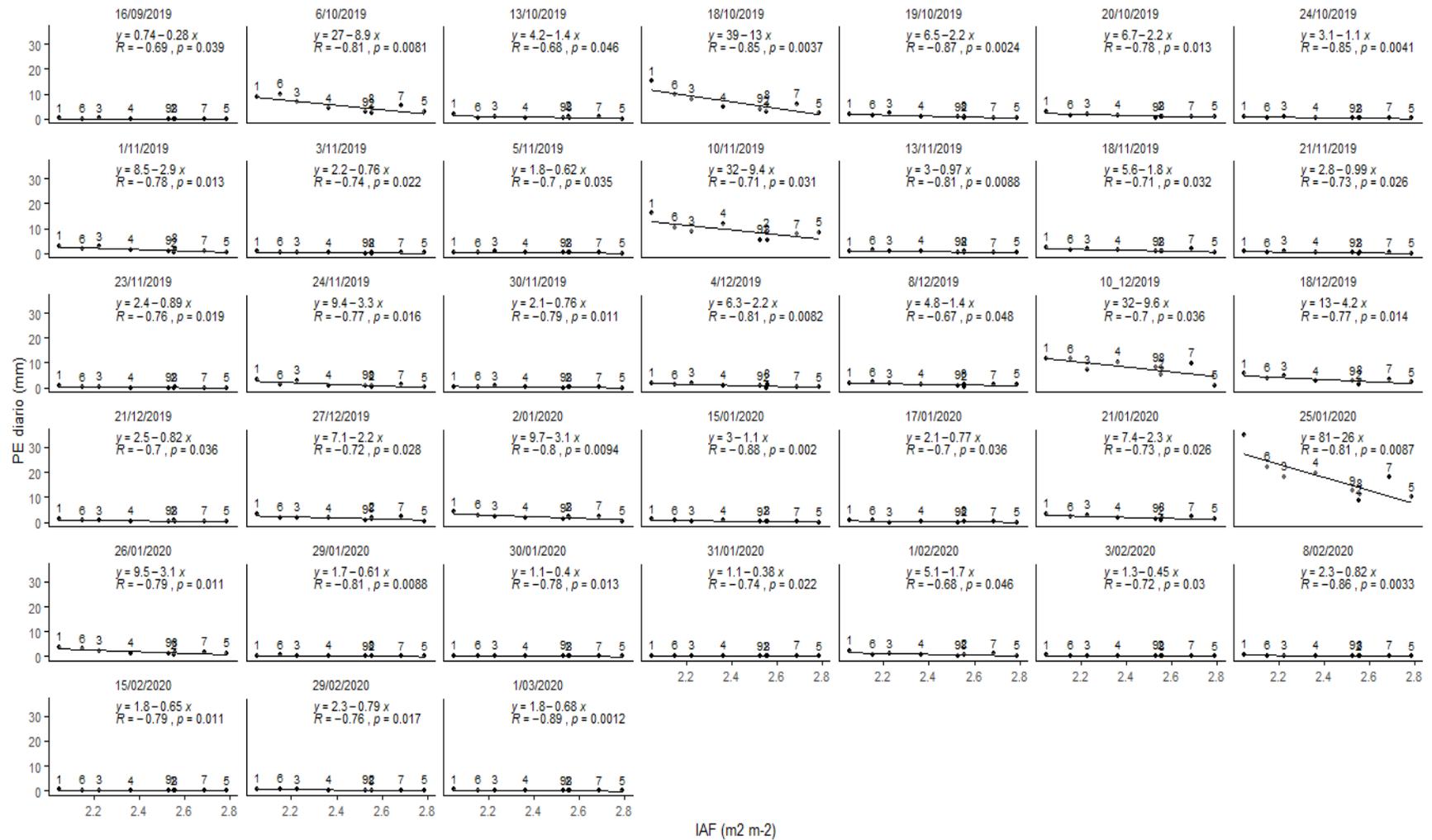


Figura A.2. Relación significativa entre la PE diaria (76 días) y la IAF de 9 sitios de muestreo.

### Anexo 3. Correlación significativa entre DD, IAF con la PE mensual

En la Figura A.3. se observa que solamente los meses de Marzo, Abril, Octubre y Noviembre presentan valores de PE mensual que se relacionan significativamente con la DD e IAF, presentando valores  $p < 0.05$ .

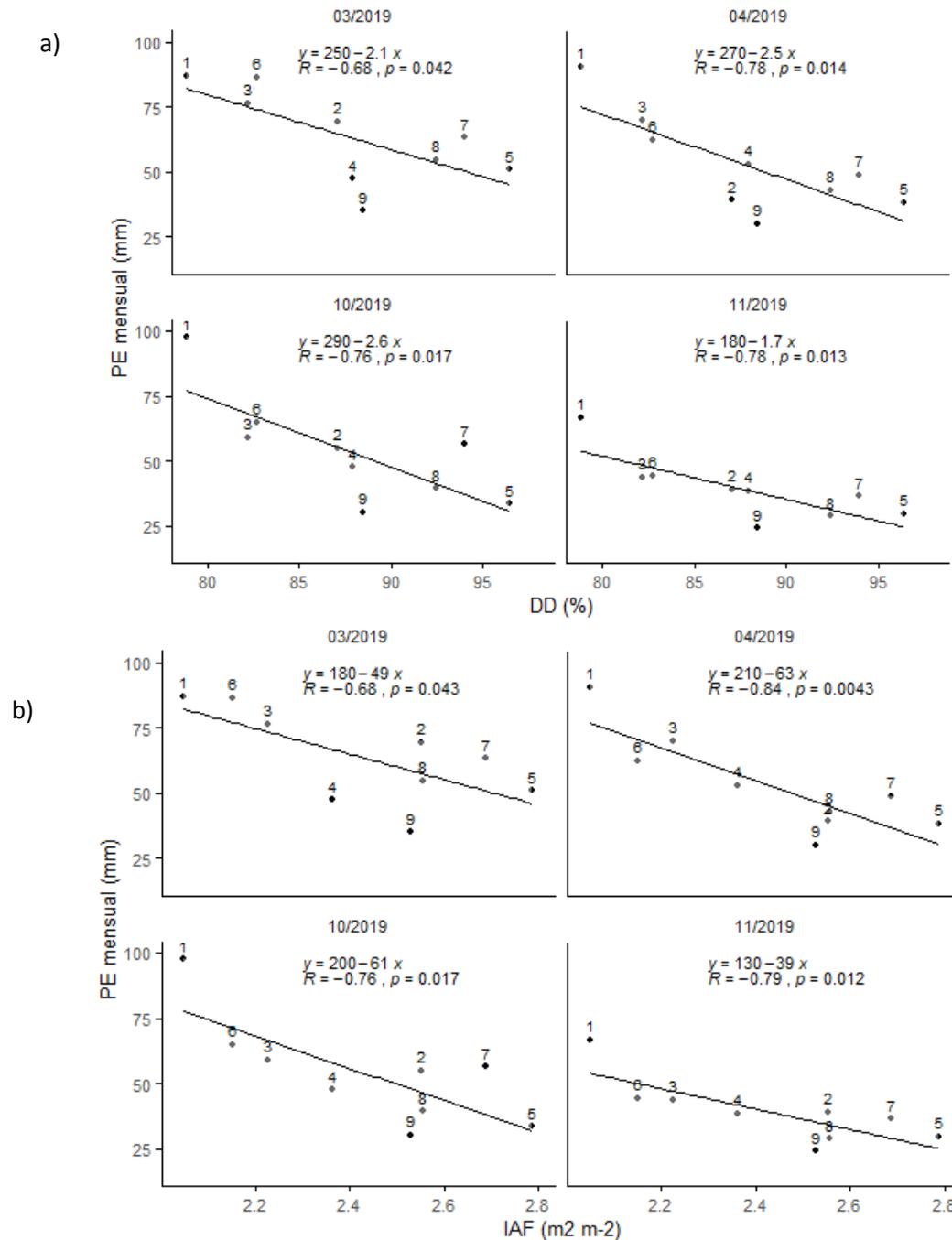


Figura A.3. Relación significativa entre la PE mensual (4 meses) y a) DD, b) IAF de 9 sitios de muestreo.