

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOLOGÍA



TESIS

**EFFECTO DE LA PRECIPITACIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL EN
LA DINÁMICA Y MORFOLOGÍA DE RAÍCES FINAS DEL BOSQUE
NUBLADO DE WAYQECHA, PAUCARTAMBO-CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. DANIELA CORRALES ALVAREZ

**PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE
BIÓLOGO**

ASESOR:

Dr. MÁXIMO AMÉRICO CHACÓN CAMPANA

CUSCO - PERÚ

2026

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor: MÁXIMO AMÉRICO CHACÓN CAMPANA

..... Quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada EFFECTO DE LA PRECIPITACIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL EN LA DINÁMICA Y MORFOLOGÍA DE RAÍCES FINAS DEL BOSQUE NUBLADO DE WAYQUECHA, PAUCARTAHBO - CUSCO

Presentado por: DANIELA CORRALES ALVAREZ con DNI Nro.: 74912296 Para optar el título profesional/grado académico de BIÓLOGO Informo

que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 1 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 26 de mayo de 2026



Firma

Post firma: MÁXIMO AMÉRICO CHACÓN CAMPANA

Nro. de DNI: 03815848

ORCID del Asesor: 0000-0002-3714-365X

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: OID: 27259 : 594753361

EFECTO DE LA PRECIPITACIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL EN LA DINÁMICA Y MORFOLOGÍA DE RAÍCES FINAS DEL BOSQU...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:594753361

Fecha de entrega

26 may 2026, 10:37 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

26 may 2026, 10:49 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

EFECTO DE LA PRECIPITACIÓN HORIZONTAL Y VERTICAL EN LA DINÁMICA Y MORFOLOGÍA DE RAÍ....pdf

Tamaño del archivo

8.6 MB

204 páginas

59.245 palabras

304.393 caracteres

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mis padres, José Manuel Corrales Vizcarra y Gladys Alvarez Muñoz, por su ejemplo, su esfuerzo y las distintas formas en que me enseñaron a seguir adelante.

A mi hermano, Marcelo Corrales Alvarez, por estar ahí siempre, sin necesidad de muchas palabras, compartiendo silencios, risas y caminos.

A quienes entendieron que la ciencia también se hace con barro en las botas, días impredecibles y mucha paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a la Facultad de Ciencias Biológicas, por brindarme la formación y las oportunidades que hicieron posible este trabajo.

A mi asesor, Dr. Máximo Américo Chacón Campana, por su acompañamiento, disposición y las valiosas orientaciones brindadas.

A mi coasesor, Dr. Walter Huaraca Huasco, por acompañar de cerca cada etapa del proceso, desde la colecta de datos hasta la revisión final, y por compartir su tiempo, conocimientos y paciencia con dedicación.

Al Dr. Daniel Metcalfe, por su confianza en la presente investigación trabajo y por motivar la continuidad de la investigación desde una perspectiva abierta y colaborativa.

A la Asociación ABIDA, por ser un espacio de crecimiento y aprendizaje, una comunidad de personas comprometidas con la ciencia y la conservación. En especial, al presidente Darcy Galiano y a todo el equipo, por su compromiso, entusiasmo y apoyo constante.

A mis seres queridos, por su paciencia, su apoyo incondicional y por estar ahí cuando las palabras y la calma fueron más necesarias que cualquier otra cosa.

A mis amigos, por su apoyo en los momentos clave, por las fotografías, las ideas, las conversaciones y las risas que equilibraron las horas más largas.

A todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron a que esta tesis sea posible.

gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
INTRODUCCIÓN	III
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	V
JUSTIFICACIÓN	VII
OBJETIVOS.....	IX
OBJETIVO GENERAL	IX
OBJETIVO ESPECÍFICO.....	IX
VARIABLES.....	X
HIPÓTESIS.....	XII
CAPÍTULO I:	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.1.1. Antecedentes internacionales	1
1.1.2. Antecedentes Locales y Nacionales	7
1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
1.2.1. Bosques Nublados	9
1.2.2. Precipitación horizontal.....	10
1.2.3. Precipitación vertical	11
1.2.4. Cambio climático.....	11
1.2.5. Sequía	12
1.2.6. Desplazamiento altitudinal de la niebla.....	12
1.2.7. Raíces finas.....	12
1.2.8. Biomasa de raíces finas ($Biomasa_{rf}$).....	13
1.2.9. Necromasa de raíces finas ($Necromasa_{rf}$).....	13
1.2.10. Stock de carbono en las raíces finas ($Stock_{rf}$)	14
1.2.11. Dinámica de raíces finas	14
1.2.11.1. Productividad primaria neta de raíces finas (PPN_{rf})	14
1.2.11.2. Tiempo de residencia de las raíces finas (TR_{rf}).....	14
1.2.11.3. Tasa de recambio o renovación de raíces finas	15
1.2.12. Rasgos morfológicos de raíces finas	15
1.2.12.1. Diámetro de las raíces finas	16
1.2.12.2. Área específica de raíces finas (SRA).....	16
1.2.12.3. Longitud específica de la raíz (SRL)	16
1.2.12.4. Densidad de tejido radicular (RTD)	16

CAPÍTULO II:	17
MATERIALES Y MÉTODOS	17
2.1. ÁREA DE ESTUDIO	17
2.1.1. UBICACIÓN	17
2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	19
2.1.2.1. Clima	19
2.1.2.2. Suelo	20
2.1.2.3. Geología	21
2.1.2.4. Hidrología	21
2.1.2.5. Vegetación y composición florística del área de estudio	22
2.2. MATERIALES	23
2.2.1. Material biológico	23
2.2.2. Equipos e insumos	23
2.3. METODOLOGÍA	24
2.3.1. Tipo de investigación	24
2.3.2. Línea de investigación	25
2.3.3. Unidad de análisis	25
2.3.4. Población de estudio	26
2.3.5. Tamaño de muestra	26
2.3.6. Descripción de las parcelas de muestreo	27
2.3.7. Métodos de colecta y procesamiento de raíces finas	30
2.3.7.1. Cálculo de la biomasa, necromasa, stock, productividad y el tiempo de residencia del flujo de carbono en las raíces finas	30
2.3.7.2. Cuantificación de la longitud específica, área específica y la densidad de tejido de las raíces finas, a nivel de comunidades y de especies arbóreas en las diferentes parcelas	35
2.3.7.3. Relación de la humedad y temperatura del suelo con la dinámica y morfología de raíces finas	37
2.3.8. Análisis estadístico	38
CAPÍTULO III:	40
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3.1. RESULTADOS	40
3.1.1. Dinámica de las raíces finas	40
3.1.1.1. Biomasa y Necromasa de raíces finas	40
3.1.1.2. Variación anual del stock de carbono en las raíces finas	50
3.1.1.3. Productividad de raíces finas	54
3.1.1.4. Tiempo de residencia de raíces finas	58
3.1.2. Morfología de Raíces finas	61

3.1.2.1. Longitud específica de las raíces finas (SRL).....	61
3.1.2.2. Área específica de las raíces finas (SRA)	68
3.1.2.3. Densidad de tejido de las raíces finas (RTD)	76
3.1.3. Relación de la humedad y temperatura del suelo con la dinámica y morfología de las raíces finas.	83
3.1.3.1. Efecto de la humedad y temperatura del suelo con la dinámica de raíces finas	83
3.1.3.2. Relación de la humedad y temperatura del suelo con la morfología de raíces finas	86
3.2. DISCUSIÓN	89
3.2.1. Dinámica de las raíces finas	89
3.2.1.1. Biomasa y Necromasa de raíces finas	89
3.2.1.2. Variación anual stock de carbono en las raíces finas.....	90
3.2.1.3. Productividad de raíces finas.....	91
3.2.1.4. Tiempo de residencia de raíces finas.....	93
3.2.2. Morfología de las raíces finas	94
3.2.2.1. Longitud específica de raíces finas	94
3.2.2.2. Área específica de raíces finas	95
3.2.2.3. Densidad de tejido de las raíces finas.....	96
3.2.3. Relación de la humedad y temperatura del suelo en la dinámica y morfología de raíces finas	98
CONCLUSIONES	100
RECOMENDACIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	103
ANEXOS.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio.....	18
Figura 2. Climatodiagrama del área de estudio	20
Figura 3. Parcelas experimentales de estudio	29
Figura 4. Extrapolación logarítmica para la determinación de biomasa de raíces finas	34
Figura 5. Sensores TMS-4 instalados en el suelo de las parcelas de estudio.....	38
Figura 6. Comparación de los valores promedio la biomasa de raíces finas y necromasa de raíces finas del año 2022	41
Figura 7. Comparación gráfica de la biomasa de raíces finas y necromasa de acuerdo a la profundidad del suelo.....	45
Figura 8. Distribución porcentual de biomasa y necromasa de raíces finas según profundidad del suelo.	46
Figura 9. Comparación del stock de carbono total en las raíces finas, en el periodo del 2021, 2022 y 2023.....	51
Figura 10. Productividad media de raíces finas durante el periodo 2021, 2022 y 2023	55
Figura 11. Productividad mensual de raíces finas.....	58
Figura 12. Promedios de la longitud específica de las raíces finas a diferentes profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm) a nivel de comunidad vegetal.....	62
Figura 13. Promedio de la longitud específica de raíces finas para cada especie arbórea.....	65
Figura 14. Promedio del área específica de las raíces finas a diferentes profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm).	69
Figura 15. Promedio del área específica de raíces finas para cada especie arbórea	72
Figura 16. Promedio de la densidad de tejido de las raíces finas a diferentes profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm).....	76
Figura 17. Promedio de la densidad de tejido de raíces finas de especies arbóreas	79
Figura 18. Modelos lineales mixtos generalizados de la productividad, humedad y temperatura del suelo del tratamiento y control de la reducción de precipitación vertical.....	84
Figura 19. Modelos lineales mixtos generalizados de la productividad y humedad y temperatura del suelo del tratamiento y control de la reducción de precipitación horizontal	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de Estudio.....	X
Tabla 2. Variables de Correlación	XI
Tabla 3. Ubicación de las Parcelas Según el Tratamiento	17
Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.....	42
Tabla 5. Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	42
Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.	43
Tabla 7. Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	43
Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical de acuerdo a la profundidad del suelo.....	47
Tabla 9. Prueba post-hoc, comparaciones Tukey entre profundidades del suelo de la parcela de tratamiento de precipitación vertical.....	48
Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal de acuerdo a la profundidad del suelo.	48
Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa de raíces finas en parcelas control y tratameiento de precipitación vertical.....	49
Tabla 12. Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	50
Tabla 13. Análisis de varianza (ANOVA) del Stock de raíces finas (control y tratamiento de la precipitación vertical), de los años 2021-2023.	52
Tabla 14. Análisis de varianza (ANOVA) del Stock de raíces finas (control y tratamiento de la precipitación horizontal, 2021-2023).....	52
Tabla 15. Comparaciones Tukey del stock de carbono de raíces finas por año de las parcelas control y tratamiento de la precipitación vertical.	53
Tabla 16. Comparaciones Tukey del stock de carbono de raíces finas por año de las parcelas control y tratamiento de la precipitación horizontal.	53

Tabla 17. Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas de precipitación vertical.....	56
Tabla 18. Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas de precipitación vertical según año.	56
Tabla 19. Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas de precipitación horizontal.	57
Tabla 20. Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas de precipitación horizontal según año.	57
Tabla 21. Tiempo de residencia de raíces finas (año) y la tasa de renovación de raíces finas (año ⁻¹).....	59
Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA) del tiempo de residencia en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.....	60
Tabla 23. Análisis de varianza (ANOVA) del tiempo de residencia en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	60
Tabla 24. Análisis de varianza (ANOVA) de la tasa de renovación en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.....	60
Tabla 25. Análisis de varianza (ANOVA) de la tasa de renovación en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	61
Tabla 26. Test de Kruskal- Walis de la longitud específica de raíces finas de la comunidad vegetal para parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.	63
Tabla 27. Test de Kruskal- Walis de la longitud específica de raíces finas, según la profundidad del suelo de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.....	63
Tabla 28. Test de Kruskal- Walis de la longitud específica de raíces finas- comunidades para las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	63
Tabla 29. Test de Kruskal- Walis de la longitud específica de raíces finas, según la profundidad del suelo de la comunidad vegetal para las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	64
Tabla 30. Análisis de varianza (ANOVA) de la longitud total de las raíces finas- especies arbóreas de la parcela de control y tratamiento de precipitación vertical.	66

Tabla 31. Comparación de medias marginales ajustadas de la longitud específica de raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.	67
Tabla 32. Análisis de varianza (ANOVA) de la longitud total de las raíces finas- especies arbóreas de la parcela de control y tratamiento de precipitación horizontal.....	67
Tabla 33. Comparación de medias marginales ajustadas de la longitud específica de raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	68
Tabla 34. Test de Kruskal- Walis del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.	70
Tabla 35. Test de Kruskal-Walis para la comparación del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal por profundidad de suelo de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.....	70
Tabla 36. Test de Kruskal- Walis del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	71
Tabla 37. Test de Kruskal-Walis para la comparación del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	71
Tabla 38. Análisis de varianza (ANOVA) del área específica de las raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento precipitación vertical.	73
Tabla 39. Comparación de medias marginales ajustadas del área específica de raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.	74
Tabla 40. Análisis de varianza (ANOVA) del área total de las raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento precipitación horizontal.....	75
Tabla 41. Comparación de medias marginales ajustadas del área total de raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	75
Tabla 42. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de tejido de las raíces finas- de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento precipitación vertical.	77
Tabla 43. ANOVA de la densidad de tejido de las raíces finas- de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	78
Tabla 44. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de tejidos de las raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.	80
Tabla 45. Comparación de medias marginales ajustadas de la densidad de tejido de raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical	81

Tabla 46. Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de tejidos de las raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.	81
Tabla 47. Comparación de medias marginales ajustadas de la densidad de tejido de raíces finas-especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal	82
Tabla 48. Modelos lineales mixtos generalizados de la productividad y variables del suelo.	83
Tabla 49. Coeficientes de correlación de Spearman entre el tiempo de residencia de raíces finas (años) y las variables de temperatura (°C) y humedad (%) del suelo.	86
Tabla 50. Coeficientes de correlación de Spearman entre los rasgos morfológicos de raíces finas (SRL, SRA y RTD) y las variables de temperatura (°C) y humedad (%) del suelo.	88

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ABIDA (Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales)

ANOVA (Analysis of Variance – Análisis de varianza)

Biomasa_{rf} (Biomasa de raíces finas)

CON-PH (Parcela control de precipitación horizontal)

CON-PV (Parcela control de precipitación vertical)

G cm⁻³ (Gramos por centímetro cúbico – densidad del tejido radicular)

Ha (Hectárea)

IC (Ingrowth cores – núcleo de crecimiento)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)

km m⁻² (Kilómetro de raíz por metro cuadrado de suelo)

M² g⁻¹ (Metros cuadrados de área superficial por gramo de masa seca)

M² m⁻² (Metro cuadrado de área de raíz por metro cuadrado de suelo)

Mg C ha⁻¹ (Megagramos de carbono por hectárea)

Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Megagramos de carbono por hectárea por año)

Mm (Milímetro)

Necromasa_{rf} (Necromasa de raíces finas)

PPN_{rf} (Fine Root Productivity – Productividad de raíces finas)

PVC (Policloruro de vinilo – material de los tubos de muestreo)

RT (Raíces totales)

RTD (Root Tissue Density – Densidad de tejido radicular [g cm⁻³])

SRA (Specific Root Area – Área específica de raíz [m² m⁻²])

SRL (Specific Root Length – Longitud específica de raíz [km m⁻²])

Stock_{rf} (Stock de carbono en las raíces finas)

TR_{rf} (Tiempo de residencia de las raíces finas)

TRT-PH (Parcela de tratamiento de reducción de precipitación horizontal)

TRT-PV (Parcela de tratamiento de reducción de precipitación vertical)

°C (Grado centígrado)

RESUMEN

Los bosques nublados son ecosistemas de alta biodiversidad y reservorios de carbono, vulnerables a cambios en la precipitación y niebla. Las raíces finas contribuyen a la producción primaria neta global, regulan el carbono subterráneo y son responsables de absorber agua y nutrientes del suelo, siendo altamente sensibles a la disponibilidad hídrica. El objetivo del estudio fue evaluar los efectos de la reducción de precipitación vertical y horizontal en la dinámica y morfología de las raíces finas del bosque nublado de Wayqecha, mediante parcelas de tratamiento (TRT-PV, TRT-PH) y controles (CON-PV, CON-PH). El muestreo se realizó mediante núcleos de crecimiento en 30 cm del suelo (3 profundidades de 10cm), y colectas directas de raíces para especies arbóreas, registrándose mensualmente la humedad y temperatura del suelo. Los resultados muestran diferencias no significativas en la biomasa total, necromasa, productividad y tiempo de residencia de raíces finas. En las parcelas CON-PV y TRT-PV la biomasa disminuyó con la profundidad del suelo significativamente; el stock de carbono disminuyó significativamente en parcelas TRT-PV en 2021 y en TRT-PH incrementó con los años; y la productividad mensual fue mayor al final de la estación seca. Los rasgos morfológicos (SRL, SRA y RTD) no presentaron diferencias significativas en la comunidad vegetal, aunque se registraron diferentes respuestas entre especies. La humedad y temperatura del suelo se relacionaron negativamente con la productividad en parcelas control. La reducción de la precipitación evidencio cambios en la dinámica y morfología de las raíces finas, y el rol clave de la humedad del suelo.

Palabras clave: Dinámica de raíces finas, Rasgos morfológicos, Precipitación vertical, Precipitación horizontal, Bosque nublado.

ABSTRACT

Cloud forests are ecosystems with high biodiversity and important carbon storage; however, they are vulnerable to changes in precipitation and cloud immersion regimes. Fine roots (≤ 2 mm in diameter) contribute substantially to global net primary productivity, regulate belowground carbon, and are responsible for water and nutrient uptake, making them highly sensitive to soil water availability. This study was conducted to understand the effect of reduced vertical and horizontal precipitation on fine root dynamics and morphology in a montane cloud forest using experimental treatment plots (TRT-PV and TRT-PH) and their respective controls (CON-PV and CON-PH). Roots were sampled using ingrowth cores to a soil depth of 30 cm, and direct root sampling was performed for different tree species. Soil moisture and temperature were recorded monthly for the treatment-control plots. The results showed no significant differences in fine root biomass, necromass, productivity, and residence time between the treatment and control plots. However, in CON-PV and TRT-PV, biomass significantly decreased with soil depth. The carbon stock significantly decreased in TRT-PV in 2021, whereas it increased over the years in TRT-PH. Monthly fine root productivity increased at the end of the dry season. Morphological traits (SRL, SRA, and RTD) did not show significant differences at the community level, although species-specific responses were observed. Soil moisture and temperature were negatively correlated with fine root productivity in the control plots. Overall, precipitation reduction resulted in changes in fine root dynamics and morphology, highlighting the key role of soil moisture in regulating belowground processes in cloud forests.

Keywords: Fine root dynamics, Morphological traits, Vertical precipitation, Horizontal precipitation, Cloud forest.

INTRODUCCIÓN

Los bosques nublados del Parque Nacional del Manu son hotspots de la biodiversidad global y laboratorios naturales para realizar investigación de ecología moderna (Catenazzi et al., 2013; Farfan-Rios et al., 2015; Jankowski et al., 2013; Salinas et al., 2021). Estos ecosistemas se caracterizan por una alta humedad atmosférica (90%) y niebla constante, la niebla incrementa con la elevación y la precipitación incrementa con la disminución de la elevación, (Halladay et al., 2012; Rapp et al., 2012). La precipitación horizontal o cantidad de gotas finas de agua provenientes de la niebla que se adhieren a la vegetación es fundamental para la biodiversidad del dosel y para el funcionamiento de este bosque (Bubb et al., 2004; Olson & Dinerstein, 2002; Stadtmuller, 1986), sin embargo estudios recientes de 23 años (1997-2020), registraron una reducción de la niebla del 70% de bosques del neotrópico, esta reducción está relacionado al incremento de la temperatura terrestre y la deforestación en los bosques llanos de la Amazonía (Guzmán et al., 2024; Halladay et al., 2012). Además, las frecuentes sequías causadas por el fenómeno de El Niño reducen de forma sostenida la disponibilidad de agua en el suelo, generando estrés hídrico, y el incremento de la mortalidad de especies arbóreas para los bosques de la cuenca Amazónica (Berenguer et al., 2020; Doughty et al., 2015; Rowland et al., 2015). Esta disminución hídrica, producto de la reducción de precipitación vertical y horizontal, conllevan a la pérdida de la biodiversidad y el acrecentamiento de las emisiones de carbono almacenado en la capa orgánica depositada por cientos de años (Zimmermann et al., 2010, 2012).

Los experimentos de reducción de precipitación vertical se han realizado principalmente en bosques llanos de zonas templadas y tropicales (Asbjornsen et al., 2018; Brando et al., 2008; Cusack et al., 2023; Rowland et al., 2018). Estos estudios han permitido comprender cómo la sequía afecta la dinámica forestal y procesos como el ciclo del carbono en raíces finas (Brando et al., 2018; Metcalfe et al., 2010). Sin embargo, en bosques nublados tropicales, los experimentos de manipulación de precipitaciones son aún escasos; Moser et al. (2014) desarrollaron el primer experimento de reducción de precipitación vertical, en bosques premontanos. En contraste, los experimentos que reducen la precipitación horizontal (niebla) son totalmente nuevos. El experimento de Cortina de Nubes de Wayqecha representa el primer estudio de este tipo (Metcalfe et al., 2025). En este contexto, los experimentos de reducción de la precipitación vertical y horizontal en Wayqecha permiten simular escenarios de disminución hídrica asociados a cambios

hidrológicos más intensificados y el presente estudio aborda el componente de dinámica y morfología de raíces finas bajo estos tratamientos.

Estudiar la dinámica y morfología de las raíces finas, ayuda a entender cómo los bosques tropicales responden al cambio climático, principalmente al déficit hídrico en el suelo (Dorji, 2015); puesto que las raíces finas constituyen la interfaz viva entre las plantas y el suelo, regulando la absorción de agua y nutrientes, desempeñando un rol central en el funcionamiento del ecosistema (Cordeiro et al., 2025; McCormack et al., 2015). La dinámica de las raíces finas (<2 mm) comprende procesos como la producción de biomasa, el tiempo de residencia, y la fracción de carbono que se destina a la producción primaria neta de las raíces (33%) (Sierra Cornejo et al., 2020). Por ello, es un componente fundamental para entender la asignación del carbono por debajo del suelo y es sensible a sequías en los bosques tropicales (Huaraca Huasco et al., 2021; Jackson et al., 1997; Yaffar et al., 2024). Asimismo, los rasgos morfológicos de las raíces finas como la longitud específica de raíz (SRL), el área específica de raíz (SRA) y la densidad de tejido (RTD) reflejan estrategias de adquisición de nutrientes que varían según la disponibilidad de agua en los bosques tropicales (Pierick et al., 2023).

Por lo que, este estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de la precipitación horizontal y vertical en la dinámica y morfología de las raíces finas del bosque nublado de Wayqecha, Paucartambo-Cusco.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El bosque nublado de Wayqecha se caracteriza por la frecuente presencia de niebla que genera un aporte hídrico proveniente de la precipitación horizontal (Huamán Chang, 2016; Llerena et al., 2021). Este aporte de la niebla es clave en la estación de secas, cuando la precipitación vertical disminuye y la humedad del suelo depende en gran medida de la condensación del aire húmedo amazónico (Rapp & Silman, 2012; Huamán Chang, 2016). Sin embargo, en las últimas décadas se ha documentado un desplazamiento de la niebla hacia mayores elevaciones como consecuencia del calentamiento atmosférico en el valle del Kosñipata (Girardin et al., 2014; Malhi et al., 2010). Guzman et al. (2024) reportan una disminución anual de -11.33×10^{-4} en la fracción de la niebla baja en estos ecosistemas. Equivalente aproximadamente a una reducción del 0.11% de niebla por año, lo que implica una menor disponibilidad de precipitación horizontal. Además, Halladay et al. (2012) atribuyen esta disminución de la niebla al ascenso del nivel de condensación por el aumento de la temperatura, lo que disminuye la frecuencia de inmersión de la niebla en el bosque nublado de Wayqecha.

Estas condiciones de menor humedad se intensifican con eventos climáticos como El Niño; durante estos episodios, los cambios en la circulación atmosférica sobre el pacífico oriental reducen la convección en los Andes centrales (Garreaud et al., 2009). En la zona montañosa de Wayqecha, esto se traduce en una disminución adicional de la precipitación vertical, acentuando el estrés hídrico estacional del ecosistema. La prolongación de las estaciones secas altera procesos fundamentales en el funcionamiento del bosque, al reducir el agua disponible en el suelo, afecta la actividad subterránea e incrementa la mortandad de especies arbóreas (Girardin et al., 2010; Malhi et al., 2010; Rowland et al., 2015, 2019). En Wayqecha, se ha demostrado que la comunidad vegetal muestra una marcada vulnerabilidad frente al estrés hídrico (Brum et al., 2023).

Dado que estos cambios se expresan principalmente a través de la disponibilidad de agua en el suelo, los procesos subterráneos y en particular las raíces finas constituyen un componente clave para evaluar la respuesta del bosque al estrés hídrico, ya que las raíces finas son responsables de la absorción de agua y nutrientes, son particularmente sensibles a las variaciones de humedad del suelo (Carmona et al., 2022; Cordeiro et al., 2025; Ifo et al., 2015). Es así que, cambios en la precipitación horizontal y vertical tienen la capacidad de alterar la humedad del suelo y consecuentemente la dinámica de las raíces finas, incluyendo su producción, crecimiento,

mortalidad y tiempo de residencia; así como su morfología, la longitud específica, el área específica, y densidad de tejido, rasgos que repercuten directamente en las estrategias de adquisición de recursos del suelo (Freschet et al., 2021; Pierick et al., 2023).

Frente a este escenario en el bosque nublado de Wayqecha, resulta necesario evaluar la respuesta de las raíces finas frente a la reducción de la precipitación vertical y horizontal, ya que es fundamental para comprender la vulnerabilidad y resiliencia de los bosques nublados frente el cambio climático, por ello buscamos responder lo siguiente:

Formulación del problema general

¿Cuál es el efecto de la reducción experimental de precipitación horizontal y vertical en la dinámica y morfología de las raíces finas del bosque nublado de Wayqecha?

Formulación de los problemas específicos

1. ¿Cómo varía la biomasa, necromasa, stock de carbono, productividad y el tiempo de residencia del flujo de carbono en las raíces finas de la comunidad vegetal en parcelas permanentes con reducción de precipitación horizontal y vertical?
2. ¿Cómo varía la longitud específica y la densidad de tejido radicular de las raíces finas en las especies arbóreas y comunidad vegetal en respuesta a la reducción de precipitación horizontal y vertical?
3. ¿Cómo se relaciona la humedad y temperatura del suelo con la dinámica (productividad y tiempo de residencia de las raíces finas) y morfología (longitud específica, área específica y densidad de tejido) de las raíces finas?

JUSTIFICACIÓN

Estudiar la respuesta de las raíces finas frente a cambios en la precipitación es clave para identificar especies más resilientes a la sequía y a la reducción de la niebla asociada al cambio climático. Tal como señalan Brum et al. (2019) en periodos de baja disponibilidad de agua, la forma y distribución de las raíces determinan si las especies pueden evitar la sequía o tolerar sus efectos. Ya que las raíces muestran variaciones fisiológicas importantes para su supervivencia, lo que permite inferir cómo responden ante el cambio climático (Freschet et al., 2021). Los experimentos de reducción de precipitación horizontal y vertical son esenciales para generar información que apoye estrategias de adaptación al cambio climático y contribuyan al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (Wangdi et al., 2017). Este estudio constituye uno de los primeros en evaluar la reducción de precipitación horizontal y vertical en bosques nublados del Perú, proporcionando información valiosa para la conservación y gestión de estos ecosistemas altamente vulnerables.

La dinámica de las raíces finas es un componente clave del ciclo del carbono subterráneo y responde de manera sensible a los cambios en la disponibilidad hídrica (Huaraca Huasco et al., 2021; Jackson et al., 1997; Yaffar et al., 2024), especialmente en bosques tropicales expuestos a sequías. Evaluar cómo cambian la biomasa, necromasa, productividad y el tiempo de residencia bajo la reducción de precipitación horizontal y vertical permite identificar alteraciones en la renovación del carbono subterráneo y en la actividad radicular, dado que la longevidad y el tiempo de residencia de las raíces reflejan las estrategias de inversión y respuesta de las plantas frente al estrés hídrico (McCormack et al., 2015).

En cuanto a sus rasgos funcionales, la longitud específica de raíz (SRL), el área específica de raíz (SRA) y la densidad de tejido (RTD) reflejan estrategias de adquisición de recursos que dependen fuertemente de la disponibilidad de agua en los bosques tropicales (Pierick et al., 2023). Cambios en la morfología de las raíces finas pueden promover diversidad funcional, favoreciendo tanto a los árboles como a la comunidad vegetal en general, en su capacidad de ocupar distintos nichos subterráneos y acceder a recursos en diferentes momentos (Freschet et al., 2021). Evaluar cómo estos rasgos responden a la reducción de precipitación horizontal y vertical permite comprender las estrategias de supervivencia y eficiencia en el uso de recursos bajo condiciones de estrés hídrico.

Las raíces finas desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: absorben agua y nutrientes, contribuyen a la fotosíntesis mediante el suministro de recursos, almacenan carbono, participan en ciclos biogeoquímicos y contribuyen a la formación y estabilización del suelo (Green et al., 2005). Por ello, analizar la relación entre humedad, temperatura del suelo y los cambios en la dinámica y morfología radicular permite comprender cómo responden a cambios en su entorno, en este caso como las plantas ajustan la asignación de recursos frente a reducciones de disponibilidad hídrica. Estos ajustes que inciden en la productividad, la mortalidad y la estrategia energética de las raíces, aunque no se midan directamente como flujos, influyen en la entrada, almacenamiento y renovación del carbono subterráneo, aspectos clave para comprender la sensibilidad del ecosistema frente al cambio climático (Freschet et al., 2021; Girardin et al., 2013). En el contexto de Wayqecha, comprender estas respuestas es clave para anticipar cambios ecológicos y resguardar los servicios ecosistémicos que brinda este bosque nublado (Brum et al., 2023).

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el efecto de la precipitación horizontal y vertical en la dinámica y morfología de raíces finas del bosque nublado de Wayqecha, Paucartambo-Cusco.

Objetivos específicos

1. Calcular la biomasa, necromasa, stock de carbono, productividad y el tiempo de residencia de raíces finas en la comunidad vegetal en parcelas con reducción de la precipitación horizontal y vertical.
2. Cuantificar la longitud específica, el área específica y la densidad de tejido radicular de raíces finas de individuos arbóreos y comunidad vegetal, en respuesta a la reducción de precipitación horizontal y vertical.
3. Determinar la relación de la humedad y temperatura del suelo con la dinámica (productividad y tiempo de residencia de raíces finas) y morfología (longitud específica, área específica y densidad de tejido) de las raíces finas.

VARIABLES

Tabla 1

Variables de Estudio

Tipo de Variable	Variable	Indicadores	Instrumento de medida	Unidades de medida
Dependientes	Dinámica de raíces finas	Biomasa de raíces finas ($Biomasa_{rf}$)	Núcleo de crecimiento	Mg C ha ⁻¹
		Necromasa de raíces finas ($Necromasa_{rf}$)	Núcleo de crecimiento	Mg C ha ⁻¹
		Productividad de raíces (PPN_{rf})	Núcleo de crecimiento	Mg C ha ⁻¹ año ⁻¹
		Tiempo de residencia del carbono en las raíces finas (TR_{rf})	Núcleo de crecimiento	años
	Morfología de las raíces finas	Longitud específica de la raíz (SRL)	Escaneo + WinRhizo	km kg ⁻¹
		Área específica de raíces finas (SRA)	Escaneo + WinRhizo	m ² kg ⁻¹
		Densidad del tejido de la raíz (RTD)	Escaneo + WinRhizo	g cm ⁻³
Independientes	Precipitación horizontal	Dinámica de raíces finas		
		Morfología de las raíces finas		
	Precipitación vertical	Dinámica de raíces finas		
		Morfología de las raíces finas		

Tabla 2*Variables de Correlación*

Tipo de variable	Variable	Indicador	Instrumento de medida	Unidad
Independiente	Humedad del suelo	% de agua en el suelo	Sensores TMS-4	%
	Temperatura del suelo	Temperatura del suelo (5 cm)	Sensores TMS-4	°C
Dependiente	Dinámica de raíces finas	Productividad (PPN_{rf})	Núcleos de crecimiento	Mg C ha ⁻¹ año ⁻¹
		Tiempo de residencia (TR_{rf})	Núcleos de crecimiento	años
	Morfología de raíces finas	Longitud específica (SRL)	Escaneo + WinRhizo	km kg ⁻¹
		Área específica (SRA)	Escaneo + WinRhizo	m ² kg ⁻¹
		Densidad de tejido (RTD)	Escaneo + WinRhizo	g cm ⁻³

HIPÓTESIS

Hipótesis General

La reducción de la precipitación horizontal y vertical afecta la dinámica y morfología de las raíces finas, en el área de estudio, el bosque nublado de Wayqecha, Paucartambo-Cusco.

Hipótesis Específicas

1. La reducción de la precipitación horizontal y vertical disminuye la biomasa, necromasa, stock de carbono y productividad de raíces finas, y su tiempo de residencia.
2. La reducción de la precipitación horizontal y vertical modifica la longitud específica, el área específica y la densidad de tejido radicular de las raíces finas a nivel de comunidades y especies arbóreas.
3. La humedad y la temperatura del suelo se relacionan negativamente con la dinámica y morfología de las raíces finas.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. Antecedentes internacionales

Pierick et al. (2023) trabajaron a lo largo del bosque montano de 1000 a 3000 m del Parque Nacional Podocarpus, Ecuador, Loja y Zamora Chinchipe, encontraron que la diversidad funcional de los rasgos de la raíz disminuye con la elevación y aumenta con la disponibilidad de nutrientes; el diámetro de raíces finas junto con la SRL tenía una dependencia significativa con la elevación a excepción de RTD, el diámetro de las raíces aumenta y SRL disminuye con la elevación, en cuanto a las Magnoliidae en su mayoría tenía raíces finas más gruesas con SRL más bajo que Clusiaceae, Euphorbiaceae y Meliaceae del clado de Rosidae, también tenían raíces relativamente gruesas; las Myrtaceae y Melastomataceae en comparación con todas las especies tenían raíces más delgadas, Cunoniaceae, Clusiaceae y Aquifoliaceae que generalmente están en las elevaciones altas presentaron densidades de tejido de raíz mayores, pero, bajas en nutrientes. Finalmente, concluyen que los rasgos funcionales de las raíces finas son más adquisitivos en sitios de elevación más baja, tienen mayor diversidad funcional, y son más conservadores en elevaciones más altas y con suelos con menos nutrientes, y sugieren que podría deberse a que la variación de diámetro tenga relación fúngica haciendo que las raíces delgadas y gruesas sean adquisitivas.

Sierra Cornejo et al. (2020) en el monte Kilimanjaro en Tanzania a lo largo de 871 a 4550 m, determinaron la biomasa de raíces finas, la necromasa, la producción y la vida media de las raíces finas de árboles, en seis ecosistemas tropicales naturales que son: Sabana, Bosque Montano inferior, Bosque de ocotea, Bosque de Podocarpus, Bosque de Ericas, Brezales de Helichrysum, con 3.7 Mg ha^{-1} de biomasa = $1.67 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en el bosque de podocarpus, donde la productividad de raíces finas en bosques montanos fue $1.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1} = 0.59 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ la cual no se vio afectada por la altitud por debajo de 3.000 m pero disminuyó a más altitud; la necromasa fue de $6.5 \text{ Mg ha}^{-1} = 2.93 \text{ MgC ha}^{-1}$, lo que es 1.5 a 3 veces más que la biomasa a lo largo de la pendiente, la producción de raíz fina no se vio afectada por una elevación, con una esperanza de vida en bosques montanos mayores a 1 año y depende de la limitación de recursos, el diámetro de las raíces finas fue aumentando a medida de la altitud llegando a 0.9 mm en el bosque de podocarpus, RTD fue 0.25 a 0.65 g cm^{-3} en bosques montanos bajos a altos, SRL disminuyó casi 2/3 de la sabana a

el bosque de Podocarpus, la relación de SRL y el área de las raíces se relaciona muy débilmente con la temperatura pero el área de raíces si estaba mejor relacionada con la precipitación, esta área a su vez presentó una relación positiva con el diámetro de las raíces. Concluyendo que la elevación y filogenia juegan un papel importante en las raíces, donde también pueden tener que ver las relaciones simbióticas, finalmente que la mayoría de las especies usan rasgos de raíz adquisitivos y conservadores.

Pierick et al. (2021) llevaron a cabo un estudio en la Reserva Biológica San Francisco, ubicada en el Parque Nacional Podocarpus, en la región andina del sur de Ecuador, dentro de un bosque montano tropical. El área de estudio abarcó un gradiente topográfico altitudinal con pendientes pronunciadas los resultados mostraron que el diámetro de raíz aumentó significativamente con la altitud, mientras que la SRL disminuyó conforme se ascendía por la pendiente. Esto implica que, en las partes bajas, donde los suelos eran más ricos, las raíces eran más delgadas y largas por unidad de masa, una estrategia típica de adquisición eficiente de recursos. En cambio, en las partes altas, las raíces eran más gruesas y menos eficaces por unidad de biomasa, lo cual refleja una estrategia más conservadora frente a la escasez de nutrientes. En el caso de la RTD, los autores encontraron que no varió significativamente con la topografía. Este hallazgo indica que la densidad de tejido radicular está fuertemente conservada evolutivamente, es decir, más determinada por la historia filogenética de las especies que por las condiciones ambientales locales. Así, la topografía actúa como un filtro ambiental, seleccionando especies con estrategias radicales adquisitivas o conservadoras según la posición en la pendiente, pero dentro de los límites establecidos por la filogenia de cada especie.

Zhang et al. (2019), mediante un metaanálisis global de 103 estudios experimentales, evidenciaron que la reducción de la precipitación altera significativamente la biomasa, morfología y dinámica de las raíces finas. Bajo condiciones de sequía, se observó una disminución en la biomasa y el diámetro de las raíces, así como en su longitud y área superficial específicas, mientras que aumentaron la densidad del tejido y la tasa de descomposición. Estas respuestas reflejan una estrategia de adaptación al estrés hídrico, en la que las plantas producen raíces más delgadas, densas y de recambio más rápido, con el fin de reducir el costo de mantenimiento y maximizar la eficiencia en la exploración del suelo. Los autores explican que estas modificaciones están asociadas a una menor disponibilidad de carbono fotosintético, producto de la reducción en el área

foliar y la actividad estomática, lo que obliga a las plantas a priorizar estructuras radiculares de bajo costo. Estos hallazgos son relevantes para comprender las implicancias de la sequía en el ciclo del carbono subterráneo, especialmente en ecosistemas sensibles al cambio climático.

Freschet et al. (2017) utilizaron un conjunto de datos de raíces finas en todo el mundo de 55 estudios publicados en Rhizopolis, en áreas climáticas diferentes, árida, tropical, templada y fría, y en lugares de control usando macetas considerando también formas de crecimiento y filogenias, según la influencia de los tipos funcionales de la planta, las variables del suelo y el clima, estudian rasgos de raíces: diámetro medio, tejido, tejido densidad (TDR) y longitud de raíz específica (SRL). Encuentran que las condiciones climáticas que promueven la fertilidad del suelo se relacionan negativamente con los rasgos de raíz fina que ayudan la adquisición rápida de recursos del suelo, con un efecto positivo particularmente fuerte de la temperatura del suelo sobre el diámetro de raíz fina y RTD, mientras un efecto negativo sobre la SRL, la precipitación mostró relación solo con el diámetro de las raíces; las especies de áreas tropicales muestran rasgos de raíz fina relativamente conservadora (raíces finas gruesas con baja SRL y RTD); en conclusión, la lluvia y la temperatura pueden afectar la distribución y los rasgos de las raíces finas al influir en la disponibilidad de recursos y en las condiciones del suelo, la temperatura tiene el vínculo más fuerte con la variación del rasgo de raíz fina, particularmente el diámetro de raíz fina y el SRL y, en menor medida con densidad de tejido, así como el SRL es mayor en especies de crecimiento controlado, que las que crecen naturalmente.

Wangdi et al. (2017) evaluó los efectos de la reducción de precipitación en un bosque dominado por *Quercus lanata* y *Quercus griffithii*, localizado a 2460 m en los himalayas de altitud. Utilizando un experimento de exclusión de precipitación, se simuló una disminución en la disponibilidad de agua en el suelo durante el período del monzón. Los resultados indicaron que la reducción de humedad en la capa superficial del suelo (0-20 cm) fue de aproximadamente 31%, mientras que las capas más profundas (50-120 cm) fueron menos afectadas. A pesar de estas condiciones de sequía, la biomasa de raíces finas en este bosque fue mayor ($6.27 \pm 0.87 \text{ t ha}^{-1} = 2.82 \pm 0.39 \text{ Mg C ha}^{-1}$) en comparación con un bosque de coníferas estudiado en la misma región. Los autores indican que la mayoría de los estudios de exclusión de lluvia no evalúan la humedad en capas profundas, lo cual es un problema porque las raíces finas también pueden estar activas en

esas zonas durante sequías prolongadas. Se menciona que las respuestas a la sequía inducida por techos pueden ser más lentas que en una sequía natural, especialmente en raíces

Ifo et al. (2015) con el objetivo de examinar la dinámica de las raíces finas en dos tipos de bosques en la cuenca del Congo en Iboubikro, Brazzaville, en la meseta de Teke; estudiando la dinámica de raíces, buscan determinar si difieren en biomasa, productividad, y la tasa de renovación de las raíces finas entre un bosque de galería y un bosque de ladera, que se encuentran en África central, una región tropical y húmedos. Se observaron diferencias significativas en la biomasa de raíces finas entre los dos tipos de bosques analizados, con $2.49 \pm 0.19 \text{ kg m}^{-2} = 11.21 \pm 0.09 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en el bosque de galería y $1.24 \pm 0.11 \text{ kg m}^{-2} = 5.58 \pm 0.05 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en el bosque de ladera. La producción anual de raíces finas no difirió significativamente entre los dos tipos de bosques estudiados con $0.46 \pm 0.04 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en el bosque de galería y $0.36 \pm 0.02 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en el bosque de ladera en un horizonte de 20 cm, y en los otros 20 hasta 40 cm de 0.10 y 0.20 $\text{kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ respectivamente. Teniendo: Total bosque de galería: $2.52 \pm 0.02 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y Total bosque de ladera: $2.52 \pm 0.03 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En cuestión a la tasa de renovación de las raíces finas de estos entornos forestales de 0 a 40 cm fue de 0.71 años⁻¹ para el bosque de galería y 1.32 años⁻¹ para el bosque de ladera, siendo mayor la tasa de renovación en los últimos 20 cm, pero más biomasa en los 20 primeros. En conclusión, se encontraron diferencias en la biomasa de las raíces finas entre los dos tipos de bosques, el bosque de galería tuvo una biomasa mayor, sin embargo, esto no se deben a diferencias en la producción, sino a diferencias en la tasa de renovación, que pueden explicarse mejor por diferencias en la estructura del bosque; la investigación sugiere que la variación en la biomasa de las raíces finas podría deberse a factores como la disponibilidad de agua y la liberación de bioelementos durante la descomposición de la hojarasca.

Hertel & Leuschner, (2010) analizaron 87 lugares bosques tropicales húmedos en América del Sur y Central, África, Asia, Australia y Oceanía, Se incluyen bosques de tres zonas altitudinales: baja (<400 m), montano inferior (400–2000 m) y montano superior (>2000 m). encontrando que la biomasa incrementa su valor según la altitud, con biomasa promedio de raíces finas vivas; $451 \pm 45 \text{ g/m}^2 = 2.03 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Necromasa promedio $2.36 \text{ Mg C ha}^{-1}$. La acumulación se relaciona con la alta acidez del suelo, alta humedad y baja descomposición microbiana, y una

producción anual promedio de raíces finas $2.51 \pm 0.37 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo que sugiere una alta renovación y mortalidad de raíces, con valores mucho más altos en bosques montanos altos.

Moser et al. (2014) en un bosque tropical perhúmedo premontano ubicado en el valle de Pono, cerca del pueblo de Toro, en el Parque Nacional Lore Lindu (Sulawesi Central, Indonesia), realizaron un experimento de exclusión de lluvia (throughfall exclusion experiment) para simular condiciones de sequía prolongada. El estudio utilizó techos transparentes bajo el dosel en tres parcelas experimentales (0.16 ha cada una) para desviar el 60% de la precipitación durante los primeros 8 meses y el 80% durante los siguientes 17 meses, con una duración total de 25 meses. Encontraron una biomasa de 2.43 a 1.8 Mg C ha^{-1} en el primer y segundo año respectivamente, así como, una productividad de 0.88 y 0.35 Mg C ha^{-1} para el primer y segundo año encontrando diferencias significativas en ambos años, además la necromasa fue incluso mayor a la biomasa por encima de 3 veces. Indicando una alta mortalidad radicular inducida por la sequía, por lo que concluyeron que las raíces finas son muy sensibles al estrés hídrico prolongado y estas respuestas pueden compararse con los bosques neotropicales de la Amazonía.

Moser et al. (2010) estudiaron las laderas orientales de los Andes ecuatorianos del Sur, en el Parque Nacional Podocarpus, Loja y Reserva Biológica San Francisco, Zamora, Chinchipe, en cinco puntos de bosque, en 1050, 1540, 1890, 2380 y 3060 m. Donde la biomasa de las raíces finas aumentó cuatro veces entre 1000 y 3000 m; la biomasa gruesa y de raíz grande se duplicó a los 3020 m el 70% de la biomasa se encuentra en la capa orgánica, con biomasa de raíces finas 6.5 ± 0.3 en la capa orgánica, 4.8 ± 0.3 en la capa mineral y un total de 10.8 ± 0.6 todo con unidades de Mg ha^{-1} , la productividad con 2.26 ± 0.29 en la capa orgánica, 1.52 ± 0.20 en la capa mineral y un total de 3.78 ± 0.49 expresado en $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, además Las raíces finas renovaban más lentamente en altitudes altas y la cantidad de raíces muertas (necromasa) era 2.7 veces mayor que la cantidad de raíces vivas (biomasa). Concluyendo que la asignación de cambia con la elevación creciente, explicado mejor por la importancia de la limitación de los recursos del suelo, y no tanto por la limitación de la luz del crecimiento de las plantas, que promueve el crecimiento de las raíces en lugar del crecimiento de los brotes en las zonas montañosas.

Hertel et al. (2009) estudiaron la biomasa y dinámica de raíces finas en un bosque tropical pre-montano natural del Valle de Pono, Parque Nacional Lore Lindu, Sulawesi Central (Indonesia), a 1050 m s.n.m. En seis parcelas homogéneas, encontraron una biomasa de raíces finas de 2.49

Mg C ha⁻¹, concentrándose el 74% en los primeros 20 cm de suelo. La producción anual fue de 0.94 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Concluyen que el sistema radical es superficial y presenta una baja producción subterránea comparado con otros bosques tropicales.

Metcalfe, (2008) en el Bosque Nacional Caxiuanã, estado de Pará, noreste de Brasil, en una selva tropical de tierras bajas, para entender cómo las plantas pueden usar sus raíces, adaptarse a los cambios en la disponibilidad de agua, examinaron el crecimiento y morfología de las raíces y su afección por la variación en la humedad del suelo en cuatro sitios de selva amazónica con vegetación, según el tipo de suelo oxisol arenoso (sitio de arena) bien drenado, un oxisol rico en arcilla (sitio de arcilla) y un sitio fértil, posteriormente se modificó una parcela excluyendo el 50% de lluvia aproximadamente. Donde en todos los sitios, SRL y SRA medidos en la superficie de 30 cm de la capa de suelo aumentaron durante la el paso de la estación húmeda a la seca; SRL y el área específica de la raíz, fueron significativamente mayores, donde se agotó la humedad del suelo. SRL en parcela de sequía de $10 \pm 6 \text{ Km Kg}^{-1}$ y en el sitio fértil de $12 \pm 8.15 \text{ en Km Kg}^{-1}$. Concluyendo que, las raíces en general, responden similar ante los cambios de humedad, y además los cambios de la morfología indicarían estrategias para adquirir agua; finalmente, ni la temperatura del suelo ni la cantidad de hojarasca orgánica en la superficie del suelo fueron factores determinantes en la variabilidad observada en el crecimiento de las raíces de las parcelas.

Soethe et al. (2006) se realizó un estudio en Parque Nacional Podocarpus, en los Andes orientales en tres puntos, de los cuales uno era bosque montano a 3000 m Donde la distribución de la raíz es menos profunda a 3000 m, y la longitud de raíz sube en la capa orgánica en la época de secas 76% y disminuye en la época de lluvias 69%, la longitud en la estación seca fue de 13.9 km m⁻² a 3.000 m y en la temporada de lluvias la raíz tuvo un valor de 16.8 km m⁻² en 3000 m; concluyen que en bosques montanos las raíces siempre prefieren la parte orgánica del suelo para adquirir nutrientes distribución de raíz, así como la capacidad de absorción de nutrientes era menos profunda en altitudes de 3.000 m, mencionan también que probablemente la concentración marcada de finas raíces a la superficie de la capa orgánica puede estar relacionada a la alta entrada de nutrientes desde el dosel por lixiviación.

Leuschner et al. (2006) en Sulawesi central (Indonesia) en la aldea de Toro en la provincia de Donggala del Parque Nacional Lore Lindu, una de las últimas áreas más grandes del bosque montano tropical; donde encontraron una biomasa de 2.04 Mg C ha⁻¹ en bosques naturales y una

disminución en la biomasa de los bosques muy alterados, habiendo $1.14 \text{ Mg C ha}^{-1}$ como menor valor disminuyendo un 55%, concluyendo que la tala selectiva y la conversión a los sistemas agroforestales bajo la cubierta de los árboles generan que se reduzca la biomasa de las raíces finas en los bosques tropicales restantes. Concluyendo que esta disminución implica no solo reducir las tasas promedio de absorción de nutrientes y agua en bosques perturbados, sino que también redujo el almacenamiento de carbono por el sistema de raíces finas.

1.1.2. Antecedentes Locales y Nacionales

Huaraca Huasco et al. (2021) estimaron la variación dinámica de las raíces finas en bosques llanos y montanos en 47 parcelas permanentes, dentro de las cuales se incluye dos parcelas permanentes en la zona de Wayqecha; donde en promedio en la zona pantropical hubo $5.57 \pm 0.64 \text{ Mg C ha}^{-1}$ del stock de raíz fina y incremento con la elevación en regiones montanas tropicales, viendo la notoria diferencia entre bosques llanos y bosques montanos; la productividad en estos bosques, varió entre 0.97 ± 0.27 y $3.18 \pm 0.55 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ esto disminuye a mayor elevación y está relacionada con la temperatura; la asignación fraccional de la productividad primaria neta total a las raíces finas varió entre $10 \pm 1\%$ y $37 \pm 4\%$ en los bosques de montanos; el tiempo de residencia en bosques montanos es de 2.97 años, este, aumentó al incrementar la elevación, también se relaciona con el pH del suelo. Concluyen que las variables físicas y químicas del suelo explican mejor la dinámica de las raíces y sus nutrientes, no tanto las variables climáticas, sin embargo, en los bosques montanos si guardaban una fuerte relación; el tiempo de residencia tiene mayor relación con suelos ácidos y déficit máximo de agua.

Huaraca Huasco et al. (2014) en los bosques montanos tropicales de los Andes peruanos identificaron y compararon los componentes de la productividad, asignación y ciclos del carbono considerando la estacionalidad y conductores climáticos, en dos parcelas forestales de 1500 1750 m.s.n.m. en la región de San Pedro en los Andes peruanos; donde encontraron que la PPN_{rf} fue mayor en la parcela de elevación más baja con un promedio de 1.89 ± 0.30 y $1.22 \pm 0.23 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la parcela de elevación de 1500 m y 1750 respectivamente. El crecimiento de raíces finas mostró un ciclo estacional fuerte, habiendo más crecimiento entre enero y abril, el verano austral en ambas parcelas y disminuyendo en un 52 y 42% en el invierno austral como junio a agosto; en conclusión, la humedad del suelo mostró muy poca variación estacional ya que fue alta todo el año y no mostró evidencia de estrés hídrico, dado que hay mayor productividad en la

parcela de menor elevación sugieren que la disminución de la productividad en la parcela de elevación más alta podría deberse a una mayor inmersión de nubes en esa área. Finalmente, la estacionalidad de la radiación solar y la cobertura de nubes impactan la productividad de las raíces finas a través de su influencia en la fotosíntesis y la disponibilidad de nutrientes.

Oliveras et al. (2014) evaluaron la PPN en los pastizales alpinos tropicales andinos de Acjanaco (puna) y compararon con la PPN de los bosques nubosos montanos de Wayqecha y Esperanza; la productividad de la raíz fina subterránea se determinó utilizando la técnica del núcleo de crecimiento, PPN_{rf} varió dentro del rango de 1.3- 2.2 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, siendo significativamente mayor en Acjanaco que en Wayqecha con 2.4 ± 0.2 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, en promedio en las dos zonas montanas 1.42 ± 0.41 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, donde la productividad de raíces finas aportó el 50 al 80% de la productividad total general en temporada de lluvias; el stock de raíces finas fue 7.24 Mg C ha⁻¹ en Wayqecha considerando 30cm de suelo, el tiempo de residencia subterráneo en Wayqecha fue 3.78 ± 0.81 años, la cual varió en y varió entre 1 y 2.8 años con resultados de la puna; las condiciones húmedas y frías generan tasas lentas de descomposición, lo que promueve un alto almacenamiento de carbono en el suelo, finalmente concluyen que no difieren significativamente en la PPN, que la presencia de carbono en el suelo entre los pastizales y los bosques nublados tropicales de montaña y las diferencias de PPN entre las zonas no es necesariamente porque estén afectadas por pastoreo o quema.

Girardin et al. (2014) estudiaron la productividad primaria neta total del ecosistema a 3000 m en el valle de Kosñipata, determinó la productividad de raíces finas en Esperanza con 1.41 ± 0.21 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ y en Wayqecha con 1.90 ± 0.35 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, encontraron una fuerte estacionalidad en la productividad de raíces finas, y se debe principalmente a cambios en la fotosíntesis, destacando la importancia de la variación en la radiación solar, donde los árboles invierten más en la producción de biomasa en la estación más fría con menor radiación solar y más en mantenimiento durante el período de radiación solar más cálido y alto.

Girardin et al. (2013) evaluaron los bosques montanos tropicales en el valle de Kosñipata, Cusco, determinaron que el stock de raíces finas incrementa con la altitud significativamente a 4.95 ± 0.62 Mg C ha⁻¹. Además, productividad de raíces finas de 1.31 ± 0.23 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (para 3020 m) valores corregidos con una subestimación de raíces de hasta un 31%, con significativa estacionalidad; en la temporada húmeda es mayor la productividad, el tiempo de residencia con

3.78 ± 0.81 años, incrementa a mayor altitud y son más altas en tierras más cálidas, la temperatura del suelo es el impulsor clave del tiempo de residencia, con una disminución de 0.17 años por cada grado de temperatura del aire. Hallaron $28.70 \pm 3.52 \text{ km kg}^{-1}$ para la longitud de raíz fina y $57.55 \pm 5.92 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ para el área específica de raíz fina; finalmente, mencionan que es probable que las bajas temperaturas, los suelos ácidos y la baja disponibilidad de nutrientes a altas elevaciones sean los factores dominantes que controlan el tiempo de residencia de la raíz fina, todo esto genera diferencias en las condiciones minerales del suelo, tasas de descomposición más lentas puede explicar el aumento de la biomasa subterránea dentro de la zona de inmersión de las nubes, más no hay diferencia significativas de productividad.

1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.2.1. Bosques Nublados- Bosques tropicales montanos

Los bosques nublados también llamados montanos se ubican en las pendientes de la cordillera de los Andes y se caracterizan por su amplia diversidad de especies y microclimas; además, presentan una composición de especies poco conocida y distinta a los bosques llanos de la Amazonía (Zimmermann et al., 2012). Poseen un clima influenciado por la constante presencia de nubes y una variación de la temperatura a diferentes elevaciones; la materia orgánica del suelo se incrementa con la elevación y disminución de la temperatura (Malhi et al., 2010). Estos bosques presentan formas biológicas peculiares, en su mayoría con árboles de entre 10 y 35 m de altura y la copa de los árboles con alta diversidad de epífitos, el sotobosque de estos ecosistemas presenta una gran cantidad de helechos, musgos, hepáticas y plantas herbáceas; donde se desconoce en su mayoría el impacto de la mano del hombre y las adaptaciones a los efectos del cambio climático (Anderson et al., 2012, 2012; Tejedor et al., 2012).

La extensión de los bosques montanos tropicales presenta variaciones en las estimaciones debido a diferencias en los criterios de definición y clasificación. Según Bubb et al. (2004), la superficie potencial de los bosques montanos tropicales es de aproximadamente $380,000 \text{ km}^2$, lo que representa cerca del 2.5% de la superficie total de bosques tropicales en el mundo. Por otro lado, (Brujinzeel et al., 2011) hacen una estimación más específica para los bosques nubosos tropicales de montaña, que constituyen un subtipo dentro de los bosques montanos, y reportan una superficie aproximada de $214,630 \text{ km}^2$, equivalente al 1.4% de la superficie total de bosques tropicales.

Estos ecosistemas cumplen un rol importante en la regulación de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera (Honorio & Baker, 2010). Además, su importancia en el almacenamiento y fijación del carbono atmosférico ayudan a regular el efecto del cambio climático (Ataroff, 2001), con la degradación de estos ecosistemas se pierde la capacidad de proveer servicios ecosistémicos o el almacenamiento de carbono debido a las diferentes tendencias climáticas (Anderson et al., 2012). Son ecosistemas poco frágiles, de difícil acceso y ecológicamente diversos con alto endemismo estudiados (Kappell & Brown, 2001; Killeen et al., 2007; Young, 1992).

Malhi et al. (2010) los describe como ecosistemas intrigantes debido a su originalidad, su importancia para la biodiversidad y la ecología en las regiones del neotrópico, y como laboratorios naturales para entender el funcionamiento de estos ecosistemas. Así también indican 5 razones por las cuales es importante estudiar estos bosques: (1) Los bosques tropicales de alta elevación son intrínsecamente interesantes, ya que son evolutivamente y ecológicamente distintos a los bosques llanos. (2) La variación de la biodiversidad de especies a lo largo de las diferentes elevaciones es responsable de los hotspots de biodiversidad en regiones tropicales. (3) Albergan abundantes especies endémicas y contribuyen a la riqueza de los hotspots de biodiversidad. (4) Los transectos de elevación en estos ecosistemas son excelentes laboratorios naturales para comprender las consecuencias de los factores abióticos y bióticos sobre el funcionamiento de estos bosques, especialmente la temperatura. (5) La conservación de los bosques montanos y su conectividad con los bosques llanos es esencial para cualquier estrategia de conservación.

1.2.2. Precipitación horizontal

Es la captación de humedad directamente de la niebla por los árboles, vegetación en general, dándose cuando el vapor de agua se condensa en estas superficies y luego cae como precipitación; es también llamada de muchas formas como por ejemplo, intercepción, el cual como ingreso extra causa una diferencia en aumento en el balance hídrico, combinado con las bajas temperaturas en las zonas montañosas, llega a ser importante en la ecología de los bosques esta podría mantener un río incluso en época de secas (Ramírez Rodríguez, 2011; Stadtmuller, 1986). Una definición similar es la de Domínguez Borrero et al. (2024) quienes indican que la precipitación horizontal ocurre cuando las diminutas gotas de vapor que se desplazan con el viento chocan contra la vegetación, además para estimar adecuadamente este tipo de lluvia es importante

conocer la presencia y comportamiento de la niebla, ya que actúa como una forma indirecta de precipitación.

1.2.3. Precipitación vertical

La precipitación vertical es el ingreso del agua que cae desde las nubes hacia la tierra, esto ocurre cuando el peso de las gotas de agua, al ser grandes vencen la fuerza de arrastre de aire ascendente y caen al suelo como lluvia, cada milímetro de lluvia es a un litro de agua en un metro cuadrado de superficie (Arroyave, 2007 como se citó en Canchig Haro & Garcés Echeverría, 2019).

1.2.4. Cambio climático

El cambio climático corresponde a alteraciones sostenidas en las condiciones climáticas a largo plazo, asociadas principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por actividades humanas (IPCC, 2023). Es un hecho que el calentamiento global se manifiesta a través de incrementos en la temperatura, y también se observan cambios en los patrones de precipitación, particularmente notorios en las vertientes de los andes, donde la cobertura de nubes está experimentando modificaciones; estos cambios climáticos llevan a un aumento en la frecuencia de eventos extremos como sequías, olas de calor, frío y precipitaciones intensas, fenómenos que ya estamos presenciando (Anderson et al., 2012; Foster, 2001).

El estrés relacionado con el clima es un cambio clave para analizar en los bosques tropicales; en los trópicos los cambios de las condiciones climáticas durante el año son menos pronunciado que en otras regiones y son generalmente caracterizado por temporadas secas y lluviosas, dichos cambios en el agua del suelo pueden afectar la absorción de nutrientes y la distribución de raíz con profundidad del suelo (Rowland et al., 2018; Soethe et al., 2007).

Los eventos climáticos extremos, como las sequías registradas en el 2005 y 2010, han sido asociados a alteraciones en el ciclo hidrológico, con evidencias como la muerte de las especies arbóreas; además, después del fenómeno del Niño de 1997 hay estudios que comprueban que las sequías afectarían más en la fotosíntesis, así como en la absorción de CO₂ y crecimiento de plantas (Doughty et al., 2015; Rowland et al., 2018). Los cambios en las lluvias son más variables y extremos, y es lo más difícil de predecir, sus efectos en los ecosistemas se han estudiado poco y solo recientemente (Dorji, 2015).

1.2.5. Sequia

La sequía puede definirse como un evento climático severo y transitorio que se manifiesta cuando una zona recibe precipitaciones significativamente por debajo de su promedio durante un periodo extendido, puede abarcar desde meses hasta varios años, este fenómeno puede presentarse incluso en regiones habitualmente húmedas (Vega Jácome, 2018). La sequía prolongada reduce de forma sostenida la disponibilidad de agua en el suelo y provoca estrés hídrico que puede desencadenar mortalidad arbórea (Rowland et al., 2015).

1.2.6. Desplazamiento altitudinal de la niebla

En los bosques montanos nublados de los Andes peruanos, la niebla se forma cuando el aire cálido y muy húmedo procedente de la Amazonía asciende por las laderas orientales. Al elevarse, este aire se enfría y el vapor de agua se condensa, generando nubes y niebla (Rapp & Silman, 2012). Sin embargo, este proceso está siendo alterado por el cambio climático. Halladay et al. (2012) explican que el aumento de la temperatura superficial del mar incrementa la liberación de calor latente en la atmósfera, lo que reduce el gradiente térmico vertical. Esto provoca que el nivel de condensación por ascenso, es decir, la altitud a partir de la cual el aire se enfría lo suficiente como para formar nubes, se desplace hacia niveles más elevados. Entonces, áreas que permanecían inmersas en niebla constante ahora pueden quedar por debajo de esta capa de nubes, perdiendo humedad y enfrentando cambios en su microclima.

1.2.7. Raíces finas

Las raíces finas son los órganos de las plantas con alta capacidad de absorber agua y nutrientes, están formadas por un meristemo subapical y una estructura anatómica distinta de otros órganos de la planta (Freschet et al., 2021; Hertel & Leuschner, 2010). Las raíces finas comúnmente consideradas aquellas con un diámetro inferior a 2 mm, presentan una vida subterránea dinámica. Sin embargo, a diferencia de las hojas, estas no desaparecen de forma simultánea, ni se distinguen como estructuras claramente delimitadas al finalizar su ciclo vital (Kubisch et al., 2016). Son llamadas finas, porque tienen la capacidad de adquirir nutrientes y agua del suelo (Jackson et al., 1997), gracias a su estructura no leñosa, son de vida corta y están asociados con muchos microorganismos (hongos, bacterias, virus, etc.). Además, tienen funciones transitorias por la alta producción y mortalidad que presentan en los ecosistemas terrestres (Chen et al., 2019).

Mientras que las raíces mayores de 2 mm es decir las raíces gruesas, cumplen la función de transporte de agua y nutrientes, soporte y anclaje (Quinto Mosquera et al., 2016). las raíces finas desempeñan un papel más complejo, ya que deben optimizar simultáneamente la adquisición de agua y de al menos 15 minerales esenciales en un suelo altamente heterogéneo (Weemstra et al., 2016).

Las principales funciones de las raíces finas en los ecosistemas terrestres según Freschet et al., (2021) son las siguientes para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres:

- Aumentan localmente la superficie de intercambio
- Proporcionan un mayor número de sitios posibles para las asociaciones de micorrizas, asociaciones simbióticas
- Capacidad de absorción e intercambio de recursos
- Características de conducción
- Resistencia mecánica y anclaje.
- Exudación de carbono
- Participan en los ciclos biogeoquímicos, y en el almacenamiento de carbono.

1.2.8. Biomasa de raíces finas ($Biomasa_{rf}$)

La biomasa de las raíces finas vivas es la masa de materia orgánica seca contenida en una unidad de área ($g\ cm^{-2}$, $kg\ m^{-2}$, $Mg\ ha^{-1}$), que es componente de la biomasa subterránea (Alvarado Villa & Cobos Miguitama, 2019). La cantidad de biomasa almacenada en las raíces finas puede variar con la profundidad del suelo y con el tipo de bosque, así como sus valores están relacionados con el clima, la cantidad de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes en el suelo, y con la biomasa aérea (Leuschner et al., 2006), también es un indicador importante para la captura de recursos del suelo por parte de las plantas. Además, Quinto Mosquera et al. (2016) mencionan que la biomasa alta de las raíces en la parte superficial del suelo está relacionada con la precipitación y lixiviación de nutrientes.

1.2.9. Necromasa de raíces finas ($Necromasa_{rf}$)

La necromasa es la cantidad de materia orgánica seca o carbono almacenado en las raíces finas muertas, en diferentes grados de descomposición (Godbold et al., 2003). Las unidades de medida de la necromasa de las raíces finas son igual a la biomasa ($g\ cm^{-2}$, $kg\ m^{-2}$, $Mg\ ha^{-1}$). Se

menciona que, así como el crecimiento de las raíces usa el carbono producido, la necromasa de raíces es una fuente importante de carbono en el suelo (Kubisch et al., 2016), y el incremento de la necromasa determina la mortalidad de raíces finas (Priess et al., 1999)

1.2.10. Stock de carbono en las raíces finas ($Stock_{rf}$)

Es la cantidad de carbono total que se encuentra presente en la biomasa y necromasa de las raíces finas ($g\ C\ cm^{-2}$, $kg\ C\ m^{-2}$, $Mg\ C\ ha^{-1}$) a diferentes profundidades del suelo. Los valores pueden variar con los ecosistemas terrestres, como los bosques tropicales, templados, boreales y pastizales (Murphy & Moore, 2010). También, están relacionados con las propiedades fisicoquímicas del suelo y factores climáticos ambientales (Huaraca Huasco et al., 2021).

1.2.11. Dinámica de raíces finas

La dinámica de las raíces está determinada por la producción de nuevas raíces (crecimiento), la tasa de mortalidad, tiempo de residencia (tiempo de vida) (Rosado et al., 2011), por tanto a la descomposición de estas. Además, la dinámica de las raíces está directamente relacionada al ciclo del carbono subterráneo (flujo de carbono) y los nutrientes del (Huaraca Huasco et al., 2021; Ifo et al., 2015). Investigaciones en cuanto a la dinámica de las raíces finas involucran a la productividad y al tiempo de residencia parte primordial de la dinámica de raíces finas, así como la relación con el ambiente edáfico (Chen et al., 2019; Freschet et al., 2021; Quinto Mosquera et al., 2016)

1.2.11.1. Productividad primaria neta de raíces finas (PPN_{rf})

Es la biomasa nueva de las raíces finas menores a 2 mm de diámetro acumulada por unidad de superficie del suelo y por unidad de tiempo (Girardin et al., 2013; Huaraca Huasco et al., 2021). En el estudio de Vogt et al. (1986), la productividad de raíces finas es entendida funcionalmente como la biomasa generada en un determinado intervalo de tiempo. Las unidades de medida de la PPN_{rf} varían al área de colecta de la producción de las raíces finas ($g\ C\ cm^{-2}\ día^{-1}$, $kg\ C\ m^{-2}\ mes^{-1}$, $Mg\ C\ ha^{-1}\ año^{-1}$).

1.2.11.2. Tiempo de residencia de las raíces finas (TR_{rf})

Es la fracción de la producción total de las raíces finas por la cantidad total de la biomasa inicial o stock de carbono total y se mide en unidades de tiempo (Freschet et al., 2021), se refiere al tiempo que permanece cualquier unidad de biomasa dentro de las

estructuras vivientes de los tejidos de la raíz, y representa un aproximado de la vida útil de la raíz fina. Es un determinante clave de la acumulación de carbono del suelo y los nutrientes disponibles y las unidades se expresan en año (Majdi et al., 2005; Strand et al., 2008).

1.2.11.3. Tasa de recambio o renovación de raíces finas

La tasa de recambio es que tan frecuentemente cambia una raíz de acuerdo al año, es el inverso de la longevidad, haciendo referencia a la vida útil, como lo llama (Kubisch et al., (2016), hablamos de cuantas veces por año se reemplaza la raíz (Graefe et al., 2008) entonces las unidades se expresan en año⁻¹.

1.2.12. Rasgos morfológicos de raíces finas

Los rasgos morfológicos de las raíces finas varían con la estructura externa como el diámetro, la longitud, y superficie externa (Freschet et al., 2021). La longitud de las raíces en los bosques tropicales montanos decrece, el diámetro es más delgado, para maximizar la capacidad de absorción de nutrientes del suelo (Girardin et al., 2013). La capacidad de absorción de agua y nutrientes está relacionada con la disminución de diámetros, incremento de la longitud y área de superficie de las raíces. Sin embargo, las plantas con estrategias conservadoras tienen las tasas de absorción bajas, diámetros grandes, está relacionado con la superficie de área, tiempo de vida, y una longitud corta de la raíz (M. L. McCormack & Guo, 2014; Reich et al., 2014; Sierra Cornejo et al., 2020; Strand et al., 2008).

Los sistemas de raíces pueden adaptarse de manera flexible según las condiciones de suelo, estas características influenciadas por factores genéticos y ambientales sirven como indicadores de nutrición de árboles (Ostonen et al., 2007). Los rasgos morfológicos destacan por ser relativamente simples de cuantificar, un papel claro de manera individual es a nivel de la planta, están asociadas a procesos del suelo como el crecimiento, la muerte y descomposición de raíces, así también a las características de la parte aérea de la planta (Kong et al., 2014). En los bosques tropicales, la alta diversidad filogenética se asocia a una mayor variabilidad en la morfología de raíces finas: las especies con raíces delgadas suelen tener mayor crecimiento radical, mientras que las de raíces gruesas dependen más de las micorrizas (Kubisch et al., 2016).

1.2.12.1. Diámetro de las raíces finas

El diámetro se debe considerar como una variable que se moldea y a su vez es transitoria porque responde a las características del suelo (resistencia mecánica, disponibilidad de oxígeno, contenido de agua) así como a la disponibilidad de fotoasimilados (Freschet et al., 2021).

1.2.12.2. Área específica de raíces finas (SRA)

Se define como la proporción entre la superficie de la raíz y su masa seca. Este rasgo se define como la proporción entre la superficie de la raíz y su biomasa, expresa cuanta superficie externa de raíz hay por unidad de biomasa, puede reflejar cuan capaz de absorber agua y nutrientes se puede absorber por el contacto entre suelo y raíz (De La Riva et al., 2021; Iversen et al., 2021; McCormack & Iversen, 2019).

1.2.12.3. Longitud específica de la raíz (SRL)

Representa la relación entre la longitud y la masa de un fragmento de raíz; es uno de los atributos morfológicos más usados en el estudio de raíces finas, ya que se considera un buen indicador de la eficiencia del sistema radicular en el uso de recursos (Ostonen et al., 2007). Este rasgo morfológico da a conocer la capacidad que tienen las raíces de explorar el suelo para encontrar nutrientes y agua, ya que refleja la eficiencia para generar superficie de absorción en relación con la biomasa o el carbono invertido en la construcción de raíces (Kramer-Walter et al., 2016) por ello esta característica es clave para estudios donde haya competencia de recursos; además las raíces finas tienen el meristema apical más pequeño y su duración de crecimiento es menos de 10 años (Freschet et al., 2021).

1.2.12.4. Densidad de tejido radicular (RTD)

Se define como la masa seca de la raíz por unidad de volumen de raíz fresca (Freschet et al., 2021). En la mayoría de los casos el valor alto RTD está relacionado a estrategias de crecimiento (Niklas, 1995; Vernescu & Ryser, 2009; Kitajima & Poorter, 2010 como se citó en Freschet et al., 2021).

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

2.1.1. UBICACIÓN

El bosque nublado del Área de Conservación Privada Wayqecha, se encuentra ubicada en la zona de amortiguamiento de la Reserva de Biosfera del Manu, en el distrito de Kosñipata, provincia de Paucartambo, departamento de Cusco, Perú. Estos ecosistemas son cabeceras de la subcuenca del río Kosñipata y la cuenca del Alto Madre de Dios (Tito Leon, 2019) (Figura 1).

El presente trabajo se realizó en cuatro parcelas permanentes previamente instaladas en el año 2017, por la Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales (ABIDA), establecidas para el proyecto: La Importancia De Las Nubes Para La Biodiversidad, Hidrología y Secuestro De Carbono Del Bosque Tropical Nublado y “Ampliación y mejora de un experimento único de reducción de nubes para evaluar los impactos del cambio climático futuro en la ecología de los bosques nubosos tropicales (Extending and enhancing a unique cloud reduction experiment to assess the impacts of future climate change on tropical cloud forest ecology)” (Metcalf et al., 2024).

Tabla 3

Ubicación de las Parcelas Según el Tratamiento

Código de la parcela permanente	N.º de subparcelas	Área total	Zona	Este (m)	Norte (m)	Tratamiento de las parcelas
CON-PV	9	900 m ²	19L	219577	8540518	Parcela control precipitación vertical
TRT-PV	9	900 m ²	19L	219548	8540463	Parcela reducción de precipitación vertical
CON-PH	9	416 m ²	19L	219396	8540059	Parcela control precipitación horizontal
TRT-PH	9	416 m ²	19L	219449	8540050	Parcela reducción de precipitación horizontal

Figura 1

Mapa de ubicación del área de estudio



2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

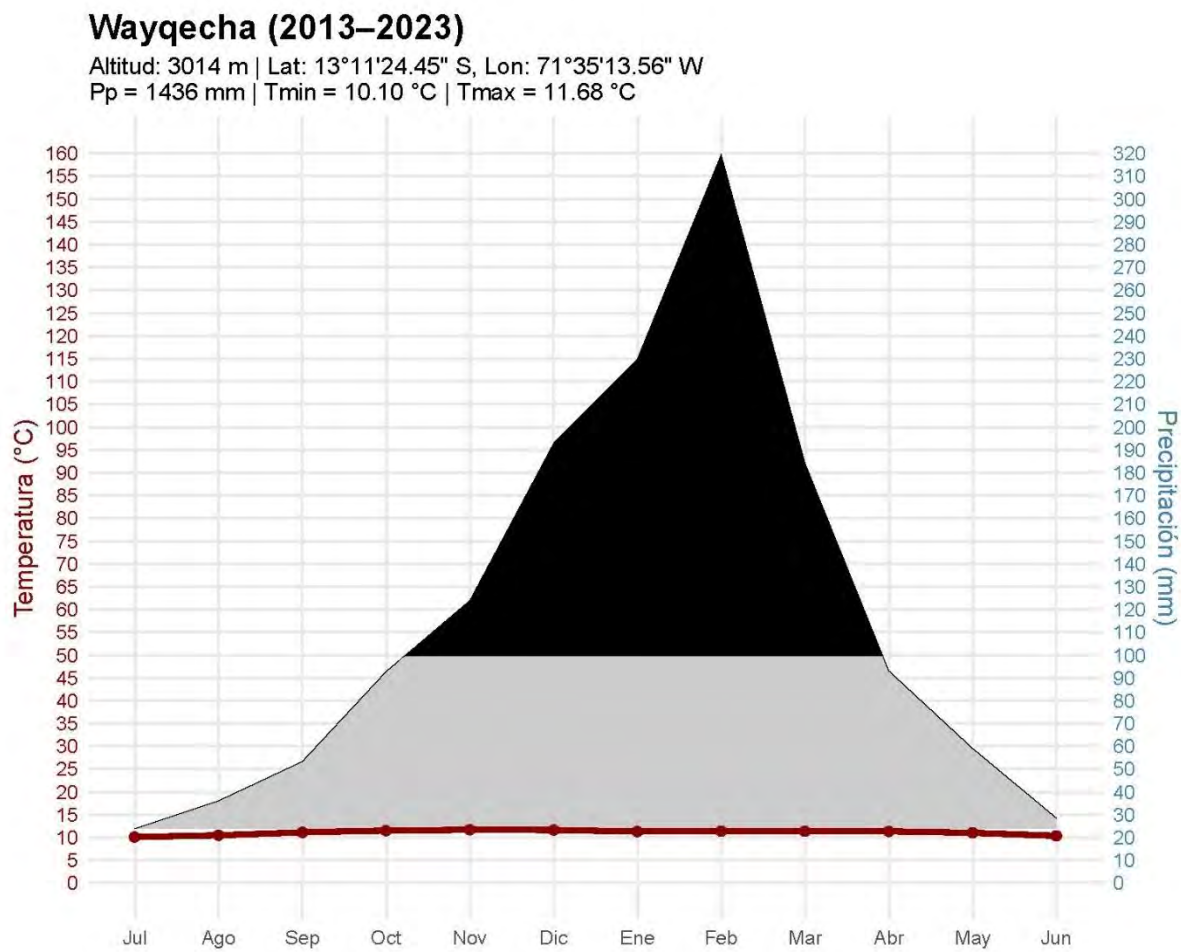
2.1.2.1. Clima

El ecosistema del bosque nublado de Wayqecha, se caracteriza por una alta heterogeneidad climática, con una estacionalidad marcada de la precipitación y una relativa estabilidad térmica anual. Este tipo de bioma forma parte del bosque montano tropical húmedo, cuya formación y dinámica están estrechamente relacionadas con la interacción entre la topografía andina y la entrada de masas de aire húmedo amazónico (Bush et al., 2004; Tovar et al., 2013). Estos bosques tienen una humedad relativa alta (90%), esto debido a la niebla y a las temperaturas del lugar, lo que hace que se mantengan húmedos casi de forma continua (Halladay et al., 2012; Rapp & Silman, 2012).

Según los datos climáticos del periodo 2013–2023, la estación Wayqecha (3014 m) registra una temperatura media anual de 11.11 °C que varía entre 10.1 °C y 11.68 °C, evidenciando una temperatura constante a lo largo del año, con una oscilación térmica de 1.58 °C, con una precipitación total anual de 1436 mm. La distribución de lluvias es claramente estacional, concentrándose entre los meses de noviembre a marzo, con un pico en febrero. En contraste, los meses de junio a agosto son significativamente más secos, lo que define un período de sequía.

Figura 2

Climatodiagrama del área de estudio



Nota: El Climatodiagrama muestra las temperaturas (línea roja) superpuestas con las precipitaciones mensuales (áreas sombreadas). La franja gris representa las lluvias dentro del umbral de 100 mm/mes, mientras que la zona negra destaca los excedentes que marcan la temporada de lluvias intensas. Este tipo de representación permite visualizar la relación entre la estacionalidad de las lluvias y la constancia térmica anual, información fundamental para entender los procesos ecológicos y fenológicos de la vegetación en el bosque nublado andino.

2.1.2.2. Suelo

Los suelos son umbrisoles, predominantemente arcillosos, con alta acidez y baja fertilidad

natural, lo que se traduce en limitaciones de nutrientes esenciales, como nitrógeno y fósforo, tienen una capa orgánica con una profundidad de 20 a 26 cm (Asner et al., 2017; Burt et al., 2023; Nottingham et al., 2018). Estas condiciones edáficas influyen en la productividad y estructura del bosque montano nublado, generando una alta acumulación de materia orgánica en horizontes superficiales debido a la lenta descomposición en ambientes fríos y húmedos (Girardin et al., 2013, 2014).

2.1.2.3. Geología

la zona se caracteriza por formaciones sedimentarias de edad paleozoica y mesozoica, constituidas principalmente por areniscas y lutitas, además de rocas metamórficas que afloran en algunos sectores, todas ellas sujetas a procesos erosivos intensos debido a la marcada pendiente del relieve andino (Girardin et al., 2014; Oliveras et al., 2014). En particular, la geología de la cuenca está dominada por lutitas metasedimentarias, que representan cerca del 80 % del área, mientras que el 20 % restante corresponde a una intrusión plutónica que también forma parte de la estructura geológica regional (Clark et al., 2014).

Estas características geológicas, sumadas a la topografía pronunciada, favorecen tasas de erosión elevadas. De hecho Dellinger et al. (2023) reportan que en Wayqecha las tasas de erosión oscilan entre 1,200 y 3,500 toneladas por kilómetro cuadrado por año, lo que promueve la oxidación del carbono orgánico contenido en las rocas sedimentarias y afecta directamente los ciclos biogeoquímicos regionales.

2.1.2.4. Hidrología

Wayqecha forma parte de la subcuenca alta del Kosñipata, la hidrología está dominada por la lluvia, que aporta aproximadamente el 91 % del agua anual (3112 ± 414 mm/año), mientras que la precipitación horizontal (niebla) contribuye cerca del 9% (316 ± 116 mm/año). El agua se pierde principalmente como escorrentía (2796 ± 126 mm/año) y mediante evapotranspiración real (688 ± 138 mm/año). A pesar de la marcada estacionalidad de las lluvias, el caudal del río se mantiene en la estación seca gracias al flujo base proveniente de agua subterránea profunda, que libera lentamente el agua almacenada durante la temporada húmeda (Clark et al., 2014).

2.1.2.5. Vegetación y composición florística del área de estudio

Anteriormente se reconocieron, para Wayqecha, diez unidades de vegetación, entre ellas se encuentran: el bosque mesófilo de montaña abierto, caracterizado por un dosel de 10 a 15 metros y vegetación arbustiva densa; el bosque mesófilo húmedo denso, con árboles que alcanzan hasta 20 metros y presencia abundante de *Chusquea dombeyana*; el bosque mesófilo de montaña sin *Chusquea*, con un dosel cerrado y sotobosque oscuro; y diferentes tipos de vegetación seca y abierta como el bosque seco esclerófilo (abierto y denso), matorrales húmedos (abiertos y arbolados) y pastizales húmedos por encima de los 3000 msnm. Cada una de estas unidades responde a condiciones particulares de altitud, pendiente, profundidad del suelo y exposición solar (Chávez y Valenzuela, 2008, como se cita en Huamán Chang, 2016).

Flora del bosque montano

El bosque montano de Wayqecha alberga una notable diversidad de especies arbóreas, arbustivas, herbáceas y epífitas. En instalaciones de parcelas permanentes de 1 ha, se identificaron 50 especies, agrupadas en 34 géneros y 26 familias botánicas, lo que da cuenta de la riqueza florística del área (Rivera Campos, 2007). Entre las familias más representativas se encuentran Cunoniaceae, Clusiaceae, Lauraceae, Melastomataceae, Rubiaceae y Primulaceae, con un mayor número de especies registradas, para las especies de *Weinmannia crassifolia*, *Weinmannia bangii*, *Weinmannia reticulata*, *Clusia flaviflora*, *Ocotea andina*, *Miconia micropetala*, *Cinchona hirsuta*, *Myrsine coreaceae* (Farfan-Rios et al., 2015). Este patrón de riqueza de especies es coherente con lo descrito por Tello et al., (2015), quienes reportan que los bosques montanos andinos presentan un alto recambio de especies entre parcelas cercanas en altitudes intermedias, como las que caracterizan al área de estudio.

En los bosques montanos de la Estación Biológica Wayqecha, Huamán Chang, 2016 identificó una alta diversidad de orquídeas epífitas, con un total de 73 especies pertenecientes a 17 géneros registrados durante el estudio. Esta riqueza específica incluye géneros representativos de los bosques nublados andinos como *Epidendrum*, *Lepanthes*, *Cyrtorchilum*, *Stelis*, *Telipogon*, *Oncidium*, *Pleurothallis* y *Trichosalpinx*, entre otros. El género *Epidendrum* fue el más diverso con 12 especies, seguido de *Lepanthes* con 10 y *Cyrtorchilum* con 9 especies. La presencia de géneros como *Telipogon*, del cual se reportaron siete especies, resalta la singularidad florística del área, ya que algunas de estas especies han sido descritas únicamente en esta localidad.

2.2. MATERIALES

2.2.1. Material biológico

- Raíces finas menores a 2 mm de diámetro.

2.2.2. Equipos e insumos

2.2.2.1. Equipos

- Estaciones meteorológicas automáticas
- Sensores de humedad del suelo (TOMTS)
- Cámara fotográfica
- Computadora
- Monitores

2.2.2.2. Material de gabinete

- Horno de secado
- Scanner
- Balanza digital 0.001g
- Vernier
- Pinzas
- Tijeras
- Sobres tamaño visita
- Sobres tamaños A5
- Bandejas
- Bandejas de agua
- Cinta
- Micas plásticas
- Papel toalla

2.2.2.3. Material de campo

- Materiales de jardinería (pico, pala, rastrillo, todos estos en tamaño pequeño)
- Vernier
- Palas draga
- 10 metros de mallas plásticas para jardinería

- Guantes de jardinería
- Bolsas ziploc de diferentes tamaños
- Bolsas plásticas
- Cronometro
- Recipientes o bandejas
- Tamices finos, cernidores
- Tijeras de podar
- Marcadores permanentes
- Lista de especies arbóreas de las parcelas a estudiar
- Cuaderno de campo
- Lápiz
- Cintillos
- Cinta flagging

2.2.2.4.Softwares

- Excel
- Programa R Studio
- WinRhizo Pro
- Software Lolly

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. Tipo de investigación

- Según su Diseño: Experimental

La investigación experimental se caracteriza por la manipulación o control intencional de una o más variables independientes (tratamientos) para evaluar sus efectos en una o más variables dependientes, con el objetivo de establecer relaciones causales (Arias Gonzáles, 2021). El presente estudio corresponde a un diseño experimental, porque se manipuló el ingreso de precipitación en las parcelas de tratamiento mediante estructuras instaladas para reducir la precipitación vertical y la precipitación horizontal. Estas dos formas de precipitación constituyeron las variables independientes, ya que fueron modificadas de manera intencional para generar

condiciones contrastantes de disponibilidad hídrica. Las variables dependientes que responden a dicha manipulación, fueron los indicadores de la dinámica (biomasa, necromasa, productividad, tiempo de residencia) y morfología de las raíces finas (longitud específica (SRL), área específica (SRA) y densidad de tejido (RTD)).

- Según el periodo del tiempo: Longitudinal

El estudio es longitudinal porque las mediciones se realizaron de manera repetida en el tiempo, durante un periodo de tres años (2021, 2022 y 2023), utilizando núcleos de crecimiento, con colectas periódicas (muestreo cada 3 meses para la productividad de raíces finas) lo que permitió observar la variación temporal en las raíces finas frente a los tratamientos de reducción de precipitación. Ya que, los estudios longitudinales examinan las variables en múltiples puntos a lo largo del tiempo, permitiendo observar cambios, tendencias y procesos de desarrollo (Haro Sarango et al., 2024).

- Según el enfoque de variables: Cuantitativo

La investigación cuantitativa se basa en la medición objetiva con la recopilación de datos numéricos, y el análisis estadístico de los datos, permitiendo establecer relaciones entre variables (Vásquez Ramírez et al., 2023). Por lo que, la investigación es de enfoque cuantitativo, ya que se recolectaron datos numéricos sobre biomasa, necromasa, productividad, tiempo de residencia y rasgos morfológicos, así como condiciones de humedad y temperatura del suelo.

2.3.2. Línea de investigación

Según la RESOLUCIÓN N.º D.2205-2022-FC-UNSAAC, el presente trabajo perteneciente al área de conocimiento de ciencia, tecnología y ambiente sigue a la línea de investigación definida de Cambio Climático.

2.3.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis estuvo constituida por las raíces finas (≤ 2 mm de diámetro) y fueron utilizadas para evaluar dos niveles de análisis:

- (1) la comunidad de raíces finas, en la que se determinó la dinámica y los rasgos morfológicos; y
- (2) las especies arbóreas dominantes, de las cuales se analizaron rasgos morfológicos específicos.

En el presente estudio se utilizó la clasificación de raíces finas según su diámetro (<2 mm), en lugar de la clasificación por orden de ramificación. Esta decisión metodológica responde a que el diámetro es un criterio ampliamente empleado en estudios de dinámica y productividad de raíces finas, al estar directamente asociado con funciones fisiológicas de absorción y con tasas de recambio más rápidas (McCormack et al., 2012; Pregitzer, 2002). La aproximación por diámetro permite una comparación más directa con estudios previos en ecosistemas andinos y facilita la evaluación de la dinámica de raíces finas.

2.3.4. Población de estudio

La población de estudio incluyó las raíces finas presentes en los suelos de las cuatro parcelas estudiadas.

2.3.5. Tamaño de muestra

La selección de las unidades de muestreo y de las especies se realizó siguiendo criterios metodológicos de representatividad espacial, dominancia y disponibilidad de raíces finas, excluyéndose aquellas especies o unidades que no presentaron material suficiente para el análisis morfológico.

a) Componente de comunidades

Criterios metodológicos para definir la muestra

En el estudio de comunidades de raíces finas, se emplearon un total de 20 núcleos de crecimiento (IC) distribuidos en las cuatro parcelas experimentales:

- CON-PV: 5 IC distribuidos en 9 subparcelas.
- TRT-PV: 5 IC distribuidos en 9 subparcelas.
- CON-PH: 5 IC distribuidos en 9 subparcelas.
- TRT-PH: 5 IC distribuidos en 9 subparcelas.

La determinación del tamaño de muestra se basó en la recomendación del protocolo RAINFOR, que sugiere instalar 16 núcleos de crecimiento por hectárea de terreno (Marthens et al., 2013). Dado que las parcelas del estudio tienen áreas menores a 1 ha (416–1200 m²), el cálculo proporcional indica un requerimiento mínimo de 1 a 2 IC por parcela. Sin embargo, para

asegurar una mejor representatividad espacial, se utilizaron 5 IC por parcela, superando ampliamente el mínimo recomendado.

b) Componente de especies

Criterios metodológicos para definir la muestra

En conjunto se analizaron diez especies arbóreas, seleccionadas en función de su representatividad en cada experimento de reducción de precipitación. En cada tratamiento se evaluaron seis especies arbóreas, distribuidas de la siguiente manera:

En las parcelas reducción de precipitación vertical, se incluyeron las especies: *Clusia alata*, *Clusia flaviflora*, *Meliosma frondosa*, *Prunus integrifolia*, *Weinmannia bangii* y *Weinmannia crassifolia*

En las parcelas reducción precipitación horizontal, se muestrearon las especies: *Meliosma frondosa*, *Miconia micropetala*, *Myrsine coriacea*, *Ocotea glabriflora*, *Prunus integrifolia* y *Weinmannia reticulata*.

La selección de las especies se realizó considerando como criterios metodológicos su dominancia dentro de cada parcela experimental, así como la disponibilidad de raíces finas en cantidad suficiente y en condiciones adecuadas para el análisis morfológico.

2.3.6. Descripción de las parcelas de muestreo

El muestreo se realizó en parcelas permanentes ya instaladas, en el año 2017, por la Asociación (ABIDA) para el proyecto ya mencionado. Las parcelas permanentes, divididas en subparcelas, se modificaron experimentalmente con fines de reducir la precipitación horizontal y vertical.

- Parcela **tratamiento de reducción de precipitación vertical** (TRT-PV) de 900m² en el cual se construyó una estructura elevada, que simula un techo, con paneles de polietileno coextruida y tri-capa resistente contra radiación UV, instalado a dos metros sobre el nivel del suelo, que impide la entrada de lluvia directa (figura 3a). Dicho experimento provocó una sequía extrema, en los primeros 30 cm de suelo, reduciendo la humedad en un 80% (Brum et al., 2023). Este experimento cuenta con una parcela comparativa de **control de**

precipitación vertical (CON-PV) de 900m^2 la cual se encuentra bajo condiciones naturales, sin modificación alguna.

- Parcela denominada **tratamiento de reducción de precipitación horizontal** (TRT-PH) de 416 m^2 , cuenta con un sistema de exclusión del ingreso de niebla mediante mallas Rachell de 90% con gramaje 105 gr/m^2 , instaladas en todos los bordes de la parcela hasta cubrir completamente el dosel (figura 3b). Las mallas, de estructura vertical, se extienden desde el nivel del suelo hasta aproximadamente 30 m de altura, con una longitud total de 40 m, suspendidas entre dos torres metálicas lo que permite reducir el ingreso de precipitación horizontal. De acuerdo con el modelo hidrológico aplicado por (Metcalf et al., 2024), la instalación de las cortinas redujo aproximadamente un 14% del ingreso de humedad proveniente de la niebla en la parcela. Esta parcela cuenta con una parcela comparativa correspondiente a una parcela en condiciones naturales control de precipitación horizontal (CON-PH) con un área de 416 m^2 .

Figura 3.

Parcelas experimentales de estudio



Nota: a) Parcela tratamiento de reducción de precipitación vertical. fotografía cortesía de Elias Condori, comunicación personal 2023 y b) Parcela tratamiento de reducción de precipitación horizontal. Fotografía cortesía de Scott Larotta, comunicación personal, 2024.

2.3.7. Métodos de colecta y procesamiento de raíces finas

2.3.7.1. Cálculo de la biomasa, necromasa, stock, productividad y el tiempo de residencia del flujo de carbono en las raíces finas

Para calcular la biomasa, necromasa, stock, productividad y el tiempo de residencia del flujo de carbono en las raíces finas, en las parcelas permanentes ya instaladas, se siguieron los lineamientos del manual Amazon Forest Inventory y Global Ecosystem Monitoring networks – RAINFOR-GEM (Marthews et al., 2013; Metcalfe et al., 2007), diseñados específicamente para ecosistemas tropicales. Considerando las dimensiones de las parcelas de muestreo, se establecieron cinco puntos para la instalación de cinco núcleos de crecimiento de suelo distribuidos sistemáticamente en cada parcela, asegurando una representación espacial adecuada.

2.3.7.1.1. Biomasa de raíces finas

Para coleccionar la biomasa subterránea de las raíces finas, en el año 2022 mes de mayo, se extrajeron cinco muestras de suelo para los núcleos de crecimiento, estas muestras de suelo fueron extraídos mediante la apertura de cinco hoyos, con ayuda de una pala draga, simulando el volumen del núcleo de crecimiento (12 cm de diámetro y con una profundidad de 30 cm).

El suelo extraído, fue empleado para la recolección manual de las raíces, siguiendo el protocolo de Metcalfe et al. (2007), con una modificación: la extracción se realizó, considerando cada 10 cm de profundidad de suelo (0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm), dividiendo el tiempo en 4 intervalos proporcionales de 3 minutos con 20 segundos por cada sección de 10 cm de suelo, completando un total de 40 minutos por núcleo de crecimiento. Las raíces finas vivas extraídas fueron separadas en raíces finas (< 2 mm), raíces gruesas (> 2 mm), y almacenadas en bolsas plásticas previamente codificadas con el código de parcela, número de muestra e intervalo de profundidad, cabe resaltar que se mantuvo la codificación y el orden del muestreo durante todo el proceso.

Posteriormente, en laboratorio, las raíces fueron lavadas cuidadosamente utilizando cernidores finos < 0.5 mm de apertura, en baldes con agua a chorro suave. Una vez limpias, las raíces fueron secadas ligeramente con papel toalla, transferidas a sobres de papel codificados y secadas en horno a una temperatura constante de 60–70 °C hasta alcanzar un peso seco constante. Luego una vez secas, fueron pesadas con una balanza digital de precisión de 0.001 g;

posteriormente, se realizó el análisis correspondiente de la biomasa total por cada punto de muestreo. La biomasa de raíces finas vivas se estimó utilizando la siguiente ecuación 1, y las conversiones respectivas de las unidades de la biomasa de g cm^{-2} a Mg C ha^{-1} .

$$\text{Biomasa} = \text{Peso seco de raíces finas vivas (g) /unidad de área (cm}^2\text{)} \dots (1)$$

$$\text{Biomasa (Mg C ha}^{-1}\text{)} = (\text{Peso seco de raíces (g) / } (\pi \times (\text{radio del IC})^2)) \times (10\,000 \text{ cm}^2 / 1 \text{ m}^2) \times (10\,000 \text{ m}^2 / 1 \text{ ha}) \times (1 \text{ Mg} / 1\,000\,000 \text{ g}) \times 0.45 \dots (2)$$

2.3.7.1.2. Necromasa de raíces finas

Durante el lavado de las raíces finas extraídas del suelo, se realizó la separación de raíces vivas y raíces muertas (necromasa), con ayuda de pinzas metálicas. La identificación se basó en criterios ampliamente utilizados, que incluyen la elasticidad del tejido, la cohesión de la corteza y la presencia o ausencia de turgencia (Leuschner et al., 2001, como se citó en Sierra et al., 2020). Para confirmar la condición del tejido, se evaluó también el color interno y externo de la raíz: las raíces se consideraron vivas cuando presentaban interior blanco, amarillo o gris y mostraban tejido flexible; mientras que la necromasa se identificó por colores marrones, oscuros o negros, junto con la pérdida de elasticidad. Las raíces parcialmente descompuestas o con degradación parcial del tejido fueron clasificadas como vivas (Bhuiyan et al., 2017).

La necromasa se estimó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Necromasa} = \text{Peso seco de raíces finas muertas(g) /unidad de área (cm}^2\text{)} \dots (3)$$

La conversión se realizó de g cm^{-2} a Mg C ha^{-1}

$$\text{Necromasa (Mg C ha}^{-1}\text{)} = (\text{Peso seco de raíces muertas (g) / } (\pi \times (\text{radio del IC})^2)) \times (10\,000 \text{ cm}^2 / 1 \text{ m}^2) \times (10\,000 \text{ m}^2 / 1 \text{ ha}) \times (1 \text{ Mg} / 1\,000\,000 \text{ g}) \times 0.45 \dots (4)$$

2.3.7.1.3. Stock de carbono en las raíces finas

El stock de carbono en raíces finas se cuantificó considerando tanto las raíces finas vivas como las raíces finas muertas (necromasa), siguiendo el mismo protocolo, establecido en el manual de campo del Amazon Forest Inventory y Global Ecosystem Monitoring networks – RAINFOR-GEM (Marthews et al., 2013; Metcalfe et al., 2007), sin modificaciones.

Para ello, una vez por año durante el 2021, 2022 y 2023 se realizaron cinco extracciones de suelo por parcela, con el uso de una pala draga, simulando el volumen del núcleo cilíndrico de 12 cm de diámetro por 30 cm de profundidad (equivalente a los núcleos de crecimiento). Se extrajo todo el suelo de cada hoyo y se procedió a recolectar manualmente todas las raíces finas vivas y muertas (necromasa) contenidas en ese volumen, por 40 minutos en 4 tiempos de 10 minutos (Metcalf et al., 2007). Esta extracción representa el valor inicial del stock de carbono en raíces finas para cada parcela. Las raíces extraídas fueron almacenadas en bolsas plásticas codificadas, lavadas cuidadosamente con cernidores, baldes y pinzas, y posteriormente secadas en horno a 60–70 °C hasta alcanzar peso constante. Finalmente, se pesaron en una balanza digital de precisión (0.001 g).

$$\text{Stock (Mg C ha}^{-1}\text{)} = (\text{Peso seco total de raíces (g)} / \pi \times (\text{radio del IC})^2) \times (10\,000 \text{ cm}^2 / 1 \text{ m}^2) \times (10\,000 \text{ m}^2 / 1 \text{ ha}) \times (1 \text{ Mg} / 1\,000\,000 \text{ g}) \times 0.45 \dots (5)$$

2.3.7.1.4. Productividad de raíces finas

Para estimar la productividad de raíces finas, se empleó el método de núcleos de crecimiento o ingrowth cores, durante los años 2021, 2022 y 2023 en intervalos de 3 meses, conforme a lo establecido en el manual de campo de Amazon Forest Inventory y Global Ecosystem Monitoring networks - RAINFOR-GEM (Girardin et al., 2010; Marthews et al., 2013; Metcalfe et al., 2007). Este método permite cuantificar la producción de raíces finas vivas hasta los 30 cm de profundidad.

Inicialmente, se extrajo el suelo de cada parcela hasta los 30 cm de profundidad utilizando una pala draga, con un diámetro de 12 cm, simulando el volumen del núcleo de crecimiento. Este suelo fue empleado para estimar el stock inicial de raíces finas, tanto vivas como muertas. Posteriormente, el mismo volumen de suelo fue devuelto al hueco original, introduciendo simultáneamente el núcleo de crecimiento, que consistía en un cilindro de malla plástica (tipo malla de jardín) de 12 cm de diámetro y 35 cm de longitud, quedando expuesto por encima de suelo los 5 centímetros del núcleo.

La recolección de raíces se realizó cada tres meses durante tres años (2021, 2022 y 2023), en cuatro tiempos distintos, siguiendo el protocolo del manual GEM sin modificación alguna. A diferencia de la metodología aplicada para la biomasa total, en este caso no se separaron las raíces

por intervalos de profundidad, y se extrajeron directamente desde los 30 cm completos de suelo en cada evento de muestreo.

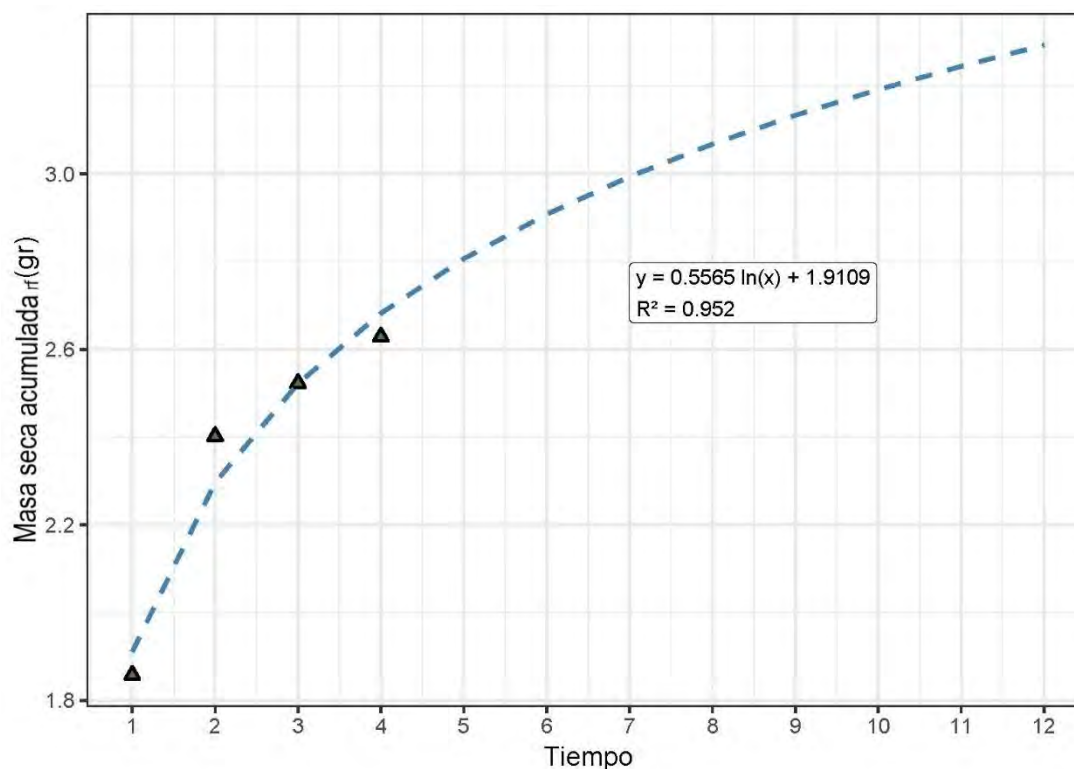
Las raíces obtenidas, de igual manera fueron colocadas en bolsas plásticas codificadas de acuerdo al tiempo de muestreo, número de parcela y número de núcleo. Posteriormente, fueron lavadas cuidadosamente con tamices finos, baldes y pinzas, secadas con papel toalla, y transferidas a sobres de papel codificados. Finalmente, se secaron en horno entre 60–70 °C hasta alcanzar la masa constante, y se pesaron en una balanza digital con precisión de 0.001 g.

$$\text{Productividad (Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}) = \text{Biomasa (Mg C ha}^{-1}) / \text{tiempo (año)} \dots (6)$$

Para calcular la biomasa, necromasa, el stock y la productividad de raíces finas se siguió el protocolo del Manual RAINFOR-GEM (Marthews et al., 2013), el cual indica que, a partir de cuatro colectas realizadas en intervalos de tiempo establecidos, cada 10 minutos, se proyecta el valor acumulado del peso seco de raíces finas hasta el tiempo 12 (120 minutos). Para esto, se obtiene el modelo lineal logarítmico, con la acumulación de masa seca de las raíces finas. Donde el peso acumulado es igual a la pendiente (a) multiplicado por el logaritmo natural del tiempo (t) más el intercepto b ($y = a \cdot \ln(t) + b$). Este modelo lineal logarítmico, permite calcular el valor total de raíces acumuladas que habrían sido recolectadas hasta 120 minutos (Figura 4). Posteriormente, estos valores fueron utilizados para el cálculo de biomasa (raíces finas vivas), necromasa (raíces finas muertas) y stock de carbono en raíces finas (vivas y muertas), y extrapolados a unidades de Mg C ha⁻¹, siguiendo los lineamientos establecidos por Metcalfe et al., (2007) y Marthews et al., (2013). Además, la masa seca de las raíces finas se convirtió en unidades de carbono, asumiendo el 45% como carbono en la masa seca de las raíces finas (Iversen et al., 2017).

Figura 4

Extrapolación logarítmica para la determinación de biomasa de raíces finas



Nota: Extrapolación logarítmica de la masa seca acumulada de raíces finas (g) en función del tiempo de colecta (cada unidad equivale a 10 minutos). Los triángulos verdes representan los valores observados en cuatro tiempos de muestreo, mientras que la línea discontinua corresponde al modelo de ajuste logarítmico ($y = 0.5565 \ln(x) + 1.9109$, $R^2 = 0.952$). El modelo permitió estimar la tendencia de acumulación de masa seca hasta 120 minutos y posteriormente la determinación de biomasa.

2.3.7.1.5. Tiempo de residencia.

Para calcular el tiempo de residencia de las raíces finas, se realizó la relación entre la biomasa total y la productividad anual de las mismas (Galbraith et al., 2013). El cálculo parte de la estimación de la biomasa ganada en raíces finas por año, a partir de los valores obtenidos trimestralmente mediante los núcleos de crecimiento, extrapolados hasta el tiempo 12 según lo detallado previamente. Una vez estimados estos valores de biomasa acumulada por año (en $\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), se calculó el tiempo de residencia, siguiendo la siguiente relación.

Tiempo de residencia (años) = Biomasa de raíces finas (Mg C ha^{-1}) / Productividad anual de raíces finas ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) ... (7)

2.3.7.2. Cuantificación de la longitud específica, área específica y la densidad de tejido de las raíces finas, a nivel de comunidades y de especies arbóreas en las diferentes parcelas

2.3.7.2.1. *Colecta de raíces finas a nivel de comunidad*

Para el análisis morfológico de raíces finas a nivel de comunidad, se utilizaron las muestras obtenidas durante el muestreo inicial de biomasa realizado en el año 2022; según los lineamientos del manual Amazon Forest Inventory y Global Ecosystem Monitoring networks – RAINFOR-GEM (Marthews et al., 2013; Metcalfe et al., 2007). Este primer muestreo consistió en la extracción manual de las raíces del suelo del mismo volumen de los núcleos de crecimiento (30 cm de profundidad por 12 cm de diámetro). Las raíces finas vivas extraídas de este primer muestreo que fueron lavadas, y antes del análisis de peso seco, fueron escaneadas para evaluar sus características morfológicas. Estas muestras, permitieron tanto el cálculo de biomasa como el análisis de los diferentes rasgos morfológicos a nivel de comunidad total.

2.3.7.2.2. *Colecta de raíces finas según las especies arbóreas*

La colecta de los rasgos morfológicos de las raíces finas a nivel de especies arbóreas se realizó de acuerdo con la lista de especies de la base de datos de ABIDA, siguiendo la metodología de Carmona et al. (2022) con algunas modificaciones, adaptadas a las condiciones del bosque nublado y al tipo de trabajo. Las raíces de las especies arbóreas fueron rastreadas en la base del árbol, siguiendo la raíz del tallo para evitar confundirlas con otra especie. Se excavó cuidadosamente la superficie del suelo en la base de cada especie arbórea, desde 0 hasta 20 cm de profundidad, para alcanzar las raíces laterales principales. Posteriormente, se recolectaron las raíces finas del primer orden, y para uniformizar el tamaño de la muestra extraída, se tomó aproximadamente 20 gr de raíz.

Las muestras de raíces colectadas fueron limpiadas con el debido cuidado, se rociaron con un poco de agua y se almacenaron dentro de bolsas de plástico Ziploc, con una bolsa por muestra individual, debidamente etiquetada con un marcador permanente. Para una mejor identificación, se usaron los mismos códigos de las parcelas, seguidos del número de árbol (los árboles estudiados

contaban con un número de identificación desde el momento de la instalación de la parcela) y la fecha de colecta.

Finalmente, al no ser analizadas inmediatamente las raíces fueron almacenadas en un refrigerador (2-6 °C) hasta días posteriores donde se procedió a escanearlas.

2.3.7.2.3. Limpieza de raíces finas

La limpieza de las raíces finas se realizó en tamices finos (cernidores) cuidadosamente a chorro suave de agua, con la ayuda de baldes y pinzas. Se mantuvo el mismo orden de muestreo en campo y los códigos de colecta; una vez limpiadas las muestras, se realizó con cuidadoso manejo un ligero secado con papel toalla a modo de prepararlas para el siguiente proceso.

2.3.7.2.4. Escaneo de raíces finas

Con la ayuda de pinzas y estiletes se realizó el escaneo de las raíces finas, utilizando un escáner Canon Scan LIDE 1200, se obtuvo fotografías en 300 ppi y formato tiff; guardamos la imagen agregando la palabra "ROOTS" al comienzo del nombre seguida de la parcela, ID del árbol, y se usó la numeración normal para relacionar las imágenes de la misma especie en caso sean necesarias más de una imagen, en caso pertenezcan al mismo tiempo del IC (por ejemplo: "ROOTS_CON_T104_FICUS_Sp_01.tiff) este fue el código en caso de especie o "ROOTS_CON_IC1_T1_01".

2.3.7.2.5. Secado y pesado de raíces finas

Inmediatamente después de escanear las raíces finas, fueron secadas en un horno a temperaturas entre 60 -70 ° C aproximadamente hasta alcanzar una masa constante, posterior fueron pesadas en una balanza digital de 0.001g de precisión. Se debe considerar que el peso sirvió para determinar la biomasa, necromasa, stock y productividad, así como, rasgos morfológicos de comunidades y especies arbóreas.

2.3.7.2.6. Procesamiento de imágenes escaneadas

Los rasgos morfológicos se calcularon a partir de los escaneos de la raíz utilizando el software WinRhizo, que brindó datos una vez cargadas la imagen y proporcionado las opciones las cuales deseamos calcular. Se procesaron las imágenes según las parcelas, y según las especies, con su código respectivo.

Los valores obtenidos para los diferentes parámetros anatómicos de las raíces finas se expresan inicialmente en unidades como centímetros (cm), centímetros cuadrados (cm²) y centímetros cúbicos (cm³). Estos valores son utilizados para calcular indicadores funcionales clave de las raíces, tales como:

- *Longitud específica:*

$$\text{SRL (cm/g)} = \text{Longitud total (cm)} / \text{Masa seca (g)} \dots (8)$$

Conversión:

$$\text{SRL (km/kg}^{-1}\text{)} = \text{SRL (cm/g)} \times (0.00001 \text{ km} / 1 \text{ cm}) \times (1000 \text{ g} / 1 \text{ kg}) \dots (9)$$

- *Área específica:*

$$\text{SRA (cm}^2\text{/g)} = \text{Área total (cm}^2\text{)} / \text{Masa seca (g)} \dots (10)$$

Conversión:

$$\text{SRA (m}^2\text{/kg}^{-1}\text{)} = \text{SRA (cm}^2\text{/g)} \times (1 \text{ cm}^2 / 0.0001 \text{ m}^2) \times (1 \text{ kg} / 1000 \text{ g}) \dots (11)$$

- *Densidad de tejido:*

$$\text{RTD (g/cm}^3\text{)} = \text{masa seca (g)} / \text{volumen (cm}^3\text{)} \dots (12)$$

2.3.7.3. Relación de la humedad y temperatura del suelo con la dinámica y morfología de raíces finas

La medición de la humedad y temperatura del suelo, se realizó mediante el uso de sensores automáticos TMS-4 dataloggers, previamente instalados y distribuidos sistemáticamente, donde se registraron datos de humedad del suelo y temperatura del suelo, 6 cm por debajo de la superficie del suelo; los dataloggers registraron cada 15 minutos y la descarga de la data se realizó mensualmente (Figura 5). Estos datos permitieron determinar la relación de la humedad y temperatura con las variables obtenidas de la dinámica y morfología de raíces finas.

Figura 5

Sensores TMS-4 instalados en el suelo de las parcelas de estudio



Nota. a) descarga de datos del sensor TMS en la parcela control precipitación vertical b) TMS instalado en la parcela control precipitación horizontal

2.3.8. Análisis estadístico

Se realizaron diferentes pruebas estadísticas en función de la naturaleza de los datos.

- La dinámica de raíces finas de la comunidad vegetal fue analizada de la siguiente manera: Para la biomasa y el tiempo de residencia de raíces finas, cuyos datos llegaron a presentar una distribución normal, se realizó los análisis de varianza (ANOVA). En caso de la distribución de la biomasa de raíces finas con la variación de la profundidad del suelo, y en el caso de la productividad, se realizó un ANOVA de dos factores, así como comparaciones post-hoc para realizar comparaciones mas según cada profundidad; para el stock de carbono de raíces finas se utilizó ANOVA de 2 de dos vías así como comparaciones post- hoc; para la productividad al no tener una distribución normal de los datos, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con comparaciones post- hocs.
- Las variables de rasgos morfológicos de la comunidad vegetal (longitud específica, área específica y densidad de tejido radicular), tampoco presentaron normalidad,

por lo que se empleó igualmente la prueba de Kruskal-Wallis con pruebas post hoc. Para el análisis de estos mismos rasgos morfológicos de raíces finas en especies arbóreas se utilizaron ANOVAS, ya que si presentaron normalidad y fueron apoyadas de pruebas post hoc.

- Para evaluar el efecto de la humedad y la temperatura del suelo con la dinámica y morfología de las raíces finas, se aplicaron dos análisis estadísticos: el primero, modelos lineales mixtos generalizados (GLMMs) para la relación de la productividad con las variables de humedad y temperatura del suelo, considerando efectos fijos de las variables de suelo y efectos aleatorios asociados al diseño experimental (repeticiones por IC), usando el paquete glmmTMB para R (Brooks et al., 2017); y el segundo, las correlaciones de Spearman para el resto de variables dinámicas (tiempo de residencia) y morfológicas (SRL, SRA y densidad de tejido).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software R versión 4.2.2 (RStudio 2022.12.0 Build 353). La validez de los resultados de acuerdo con las características de los datos, permitió responder a los objetivos generales y específicos de la investigación.

CAPÍTULO III:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS

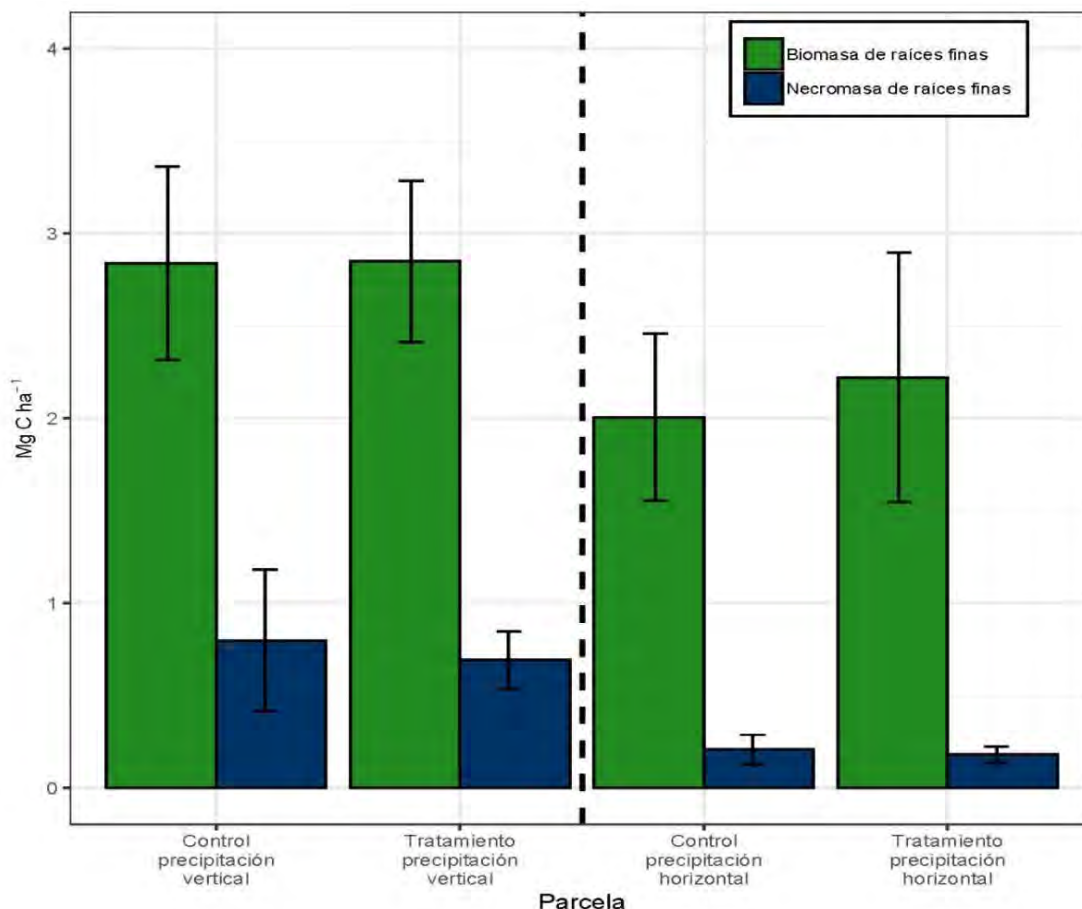
3.1.1. Dinámica de las raíces finas

3.1.1.1. Biomasa y Necromasa de raíces finas de la comunidad vegetal

En la Figura 6 se muestra que la biomasa de raíces finas no presenta variaciones en los valores promedio de las parcelas de tratamiento y control, hasta los 30 cm de profundidad del suelo. La parcela con tratamiento de precipitación vertical presentó el valor más alto, con un promedio de $2.85 \pm 0.44 \text{ Mg C ha}^{-1}$, en comparación con el control de precipitación vertical con $2.81 \pm 0.52 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal, presentaron valores de $2.01 \pm 0.45 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y $2.22 \pm 0.68 \text{ Mg C ha}^{-1}$ respectivamente. La necromasa en las parcelas de precipitación horizontal fue de $2.01 \pm 0.45 \text{ g}$ en el control y $2.22 \pm 0.68 \text{ g}$ en el tratamiento, mientras que en precipitación vertical fue de $2.81 \pm 0.52 \text{ g}$ en el control y $2.85 \pm 0.44 \text{ g}$ en el tratamiento.

Figura 6

Comparación de los valores promedio de la biomasa de raíces finas y necromasa de raíces finas del año 2022



Nota: Las barras representan el promedio de la biomasa de raíces finas (verde), necromasa de raíces finas (azul), expresado en Mg C ha⁻¹, con sus respectivas barras de error, para el año 2022. La línea discontinua separa las parcelas de tratamiento de precipitación vertical y horizontal.

Análisis de varianza para la biomasa y necromasa total de raíces finas

Con el fin de evaluar si existen diferencias significativas en la biomasa y necromasa total de raíces finas entre las parcelas control y tratamiento para cada experimento de precipitación (horizontal y vertical), se realizó un análisis de varianza (ANOVA de un factor), considerando como factor fijo el tipo de parcela. Los datos para este análisis se encuentran en el Anexo 2.

Las hipótesis planteadas para la biomasa de raíces fueron las siguientes:

H₀: No existen diferencias significativas en la biomasa total de raíces finas entre el control y el tratamiento.

H₁: Existen diferencias significativas en la biomasa total de raíces finas entre el control y el tratamiento.

Tabla 4

Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0036	0.0036	0.0036	0.9538
Residuales	7	7.0104	1.0015		

En la Tabla 4 se muestra que no existen diferencias estadísticamente significativas entre la parcela control y el tratamiento de la precipitación vertical ($F_{1,7} = 0.0036$; $p = 0.9538$). El alto valor de p indica que no se rechaza la hipótesis nula, evidenciando que la manipulación de la precipitación vertical no produjo cambios significativos en la biomasa total de raíces finas.

Tabla 5

Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.1142	0.1142	0.0692	0.7992
Residuales	8	13.2159	1.652		

En la Tabla 5 el análisis estadístico indica que no existen diferencias significativas entre la parcela control y el tratamiento en parcelas de precipitación horizontal ($F_{1,8} = 0.0692$; $p = 0.7992$). Dado que el valor de p es mayor a 0.05, no se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que el

tratamiento de precipitación horizontal no tuvo un efecto significativo sobre la biomasa total de raíces finas.

Las hipótesis planteadas para el análisis de necromasa fueron:

H₀: No existen diferencias significativas en la necromasa de raíces finas entre las parcelas control y tratamiento.

H_a: Existen diferencias significativas en la necromasa de raíces finas entre las parcelas control y tratamiento.

Tabla 6

Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0252	0.0252	0.0785	0.7875
Residuales	7	2.2469	0.3210		

En la Tabla 6 el Análisis de varianza muestra que no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre la parcela control y el tratamiento ($F_{1,7} = 0.0785$; $p = 0.7875$). Este resultado indica que la manipulación de la precipitación vertical no tuvo un efecto significativo sobre la necromasa total de raíces finas, manteniéndose valores similares entre ambas parcelas.

Tabla 7

Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa total de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0021	0.0021	0.1009	0.7589
Residuales	8	0.1629	0.0204		

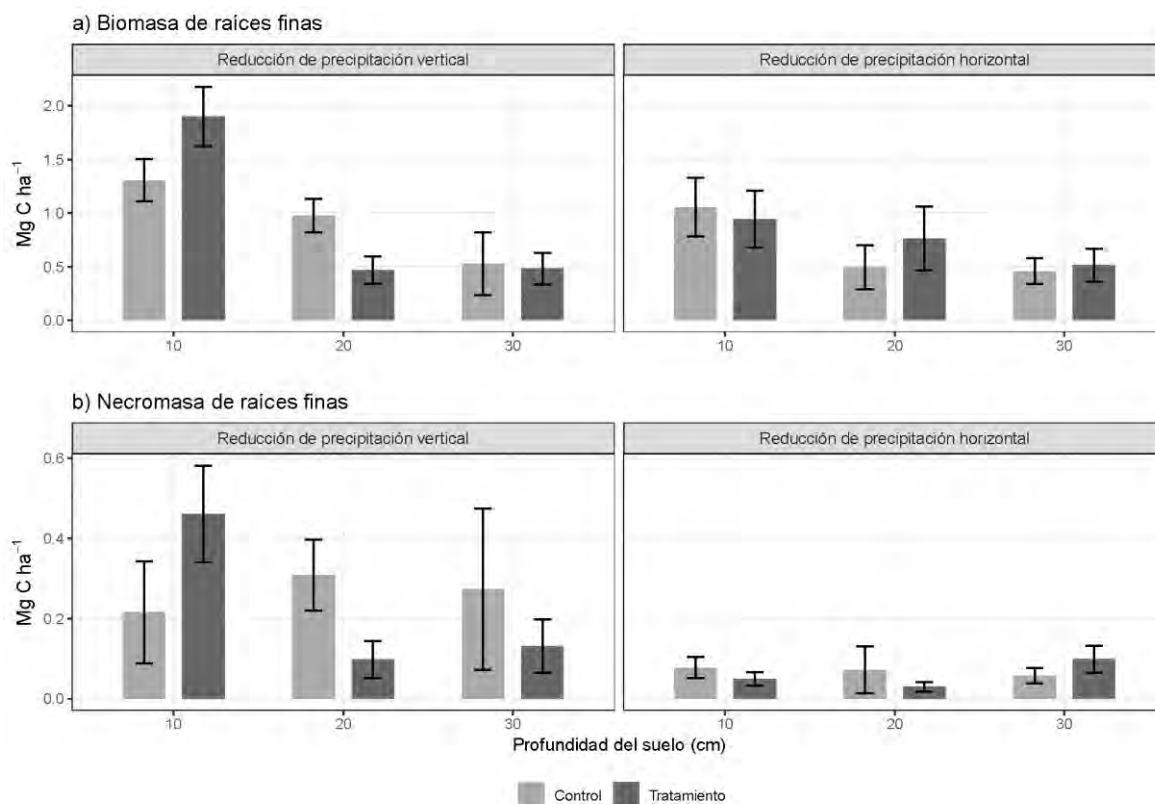
En la Tabla 7 el análisis estadístico indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre la parcela control y el tratamiento ($F_{1,8} = 0.1009$; $p = 0.7589$). El valor de p,

mayor a 0.05, indica que no se rechaza la hipótesis nula, sugiriendo que la manipulación de la precipitación horizontal no generó cambios significativos en la necromasa total de raíces finas.

En las Figuras 7 y 8 se muestra la distribución de la biomasa y la necromasa de raíces finas en función de la profundidad del suelo. En las parcelas de precipitación vertical, la biomasa disminuyó con la profundidad del suelo en parcela control, desde $1.31 \pm 0.20 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en el estrato 0–10 cm (85.8 % del stock) hasta $0.53 \pm 0.29 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en 20–30 cm (65.9 % del stock). En el tratamiento, la biomasa también presentó una reducción con la profundidad, pasando de $1.89 \pm 0.28 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (80.5 % del stock) en la capa superficial a $0.48 \pm 0.15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (78.5 % del stock) en el estrato más profundo. La necromasa mostró un patrón complementario, aumentando su contribución con la profundidad del suelo. En el control, los valores variaron de $0.22 \pm 0.13 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (14.2 % del stock) en 0–10 cm a $0.27 \pm 0.20 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (34.1 % del stock) en 20–30 cm, mientras que en el tratamiento la necromasa representó entre $0.46 \pm 0.12 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (19.5 % del stock) en superficie y $0.13 \pm 0.07 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (21.5 % del stock) en profundidad. Por otro lado, en las parcelas de precipitación horizontal, la biomasa se mantuvo relativamente estable con la profundidad tanto en el control, con valores entre 0.45 y $1.05 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (87.3–93.1 % del stock), como en el tratamiento, donde osciló entre 0.51 y $0.94 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (83.9–96.2 % del stock). La necromasa en estas parcelas representó una fracción menor y relativamente constante del stock total, variando entre 0.06 y $0.08 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (6.9–12.7 %) en el control y entre 0.03 y $0.10 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (3.8–16.1 %) en el tratamiento.

Figura 7

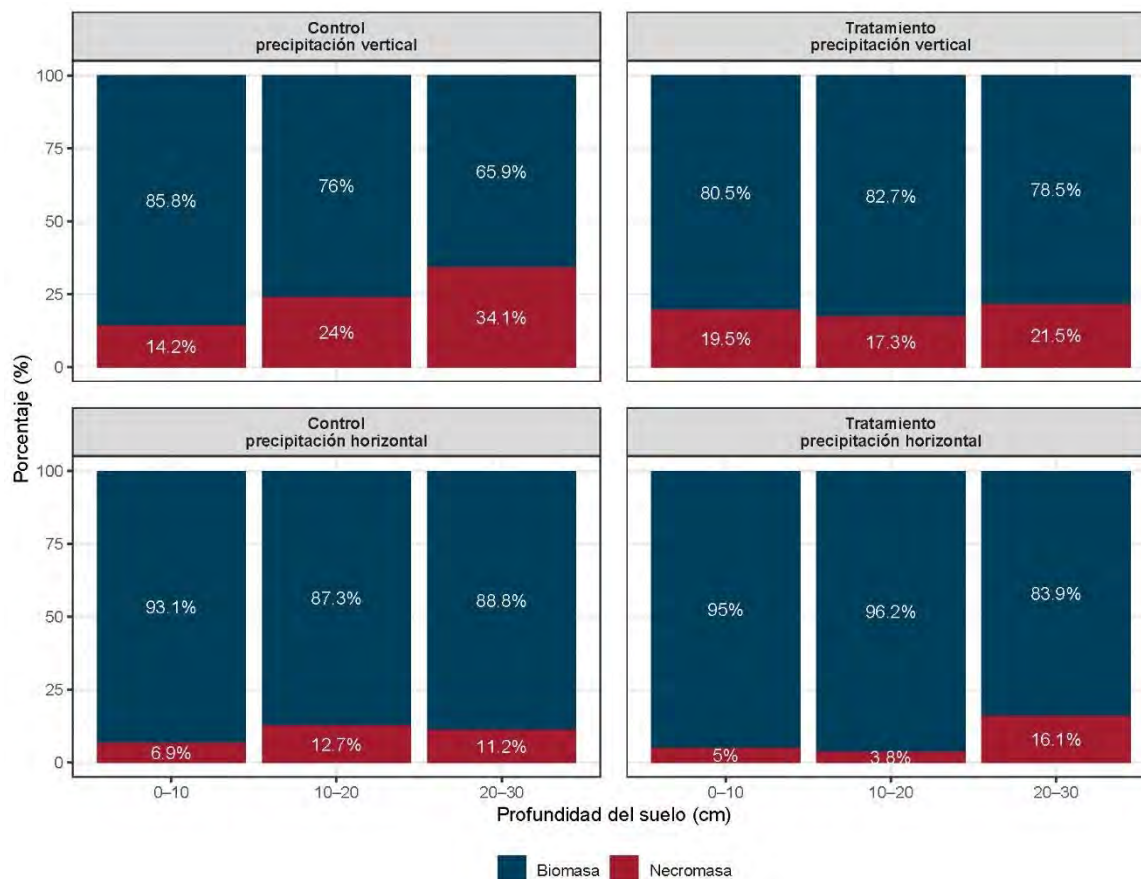
Comparación gráfica de la biomasa de raíces finas y necromasa de acuerdo a la profundidad del suelo.



Nota: Promedio de la biomasa de raíces finas (a), y necromasa de raíces finas (b) con la profundidad del suelo (10, 20 y 30 cm) para cada parcela de experimentación: control y tratamiento de precipitación horizontal como control y tratamiento de precipitación vertical. Las barras grises claras representan los valores promedio de las parcelas control y las barras grises oscuras representan los valores promedio de las parcelas de tratamiento, en cada barra de gris indican el error estándar de la Media con una barra de error negra.

Figura 8

Distribución porcentual de biomasa y necromasa de raíces finas según profundidad del suelo.



Nota: El gráfico muestra el porcentaje que representa la biomasa y necromasa de raíces finas en tres estratos de profundidad del suelo (0–10 cm, 10–20 cm y 20–30 cm), en las diferentes parcelas de tratamiento de precipitación y control, tanto vertical como horizontal. Cada barra representa la proporción porcentual de biomasa (color azul) y necromasa (color rojo) dentro de cada profundidad y tratamiento.

Análisis de varianza para la biomasa de raíces finas según la profundidad del suelo

Para evaluar si la biomasa de raíces finas varía entre las parcelas control y tratamiento, de acuerdo a las profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm), y si existe una interacción entre ambos factores, se realizó un análisis de varianza factorial (ANOVA) de dos factores para cada

experimento de precipitación (horizontal y vertical), considerando como factores fijos el tipo de parcela y la profundidad del suelo. Los datos para este análisis se encuentran en el *Anexo 4*.

Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

H₀: *La biomasa de raíces finas no difiere con las profundidades de suelo (0–10, 10–20 y 20–30 cm) en las parcelas control y tratamiento.*

H₁: *La biomasa de raíces finas difiere con las profundidades de suelo (0–10, 10–20 y 20–30 cm) en las parcelas control y tratamiento.*

Tabla 8

Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical de acuerdo a la profundidad del suelo.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0012	0.0012	0.0062	0.93802
Profundidad (cm)	2	6.6271	3.313	17.886	3.934e-05 ***
Parcela × Profundidad	2	1.3604	0.6802	3.5081	0.04848 *
Residuales	21	4.0720	0.1939		

En la Tabla 8 los resultados del ANOVA no muestran diferencias estadísticamente significativas entre la parcela control y el tratamiento de precipitación vertical ($p > 0.05$). Sin embargo, la interacción entre parcela y profundidad presentó un valor marginal ($F_{2,21} = 3.5081$; $p < 0.05$), así como en la profundidad ($F_{2,21} = 17.886$; $p < 0.001$) esta tendencia se probó en la prueba post-hoc.

Tabla 9

Prueba post-hoc, comparaciones Tukey entre profundidades del suelo de la parcela de tratamiento de precipitación vertical.

Contraste de profundidad (cm)	Diferencia estimada	EE	gl	t	p-ajustado
0–10 vs 10–20	1.4315	0.278	21	5.14	0.0001***
0–10 vs 20–30	1.418	0.278	21	5.092	0.0001***
10–20 vs 20–30	–0.0135	0.278	21	–0.049	0.9987

En la Tabla 9 muestra que, en parcela de tratamiento de precipitación vertical, la biomasa de raíces finas mostró diferencias significativas entre profundidades del suelo. De 0–10 cm de suelo presentó valores significativamente mayores que en la profundidad de 10–20 cm ($p < 0.001$) y 20–30 cm ($p < 0.001$). Por lo que se puede afirmar que la biomasa de raíces finas disminuye con la profundidad del suelo.

Tabla 10

Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal de acuerdo a la profundidad del suelo.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0381	0.0381	0.1456	0.70609
Profundidad (cm)	2	0.3933	0.6966	2.6646	0.9014
Parcela × Profundidad	2	0.1760	0.08799	0.3366	0.71754
Residuales	24	6.2748	0.26145		

En la Tabla 10 el análisis estadístico no evidenció diferencias significativas entre la parcela control y el tratamiento ($F_{1,24} = 0.1207$; $p = 0.7313$), ni entre las profundidades del suelo evaluadas ($F_{2,24} = 0.0307$; $p = 0.9698$). Asimismo, la interacción entre parcela y profundidad no resultó significativa ($F_{2,24} = 0.4016$; $p = 0.6737$). Estos resultados indican que la manipulación de la precipitación horizontal no produjo cambios significativos en la biomasa de raíces finas a lo largo del perfil del suelo.

Análisis de varianza para la biomasa y necromasa total de raíces finas

Con el fin de evaluar si existen diferencias en la necromasa de raíces finas entre las parcelas control y tratamiento, entre las profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm) y en la interacción entre ambos factores, se realizó un ANOVA factorial de dos factores para cada experimento de precipitación (horizontal y vertical).

Las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

H₀: La necromasa de raíces finas no difiere entre las parcelas control y tratamiento en ninguna de las profundidades del suelo evaluadas (0–10, 10–20 y 20–30 cm).

H₁: La necromasa de raíces finas difiere entre las parcelas control y tratamiento en al menos una de las profundidades del suelo evaluadas (0–10, 10–20 o 20–30 cm)

Tabla 11

Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0084	0.0084	0.1183	0.7343
Profundidad (depth_cm2)	2	0.0988	0.0494	0.6962	0.5096
Parcela × Profundidad	2	0.0257	0.0128	0.1807	0.836
Residuales	21	1.4906	0.071		

En la Tabla 11 se observa que el ANOVA en el experimento de precipitación vertical donde tampoco se detectaron efectos significativos del tipo de parcela ($F_{1,21} = 0.12$; $p = 0.73$), de la profundidad del suelo ($F_{2,21} = 0.70$; $p = 0.51$) ni de su interacción ($F_{2,21} = 0.18$; $p = 0.84$) sobre la necromasa de raíces finas. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula para ninguno de los factores evaluados en el experimento de precipitación horizontal.

Tabla 12

Análisis de varianza (ANOVA) para la necromasa de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0007	0.0007	0.145	0.7067
Profundidad (cm)	2	0.013	0.0065	1.3713	0.273
Parcela × Profundidad	2	0.0079	0.0039	0.8339	0.4466
Residuales	24	0.1134	0.0047		

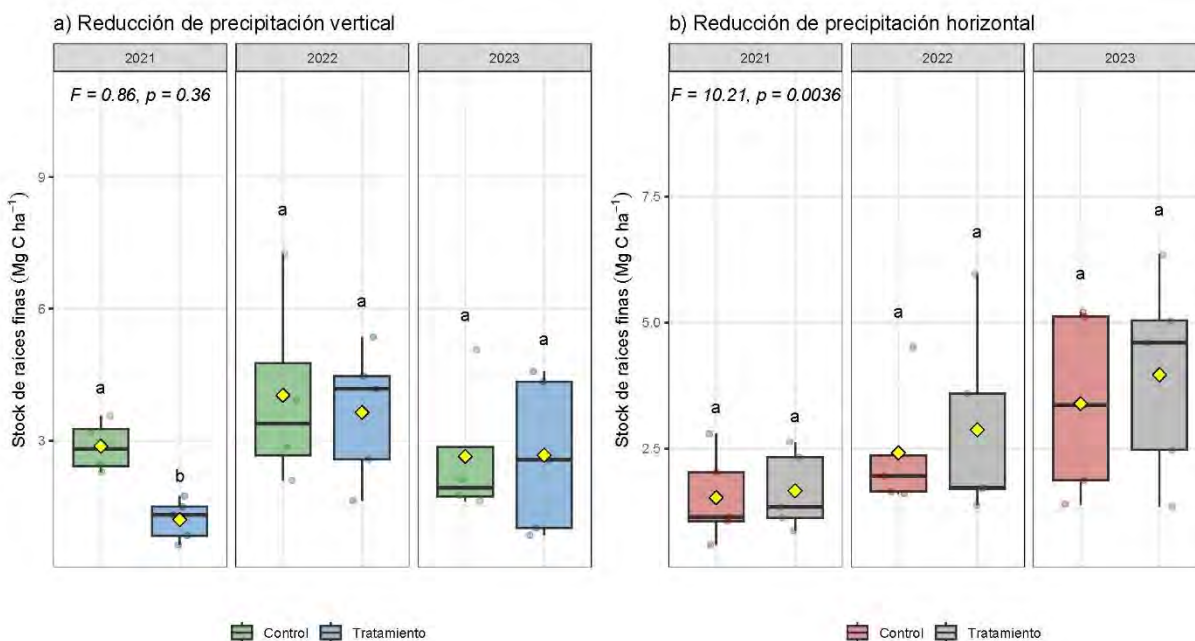
En la tabla 12 se observa que el ANOVA no mostró diferencias significativas en la necromasa de raíces finas entre parcelas ($F_{1,24} = 0.15$; $p = 0.71$), entre profundidades del suelo ($F_{2,24} = 1.37$; $p = 0.27$) ni en la interacción parcela × profundidad ($F_{2,24} = 0.83$; $p = 0.45$). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula para ninguno de los factores evaluados en el experimento de precipitación horizontal.

3.1.1.2. Variación anual del stock de carbono en las raíces finas

En la Figura 9 se observa el stock de carbono en las raíces finas varía para los tratamientos y controles en las parcelas precipitación vertical y horizontal. En la parcela de control de precipitación vertical el stock de carbono fue de 2.87 Mg C ha⁻¹ en 2021, aumentando a 4.03 Mg C ha⁻¹ en 2022 y manteniéndose en 2.64 Mg C ha⁻¹ en 2023. En la parcela de tratamiento, el stock fue menor en 2021 (1.2 Mg C ha⁻¹), se mantuvo en 3.65 Mg C ha⁻¹ en 2022 y en 2.67 Mg C ha⁻¹ en 2023. Por otro lado, en las parcelas de precipitación horizontal, el stock en la parcela control pasó de 1.52 Mg C ha⁻¹ en 2021 a 2.41 Mg C ha⁻¹ en 2022, y alcanzó 3.39–3.96 Mg C ha⁻¹ en 2023. En el tratamiento, se observó un aumento de 1.66 Mg C ha⁻¹ en 2021 a 2.87 Mg C ha⁻¹ en 2022.

Figura 9

Comparación de los valores promedio del stock de carbono total en las raíces finas, en el periodo del 2021, 2022 y 2023



Nota: Stock de raíces finas (Mg C ha⁻¹) en parcelas bajo tratamiento de precipitación vertical (a) y horizontal (b) durante los años 2021, 2022 y 2023. Se muestran diagramas de caja con los valores individuales (puntos), la media (rombos amarillos) y las letras que indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba post-hoc.

Análisis de varianza para la variación anual del stock de carbono de raíces finas

Con el fin de evaluar si existen diferencias en el stock de raíces finas entre las parcelas control y tratamiento, entre los años de evaluación (2021–2023) y en la interacción entre ambos factores, se realizó un análisis de varianza factorial de dos vías (ANOVA) de manera independiente para los experimentos de reducción de la precipitación vertical y horizontal. Los datos para este análisis se encuentran en el *Anexo 5*.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H₀: La variación anual del stock de raíces finas no difiere significativamente entre parcelas control y tratamiento.

H₁: La variación anual del stock de raíces finas difiere significativamente entre parcelas control y tratamiento.

Tabla 13

Análisis de varianza (ANOVA) del Stock de raíces finas (control y tratamiento de la precipitación vertical), de los años 2021-2023.

Fuente de variación	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	p-valor
Parcela	1	3.05	3.051	1.147	0.295
Año	1	2.28	2.284	0.859	0.364
Parcela × Año	1	3.2	3.204	1.205	0.284
Residual	23	61.15	2.659		

En la Tabla 13 se observa que en el experimento de reducción de la precipitación vertical no se detectaron efectos significativos del tipo de parcela sobre el stock de raíces finas ($F_{1,23} = 1.15$; $p = 0.295$), ni del año de evaluación ($F_{1,23} = 0.86$; $p = 0.364$), ni de la interacción parcela × año ($F_{1,23} = 1.21$; $p = 0.284$). Dado que ninguno de los factores evaluados presentó diferencias significativas ($p > 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula (H_0) para el experimento de precipitación vertical.

Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA) del Stock de raíces finas (control y tratamiento de la precipitación horizontal, 2021-2023)

Fuente de variación	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	p-valor	Significación
Parcela	1	1.13	1.126	0.529	0.473	
Año	1	21.72	21.721	10.21	0.00364	**
Parcela × Año	1	0.24	0.239	0.112	0.74	
Residual	26	55.31	2.127			

En la Tabla 14 se observa que en las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal el stock de raíces finas no hubo efectos significativos ($F_{1,26} = 0.53$; $p = 0.473$) ni en la interacción parcela $\times$ año ($F_{1,26} = 0.11$; $p = 0.740$). Sin embargo, el factor año presentó un efecto significativo ($F_{1,26} = 10.21$; $p < 0.01$), indicando variaciones interanuales en el stock de raíces finas para las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal, cuyos valores incrementan con los años. Por lo que, se rechaza la hipótesis nula (H_0) únicamente para el factor año.

Tabla 15

Comparaciones Tukey del stock de carbono de raíces finas por año de las parcelas control y tratamiento de la precipitación vertical.

Año	Contraste	Diferencia estimada	IC 95% inferior	IC 95% superior	p-ajustado
2021	Tratamiento vs Control	-1.67	-2.5	-0.835	0.00213**
2022	Tratamiento vs Control	-0.389	-3.36	2.59	0.766
2023	Tratamiento vs Control	0.029	-2.69	2.75	0.981

En la Tabla 15 las comparaciones post- hoc mostraron diferencias significativas entre parcelas únicamente en el año 2021, donde el tratamiento presentó un stock de raíces finas significativamente menor que el control ($p < 0.01$). En los años 2022 ($p = 0.766$) y 2023 ($p = 0.981$) no se detectaron diferencias significativas entre parcelas. Para el año 2021 se rechaza la hipótesis nula (H_0).

Tabla 16

Comparaciones Tukey del stock de carbono de raíces finas por año de las parcelas control y tratamiento de la precipitación horizontal.

Año	Contraste	Diferencia estimada	IC 95% inferior	IC 95% superior	p-ajustado
2021	Tratamiento vs Control	0.134	-1.08	1.34	0.804
2022	Tratamiento vs Control	0.456	-1.9	2.81	0.667
2023	Tratamiento vs Control	0.572	-2.2	3.34	0.647

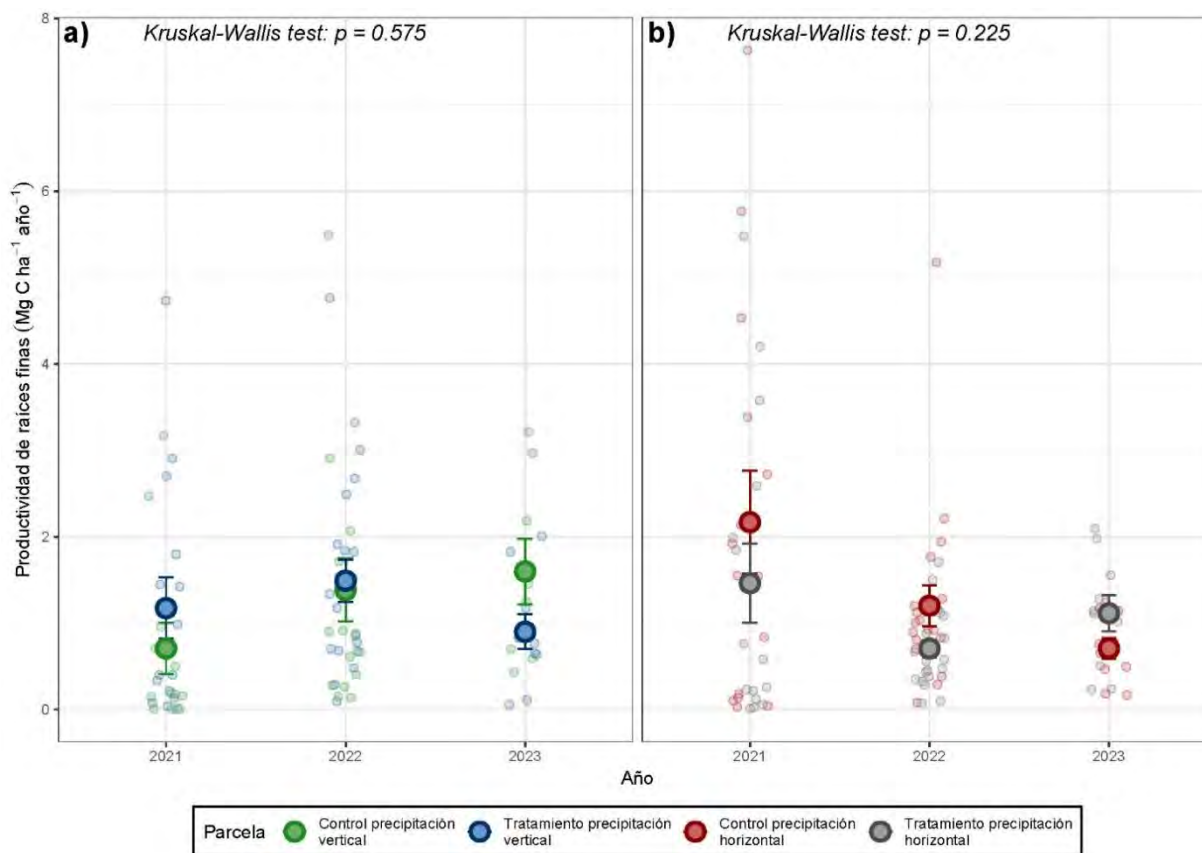
En la Tabla 16 se observa las comparaciones post- hoc no evidenciaron diferencias significativas entre parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal en ninguno de los años evaluados ($p > 0.05$), lo que indica una respuesta similar del stock de raíces finas frente a la reducción de la precipitación horizontal. Para todos los años evaluados, no se rechaza la hipótesis nula (H_0).

3.1.1.3. Productividad de raíces finas

En la Figura 10 se observa los valores de productividad de raíces finas entre las parcelas control y tratamientos de precipitación vertical y horizontal. Para la parcela control de precipitación vertical, la productividad aumentó de $0.71 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en 2021 a $1.60 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en 2023, mientras que en la parcela de tratamiento pasó de 1.17 a $0.90 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mostrando un incremento en 2022. Por otro lado, en las parcelas de precipitación horizontal, el control presentó una disminución de 2.17 a $0.71 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ entre 2021 y 2023, mientras que el tratamiento fluctuó entre 1.46 en 2021 y $1.11 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en 2023, con el valor más bajo en 2022.

Figura 10

Productividad media de raíces finas durante el periodo 2021, 2022 y 2023



Nota: En el panel (a) se muestra la productividad en parcelas con reducción de precipitación vertical (control y tratamiento), y en el panel (b) en parcelas con reducción de precipitación horizontal (control y tratamiento), para los años 2021, 2022 y 2023. Los puntos representan observaciones individuales, mientras que los círculos grandes indican la media $\pm$ error estándar. Se indica el resultado del test de Kruskal-Wallis en la parte superior del gráfico. Los puntos verdes y azules corresponden a las parcelas de reducción de precipitación vertical (control y tratamiento, respectivamente); parcelas rojas y grises a las parcelas de reducción de precipitación horizontal (control y tratamiento, respectivamente).

Análisis estadístico de la productividad de raíces finas

Para evaluar si existen diferencias significativas en la productividad de raíces finas entre parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal y vertical, se realizó una prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis, dado que los datos no cumplieron el supuesto de normalidad. Los datos para este análisis se encuentran en el *Anexo 7*.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H₀: No existen diferencias significativas en la productividad de raíces finas entre las parcelas control y tratamiento.

H₁: Existen diferencias significativas en la productividad de raíces finas entre las parcelas control y tratamiento.

Tabla 17

Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Comparación	χ^2	df	Z	p-valor ajustado
Control – Tratamiento de precipitación vertical	0.314	1	-0.561	0.575

La Tabla 17, no muestran diferencias significativas entre el control y el tratamiento en el experimento de precipitación vertical ($p = 0.575$). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula, indicando que la manipulación de la precipitación vertical no afectó significativamente la productividad de raíces finas.

Tabla 18

Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical según año.

Comparación	Año	χ^2	df	Pvalor
Control – Tratamiento	2021	1.371	1	0.242
Control – Tratamiento	2022	0.685	1	0.408
Control – Tratamiento	2023	1.547	1	0.214

Según la tabla 18 no se detectaron diferencias significativas entre el control y el tratamiento en ninguno de los años evaluados ($p > 0.05$), por lo que no se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 19

Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Comparación	χ^2	df	Z	p-valor ajustado
Control – Tratamiento de precipitación horizontal	1.475	1	1.214	0.225

Según la Tabla 19 no se observaron diferencias significativas entre parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal ($p = 0.225$). La hipótesis nula no se rechaza, indicando que la manipulación de la precipitación horizontal no tuvo un efecto relevante en la productividad de raíces.

Tabla 20

Kruskal–Wallis para la productividad de raíces finas en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal según año.

Comparación	Año	χ^2	df	Pvalor
Control – Tratamiento	2021	0.589	1	0.443
Control – Tratamiento	2022	3.793	1	0.051
Control – Tratamiento	2023	2.063	1	0.151

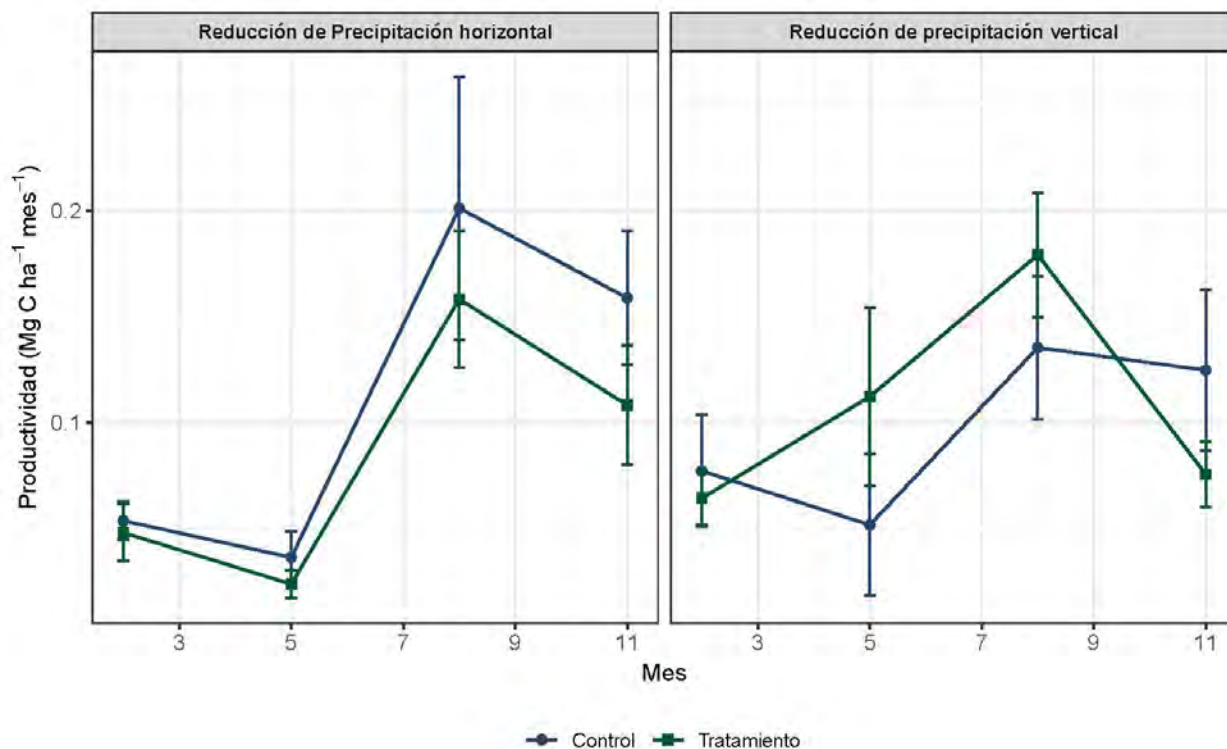
La Tabla 20 indico que, en la comparación anual de las parcelas de precipitación horizontal, tampoco muestran diferencias significativas entre control y tratamiento ($p > 0.05$), sugiriendo que los efectos de la manipulación de la precipitación horizontal sobre la productividad se mantuvieron estables durante los tres años evaluados.

En la Figura 10 se observa la productividad estacional de raíces finas. Para las parcelas de precipitación vertical, la productividad siguió una tendencia similar entre control y tratamiento, con un aumento marcado en la estación seca y disminución hacia la estación más húmeda. De igual

manera, para las parcelas de precipitación horizontal, se encontraron picos de productividad más altos en las estaciones secas, mientras que el tratamiento presentó valores más bajos, reflejando una reducción en productividad.

Figura 11

Productividad mensual de raíces finas



Nota: La figura muestra la variación de la productividad mensual de raíces finas (Mg C ha⁻¹ mes⁻¹) en parcelas bajo tratamientos de reducción de precipitación horizontal (izquierda) y vertical (derecha), comparando parcelas control (círculos azules) y parcelas con tratamiento (cuadrados verdes). Los puntos representan la media mensual y las barras indican el error estándar ($\pm$ SE).

3.1.1.4. Tiempo de residencia de raíces finas

En la Tabla 21 se muestra que en las parcelas de precipitación vertical el tiempo de residencia de las raíces finas fue mayor en la parcela de tratamiento que en el control, con valores de 2.80 ± 0.69 años en el tratamiento y 1.92 ± 0.41 años en el control. En las parcelas de precipitación horizontal, el tiempo de residencia fue similar entre control y tratamiento, con 1.72

± 0.17 y 1.95 ± 0.37 años, respectivamente. En cuanto a la tasa de renovación, en precipitación vertical el tratamiento presentó valores menores que el control, mientras que en precipitación horizontal la tasa fue comparable entre ambos.

Tabla 21

Tiempo de residencia de raíces finas (año) y la tasa de renovación de raíces finas (año⁻¹)

Parcela	Tasa de renovación de raíces finas (año ⁻¹)		Tiempo de residencia de raíces finas (año)	
	Media	SE	Media	SE
CON-PV	0.64	0.20	1.92	0.41
TRT-PV	0.45	0.11	2.80	0.69
CON-PH	0.60	0.05	1.72	0.17
TRT-PH	0.58	0.09	1.95	0.37

Análisis estadístico para el tiempo de residencia y tasa de renovación de raíces finas

Con el fin de evaluar si existen diferencias significativas en el tiempo de residencia y en la tasa de renovación de raíces finas entre parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal y vertical, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, considerando como factor fijo el tipo de parcela. Los datos para este análisis se encuentran en el *Anexo 8*.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H₀: *No existen diferencias significativas en el tiempo de residencia y tasa de renovación entre parcelas control y tratamiento.*

H₁: *Existen diferencias significativas en el tiempo de residencia y tasa de renovación entre parcelas control y tratamiento.*

Tabla 22

Análisis de varianza (ANOVA) del tiempo de residencia en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	1.712	1.712	1.037	0.343
Residuales	7	11.564	1.652		

Tabla 23

Análisis de varianza (ANOVA) del tiempo de residencia en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0177	0.0177	0.177	0.685
Residuales	8	0.7983	0.0998		

En la Tabla 22 se observa que el tiempo de residencia no difirió significativamente entre parcelas control y tratamiento de precipitación vertical ($F_{1,7} = 1.037$; $p = 0.343$). De igual manera, según la Tabla 23, en las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal tampoco se detectan diferencias significativas ($F_{1,8} = 0.177$; $p = 0.685$). Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula en ninguno de los experimentos.

Tabla 24

Análisis de varianza (ANOVA) de la tasa de renovación en parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.0784	0.0784	0.746	0.416
Residuales	7	0.7364	0.1052		

Tabla 25

Análisis de varianza (ANOVA) de la tasa de renovación en parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	Df	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.00183	0.00183	0.065	0.805
Residuales	8	0.2255	0.0282		

Según la Tabla 24, la tasa de renovación no muestra diferencias significativas entre parcelas control y tratamiento en precipitación vertical ($F_{1,7} = 0.746$; $p = 0.416$).

De manera similar, la Tabla 25 indica que bajo precipitación horizontal tampoco existen diferencias significativas ($F_{1,8} = 0.065$; $p = 0.805$), por lo que no se rechaza la hipótesis nula en ninguno de los casos.

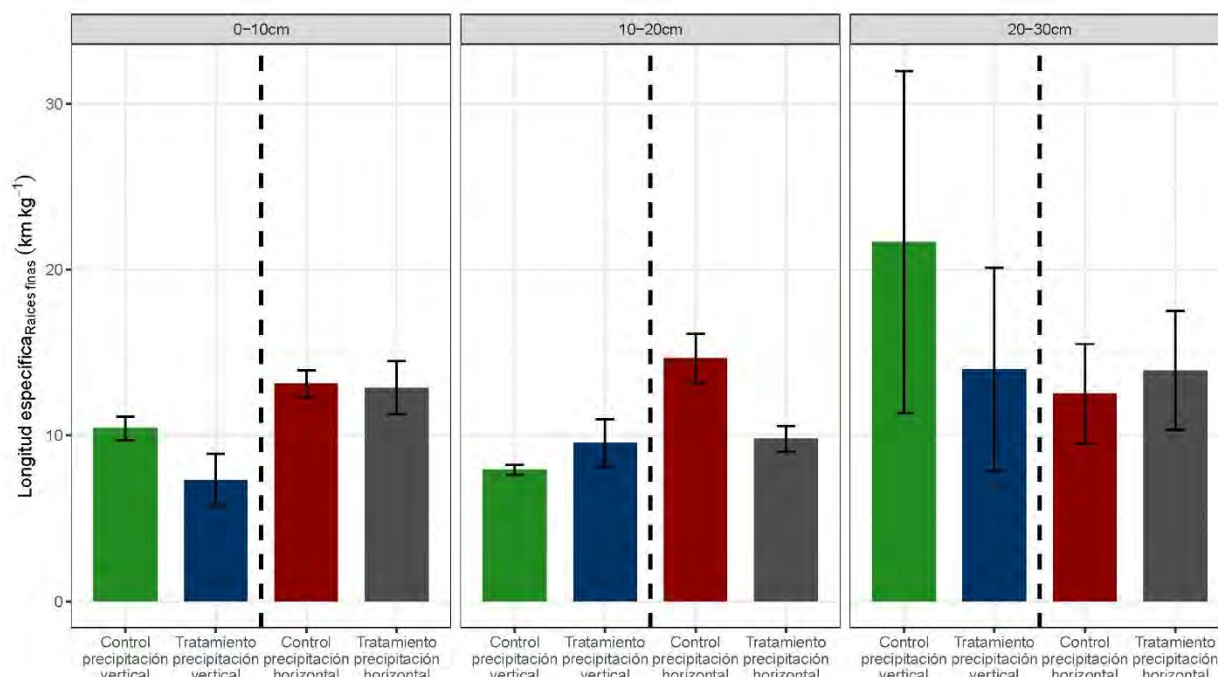
3.1.2. Morfología de Raíces finas

3.1.2.1. Longitud específica de las raíces finas (SRL)

En la Figura 12 se muestran los valores promedios de SRL de la comunidad vegetal por profundidad del suelo. Para la parcela control precipitación vertical, la SRL disminuyó en los 10 primeros centímetros de suelo ($2.73 \pm 0.47 \text{ km kg}^{-1}$), a los 10–20 cm ($2.07 \pm 0.36 \text{ km kg}^{-1}$), aumentando notablemente de 20–30 cm de profundidad de suelo $5.49 \pm 1.25 \text{ km kg}^{-1}$. En la parcela de tratamiento, la SRL presentó valores más bajos en los 10 primeros centímetros de suelo ($1.93 \pm 0.31 \text{ km kg}^{-1}$) y aumentó con la profundidad, alcanzando $3.55 \pm 0.81 \text{ km kg}^{-1}$ a 20–30 cm de suelo. En cambio, en las parcelas de precipitación horizontal, la SRL en los 10 primeros centímetros mostró valores similares en el control ($3.41 \pm 0.42 \text{ km kg}^{-1}$) como en el tratamiento ($3.34 \pm 0.39 \text{ km kg}^{-1}$). A los 10–20 cm, el control presentó valores mayores ($3.75 \pm 0.52 \text{ km kg}^{-1}$) en comparación con el tratamiento ($2.57 \pm 0.34 \text{ km kg}^{-1}$). A 20–30 cm de profundidad, la SRL fue similar entre control ($3.21 \pm 0.58 \text{ km kg}^{-1}$) y tratamiento ($3.57 \pm 0.60 \text{ km kg}^{-1}$).

Figura 12

Promedios de la longitud específica de las raíces finas a diferentes profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm) a nivel de comunidad vegetal.



Nota: Las barras de color son los valores promedio de las raíces finas, y las barras negras continuas en cada barra de color son los valores del error estándar de la Media. La línea vertical discontinua separa las parcelas de tratamiento de precipitación vertical y horizontal.

Análisis estadístico de la longitud específica de raíces finas de la comunidad vegetal

Debido a la falta de normalidad en los datos, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis para evaluar las diferencias en SRL entre control y tratamiento, considerando análisis entre parcelas y por profundidad del suelo, de manera independiente para precipitación horizontal y vertical. Los datos utilizados se encuentran en el *Anexo 10*.

Las hipótesis planteadas fueron:

H₀: *La SRL de las raíces finas no difiere entre las parcelas control y tratamiento a nivel de comunidad vegetal.*

H₁: La SRL de las raíces finas difiere entre las parcelas control y tratamiento a nivel de comunidad vegetal.

Tabla 26

Test de Kruskal- Walis de la longitud específica de raíces finas de la comunidad vegetal para parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	χ^2	gl	p-valor
Control -Tratamiento de precipitación vertical	2.16	1	0.1416

La Tabla 26 muestra el análisis global donde el SRL para la comunidad vegetal resultó sin diferencias significativas entre las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical ($\chi^2 = 2.16$, $p = 0.152$) No se rechaza la hipótesis nula para la SRL a nivel de comunidad vegetal

Tabla 27

Test de Kruskal- Walis de la longitud específica de raíces finas, según la profundidad del suelo de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Profundidad del suelo (cm)	χ^2	gl	p-valor
0–10	2.2	1	0.142
10–20	0.2	1	0.624
20–30	1	1	0.327

En la tabla 27 el análisis por profundidad tampoco evidenció diferencias significativas entre control y tratamiento en ninguna de las profundidades del suelo (0–10, 10–20 y 20–30 cm; $p > 0.05$). No se rechaza la hipótesis nula para la SRL a nivel de comunidad vegetal.

Tabla 28

Test de Kruskal- Walis de la longitud específica de raíces finas- comunidades para las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	χ^2	gl	p-valor
Control -Tratamiento de precipitación horizontal	2.05	1	0.152

La Tabla 28 indica que la SRL para la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal, no mostraron diferencias significativas en la SRL entre control y tratamiento ($\chi^2 = 1.61$, $p = 0.205$). No se rechaza la hipótesis nula para la SRL a nivel de comunidad vegetal.

Tabla 29

Test de Kruskal- Wallis de la longitud específica de raíces finas, según la profundidad del suelo de la comunidad vegetal para las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Profundidad del suelo (cm)	χ^2	gl	p-valor
0–10	0.53	1	0.465
10–20	3.94	1	0.047
20–30	0.1	1	0.754

La Tabla 29 muestra el análisis por profundidad del suelo, donde se detectó una diferencia significativa entre control y tratamiento únicamente en la profundidad de 10–20 cm de suelo ($\chi^2 = 3.94$, $p = 0.047$), donde el control presentó valores mayores de SRL. En los estratos 0–10 cm y 20–30 cm no se observaron diferencias significativas ($p > 0.05$). Se rechaza la hipótesis nula considerando la diferencia del estrato 10–20 cm.

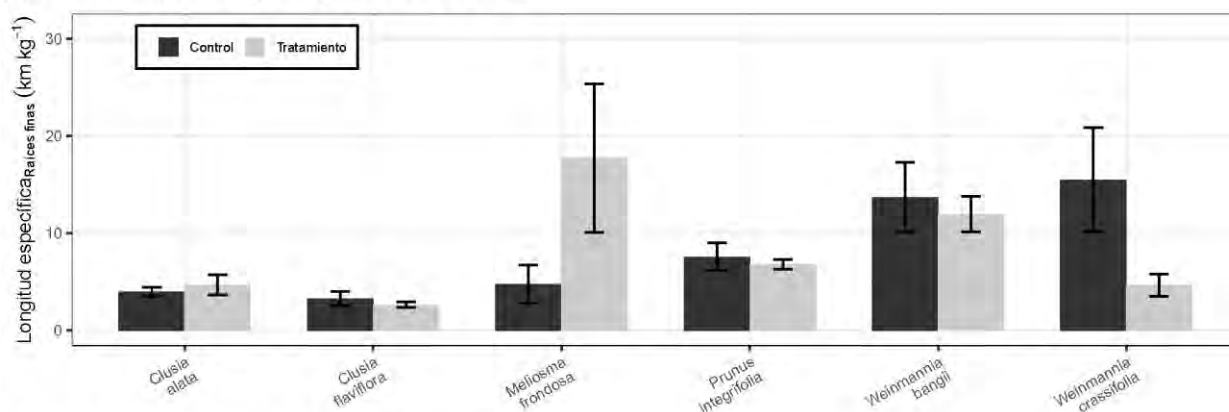
En la Figura 13 se presentan los valores promedio de **SRL por especie arbórea** en las parcelas de precipitación vertical y horizontal. En las parcelas de precipitación vertical, la parcela de tratamiento presentó valores de SRL superiores *Meliosma frondosa*, ($17.73 \pm 7.66 \text{ km kg}^{-1}$) en comparación con el control ($4.76 \pm 1.94 \text{ km kg}^{-1}$). En contraste, *Weinmannia crassifolia* registró valores notablemente mayores en el control ($15.51 \pm 5.34 \text{ km kg}^{-1}$) que en el tratamiento ($4.67 \pm 1.14 \text{ km kg}^{-1}$). Para el resto de especies, como *Clusia alata*, *Clusia flaviflora*, *Prunus integrifolia* y *Weinmannia bangii*, los valores de SRL fueron similares entre control y tratamiento. Por otro lado, en las parcelas de precipitación horizontal, la SRL también varió entre control y tratamiento según la especie. *Miconia micropetala* presentó valores mayores en el control ($12.82 \pm 3.05 \text{ km kg}^{-1}$) en comparación con el tratamiento ($7.30 \pm 1.75 \text{ km kg}^{-1}$). Por el contrario, *Myrsine coriaceae* mostró valores ligeramente superiores en el tratamiento ($5.28 \pm 0.68 \text{ km kg}^{-1}$) respecto al control ($3.20 \pm 0.75 \text{ km kg}^{-1}$). En especies como *Meliosma frondosa*, *Ocotea glabriflora*, *Prunus*

integrifolia y *Weinmannia reticulata*, los valores de SRL fueron comparables entre control y tratamiento.

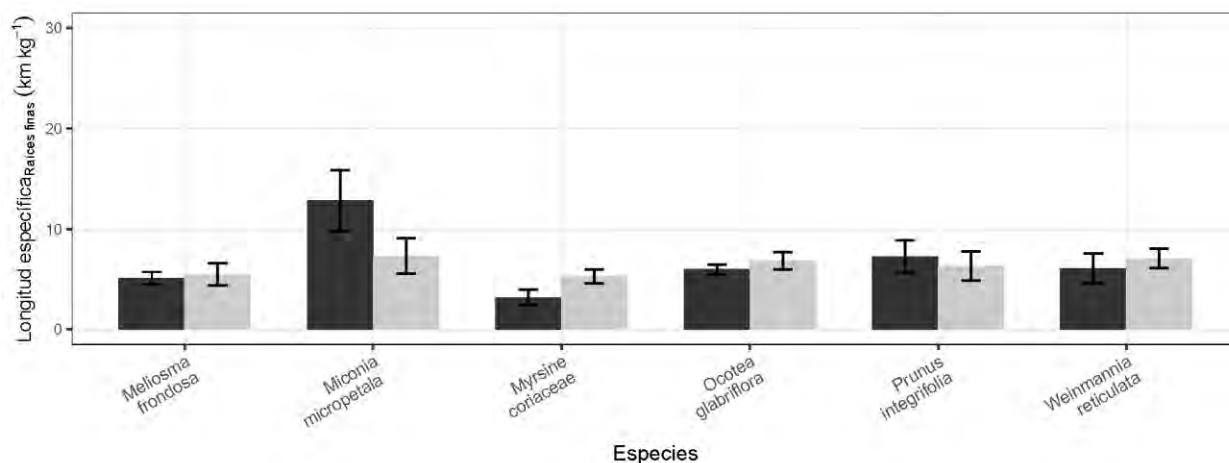
Figura 13

Promedio de la longitud específica de raíces finas para cada especie arbórea.

(a) Reducción de la precipitación vertical



(b) Reducción de la precipitación horizontal



Nota: (a) en las parcelas de tratamiento y control de la precipitación vertical y (b) en las parcelas de tratamiento y control de la precipitación horizontal. Cada barra muestra el valor medio con su respectiva barra negra continua que muestra el error.

Análisis estadístico de la longitud específica de raíces finas por especies arbóreas

Para evaluar el efecto del tratamiento de precipitación (control vs tratamiento), la especie arbórea y la interacción entre parcela y especie sobre la SRL, se aplicó un ANOVA de dos vías de

forma independiente para las parcelas de precipitación vertical y precipitación horizontal. Los datos utilizados se encuentran en el *Anexo 12*.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H₀: La longitud específica de raíces finas (SRL) de las especies arbóreas no difiere entre las de parcelas control y tratamiento.

H₁: La longitud específica de raíces finas (SRL) de las especies arbóreas difiere entre las parcelas control y tratamiento.

Tabla 30

Análisis de varianza (ANOVA) de la longitud total de las raíces finas- especies arbóreas de la parcela de control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Parcela (<i>plot_code</i>)	1	12.5	12.5	0.523	0.474
Especie (<i>tree_specie</i>)	6	688.55	114.759	4.798	0.0008***
Parcela × Especie	5	514.34	102.868	4.301	0.0029**
Residual	43	1028.52	23.919		

En la tabla 30, El ANOVA mostró un efecto significativo de la especie arbórea sobre la SRL ($F_{6,43} = 4.80$, $p < 0.001$), así como un efecto significativo de la interacción tratamiento y especie ($F_{5,43} = 4.30$, $p < 0.01$), por lo que se acepta la hipótesis alterna.

Tabla 31

Comparación de medias marginales ajustadas de la longitud específica de raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Especie	Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
<i>Clusia alata</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	-0.718	3.57	43	-0.201	0.8415
<i>Clusia flaviflora</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	0.608	2.96	43	0.205	0.838
<i>Meliosma frondosa</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	-12.966	3.99	43	-3.247	0.002
<i>Prunus integrifolia</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	0.749	3.09	43	0.242	0.81
<i>Weinmannia bangii</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	1.758	3.57	43	0.492	0.625
<i>Weinmannia crassifolia</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	10.839	3.28	43	3.304	0.002

Las comparaciones post hoc revelaron diferencias significativas la SRL entre control y tratamiento para *Meliosma frondosa* ($p < 0.01$), con valores mayores en el tratamiento, y para *Weinmannia crassifolia* ($p < 0.01$), con valores mayores en el control. Se rechaza la hipótesis nula para la SRL de las especies arbóreas en las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical, la respuesta al tratamiento dependió de la especie arbórea.

Tabla 32

Análisis de varianza (ANOVA) de la longitud total de las raíces finas- especies arbóreas de la parcela de control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Parcela (<i>plot_code</i>)	1	24.86	24.856	2.799	0.101
Especie (<i>tree_specie</i>)	6	300.54	50.09	5.64	0.0002
Parcela × Especie	5	76.31	15.263	1.719	0.148
Residual	50	444.08	8.882		

En la Tabla 32 el ANOVA demostró una diferencia significativa de la SRL de raíces finas entre las parcelas de precipitación horizontal según las especie arbórea sobre la SRL ($F_{6,50} = 5.64$, $p < 0.001$). Sin embargo, ni el efecto del tratamiento ni la interacción tratamiento y especie fueron significativos.

Tabla 33

Comparación de medias marginales ajustadas de la longitud específica de raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Espece	Contrast	Estimate	SE	df	t.ratio	p.value
<i>Meliosma frondosa</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-0.348	2	50	-0.174	0.862
<i>Miconia micropetala</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	5.521	2.18	50	2.537	0.014
<i>Myrsine coriaceae</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-2.085	1.7	50	-1.227	0.225
<i>Ocotea glabriflora</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-0.863	2	50	-0.432	0.668
<i>Prunus integrifolia</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	0.946	1.88	50	0.502	0.618
<i>Weinmannia reticulata</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-0.954	2.11	50	-0.453	0.653

Las comparaciones post- hoc de la Tabla 33 mostraron una diferencia significativa entre control y tratamiento únicamente para *Miconia micropetala* ($p < 0.05$), con un valor mayor en la parcela control. Se rechaza la hipótesis nula para *Miconia micropetala*, donde se detectó una diferencia significativa entre control y tratamiento de precipitación horizontal.

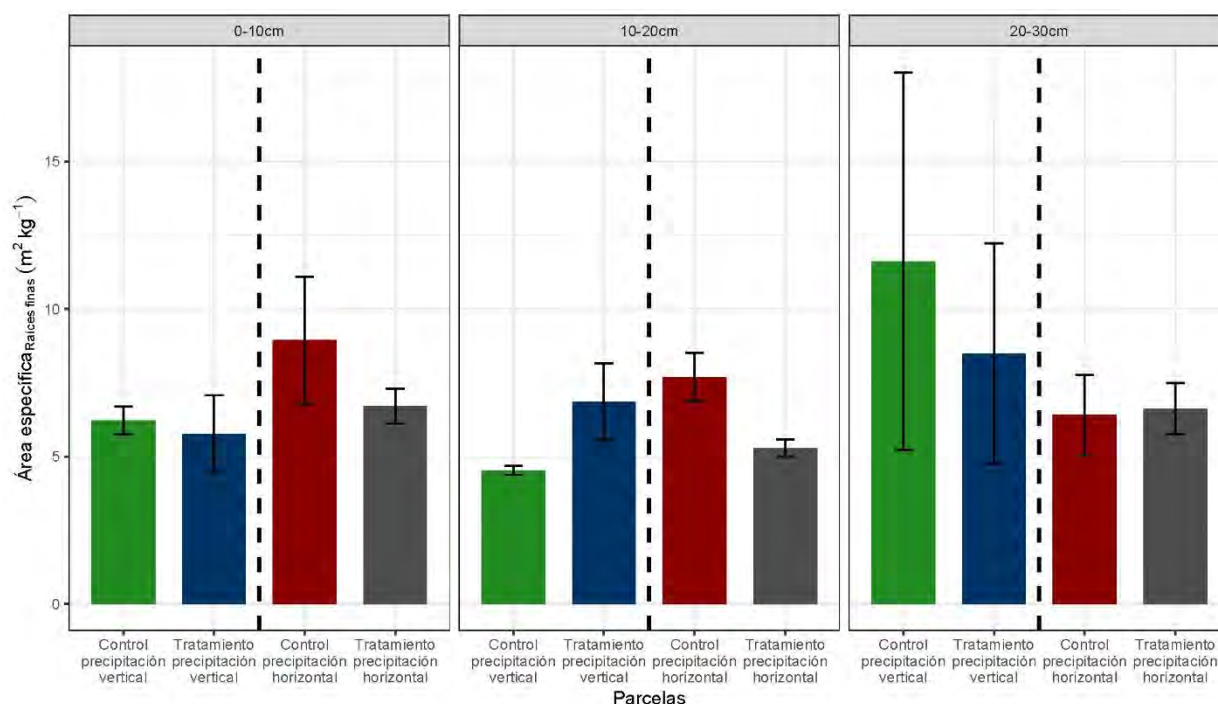
3.1.2.2. Área específica de las raíces finas (SRA)

En la Figura 14 se muestran los valores promedios de SRA de la comunidad vegetal por profundidad del suelo. En la parcela control de precipitación vertical, la SRA disminuyó entre 0–

10 cm de suelo ($6.22 \pm 0.48 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) y 10–20 cm ($4.53 \pm 0.15 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$), aumentando notablemente en la profundidad 20–30 cm ($11.61 \pm 6.4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$). En la parcela de tratamiento, la SRA presentó valores ligeramente mayores en la parte superficial (0–10 cm: $5.76 \pm 1.32 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$), con un aumento intermedio a 10–20 cm ($6.85 \pm 1.31 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) y un leve descenso a 20–30 cm ($8.49 \pm 3.73 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$). Por otro lado, en las parcelas de precipitación horizontal, la SRA mostró valores similares los primeros centímetros de suelo (0–10 cm: control $8.94 \pm 2.15 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, tratamiento $6.71 \pm 0.59 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$). En la profundidad de 10–20 cm, el control presentó valores mayores ($7.69 \pm 0.82 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) que el tratamiento ($5.28 \pm 0.29 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$), mientras que en 20–30 cm los valores fueron similares entre control ($6.40 \pm 1.37 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) y tratamiento ($6.62 \pm 0.88 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$).

Figura 14

Promedio del área específica de las raíces finas a diferentes profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm).



Nota. Las barras de color son los valores promedio de las raíces finas, con sus barras de error estándar. La línea vertical discontinua separa las parcelas de tratamiento de precipitación vertical y horizontal.

Análisis estadístico del área específica de raíces finas de la comunidad vegetal

Debido a la falta de normalidad en los datos, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis para evaluar las diferencias en el SRA entre control y tratamiento para las parcelas de precipitación vertical y horizontal., considerando análisis generales y por profundidad del suelo, Los datos utilizados se encuentran en el *Anexo 14*.

Hipótesis planteadas:

***H₀:** La SRA de raíces finas a nivel de comunidad no difiere entre control y tratamiento de precipitación.*

***H₁:** La SRA de las raíces finas difiere a nivel de comunidad entre control y tratamiento de precipitación.*

Tabla 34

Test de Kruskal- Walis del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente de variación	χ^2	gl	p-valor
Parcela (control vs tratamiento)	0.01	1	0.922

Tabla 35

Test de Kruskal-Walis para la comparación del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal por profundidad de suelo de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Profundidad del suelo	χ^2	gl	p-valor
0–10 cm	0.96	1	0.327
10–20 cm	3.84	1	0.05
20–30 cm	0.06	1	0.807

En la Tabla 34 el análisis no mostró diferencias significativas del SRA de raíces finas entre parcelas control y tratamiento de precipitación vertical ($p > 0.05$). La tabla 35 muestra el análisis por profundidad, se detectó una diferencia marginal/significativa en el estrato 10–20 cm, donde el

tratamiento presentó valores mayores que el control. En los estratos 0–10 y 20–30 cm, no se observan diferencias significativas, por lo que no se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 36

Test de Kruskal- Wallis del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente de variación	χ^2	gl	p-valor
Parcela (control vs tratamiento)	3.11	1	0.078

Tabla 37

Test de Kruskal-Wallis para la comparación del área específica de las raíces finas de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Profundidad del suelo	χ^2	gl	p-valor
0–10 cm	0.27	1	0.602
10–20 cm	5.77	1	0.016
20–30 cm	0.01	1	0.917

La tabla 36 muestra que no hay diferencia significativa entre los valores de SRA de raíces finas de la parcela control y tratamiento de precipitación horizontal ($p > 0.05$). La Tabla 37 muestra que en el estrato 10–20 cm se encontró una diferencia significativa del SRA de raíces finas en las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal, con valores mayores en el control que en el tratamiento ($p = 0.016$). En los estratos 0–10 y 20–30 cm no se encontraron diferencias significativas. Por lo tanto, la hipótesis nula se rechaza únicamente para el estrato 10–20 cm.

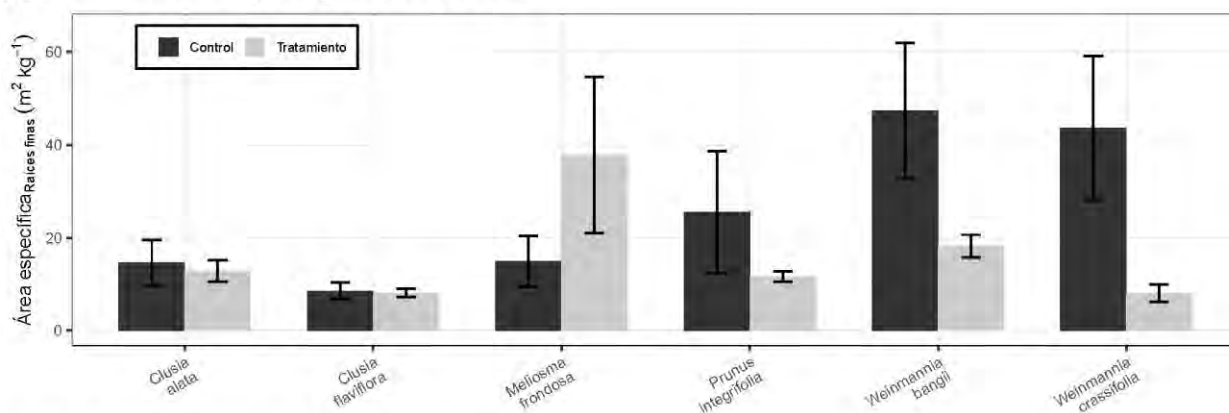
En la Figura 15 se presentan los valores promedio del **SRA por especie arbórea** en las parcelas de precipitación vertical y horizontal. En la parcela control de precipitación vertical especies como *Clusia flaviflora* mostraron valores de SRA de 14.66 ± 4.82 y $8.55 \pm 1.78 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$, respectivamente, mientras *Meliosma frondosa* presentó $14.92 \pm 5.45 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$. Especies como *Prunus integrifolia*, *Weinmannia bangii*, *Weinmannia crassifolia* y *Weinmannia reticulata*

mostraron valores más altos, destacando *Weinmannia bangii* con $47.36 \pm 14.67 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$. En la parcela de tratamiento, *Meliosma frondosa* registró un aumento notable ($37.82 \pm 16.81 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$) respecto al control, mientras que *Weinmannia crassifolia* presentó valores menores ($8.03 \pm 1.89 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$); el resto de especies mostró cambios moderados o similares respecto al control. En el caso de las parcelas de precipitación horizontal las especies presentaron valores similares entre las parcelas control y tratamiento

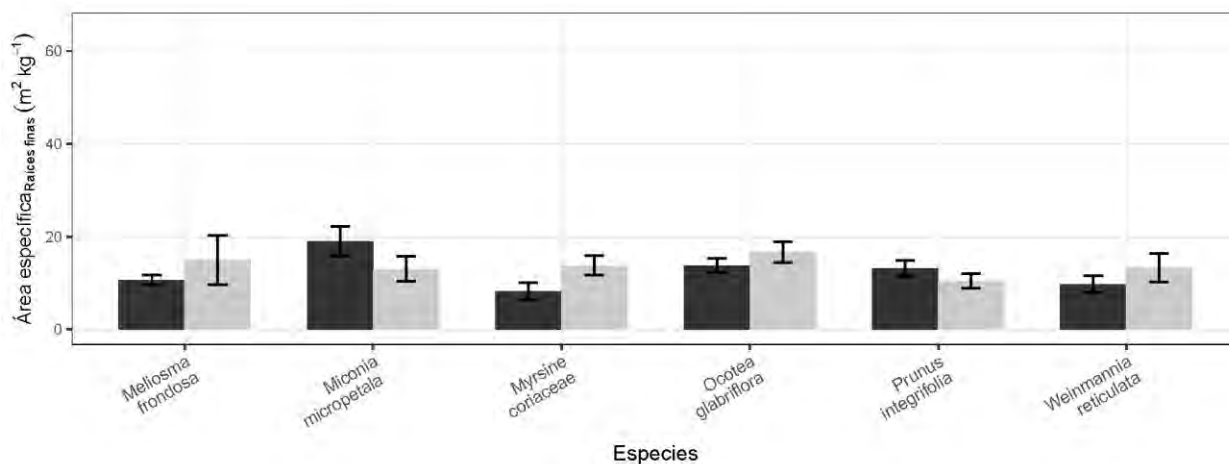
Figura 15

Promedio del área específica de raíces finas para cada especie arbórea

(a) Reducción de la precipitación vertical



(b) Reducción de la precipitación horizontal



Nota: (a) en las parcelas de tratamiento y control de la precipitación vertical y (b) en las parcelas de tratamiento y control de la precipitación horizontal. Cada barra muestra el valor medio con su respectiva barra negra continua que muestra el error.

Análisis estadístico del área específica de raíces finas por especies arbóreas

Para evaluar el efecto del tratamiento (control vs tratamiento), la especie arbórea y su interacción sobre la SRA, se aplicó un ANOVA de dos vías de manera independiente para precipitación vertical y horizontal. Los datos utilizados se encuentran en el *Anexo 17*.

Hipótesis planteadas:

H₀: *La SRA de raíces finas no difiere entre control y tratamiento de precipitación por especie arbórea.*

H₁: *La SRA de raíces finas difiere entre control y tratamiento de precipitación por especie arbórea.*

Tabla 38

Análisis de varianza (ANOVA) del área específica de las raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento precipitación vertical.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Plot_code (parcela)	1	1820.1	1820.12	6.7216	0.01288 *
Tree_especie(especie)	6	3585	597.5	2.2065	0.06018 ·
Parcela × especie	5	4289.5	857.91	3.1682	0.01578 *
Residuales	44	11914.6	270.79		

La Tabla 38 muestra que hubo un efecto significativo del tratamiento ($p < 0.05$) y en la interacción tratamiento × especie ($p < 0.05$), mientras que el efecto de la especie fue marginal ($p = 0.060$). Esto indica que la respuesta de la SRA de raíces finas al tratamiento de precipitación vertical dependió de la especie arbórea.

Tabla 39

Comparación de medias marginales ajustadas del área específica de raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Especie	Comparación	Estimación	SE	df	t-ratio	P-valor
<i>Clusia alata</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	1.782	12	44	0.148	0.8828
<i>Clusia flaviflora</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	0.417	9.96	44	0.042	0.9668
<i>Meliosma frondosa</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	-22.901	13.4	44	-1.704	0.0954
<i>Prunus integrifolia</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	13.88	10.4	44	1.334	0.1892
<i>Weinmannia bangii</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	29.164	11	44	2.642	0.0114
<i>Weinmannia crassifolia</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	35.639	11	44	3.229	0.0024

La Tabla 39 muestra los resultados post- hoc donde se detectaron diferencias significativas entre control y tratamiento para *Weinmannia bangii* ($p < 0.05$) y *Weinmannia crassifolia* ($p < 0.005$), por lo que se rechaza la hipótesis nula por estas diferencias entre las especies de control y tratamiento.

Tabla 40

Análisis de varianza (ANOVA) del área total de las raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento precipitación horizontal.

Fuente de variación	gl	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	p-valor
Plot_code (parcela)	1	3.32	3.318	0.1123	0.7389
Tree_specie(especie)	6	274.2	45.7	1.5472	0.1824
Parcela × especie	5	227.07	45.414	1.5375	0.1952
Residuales	50	1476.88	29.538		

No se encontraron diferencias significativas entre control y tratamiento para ninguna especie bajo precipitación horizontal ($p > 0.05$). La hipótesis nula se mantiene, indicando que el tratamiento no afectó la SRA de raíces finas por especie en las parcelas de precipitación horizontal.

Tabla 41

Comparación de medias marginales ajustadas del área total de raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

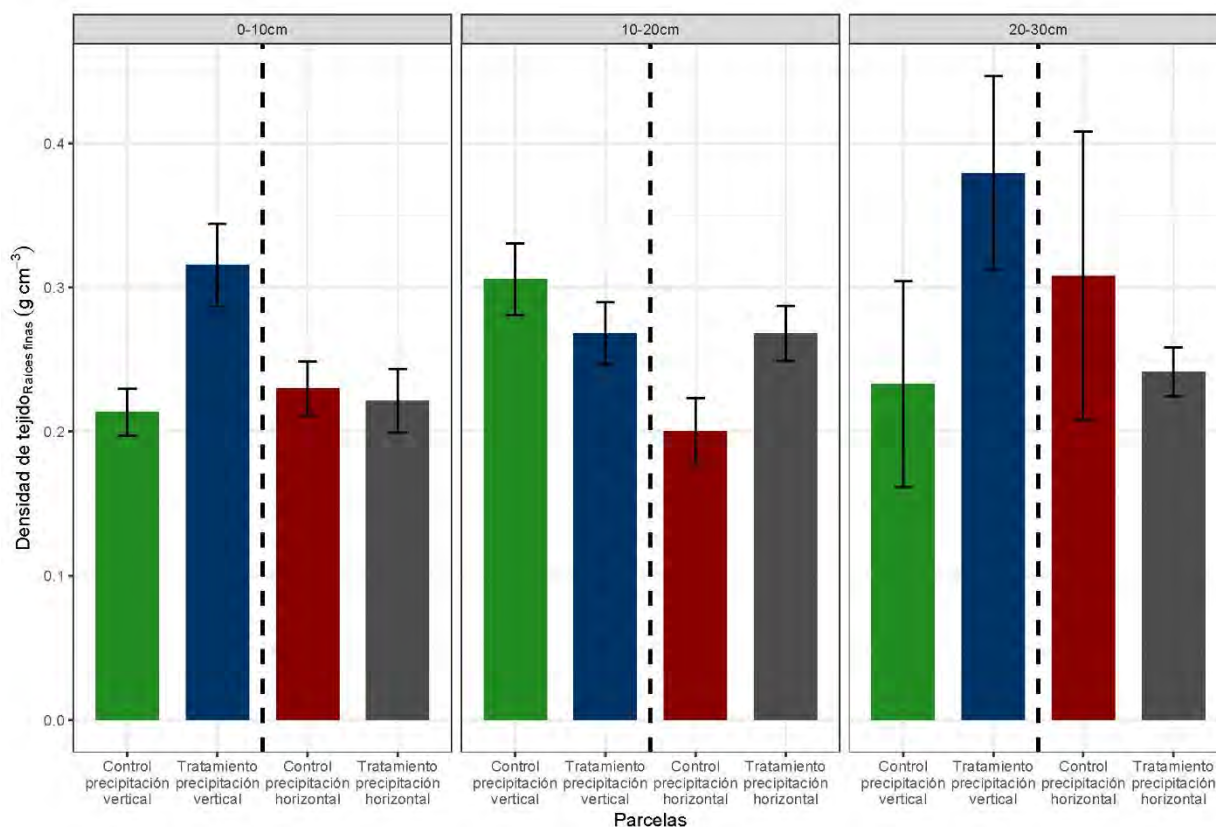
Especie	Comparación	Estim	SE	df	t-ratio	p-valor
<i>Meliosma frondosa</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-4.31	3.65	50	-1.183	0.2422
<i>Miconia micropetala</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	5.92	3.97	50	1.49	0.1424
<i>Myrsine coriaceae</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-5.59	3.1	50	-1.803	0.0774
<i>Ocotea glabriflora</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-2.92	3.65	50	-0.801	0.4272
<i>Prunus integrifolia</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	2.63	3.44	50	0.765	0.4477
<i>Weinmannia reticulata</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-3.51	3.84	50	-0.913	0.3655

3.1.2.3. Densidad de tejido de las raíces finas (RTD)

En la Figura 16 se muestran los valores promedio de RTD de raíces finas a diferentes profundidades del suelo de la comunidad vegetal, en las parcelas de precipitación vertical y horizontal. En la parcela control de precipitación vertical, la RTD presentó un incremento desde 0–10 cm ($0.21 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$) hasta 10–20 cm ($0.31 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$), seguido de un ligero descenso a 20–30 cm ($0.23 \pm 0.07 \text{ g cm}^{-3}$). En la parcela de tratamiento, los valores fueron mayores en 0–10 cm ($0.32 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$), disminuyeron levemente a 10–20 cm ($0.27 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$) y aumentaron nuevamente a 20–30 cm ($0.38 \pm 0.07 \text{ g cm}^{-3}$). En las parcelas de precipitación horizontal, la RTD presentó variaciones menores entre control y tratamiento. En el control, los valores fueron 0.23 ± 0.02 , 0.20 ± 0.02 y $0.31 \pm 0.10 \text{ g cm}^{-3}$ para 0–10, 10–20 y 20–30 cm de suelo, respectivamente. En el tratamiento, los valores fueron 0.22 ± 0.02 , 0.27 ± 0.02 y $0.24 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$, mostrando un patrón similar al control.

Figura 16

Promedio de la densidad de tejido de las raíces finas a diferentes profundidades del suelo (10, 20 y 30 cm).



Nota. Las barras de color son los valores promedio de las raíces finas, y las barras negras continuas en cada barra de color son los valores del error estándar de la Media. La línea vertical discontinua separa las parcelas de tratamiento de precipitación vertical y horizontal.

Análisis estadístico de la densidad de tejido de raíces finas de la comunidad vegetal

Con el fin de evaluar si existen diferencias significativas en la RTD de raíces finas en las parcelas de precipitación vertical, se realizó un ANOVA de dos vías de acuerdo a las parcelas, la profundidad del suelo y su interacción sobre la RTD, de forma independiente para precipitación vertical y horizontal. Los datos utilizados se encuentran en el *Anexo 19*.

Hipótesis planteadas:

H₀: *La RTD de raíces finas no difiere entre control y tratamiento a nivel de comunidad.*

H₁: *La RTD de raíces finas difiere entre control y tratamiento a nivel de comunidad.*

Tabla 42

Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de tejido de las raíces finas- de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento precipitación vertical.

Fuente	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Parcela (plot_code)	1	0.032946	0.032946	3.6869	0.0685
Profundidad soil_depth	2	0.009047	0.004523	0.5062	0.61
Parcela y profundidad	2	0.040999	0.0205	2.2941	0.126
Residuals	21	0.187652	0.008936		

Como se observa en la Tabla 42, el tratamiento mostró un efecto marginal sobre la RTD ($p = 0.0685$), mientras que la profundidad y la interacción no fueron significativas ($p > 0.05$). Esto indica que el tratamiento de precipitación vertical no produjo diferencias estadísticamente significativas en la densidad de tejido de raíces finas a nivel de comunidad. no se rechaza la hipótesis nula (H_0), no hay diferencias significativas en densidad de tejido entre control y tratamiento bajo precipitación horizontal.

Tabla 43

Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de tejido de las raíces finas- de la comunidad vegetal de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Parcela (plot_code)	1	0.000043	0.0000433	0.0043	0.9482
Profundidad (soil depth)	2	0.013758	0.006879	0.685	0.5137
Parcela y profundidad	2	0.022648	0.011324	1.1277	0.3403
Residuals	24	0.240999	0.010042		

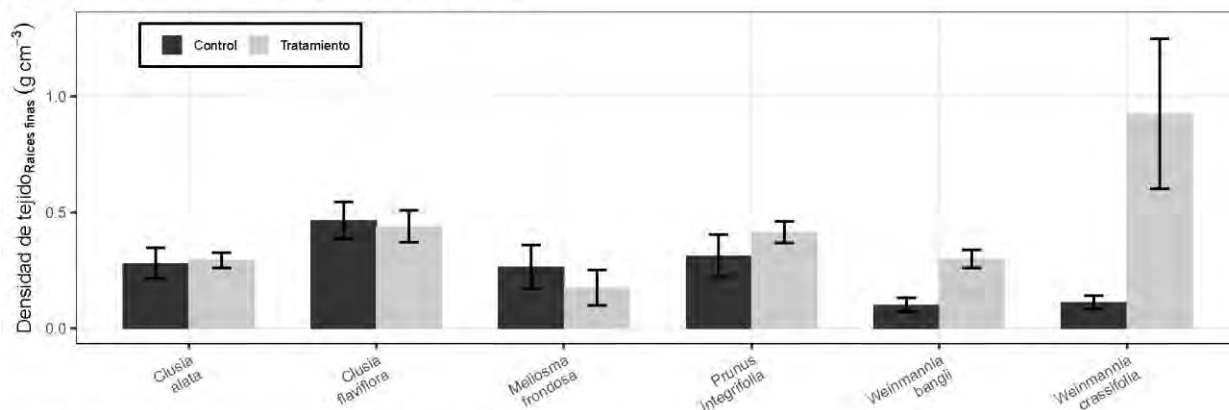
Como se muestra en la Tabla 43, no se detectaron diferencias significativas en RTD de las raíces finas entre control y tratamiento de precipitación horizontal, ni por profundidad ni por interacción de las parcelas y profundidad ($p > 0.05$). No se rechaza la hipótesis nula (H_0), no hay diferencias significativas en densidad de tejido entre control y tratamiento bajo precipitación horizontal.

En la Figura 17 se presentan los valores promedio de **densidad de tejido de raíces finas por especie arbórea** en las parcelas de precipitación vertical y horizontal. Para las parcelas de precipitación vertical, se observó que *Weinmannia crassifolia* presentó valores notablemente menores en el tratamiento ($0.93 \pm 0.32 \text{ g cm}^{-3}$) comparado con el control ($0.11 \pm 0.03 \text{ g cm}^{-3}$). Para el resto de las especies, como *Clusia alata*, *Clusia flaviflora*, *Meliosma frondosa*, *Prunus integrifolia*, *Weinmannia bangii* y *Weinmannia reticulata*, los valores de densidad de tejido fueron similares entre control y tratamiento. En las parcelas de precipitación horizontal (PH), los valores de densidad de tejido fueron generalmente similares entre control y tratamiento para la mayoría de las especies. Solo *Myrsine coriaceae* mostró un aumento en el tratamiento ($0.35 \pm 0.08 \text{ g cm}^{-3}$) respecto al control ($0.51 \pm 0.09 \text{ g cm}^{-3}$).

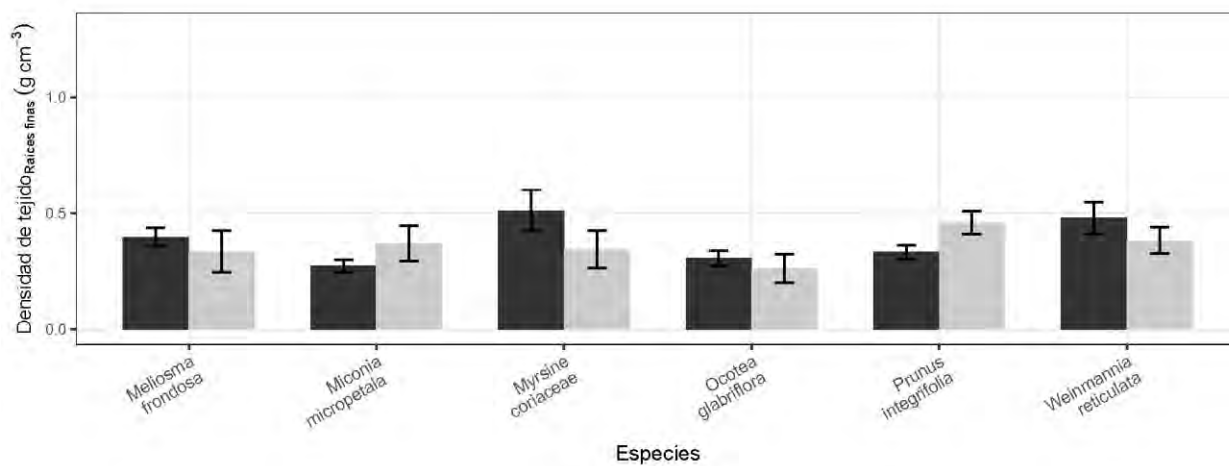
Figura 17

Promedio de la densidad de tejido de raíces finas para especies arbóreas

(a) Reducción de la precipitación vertical



(b) Reducción de la precipitación horizontal



Nota: (a) en las parcelas de tratamiento y control de la precipitación vertical y (b) en las parcelas de tratamiento y control de la precipitación horizontal. Cada barra muestra el valor medio con su respectiva barra negra continua que muestra el error.

Análisis la densidad de tejido de raíces finas por especies arbóreas

Se aplicó un ANOVA de dos vías para evaluar los efectos del tratamiento (control vs tratamiento), la especie arbórea y su interacción sobre la densidad de tejido, de manera independiente para las parcelas de precipitación horizontal y vertical independientemente. Los datos utilizados se encuentran en el *Anexo 21*.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H₀: La densidad de tejido de las raíces finas de especies arbóreas no difiere entre control y tratamiento de precipitación.

H₁: La densidad de tejido de las raíces finas de especies arbóreas difiere entre control y tratamiento de precipitación.

Tabla 44

Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de tejidos de las raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Fuente	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	p-valor
plot_code	1	0.4716	0.4716	7.286	0.0098 **
tree_especie	6	0.8946	0.1491	2.304	0.051 .
plot_code:tree_especie	5	1.1793	0.2359	3.644	0.0076 **
Residuals	44	2.848	0.0647	-	-

En la Tabla 44 se presentan los resultados del ANOVA para las parcelas de precipitación vertical, donde se observa un efecto significativo del tratamiento sobre la densidad de tejido ($F_{1,44} = 7.286$, $p < 0.01$), así como un efecto significativo de la interacción tratamiento $\times$ especie ($F_{5,44} = 3.644$, $p < 0.01$).

Tabla 45

Comparación de medias marginales ajustadas de la densidad de tejido de raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación vertical.

Especie	Comparación	Estimado	SE	df	t.ratio	p-valor
<i>Clusia alata</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	-0.0135	0.186	44	-0.073	0.942
<i>Clusia flaviflora</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	0.0254	0.154	44	0.165	0.87
<i>Meliosma frondosa</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	0.0888	0.208	44	0.427	0.671
<i>Prunus integrifolia</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	-0.1031	0.161	44	-0.641	0.525
<i>Weinmannia bangii</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	-0.1969	0.171	44	-1.154	0.255
<i>Weinmannia crassifolia</i>	Control precipitación vertical - Tratamiento precipitación vertical	-0.8123	0.171	44	-4.76	<0.0001**

Las comparaciones post hoc mostraron diferencias significativas únicamente para la densidad de tejido de las raíces de *Weinmannia crassifolia* ($p < 0.001$), por lo que se rechaza la hipótesis nula para la densidad de tejido a nivel de especie bajo precipitación vertical.

Tabla 46

Análisis de varianza (ANOVA) de la densidad de tejidos de las raíces finas de las especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Fuente	Df	Sum Sq	Mean Sq	F	p-valor
Parcela (plot_code)	1	0.00065	0.00065	0.033	0.857
Especie (tree_specie)	6	0.162	0.027	1.367	0.246
Parcela y especie	5	0.1595	0.0319	1.616	0.173
Residuals	50	0.98727	0.0197	-	-

En la Tabla 46 se presentan los resultados del ANOVA para las parcelas de precipitación horizontal, donde ninguno de los efectos principales ni la interacción fue significativo ($p > 0.05$). La tabla 47 muestra las comparaciones post- hoc que indicaron diferencias significativas únicamente para *Myrsine coriacea* ($p < 0.05$), mientras que para el resto de las especies no se observaron diferencias significativas, por lo que se acepta la hipótesis nula para el efecto general del tratamiento bajo precipitación horizontal.

Tabla 47

Comparación de medias marginales ajustadas de la densidad de tejido de raíces finas- especies arbóreas de las parcelas control y tratamiento de precipitación horizontal.

Especie	Comparación	Estimado	SE	df	t.ratio	p-valor
<i>Meliosma frondosa</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	0.0617	0.0943	50	0.654	0.516
<i>Miconia micropetala</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-0.0957	0.103	50	-0.932	0.356
<i>Myrsine coriacea</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	0.1668	0.0801	50	2.082	0.0425*
<i>Ocotea glabriflora</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	0.0446	0.0943	50	0.473	0.638
<i>Prunus integrifolia</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	-0.1259	0.0889	50	-1.416	0.163
<i>Weinmannia reticulata</i>	Control precipitación horizontal - Tratamiento precipitación horizontal	0.0969	0.0994	50	0.975	0.334

3.1.3. Relación de la humedad y temperatura del suelo con la dinámica y morfología de las raíces finas.

3.1.3.1. Efecto de la humedad y temperatura del suelo con la dinámica de raíces finas

De acuerdo con la Tabla 48 el análisis realizado mediante modelos lineales mixtos generalizados (GLMM), evaluó el efecto de la humedad del suelo y la temperatura del suelo sobre la productividad mensual de las raíces finas en las diferentes parcelas. Los resultados muestran variaciones tanto en la dirección como en la significancia de los efectos según el tipo de tratamiento. Los datos utilizados figuran en el *Anexo 25*.

Tabla 48

Modelos lineales mixtos generalizados de la productividad y variables del suelo.

Parcela	Variable	Estimate	SE	p-valor	Random Effect (σ^2)	AIC
CON-PV	Humedad	-0.08738	0.0391	0.0256*	~0	-94
CON-PV	Temperatura	-0.48927	0.3685	0.1843	~0	-91
TRT-PV	Humedad	0.0249	0.0136	0.0672	0.06216	-109
TRT-PV	Temperatura	-0.3194	0.3646	0.3809	0.05432	-107
CON-PH	Humedad	-0.1028	0.0241	7.60E-05***	0.03139	-113
CON-PH	Temperatura	-0.863	0.2901	0.00293 **	0.03625	-103
TRT-PH	Humedad	0.00032	0.0146	0.9823	0.1045	-131
TRT-PH	Temperatura	-0.8005	0.2484	0.00127**	0.1029	-133

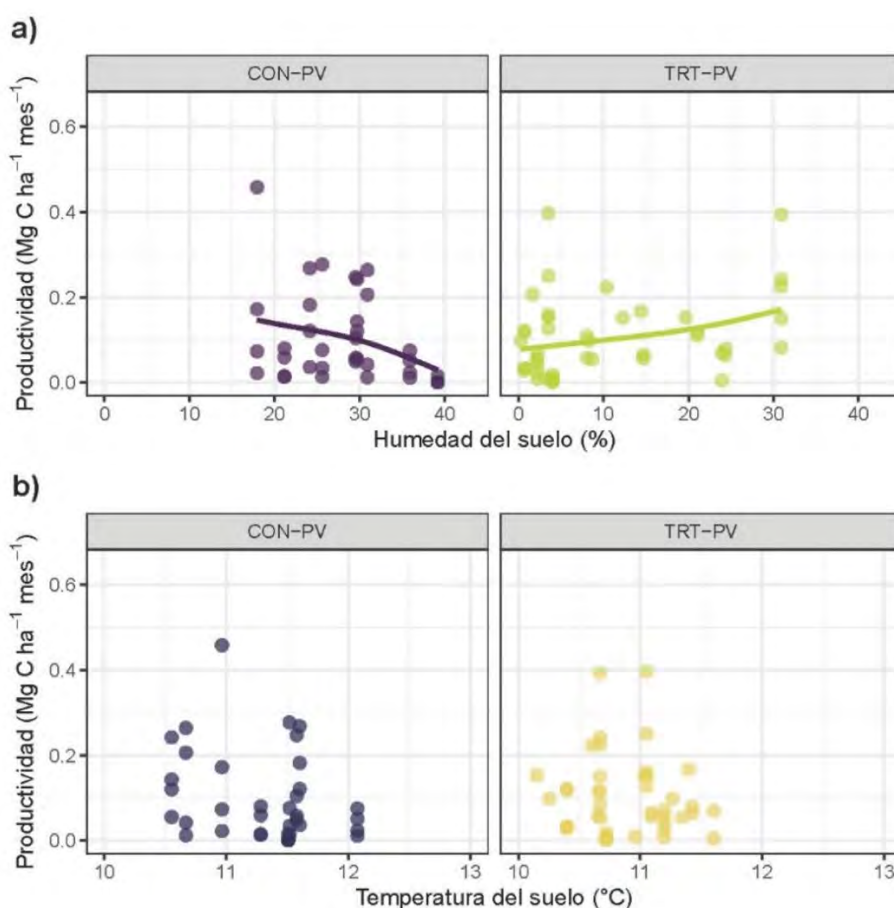
*Nota: Estimate indica la magnitud y dirección del efecto fijo estimado; SE es el error estándar asociado. p-valor y Signif. representan el nivel de significancia estadística (NS = no significativo; · = $p < 0.1$; * = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** = $p < 0.001$). Random Effect (σ^2) corresponde a la varianza del efecto aleatorio. El AIC (Criterio de Información de Akaike) se incluye como indicador comparativo del ajuste del modelo.*

La Figura 18 muestra que la humedad del suelo tuvo un efecto negativo y significativo sobre la productividad de raíces finas de la parcela de control de precipitación vertical (E= -0.08738, $p < 0.05$), en cambio en la parcela de tratamiento de precipitación vertical (TRT-PV), la

humedad del suelo mostró un efecto positivo sobre la productividad mensual (Estimate = 0.0249, $p = 0.067$), marginalmente significativo. En relación a la temperatura, en la parcela de control de precipitación vertical (CON-PV), el efecto también fue negativo (Estimate = -0.4893), sin alcanzar significancia estadística ($p = 0.184$). En la parcela de tratamiento de precipitación vertical (TRT-PV), la temperatura del suelo también presentó un efecto negativo (Estimate = -0.3194), y también no significativo ($p = 0.381$).

Figura 18

Modelos lineales mixtos generalizados de la productividad, humedad y temperatura del suelo del tratamiento y control de la reducción de precipitación vertical.

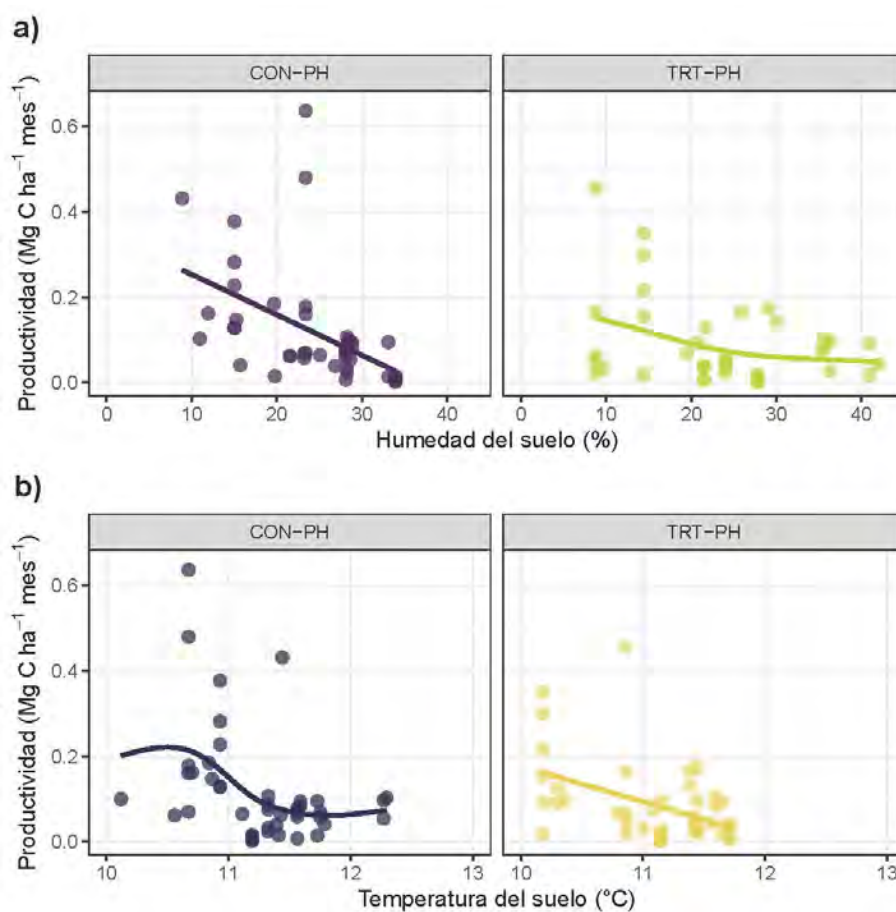


Nota. (a) Relación entre la productividad (Mg C ha⁻¹ mes⁻¹) y la humedad del suelo (%). (b) Relación entre la productividad (Mg C ha⁻¹ mes⁻¹) y la temperatura del suelo (°C). Cada punto representa un valor mensual de productividad obtenido por parcela. Por otro lado, en la Figura 19 se muestra que, en la parcela control precipitación horizontal la humedad del suelo tuvo un

efecto negativo en la productividad de raíces finas, con significancia ($E = -0.1028p < 0.001$); en cambio, en el tratamiento de precipitación horizontal (TRT-PH), la humedad del suelo no tuvo efecto sobre la productividad de raíces finas ($\text{Estimate} = 0.0003$, $p = 0.982$). Respecto al efecto de la temperatura del suelo en la productividad de raíces finas, en la parcela de tratamiento de precipitación horizontal mostró un efecto negativo fuerte y altamente significativo ($\text{Estimate} = -0.8005$, $p < 0.05$). De manera similar, en el control de precipitación horizontal (CON-PH), la temperatura TMS tuvo un efecto negativo y significativo sobre la productividad ($\text{Estimate} = -0.863$, $p < 0.05$).

Figura 19

Modelos lineales mixtos generalizados de la productividad y humedad y temperatura del suelo del tratamiento y control de la reducción de precipitación horizontal



Nota. (a) Relación entre la productividad (Mg C ha⁻¹ mes⁻¹) y la humedad del suelo (%).

(b) Relación entre la productividad ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$) y la temperatura del suelo ($^{\circ}\text{C}$). Cada punto representa un valor mensual de productividad obtenido por parcela.

En la Tabla 49 se muestran los coeficientes de correlación de Spearman entre el tiempo de residencia de raíces finas y la humedad y temperatura del suelo. En ninguna de las parcelas de precipitación vertical ni horizontal se detectaron correlaciones significativas entre el tiempo de residencia y las variables ambientales evaluadas ($p > 0.05$), tanto en control como en tratamiento. Estos resultados indican que el tiempo de residencia de las raíces finas no estuvo significativamente asociado con la humedad ni con la temperatura del suelo en las condiciones estudiadas. Los datos empleados para este análisis están en la tabla del *Anexo 26*.

Tabla 49

Coefficientes de correlación de Spearman entre el tiempo de residencia de raíces finas (años) y las variables de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad (%) del suelo.

Parcela	Variables	n	r	p	Sig.
CON-PV	Humedad del suelo-Tiempo de residencia	4	1	0.083	NS
TRT-PV		5	-0.7	0.233	NS
CON-PH		5	-0.051	0.935	NS
TRT-PH		5	0.1	0.95	NS
CON-PV	Temperatura del suelo - Tiempo de residencia	4	-0.6	0.417	NS
TRT-PV		5	0.1	0.95	NS
CON-PH		5	0.564	0.322	NS
TRT-PH		5	-0.5	0.45	NS

Nota: r corresponde al coeficiente de correlación de Spearman; p indica el valor de significancia estadística; sig. muestra el nivel de significancia (NS = no significativo; $p < 0.05 = *$, $p < 0.01 = **$, $p < 0.001 = ***$).

3.1.3.2. Relación de la humedad y temperatura del suelo con la morfología de raíces finas

En la Tabla 50 se presentan los coeficientes de correlación de Spearman entre los rasgos morfológicos de las raíces finas y las variables ambientales de humedad y temperatura del suelo,

los datos utilizados figuran en el *Anexo 27*. En general, la morfología de las raíces finas no mostró relaciones consistentes con la humedad ni con la temperatura del suelo en las diferentes parcelas ($p > 0.05$). Sin embargo, se detectaron algunas relaciones significativas específicas por tratamiento. En la parcela de tratamiento de precipitación vertical (TRT-PV), la longitud específica de raíces finas (SRL) presentó una correlación positiva significativa con la humedad del suelo ($r = 0.75$, $p < 0.01$). Asimismo, en la parcela de tratamiento de precipitación horizontal (TRT-PH), la SRL mostró una correlación positiva significativa con la temperatura del suelo ($r = 0.54$, $p < 0.05$).

Adicionalmente, en la parcela control de precipitación vertical (CON-PV), el área específica de raíces finas (SRA) se correlacionó negativamente con la temperatura del suelo ($r = -0.61$, $p < 0.05$), mientras que la densidad de tejido (RTD) presentó una correlación positiva significativa con esta misma variable ($r = 0.61$, $p < 0.05$). En el resto de combinaciones entre rasgos y variables ambientales no se observaron correlaciones significativas.

Tabla 50

Coeficientes de correlación de Spearman entre los rasgos morfológicos de raíces finas (SRL, SRA y RTD) y las variables de temperatura (°C) y humedad (%) del suelo.

Parcela	Variables	n	r	p	sig
CON-PV	Humedad del suelo - SRL	12	0.281	0.377	NS
TRT-PV		15	0.753	0.0012	**
CON-PH		15	0.229	0.411	NS
TRT-PH		15	-0.262	0.346	NS
CON-PV	Humedad del suelo-SRA	12	0.345	0.271	NS
TRT-PV		15	0.469	0.0777	NS
CON-PH		15	-0.207	0.459	NS
TRT-PH		15	-0.109	0.699	NS
CON-PV	Humedad del suelo-RTD	12	-0.345	0.271	NS
TRT-PV		15	-0.218	0.435	NS
CON-PH		15	0.336	0.221	NS
TRT-PH		15	0.153	0.587	NS
CON-PV	Temperatura del suelo-SRL	12	-0.497	0.101	NS
TRT-PV		15	-0.0109	0.969	NS
CON-PH		15	0.0504	0.858	NS
TRT-PH		15	0.535	0.04	*
CON-PV	Temperatura del suelo-SRA	12	-0.605	0.0373	*
TRT-PV		15	-0.469	0.0777	NS
CON-PH		15	-0.297	0.283	NS
TRT-PH		15	0.185	0.508	NS
CON-PV	Temperatura del suelo-RTD	12	0.605	0.0373	*
TRT-PV		15	0.12	0.67	NS
CON-PH		15	0.224	0.422	NS
TRT-PH		15	0.196	0.483	NS

Nota: r corresponde al coeficiente de correlación de Spearman; p indica el valor de significancia estadística; sig. muestra el nivel de significancia (NS = no significativo; $p < 0.05 = *$, $p < 0.01 = **$, $p < 0.001 = ***$).

3.2. DISCUSIÓN

3.2.1. Dinámica de las raíces finas

3.2.1.1. Biomasa y Necromasa de raíces finas

Los resultados de este estudio muestran que la disminución de la precipitación vertical y horizontal en los bosques montanos de Wayqecha, incrementa la biomasa de raíces finas, sin embargo, este incremento no es significativamente superior a las parcelas control, para ambos tratamientos (Figura 6, Tabla 4 y 5). Este efecto positivo está relacionado directamente con la disminución de la biomasa a mayor profundidad del suelo. En condiciones de estrés hídrico, las plantas asignan mayor carbono a las raíces finas para maximizar la absorción de agua, para mantener estable la biomasa subterránea (Ibrahim et al., 2020; Wangdi et al., 2017), debido a estrategias compensatorias de asignación de recursos bajo limitaciones nutrientes y agua (Hertel & Leuschner, 2010). En los bosques montanos la descomposición de la materia orgánica del suelo es más lenta en comparación a los bosques llanos tropicales, en la parte superficial del suelo existe una mayor disponibilidad relativa de nutrientes, lo que favorece la acumulación de la biomasa (Huaraca Huasco et al., 2021; Moser et al., 2010; Sierra Cornejo et al., 2020).

La disminución de la **biomasa de raíces finas con la profundidad del suelo** (Figura 7, Tabla 8, 9 y 10), está relacionada con la disponibilidad de agua y nutrientes en la capa superficial del suelo, lo que obliga a incrementar las raíces para maximizar recursos. Sorprendentemente, se encontró que la biomasa en la profundidad de 10–20 cm disminuye en la parcela tratamiento de precipitación vertical respecto al control, esto podría explicarse con la mayor disponibilidad de agua y nutrientes distribuidas en la profundidad, en este contexto Moser et al. (2010) e Ifo et al. (2015) señalan que en los bosques montanos gran parte de la biomasa radicular se acumula en los estratos donde los nutrientes se encuentran más disponibles y se favorece de la liberación de bioelementos en la descomposición de hojarasca. La reducción de la precipitación tiene un efecto en la comunidad de organismos en las primeras capas del suelo, donde el incremento de la temperatura incrementa la actividad de organismos descomponedores y la disponibilidad de nutrientes (Nottingham et al., 2025).

Así mismo, en la figura del *Anexo 21*, se observa que los datos de biomasa de raíces finas obtenidos en el presente estudio, van acorde con valores antes reportados para ecosistemas similares en bosques del neotrópico y Paleotrópico, también van en la línea con los valores de biomasa reportados por Hertel & Leuschner, (2010) como promedio tropical global de biomasa raíces finas.

En la parcela de control de precipitación vertical la necromasa de raíces finas incrementa con la profundidad del suelo; este patrón cambia en la parcela de reducción de la precipitación vertical donde la necromasa tiende a incrementar (Figura 7, Tabla 11 y 12). Es decir el tratamiento de reducción afecta la normal distribución de la necromasa incrementándola para los primeros centímetros de suelo induciendo a la acumulación de raíces muertas (necromasa), debido a las condiciones más restrictivas en el proceso de la descomposición, con la disminución de la humedad del suelo y la actividad microbiana (Girardin et al., 2013; Hertel & Leuschner, 2010). Los resultados de este estudio en la necromasa concuerdan con lo reportado por Ifo et al. (2015) y Moser et al. (2014), que documentaron un aumento significativo de necromasa bajo condiciones de exclusión de precipitación vertical.

3.2.1.2. Variación anual stock de carbono en las raíces finas

El stock de carbono en las raíces finas está relacionado con los cambios en la cantidad de biomasa y necromasa en el tratamiento de reducción de precipitación vertical (Figura 8 y 9). En 2021, la reducción significativa del stock de carbono en el año (Tabla 15), está relacionado con la disminución de la precipitación vertical, como menciona Ifo et al. (2015) las condiciones de sequedad disminuyen la disponibilidad de nutrientes, limitan el crecimiento de las raíces. Estos resultados concuerdan con estudios previos de exclusión de lluvias, donde señalan que los efectos de estas manipulaciones de precipitación suelen manifestarse en el mediano y largo plazo, teniendo un efecto gradual (Moser et al., 2014; Zhang et al., 2019). Dado que este estudio se desarrolló varios años después de la instalación de los tratamientos, es posible que las raíces se hayan ido acondicionando progresivamente al nuevo régimen hídrico, indicando un proceso de recuperación parcial en la parcela de tratamiento. Además, este efecto podría estar influenciado por el desgaste de la estructura instalada en la parcela de tratamiento vertical (paneles de polietileno) a lo largo del tiempo o por infiltraciones parciales de agua, factores que habrían debilitado el impacto total del tratamiento sobre la dinámica y persistencia de las raíces finas.

En cambio, en las parcelas de precipitación horizontal el stock de raíces finas aumentó progresivamente a lo largo de los tres años (Tabla 14). Tal como señalan Girardin et al. (2013), la constante presencia de niebla y la elevada humedad relativa del bosque, llegan a favorecer el crecimiento radicular, lo que explicaría el incremento progresivo observado en las parcelas. Las mallas instaladas en la parcela de tratamiento, además de reducir la precipitación horizontal, parecen modificar el bosque, al disminuir la velocidad del viento y retener la humedad en el sotobosque, lo cual podría haber generado un ambiente más favorable para el crecimiento radicular. En contraste, los techos utilizados en la exclusión de precipitación vertical no produjeron este efecto, actuando como barreras para la lluvia directa e incluso reduciendo parcialmente la entrada de precipitación horizontal, lo que explicaría la ausencia de incrementos significativos en ese experimento. La tendencia creciente también podría estar influenciada por otros factores. (Oliveras et al. (2014) señalan que, en bosques montanos andinos, no necesariamente se produce un mayor número de raíces finas, sino que estas tienden a acumularse debido a su mayor longevidad y a la lenta descomposición, lo que puede generar un aparente incremento en el stock sin que ello implique un aumento real de la producción. En este sentido, Yaffar et al. (2023) documentan una amplia variabilidad en los stocks de raíces finas, la cual responde a factores ecológicos (condiciones edáficas, disponibilidad hídrica, composición florística) y también metodológicos (profundidad de muestreo, épocas de colecta, técnicas de separación). En la figura del *Anexo 22*, se aprecia que los valores registrados en este estudio no superan el límite superior del rango global reportado para estos ecosistemas, lo que refuerza la necesidad de complementar estos resultados con mediciones de humedad del suelo y de aportaciones de niebla, con el fin de distinguir los efectos propios de los tratamientos y las variaciones ambientales naturales.

3.2.1.3. Productividad de raíces finas

La productividad de raíces finas de las parcelas de estudio no reflejó variaciones consistentes entre parcelas control y tratamiento de precipitación vertical y horizontal, a lo largo de los tres años de evaluación (Figura 10, Tabla 17-20). Sin embargo, se aprecia un patrón temporal interesante, ante la reducción de precipitación vertical las raíces tienden incrementar la productividad, mientras que cuando la disponibilidad hídrica aumenta la productividad disminuye. En el experimento de precipitación horizontal se observa la tendencia opuesta. Estas respuestas, al igual que en la biomasa y stock, sugieren que la respuesta radicular depende no sólo de la cantidad

total de agua, sino también de la cantidad de nutrientes en el suelo y en este caso específico de la estacionalidad.

En este contexto, Huaraca Huasco et al. (2021) señala que la productividad radicular en estos ecosistemas está fuertemente condicionada por las bajas temperaturas y la limitación de nutrientes del suelo, lo que sugiere que la estabilidad observada en los resultados del presente estudio está asociada a las condiciones edáficas y climáticas del sitio que al efecto de los tratamientos de exclusión. Además, la capa gruesa de materia orgánica del suelo y la temperatura baja también pueden favorecer la persistencia de raíces más longevas y con menor recambio, lo que reduce la sensibilidad de la productividad frente a variaciones de precipitación (Huaraca Huasco et al., 2021; Hertel & Leuschner, 2010), por ello las raíces sin las condiciones de agua necesarias resultan igual de productivas e incluso responden aumentando más biomasa en el tiempo. Por otro lado, la disminución en la productividad de raíces finas en la parcela de tratamiento de precipitación horizontal, no fue estadísticamente significativa, se observa una tendencia decreciente a lo largo de los años. Esta tendencia podría estar asociada a la reducción del ingreso de niebla por efecto de la malla, lo que implicaría una menor fracción de luz difusa y un predominio de radiación directa, la luz difusa puede ser utilizada con mayor eficiencia fotosintética que la luz directa (Berry & Goldsmith, 2020). Por lo tanto, la reducción de luz difusa podría haber limitado la fotosíntesis y, en consecuencia, la asignación de carbono a raíces finas, resultando en una menor productividad.

Así también, en la figura del *Anexo 23* se puede observar que los valores obtenidos en el presente estudio para productividad de raíces finas son coherentes con valores reportados en estudios previos en este tipo de ecosistemas y condiciones, encontrándose incluso por debajo del valor promedio tropical global reportado por Hertel & Leuschner (2010).

El incremento de la productividad hacia el mes de agosto, coincide con el final de la estación seca y previo al inicio de la temporada de lluvias (Figura 11). Este patrón es consistente con lo reportado por Girardin et al. (2014), quienes documentaron un marcado ciclo estacional, con mayor crecimiento radicular durante la estación seca, asociado principalmente a la sequía estacional y la radiación solar. (Oliveras et al., 2014) también reportaron un cambio en la asignación de la productividad, con mayor inversión en raíces finas al final de la estación seca, lo que respalda los resultados de este estudio, de que las raíces finas siguen una estrategia

anticipatoria, al incrementar la productividad radicular antes de las lluvias, para maximizar la absorción de agua y nutrientes cuando la humedad del suelo se incrementa.

En este sentido, los patrones encontrados a lo largo de los años, son señales ecológicas sugerentes que se confirman con el efecto de la humedad en la productividad, lo que resalta la importancia de estudios adicionales que incluyan la estacionalidad y registros directos de las condiciones del suelo. Pese a ello, los valores se mantuvieron estables y dentro del rango previamente descrito para bosques montanos neotropicales y paleotropicales.

3.2.1.4. Tiempo de residencia de raíces finas

La ausencia de diferencias significativas en el tiempo de residencia de raíces finas no excluye la posibilidad de que la disponibilidad de agua y nutrientes esté modulando la dinámica de recambio radicular, lo que se refleja en la tendencia hacia una mayor longevidad en las parcelas con reducción de precipitación vertical y horizontal (Tabla 21, 22 y 23). En particular, las raíces tienden a mantenerse por más tiempo en condiciones de menor disponibilidad hídrica, lo que sugiere una menor frecuencia de renovación. Este patrón es consistente con lo reportado en estudios previos en bosques montanos, donde la longevidad radicular se ha asociado a suelos fríos y pobres en nutrientes, condiciones que reducen la actividad microbiana y la descomposición, favoreciendo una estrategia conservadora orientada al ahorro de carbono y a la formación de raíces más duraderas (Girardin et al., 2013; Oliveras et al., 2014). De manera complementaria, Graefe et al. (2008) señalan que temperaturas más altas tienden a acelerar la renovación radicular, mientras que en ecosistemas montano tropicales la baja fertilidad y la acidez del suelo prolongan la vida útil de las raíces.

En comparación con otras regiones tropicales (*Anexo 24*), los resultados del estudio también se asemejan a los observados en bosques montanos de África, donde la dinámica de recambio radicular está fuertemente influenciada por la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes (Ifo et al., 2015; Sierra et al., 2020). En ese sentido, el menor recambio registrado en las parcelas con tratamiento refuerza la idea de que, frente a la ausencia de precipitación vertical, las raíces adoptan una estrategia conservadora, aumentando su longevidad como mecanismo adaptativo ante condiciones de estrés hídrico y baja fertilidad. Por lo que, la tendencia hacia una mayor longevidad radicular en las parcelas con reducción de precipitación requiere evaluaciones

que integren mediciones de descomposición, de necromasa y actividad microbiana, que permitirán confirmar los mecanismos que regulan el tiempo de residencia en estos bosques.

3.2.2. Morfología de las raíces finas

3.2.2.1. Longitud específica de raíces finas

El incremento de longitud específica de raíces finas a mayor profundidad del suelo (Figura 12, Tabla 26 y 28) aunque no resulto significativo, sugiere que estas adoptan una morfología más eficiente, posiblemente como estrategia para explorar y optimizar la absorción de agua en capas donde los recursos son más limitados y variables. Este patrón ha sido descrito también por Pierick et al. (2021) y Zhang et al. (2019), quienes señalan que las raíces a mayor profundidad tienden a presentar mayor longitud específica como respuesta funcional a la escasez hídrica o nutricional. Además estos resultados son consistentes con lo reportado por Metcalfe, (2008) que la sequía reduce la inversión en raíces al restringir su expansión por falta de agua y carbono, por lo que estas se expanden a mayor profundidad.

La disminución de SRL de las raíces finas en la reducción de precipitación horizontal respecto a su control, a la profundidad de 10 a 20 cm está relacionado a la biomasa acumulada a esta profundidad, reflejando a una estrategia más conservadora, reduciendo el SRL para disminuir los costos respiratorios y aumentar la longevidad de las raíces existentes (McCormack et al., 2015). Este comportamiento coincide con los mayores tiempos de residencia observados en las parcelas con reducción de precipitación, donde las raíces reflejan mayor inversión en el mantenimiento de las raíces finas. Además, este patrón es consistente con lo reportado por Pierick et al. (2021, 2023), Sierra Cornejo et al. (2020) y Weemstra et al. (2016), quienes documentaron que las raíces tienden a adoptar estrategias conservadoras con menor SRL, mayor grosor y mayor longevidad, lo que resulta ventajoso en ambientes fríos y con baja disponibilidad de nutrientes.

Los resultados de la longitud de las raíces finas a nivel de especies (Figura 13, Tabla 31 y 33) demuestran que la reducción de la precipitación vertical tiene efectos en algunas especies arbóreas, donde *Weinmannia bangii* y *W. crassifolia* reduce su longitud específica de raíces finas bajo reducción de lluvia, lo que sugiere una estrategia conservadora frente al déficit hídrico, caracterizada por raíces más gruesas, longevas y con menor capacidad exploratoria (Sierra Cornejo et al., 2020; Zhang et al., 2019). En contraste, *Meliosma frondosa* incrementa su SRL bajo el tratamiento, reflejando una estrategia más exploratoria para optimizar la absorción en condiciones

de menor disponibilidad de agua. Por otro lado, el incremento SRL de *Myrsine coriaceae* bajo el tratamiento de precipitación horizontal podría reflejar una estrategia más oportunista, orientada a maximizar la absorción rápida de nutrientes y agua cuando las condiciones lo permiten. Esto coincide con lo planteado por De La Riva et al. (2021), quienes señalan que en suelos relativamente más fértiles o con mayor disponibilidad hídrica, las especies tienden a desarrollar raíces con mayor SRL para optimizar la captación, ya que un SRL alto permite explorar mayores volúmenes de suelo, favoreciendo la adquisición de recursos en condiciones variables (Kramer-Walter et al., 2016).

Las diferencias entre especies podrían estar asociadas tanto a rasgos funcionales como a su historia filogenética, ya que Pierick et al. (2023) reportaron que especies de Melastomataceae, como el género *Miconia*, mantienen valores altos de SRL en ambientes de alta elevación, mientras que especies de Clusiaceae, como *Clusia*, presentan raíces más conservadoras con bajo SRL, características que coinciden con las observaciones del presente estudio. Además, algo importante es que el género *Weinmannia* muestra una alta sensibilidad funcional frente a cambios en la disponibilidad hídrica y edáfica, lo que podría explicar la marcada reducción de este rasgo en la parcela de tratamiento de precipitación vertical. La SRL puede reflejar dos estrategias opuestas, una donde las plantas desarrollan raíces finas y largas para absorber directamente los nutrientes, y otra en la que invierten en raíces más gruesas y dependen de asociaciones micorrícicas para la captación (Dantas De Paula et al., 2024); por lo que, la variabilidad observada en este estudio entre especies, ya sea con aumentos o reducciones de SRL según el tipo de tratamiento, indica más que una sola estrategia, una dualidad funcional y la alta variabilidad interespecífica del rasgo, así como también lo señalan Khong et al. (2014).

3.2.2.2. Área específica de raíces finas

A nivel de la comunidad vegetal total, el área específica de raíces finas presenta el mismo patrón que la longitud y específica de raíces finas con la profundidad del suelo (Figura 14). Así también, *Weinmannia bangii* y *W. crassifolia* redujeron significativamente su SRA bajo exclusión de precipitación vertical, mientras que *Myrsine coriaceae* incremento este rasgo en la reducción de precipitación horizontal (Figura 15, Tabla 39 y 41). Este patrón sugiere que, a nivel comunitario, los árboles del bosque montano presentan una alta plasticidad funcional con diferentes respuestas.

La reducción significativa del área específica de raíces (SRA) observada en *Weinmannia bangii* y *W. crassifolia* bajo reducción de precipitación vertical puede interpretarse como un ajuste funcional frente a la menor disponibilidad hídrica. La reducción del SRA es una estrategia conservadora que prioriza la longevidad y el bajo costo de mantenimiento del sistema radical (De La Riva et al., 2021; Sierra Cornejo et al., 2020). Además, según Metcalfe et al. (2008), bajo condiciones secas las plantas no necesariamente invierten en mayor masa radicular, sino que modifican su morfología, ya que, producen raíces con menor superficie para reducir pérdidas por respiración y aumentar la resistencia estructural del tejido. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhang et al. (2019), quienes señalan que la reducción del SRA en ambientes más secos refleja un balance entre la adquisición de recursos y el consumo de carbono, ajustando la inversión radicular a las limitaciones por el déficit hídrico. Por el contrario, el incremento de SRA en *Myrsine coriacea* bajo la reducción de precipitación horizontal es una estrategia más exploratoria y oportunista. Este incremento implica la formación de raíces con mayor superficie de absorción por unidad de biomasa, lo que incrementa la captación de agua y nutrientes en microambientes donde la humedad se distribuye de forma heterogénea (Sierra Cornejo et al., 2020). Este tipo de respuesta está asociada con especies de rasgos más adquisitivos, capaces de modificar rápidamente su arquitectura radicular para aprovechar las fluctuaciones de humedad o los flujos horizontales de agua característicos de los bosques nublados.

En conjunto, estos resultados evidencian estrategias contrastantes de adaptación funcional ante la reducción de la precipitación: mientras *Weinmannia* opta por un ajuste conservador que prioriza la persistencia del tejido radicular y la eficiencia en el uso del carbono, *Myrsine* responde incrementando su capacidad exploratoria para mantener la adquisición de recursos en condiciones de menor humedad. Estas respuestas diferenciadas podrían explicar la estabilidad del SRA a nivel comunitario, reflejando la coexistencia de estrategias opuestas dentro del mismo bosque, tal como plantea Brum et al. (2019), esta diversidad funcional permite a las especies acceder al recurso hídrico en distintos estratos del suelo, de acuerdo con su profundidad de enraizamiento y sus adaptaciones hidráulicas particulares.

3.2.2.3. Densidad de tejido de las raíces finas

No se detectaron variaciones consistentes en la densidad de tejido de las raíces finas a nivel de comunidad en las diferentes parcelas de tratamiento, aunque las especies respondieron

de manera diferente (Figura 16, Tabla 42 y 43). El incremento en RTD en *Weinmannia bangii* y sobre todo de *W. crassifolia* en el tratamiento de precipitación vertical (Figura 17, Tabla 45), y la disminución de RTD en *Myrsine coriacea* en la parcela tratamiento de precipitación horizontal presentan estrategias diferentes frente al estrés hídrico (Figura 17, Tabla 47). Algunas de estas especies incrementan su RTD para priorizar persistencia en el suelo, mientras otras reducen para favorecer raíces de rápido recambio. Estos resultados coinciden con Pierick et al. (2023), quienes encontraron que RTD es un rasgo fuertemente conservado filogenéticamente y depende más de la especie que del ambiente, lo que explicaría la ausencia de un patrón a nivel comunitario, pero sí respuestas particulares en especies. Además, la densidad de tejido tiende a aumentar en ambientes más secos y fríos, y está asociada a una mayor longevidad radical, ya que, algunas especies pueden desarrollar raíces más densas y duraderas como mecanismo de resistencia a la desecación (Sierra Cornejo et al., 2020; Zhang et al., 2019), algo que concuerda con lo observado en el género *Weinmannia* con una estrategia de incremento de longevidad, pero carencia en la absorción de nutrientes. McCormack et al. (2012, 2015) mostraron también que el incremento de RTD, generalmente acompañado de diámetros radicales mayores, esta asocia a una mayor dependencia de micorrizas. Estas asociaciones facilitan la absorción de nutrientes y aumentan la tolerancia al estrés hídrico en el suelo y a patógenos. En este contexto, los incrementos de RTD observados en el género *Weinmannia* podrían reflejar una estrategia conservativa vinculada tanto a la longevidad radical como a una asociación simbiótica con las micorrizas.

Kramer-Walter et al. (2016) y De la Riva et al. (2022) sostienen que valores altos de RTD suelen encontrarse en suelos más pobres, donde la inversión en raíces densas representa una estrategia de bajo recambio y alta eficiencia de retención de recursos, mientras que en ambientes más fértiles predomina un RTD bajo, existe una absorción alta de nutrientes. En este contexto, los incrementos de RTD observados bajo reducción de precipitación vertical podrían estar relacionados a una menor disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo. Por el contrario, la ligera reducción de RTD en *Myrsine coriacea* bajo reducción de precipitación horizontal podría deberse a la alta variabilidad funcional dentro de la comunidad, donde coexisten especies que cuando encuentran recursos no necesitan invertir en longevidad sino en adquisición.

3.2.3. Relación de la humedad y temperatura del suelo en la dinámica y morfología de raíces finas

El efecto de la humedad del suelo mostró patrones diferentes entre parcelas control y de tratamiento. El efecto negativo de la humedad del suelo en la productividad de las raíces finas está inversamente relacionado con la humedad del suelo en las parcelas control de precipitación vertical y horizontal (Tabla 48). Esto indica que en condiciones de sequía las plantas invierten más en la producción de raíces, también se observó con la estacionalidad, donde la mayor asignación subterránea ocurre al finalizar la época de secas, lo que coincide con lo descrito para bosques tropicales de montaña por Oliveras et al. (2014) y Girardin et al. (2014). Además, la productividad de las raíces finas presenta una plasticidad funcional que les permite mantener la absorción de agua y nutrientes bajo condiciones de menor humedad de suelo, como una estrategia de tolerancia a la sequía en los 30 cm del suelo (Brum et al., 2019). El efecto marginal positivo en la producción de raíces finas con la disminución de la humedad en las parcelas de precipitación vertical y horizontal, podría estar relacionado a los pequeños incrementos de la cantidad de agua en el suelo. Estos resultados sugieren que la reducción experimental de la precipitación altera el patrón natural de sensibilidad de las raíces a la humedad, evidenciando una dependencia del agua en ecosistemas con estrés hídrico continuo.

El efecto negativo de la temperatura sobre la productividad en todas las parcelas, es significativo en las de precipitación horizontal (CON-PH y TRT-PH) (Tabla 48). Una posible explicación en estos ecosistemas, los aumentos de temperatura suelen coincidir con descensos de humedad, generando condiciones de mayor estrés hídrico que limitan la formación de nuevas raíces. Esto coincide con lo señalado por Moser et al. (2014), quienes destacan que la humedad, más que la temperatura, es el principal modulador de la productividad radicular. Además, los resultados son distintos con lo reportado por Huaraca Huasco et al. (2021), quienes observaron una relación positiva entre la temperatura y la productividad radicular en una gradiente de elevación, donde el incremento térmico favorece la actividad metabólica y la mineralización del suelo. En cambio, en Wayqecha, un ecosistema montano frío, las bajas temperaturas ya imponen una limitación fisiológica al crecimiento radicular, por lo que un aumento adicional de temperatura no necesariamente se traduce en mayor productividad. Por el contrario, podría intensificar los costos respiratorios y reducir la eficiencia en la asignación de carbono a las raíces finas. En este sentido, los hallazgos de esta investigación se alinean más con lo planteado por Girardin et al. (2013),

quienes reportaron una menor productividad en ambientes fríos, y con la interpretación de Girardin et al. (2014), que documentaron un patrón estacional de productividad ligado a la radiación y a la disponibilidad hídrica, más que a la temperatura, la cual se mantiene relativamente estable en estos ecosistemas.

Si bien no se detectaron relaciones significativas en todos los parámetros evaluados de la dinámica de las raíces finas, los resultados permiten identificar tendencias. En particular, la productividad mostró una respuesta clara y significativa frente a la humedad y temperatura del suelo. Por otro lado, la morfología de las raíces finas no mostró relaciones consistentes y las pocas asociaciones significativas detectadas fueron específicas de cada tratamiento (Tabla 49). Sin embargo, la relación positiva y significativa entre el SRL y la humedad del suelo en la parcela de precipitación vertical, confirma que, bajo una condición de sequía prolongada, las raíces finas muestran una respuesta más sensible que en el control, incrementando su longitud específica ante pequeños aumentos de humedad que se puedan dar en el suelo. De acuerdo con Sierra Cornejo et al. (2020), mayores valores de SRL en condiciones más húmedas reflejan raíces más largas por unidad de masa, capaces de absorber nutrientes con mayor eficiencia. En este contexto, esta mayor sensibilidad del SRL frente a la humedad podría representar una estrategia adaptativa para aprovechar los recursos disponibles en un suelo constantemente seco. En relación con la hipótesis planteada, los resultados evidenciaron efectos negativos estadísticamente significativos con la reducción de la precipitación horizontal y vertical sobre la dinámica y morfología de las raíces finas; se observó respuestas adaptativas frente al estrés hídrico. La humedad del suelo es la principal variable soporte en la dinámica de las raíces finas, mientras que la temperatura actúa de manera secundaria. Además, los rasgos morfológicos de las diferentes especies arbóreas indican un mecanismo compensatorio para la estabilidad de las raíces finas. Estos hallazgos destacan la importancia de incluir los rasgos funcionales de raíces finas en los estudios sobre cambio climático en bosques nublados andinos. Por lo tanto, la hipótesis general fue parcialmente aceptada, debido a que la reducción de la precipitación produjo cambios significativos en la dinámica y morfología de las raíces finas; sin embargo, varias variables presentaron respuestas adaptativas y estrategias conservadoras frente al estrés hídrico, en lugar de una disminución generalizada.

CONCLUSIONES

1. La producción biomasa y necromasa total de raíces finas de la comunidad vegetal no presentaron diferencias significativas ante la reducción de la precipitación vertical y horizontal. Sin embargo, la distribución de la biomasa sí presentó cambios con la profundidad del suelo en las parcelas de precipitación vertical, donde la biomasa fue significativamente mayor en la capa superficial en comparación con las profundidades de 10–20 cm y 20–30 cm de suelo. La necromasa de raíces finas incrementó con la profundidad en el control (14–34 %), mientras que en el tratamiento se concentró en los primeros centímetros del suelo (~20 %). En el año 2021 el stock de carbono de raíces finas disminuyó bajo la reducción de precipitación vertical de 2.87 Mg C ha⁻¹ en el control a 1.20 Mg C ha⁻¹ en el tratamiento, mientras que bajo reducción precipitación horizontal incrementó con los años de 1.6 Mg C ha⁻¹ en 2021, a 3.7 Mg C ha⁻¹ en 2023. La productividad de raíces finas no mostró diferencias significativas ante la reducción precipitación vertical ni horizontal, pero, presentó una marcada variación estacional, con máximos en agosto (0.20 Mg C ha⁻¹ mes⁻¹) y mínimos (0.02 Mg C ha⁻¹ mes⁻¹) entre febrero y mayo. El tiempo de residencia de las raíces finas mostró valores similares entre parcelas.
2. A nivel de comunidad vegetal, la SRL, el SRA y RTD de las raíces finas no presentaron diferencias significativas en las parcelas control y tratamiento de la precipitación vertical como horizontal. A nivel de especies arbóreas, la respuesta a la reducción de la precipitación fue más específica. Bajo la reducción de precipitación vertical, *Meliosma frondosa* mostró un incremento significativo de la SRL (17.73 km kg⁻¹) en comparación con el control (4.76 km kg⁻¹), mientras que *Weinmannia crassifolia* presentó una disminución significativa tanto en la SRL (de 15.51 a 4.67 km kg⁻¹) como en la SRA (de 43.66 a 8.03 m² kg⁻¹), acompañada de un aumento significativo de la RTD en el tratamiento (de 0.11 a 0.93 g cm⁻³), indicando una estrategia más conservativa frente al estrés hídrico. Además, se detectaron diferencias en la SRA de *Weinmannia bangii*, con valores mayores en la parcela control respecto al tratamiento. En las parcelas de precipitación horizontal, la SRL mostró una diferencia significativa en *Miconia micropetala*, con valores mayores en el control (12.82 ± 3.05 km kg⁻¹) que en el tratamiento (7.30 ± 1.75 km kg⁻¹), mientras que la RTD presentó una diferencia significativa para *Myrsine coriaceae*, con valores mayores en el tratamiento (0.35 ± 0.08 g cm⁻³) respecto al control (0.51 ± 0.09 g cm⁻³). Para el resto

de las especies y rasgos evaluados, no se detectaron diferencias significativas entre parcelas.

3. La humedad del suelo mostró un efecto negativo sobre la productividad de raíces finas, en las parcelas control, indicó una disminución de la productividad a mayor humedad, mientras que, en el tratamiento de reducción de precipitación vertical, la humedad tuvo un efecto positivo, aunque no significativo. Por su parte, la temperatura del suelo presentó un efecto negativo sobre la productividad en todas las parcelas, siendo más marcado bajo la reducción de precipitación horizontal. El tiempo de residencia de las raíces finas no mostró una relación clara con la humedad ni con la temperatura del suelo. En cuanto a la morfología, la SRL presentó una relación positiva con la humedad del suelo en la parcela de tratamiento de precipitación vertical, indicando una mayor elongación radicular bajo condiciones de mayor disponibilidad hídrica, mientras que la temperatura del suelo se asoció con una disminución del SRA y un aumento de la densidad de tejido RTD en el control de precipitación vertical.

RECOMENDACIONES

1. En la investigación científica

- Realizar estudios más amplios y a largo plazo de la respuesta de las raíces finas para comprender mejor la respuesta de las raíces finas a cambios en la disponibilidad hídrica del suelo.
- Realizar evaluaciones que integren los rasgos morfológicos de raíces y hojas en especies arbóreas, con el fin de analizar su coordinación funcional dentro del espectro económico de las plantas, ya que aún existen pocos estudios que aborden esta relación, sobre todo en bosques nublados andinos.
- Ampliar la evaluación de rasgos morfológicos a diferentes grupos funcionales de plantas (por ejemplo, epífitas, herbáceas, arbustos) para identificar respuestas diferenciales ante la reducción de precipitación.

2. Metodológicas

- Incluir mediciones mensuales más frecuentes de humedad y temperatura a diferentes profundidades del suelo para entender mejor las variaciones microambientales del suelo, que afectan la producción y mortalidad radicular.
- Ampliar el tiempo de permanencia de los núcleos de crecimiento en el suelo para reducir la perturbación del sistema y obtener estimaciones más representativas del crecimiento radicular.
- Realizar estudios de raíces finas a mayores profundidades, sin limitarse a los 30 primeros centímetros.

3. En la gestión y conservación

- Promover la integración de información sobre dinámica y morfología radicular en planes de manejo y conservación de los bosques andinos, dado su papel clave en la retención de carbono, la resiliencia y vulnerabilidad ante el estrés hídrico.
- Considerar las diferencias funcionales entre especies al planificar acciones de conservación, priorizando aquellas que presentan resiliencia ante el estrés hídrico.
- Fomentar la conservación de los bosques nublados andinos como sistemas estratégicos para la captura de carbono y la regulación hídrica, integrando la dimensión subterránea en las políticas de adaptación al cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado Villa, I. L., & Cobos Miguitama, C. S. (2019). *Relaciones entre la estructura y cobertura arbórea con el carbono almacenado en bosques montanos Andinos en el macizo del Cajas, Azuay-Ecuador*. Universidad de Cuenca.

Anderson, E. P., Marengo, J. A., Villalba, R., Halloy, S. R. P., Young, B. E., Cordero, D., Gast, F., Jaimes, E., & Ruiz Carrascal, D. (2012). *Cambio climático y Biodiversidad en los Andes Tropicales*.

Arias Gonzáles, J. L. (2021). Diseño y metodología de la investigación. Enfoques Consulting EIRL.

Asbjornsen, H., Campbell, J. L., Jennings, K. A., Vadeboncoeur, M. A., McIntire, C., Templer, P. H., Phillips, R. P., Bauerle, T. L., Dietze, M. C., Frey, S. D., Groffman, P. M., Guerrieri, R., Hanson, P. J., Kelsey, E. P., Knapp, A. K., McDowell, N. G., Meir, P., Novick, K. A., Ollinger, S. V., ... Rustad, L. E. (2018). Guidelines and considerations for designing field experiments simulating precipitation extremes in forest ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(12), 2310–2325. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13094>

Asner, G. P., Martin, R. E., Anderson, C. B., Kryston, K., Vaughn, N., Knapp, D. E., Bentley, L. P., Shenkin, A., Salinas, N., Sinca, F., Tupayachi, R., Quispe Huaypar, K., Montoya Pillco, M., Ccori Álvarez, F. D., Díaz, S. M., Enquist, B. J., & Malhi, Y. (2017). Scale dependence of canopy trait distributions along a tropical forest elevation gradient. *New Phytologist*, 214(3), 973–988. <https://doi.org/10.1111/nph.14068>

Ataroff, M. (2001). Bosques Nublados del Neotrópico. En *Bosques nublados del neotropico* (Kappelle, M., Brown, A., pp. 397–442). IMBIO.

Berenguer, E., Lennox, G. D., Ferreira, J., Malhi, Y., Aragão, L. E., Barreto, J. R., ... & Barlow, J. (2021). Tracking the impacts of El Niño drought and fire in human-modified Amazonian forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(30), e2019377118.

Berry ZC, Goldsmith GR (2020) Diffuse light and wetting differentially affect tropical tree leaf photosynthesis. *New Phytologist* 225:143–153. <https://doi.org/10.1111/nph.16121>

Bhuiyan, R., Minkkinen, K., Helmisaari, H.-S., Ojanen, P., Penttilä, T., & Laiho, R. (2017). Estimating fine-root production by tree species and understorey functional groups in two contrasting peatland forests. *Plant and Soil*, 412(1-2), 299-316. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3070-3>

Brando, P. M., Nepstad, D. C., Davidson, E. A., Trumbore, S. E., Ray, D., & Camargo, P. (2008). Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: Results of a throughfall reduction experiment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1839–1848. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0031>

Brujinzeel, L. A., Scatena, F. N., & Hamilton, L. S. (2011). General perspectives L. Setting the stage F. En *Tropical Montane Cloud Forests Science for Conservation and Management*.

Brum, M., Vadeboncoeur, M. A., Ivanov, V., Asbjornsen, H., Saleska, S., Alves, L. F., Penha, D., Dias, J. D., Aragão, L. E. O. C., Barros, F., Bittencourt, P., Pereira, L., & Oliveira, R. S. (2019). Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. *Journal of Ecology*, 107(1), 318-333. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13022>

Brum, M., Vadeboncoeur, M., Asbjornsen, H., Puma Vilca, B. L., Galiano, D., Horwath, A. B., & Metcalfe, D. B. (2023). Ecophysiological controls on water use of tropical cloud forest trees in response to experimental drought. *Tree Physiology*, 43(9), 1514-1532. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad070>

Bubb, P., May, I., Miles, L., & Sayer, J. (Eds). (2004). Cloud forest agenda. UNEP World Conservation Monitoring Centre.

Burt, E. I., Goldsmith, G. R., Cruz-de Hoyos, R. M., Ccahuana Quispe, A. J., & West, A. J. (2023). The seasonal origins and ages of water provisioning streams and trees in a tropical montane cloud forest. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(22), 4173–4186. <https://doi.org/10.5194/hess-27-4173-2023>

Bush, M. B., Silman, M. R., & Urrego, D. H. (2004). 48,000 Years of Climate and Forest Change in a Biodiversity Hot Spot. *Science*, 303(5659), 827-829. <https://doi.org/10.1126/science.1090795>

Canchig Haro, S. X., & Garcés Echeverría, B. J. (2019). Aporte Hidrológico De La Precipitación Horizontal En El “Bosque Nublado Asabí” En La Zona De Intag- Imbabura. Universidad Técnica del norte.

Carmona, C., Koore, K., Pärtel, M., Moora, M., Bueno, G., Puy, J., & Tordoni, E. (2022). TraitDivNet protocols (pp. 973-1122) [Protocolo]. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.17572>

Catenazzi, A., Lehr, E., & May, R. V. (2013). The amphibians and reptiles of Manu National Park and its buffer zone, Amazon basin and eastern slopes of the Andes, Peru. *Biota Neotropica*, 13(4), 269-283. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032013000400024>

Chen, G., Hobbie, S. E., Reich, P. B., Yang, Y., & Robinson, D. (2019). Allometry of fine roots in forest ecosystems. *Ecology Letters*, 22(2), 322-331. <https://doi.org/10.1111/ele.13193>

Clark, K. E., Torres, M. A., West, A. J., Hilton, R. G., New, M., Horwath, A. B., Fisher, J. B., Rapp, J. M., Robles Caceres, A., & Malhi, Y. (2014). The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 5377–5397. <https://doi.org/10.5194/hess-18-5377-2014>

Cordeiro, A. L., Norby, R. J., Andersen, K. M., Valverde-Barrantes, O., Fuchslueger, L., Oblitas, E., Hartley, I. P., Iversen, C. M., Gonçalves, N. B., Takeshi, B., Lapola, D. M., & Quesada, C. A. (2020). Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. *Plant-Environment Interactions*, 1(1), 3-16. <https://doi.org/10.1002/pei3.10010>

Cordeiro, A. L., Cusack, D. F., Dietterich, L. H., Valdes, E., Gonçalves, N. B., Oliveira, M., Quesada-Ávila, G., & Wright, S. J. (2025). Drying suppresses fine root production to 1 m depths and alters root traits in four distinct tropical forests. *New Phytologist*, nph.70751. <https://doi.org/10.1111/nph.70751>

Cusack, D. F., & Turner, B. L. (2021). Fine Root and Soil Organic Carbon Depth Distributions are Inversely Related Across Fertility and Rainfall Gradients in Lowland Tropical Forests. *Ecosystems*, 24(5), 1075-1092. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00569-6>

Cusack, D. F., Dietterich, L. H., & Sulman, B. N. (2023). Soil respiration responses to throughfall exclusion are decoupled from changes in soil moisture for four tropical forests, suggesting processes for ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 37(4), e2022GB007473. <https://doi.org/10.1029/2022GB007473>

Dantas De Paula, M., Reichert, T., Lugli, L., McGale, E., Pierick, K., Darela-Filho, J. P., Langan, L., Homeier, J., Rammig, A., & Hickler, T. (2024). The fungal collaboration gradient drives root trait distribution and ecosystem processes in a tropical montane forest. *Biodiversity and Ecosystem Function: Terrestrial*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3259>

De La Riva, E. G., Querejeta, J. I., Villar, R., Pérez-Ramos, I. M., Marañón, T., Galán Díaz, J., De Tomás Marín, S., & Prieto, I. (2021). The Economics Spectrum Drives Root Trait Strategies in Mediterranean Vegetation. *Frontiers in Plant Science*, 12, 773118. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.773118>

Domínguez Borrero, L., Campos Sofía, M., & Álvarez Balanqué, M. T. (2024). *Comportamiento de la lluvia horizontal en el ecosistema montañoso de La Gran Piedra*. *Revista Cubana de Meteorología*, 30(2), abril–junio 2024. <https://cu-id.com/2377/v30n2e04>

Dorji, Y. (2015). Effects of Experimental Drought on Fine Root Biomass in Two Different Altitudinal Forests of Bhutan.

Doughty, C. E., Metcalfe, D. B., Girardin, C. A. J., Amézquita, F. F., Cabrera, D. G., Huasco, W. H., Silva-Espejo, J. E., Araujo-Murakami, A., Da Costa, M. C., Rocha, W., Feldpausch, T. R., Mendoza, A. L. M., Da Costa, A. C. L., Meir, P., Phillips, O. L., & Malhi, Y. (2015). Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, 519(7541), 78-82. <https://doi.org/10.1038/nature14213>

Farfan-Rios, W., Garcia-Cabrera, K., Salinas, N., Raurau-Quisiyupanqui, M. N., & Silman, M. R. (2015). Lista anotada de árboles y afines en los bosques montanos del sureste peruano: La

importancia de seguir recolectando. *Revista Peruana de Biología*, 22(2), 145-174. <https://doi.org/10.15381/rpb.v22i2.11351>

Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews*, 55(1-2), 73-106. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00056-3)

Freschet, G. T., Pagès, L., Iversen, C. M., Comas, L. H., Rewald, B., Roumet, C., Klimešová, J., Zadworny, M., Poorter, H., Postma, J. A., Adams, T. S., Bagniewska-Zadworna, A., Bengough, A. G., Blancaflor, E. B., Brunner, I., Cornelissen, J. H. C., Garnier, E., Gessler, A., Hobbie, S. E., ... McCormack, M. L. (2021). A starting guide to root ecology: Strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *New Phytologist*, 232(3), 973-1122. <https://doi.org/10.1111/nph.17572>

Freschet, G. T., Valverde-Barrantes, O. J., Tucker, C. M., Craine, J. M., McCormack, M. L., Violle, C., Fort, F., Blackwood, C. B., Urban-Mead, K. R., Iversen, C. M., Bonis, A., Comas, L. H., Cornelissen, J. H. C., Dong, M., Guo, D., Hobbie, S. E., Holdaway, R. J., Kembel, S. W., Makita, N., ... Roumet, C. (2017). Climate, soil and plant functional types as drivers of global fine-root trait variation. *Journal of Ecology*, 105(5), 1182-1196. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12769>

Galbraith, D., Malhi, Y., Affum-Baffoe, K., Castanho, A. D. A., Doughty, C. E., Fisher, R. A., Lewis, S. L., Peh, K. S.-H., Phillips, O. L., Quesada, C. A., Sonké, B., & Lloyd, J. (2013). Residence times of woody biomass in tropical forests. *Plant Ecology & Diversity*, 6(1), 139-157. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.770578>

Girardin, C. A. J., Aragão, L. E. O. C., Malhi, Y., Huaraca Huasco, W., Metcalfe, D. B., Durand, L., Mamani, M., Silva-Espejo, J. E., & Whittaker, R. J. (2013). Fine root dynamics along an elevational gradient in tropical Amazonian and Andean forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(1), 252-264. <https://doi.org/10.1029/2011GB004082>

Girardin, C. A. J., Espejob, J. E. S., Doughty, C. E., Huasco, W. H., Metcalfe, D. B., Durand-Baca, L., Marthews, T. R., Aragao, L. E. O. C., Farfán-Rios, W., García-Cabrera, K., Halladay, K., Fisher, J. B., Galiano-Cabrera, D. F., Huaraca-Quispe, L. P., Alzamora-Taype, I., Eguiluz-Mora, L., -Revilla, N. S., Silman, M. R., Meir, P., & Malhi, Y. (2014). Productivity and

carbon allocation in a tropical montane cloud forest in the Peruvian Andes. *Plant Ecology & Diversity*, 7(1-2), 107-123. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.820222>

Girardin, C. A. J., Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Mamani, M., Huaraca Huasco, W., Durand, L., Feeley, K. J., Rapp, J., Silva-Espejo, J. E., Silman, M., Salinas, N., & Whittaker, R. J. (2010). Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biology*, 16(12), 3176-3192. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02235.x>

Godbold, D. L., Fritz, H.-W., Jentschke, G., Meesenburg, H., & Rademacher, P. (2003). Root turnover and root necromass accumulation of Norway spruce (*Picea abies*) are affected by soil acidity. *Tree Physiology*, 23(13), 915-921. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.13.915>

Graefe, S., Hertel, D., & Leuschner, C. (2008). Fine root dynamics along a 2,000-m elevation transect in South Ecuadorian mountain rainforests. *Plant and Soil*, 313(1-2), 155-166. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9688-z>

Green, J. J., Dawson, L. A., Proctor, J., Duff, E. I., & Elston, D. A. (2005). Fine Root Dynamics in a Tropical Rain Forest is Influenced by Rainfall. *Plant and Soil*, 276(1-2), 23-32. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0331-3>

Guzmán Q., J. A., Hamann, H. F., & Sánchez-Azofeifa, G. A. (2024). Multi-decadal trends of low-clouds at the Tropical Montane Cloud Forests. *Ecological Indicators*, 158, 111599. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111599>

Halladay, K., Malhi, Y., & Turnbull, L. (2012). Cloud frequency climatology at the Andes–Amazon transition: 2000–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D23). <https://doi.org/10.1029/2012JD017770>

Haro Sarango, A. F., Chisag Pallmay, E. R., Ruiz Sarzosa, J. P., & Caicedo Pozo, J. E. (2024). Tipos y clasificación de las investigaciones. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(2), 956–966. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i2.1927>

Hertel, D., & Leuschner, Ch. (2010). Fine root mass and fine root production in tropical moist forests as dependent on soil, climate, and elevation. En L. A. Bruijnzeel, F. N. Scatena, & L.

S. Hamilton (Eds.), *Tropical Montane Cloud Forests* (1.a ed., pp. 428-444). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384.048>

Hertel, D., Moser, G., Culmsee, H., Erasmi, S., Horna, V., SchulRTD, B., & Leuschner, Ch. (2009). Below- and above-ground biomass and net primary production in a paleotropical natural forest (Sulawesi, Indonesia) as compared to neotropical forests. *Forest Ecology and Management*, 258(9), 1904-1912. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.019>

Honorio, E. N., & Baker, T. R. (2010). *Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos* (E. N. Honorio Coronado).

Huamán Chang, M. D. (2016). *Preferencias de hábitat de orquídeas epífitas en los bosques nublados de la Estación Biológica Wayqecha – Manu, Cusco*. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Huaraca Huasco, W., Girardin, C. A. J., Doughty, C. E., Metcalfe, D. B., Baca, L. D., Silva-Espejo, J. E., Cabrera, D. G., Aragão, L. E. O. C., Davila, A. R., Marthews, T. R., Huaraca-Quispe, L. P., Alzamora-Taype, I., Mora, L. E., Farfán-Rios, W., Cabrera, K. G., Halladay, K., Salinas-Revilla, N., Silman, M. R., Meir, P., & Malhi, Y. (2014). Seasonal production, allocation and cycling of carbon in two mid-elevation tropical montane forest plots in the Peruvian Andes. *Plant Ecology & Diversity*, 7(1-2), 125-142. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.819042>

Huaraca Huasco, W., Riutta, T., Girardin, C. A. J., Hanco Pacha, F., Puma Vilca, B. L., Moore, S., Rifai, S. W., Del Aguila-Pasquel, J., Araujo Murakami, A., Freitag, R., Morel, A. C., Demissie, S., Doughty, C. E., Oliveras, I., Galiano Cabrera, D. F., Durand Baca, L., Farfán Amézquita, F., Silva Espejo, J. E., Da Costa, A. C. L., ... Malhi, Y. (2021). Fine root dynamics across pantropical rainforest ecosystems. *Global Change Biology*, 27(15), 3657-3680. <https://doi.org/10.1111/gcb.15677>

Ibrahim, F., Adu-Bredu, S., Addo-Danso, S. D., Duah-Gyamfi, A., Manu, E. A., & Malhi, Y. (2020). Patterns and controls on fine-root dynamics along a rainfall gradient in Ghana. *Trees*, 34(4), 917-929. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01970-3>

Ifo, S. A., Koubouana, F., Nganga, D., Bocko, Y., & Mantota, A. (2015). Fine roots dynamics in a tropical moist forest: Case of two forest groves in the Congo basin. *Baltic Forestry*, 21(2), 204-211.

Iversen, C. M., McCormack, M. L., Powell, A. S., Blackwood, C. B., Freschet, G. T., Kattge, J., Roumet, C., Stover, D. B., Soudzilovskaia, N. A., Valverde-Barrantes, O. J., Van Bodegom, P. M., & Violle, C. (2017). A global Fine-Root Ecology Database to address below-ground challenges in plant ecology. *New Phytologist*, 215(1), 15-26. <https://doi.org/10.1111/nph.14486>

Iversen, C., McCormack, M., Baer, J., Powell, A., Chen, W., Collins, C., Fan, Y., Fanin, N., Freschet, G., Guo, D., Hogan, J., Kou, L., Laughlin, D., Lavelly, E., Liese, R., Lin, D., Meier, I., Montagnoli, A., Roumet, C., ... Zadworny, M. (2021). Fine-Root Ecology Database (FRED): A Global Collection of Root Trait Data with Coincident Site, Vegetation, Edaphic, and Climatic Data, Version 3. [Dataset]. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). <https://doi.org/10.25581/ORNLSFA.014/1459186>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (H. Lee & J. Romero, Eds.). IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf

Jackson, R. B., Mooney, H. A., & Schulze, E.-D. (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(14), 7362-7366. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.14.7362>

Jankowski, J. E., Merkord, C. L., Rios, W. F., Cabrera, K. G., Revilla, N. S., & Silman, M. R. (2013). The relationship of tropical bird communities to tree species composition and vegetation structure along an Andean elevational gradient. *Journal of Biogeography*, 40(5), 950-962. <https://doi.org/10.1111/jbi.12041>

Kappell, M., & Brown, A. (2001). *Introducción a Los Bosques Nublados del Neotrópico. Una síntesis regional.*

Killeen, T. J., Douglas, M., Consiglio, T., Jørgensen, P. M., & Mejia, J. (2007). Dry spots and wet spots in the Andean hotspot. *Journal of Biogeography*, 34(8), 1357-1373. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01682.x>

Kitayama, K., & Aiba, S. (2002). Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo. *Journal of Ecology*, 90(1), 37-51. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00634.x>

Kong, D., Ma, C., Zhang, Q., Li, L., Chen, X., Zeng, H., & Guo, D. (2014). Leading dimensions in absorptive root trait variation across 96 subtropical forest species. *New Phytologist*, 203(3), 863-872. <https://doi.org/10.1111/nph.12842>

Kramer-Walter, K. R., Bellingham, P. J., Millar, T. R., Smissen, R. D., Richardson, S. J., & Laughlin, D. C. (2016). Root traits are multidimensional: Specific root length is independent from root tissue density and the plant economic spectrum. *Journal of Ecology*, 104(5), 1299-1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12562>

Kubisch, P., Hertel, D., & Leuschner, C. (2016). Fine Root Productivity and Turnover of Ectomycorrhizal and Arbuscular Mycorrhizal Tree Species in a Temperate Broad-Leaved Mixed Forest. *Frontiers in Plant Science*, 07. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01233>

Leuschner, C., Wiens, M., Harteveld, M., Hertel, D., & Tjitrosemito, S. (2006). Patterns of Fine Root Mass and Distribution along a Disturbance Gradient in a Tropical Montane Forest, Central Sulawesi (Indonesia). *Plant and Soil*, 283(1-2), 163-174. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-6638-5>

Llerena, S. A., Kurbatova, A. I., & Grigorets, E. A. (2021). Carbon sequestration in Tropical Montane Cloud Forests. *Socialno-Ecologicheskie Technologii*, 11(3), 377-397. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-3-377-397>

Majdi, H., Pregitzer, K., Morén, A.-S., Nylund, J.-E., & I. Ågren, G. (2005). Measuring Fine Root Turnover in Forest Ecosystems. *Plant and Soil*, 276(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3104-8>

Malhi, Y., Farfán Amézquita, F., Doughty, C. E., Silva-Espejo, J. E., Girardin, C. A. J., Metcalfe, D. B., Aragão, L. E. O. C., Huaraca-Quispe, L. P., Alzamora-Taype, I., Eguiluz-Mora,

L., Marthews, T. R., Halladay, K., Quesada, C. A., Robertson, A. L., Fisher, J. B., Zaragoza-Castells, J., Rojas-Villagra, C. M., Pelaez-Tapia, Y., Salinas, N., ... Phillips, O. L. (2014). The productivity, metabolism and carbon cycle of two lowland tropical forest plots in south-western Amazonia, Peru. *Plant Ecology & Diversity*, 7(1-2), 85-105. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.820805>

Malhi, Y., Silman, M., Salinas, N., Bush, M., Meir, P., & Saatchi, S. (2010). Introduction: Elevation gradients in the tropics: laboratories for ecosystem ecology and global change research. *Global Change Biology*, 16(12), 3171-3175. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02323.x>

Marthews, T. R., Metcalfe, D., Malhi, Y., Phillips, O., Huaraca Huasco, W., Ruiz Jaen, T., Riutta, T., Girardin, C., Urrutia, C., Cain, R., Butt, N., & Oliveras, Imma. (2013). Measuring Tropical Forest Carbon Allocation And Cycling RAINFOR Field Manual: Vol. 2.2.

McCormack, M. L., Adams, T. S., Smithwick, E. A. H., & Eissenstat, D. M. (2012). Predicting fine root lifespan from plant functional traits in temperate trees. *New Phytologist*, 195(4), 823-831. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04198.x>

McCormack, M. L., Dickie, I. A., Eissenstat, D. M., Fahey, T. J., Fernandez, C. W., Guo, D., Helmisaari, H., Hobbie, E. A., Iversen, C. M., Jackson, R. B., Leppälammi-Kujansuu, J., Norby, R. J., Phillips, R. P., Pregitzer, K. S., Pritchard, S. G., Rewald, B., & Zadworny, M. (2015). Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. *New Phytologist*, 207(3), 505-518. <https://doi.org/10.1111/nph.13363>

McCormack, M. L., & Guo, D. (2014). Impacts of environmental factors on fine root lifespan. *Frontiers in Plant Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00205>

McCormack, M. L., & Iversen, C. M. (2019). Physical and Functional Constraints on Viable Belowground Acquisition Strategies. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1215. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01215>

Metcalfe, D. B. (2008). Understanding the effects of drought upon carbon allocation and cycling in an Amazonian rain forest.

Metcalf, D. B., Meir, P., Aragão, L. E. O. C., Lobo-do-Vale, R., Galbraith, D., Fisher, R. A., ... & Williams, M. (2010). Shifts in plant respiration and carbon use efficiency at a large-scale drought experiment in the eastern Amazon. *New Phytologist*, 187(3), 608-621.

Metcalf, D. B., Galiano Cabrera, D. F., Alvarez Mayorga, L. M., Cruz, R. S., Alvarez, D. C., Otazu, B. R. E., Huaraca Huasco, W., Chambi, J. R., Ezquerro, M. E., Puma Vilca, B. L., Mulligan, M., Vadeboncoeur, M. A., Asbjornsen, H., Bittencourt, P. R. L., Horwath, A. B., & Bartholomew, D. C. (2024). The Wayqecha Amazon Cloud Curtain Ecosystem Experiment: A new experimental method to manipulate fog water inputs in terrestrial systems. *Methods in Ecology and Evolution*, 16(2), 400-413. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14483>

Metcalf, D. B., Williams, M., Aragão, L. E. O. C., Da Costa, A. C. L., De Almeida, S. S., Braga, A. P., Gonçalves, P. H. L., De Athaydes, J., Junior, S., Malhi, Y., & Meir, P. (2007). A method for extracting plant roots from soil which facilitates rapid sample processing without compromising measurement accuracy. *New Phytologist*, 174(3), 697-703. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02032.x>

Moser, G., Leuschner, C., Röderstein, M., Graefe, S., Soethe, N., & Hertel, D. (2010). Biomass and productivity of fine and coarse roots in five tropical mountain forests stands along an altitudinal transect in southern Ecuador. *Plant Ecology & Diversity*, 3(2), 151-164. <https://doi.org/10.1080/17550874.2010.517788>

Moser, G., SchulRTD, B., Hertel, D., Horna, V., Coners, H., Barus, H., & Leuschner, C. (2014). Replicated throughfall exclusion experiment in an Indonesian perhumid rainforest: Wood production, litter fall and fine root growth under simulated drought. *Global Change Biology*, 20(5), 1481-1497. <https://doi.org/10.1111/gcb.12424>

Murphy, M. T., & Moore, T. R. (2010). Linking root production to aboveground plant characteristics and water table in a temperate bog. *Plant and Soil*, 336(1-2), 219-231. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0468-1>

Nottingham, A. T., Hicks, L. C., Ccahuana, A. J. Q., Salinas, N., Bååth, E., & Meir, P. (2018). Nutrient limitations to bacterial and fungal growth during cellulose decomposition in tropical forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 54(2), 219-228. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1247-4>

Nottingham, A. T., Karhu, K., Salinas, N., Schnecker, J., Sietiö, O.-M., Martin-Vivanco, A. K., Wanek, W., & Meir, P. (2025). Microbial death in the Andes: Necromass declines despite growth and carbon-use-efficiency increases with decadal soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*, 110002. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.110002>

Oliveras, I., Girardin, C., Doughty, C. E., Cahuana, N., Arenas, C. E., Oliver, V., Huaraca Huasco, W., & Malhi, Y. (2014). Andean grasslands are as productive as tropical cloud forests. *Environmental Research Letters*, 9(11), 115011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/115011>

Oliveras, I., Malhi, Y., Salinas, N., Huaman, V., Urquiaga-Flores, E., Kala-Mamani, J., Quintano-Loaiza, J. A., Cuba-Torres, I., Lizarraga-Morales, N., & Román-Cuesta, R.-M. (2014). Changes in forest structure and composition after fire in tropical montane cloud forests near the Andean treeline. *Plant Ecology & Diversity*, 7(1-2), 329-340. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.816800>

Olson, D. M., & Dinerstein, E. (2002). The global 200: Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 89(2), 199. <https://doi.org/10.2307/3298564>

Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M. R., Lõhmus, K., Majdi, H., Metcalfe, D., Olsthoorn, A. F. M., Pronk, A., Vanguelova, E., Weih, M., & Brunner, I. (2007). Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 141(3), 426-442. <https://doi.org/10.1080/11263500701626069>

Pierick, K., Leuschner, C., & Homeier, J. (2021). Topography as a factor driving small-scale variation in tree fine root traits and root functional diversity in a species-rich tropical montane forest. *New Phytologist*, 230(1), 129-138. <https://doi.org/10.1111/nph.17136>

Pierick, K., Link, R. M., Leuschner, C., & Homeier, J. (2023). Elevational trends of tree fine root traits in species-rich tropical Andean forests. *Oikos*, 2023(1), e08975. <https://doi.org/10.1111/oik.08975>

Pregitzer, K. S. (2002). Fine roots of trees – a new perspective. *New Phytologist*, 154(2), 267-270. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00413_1.x

Priess, J., Then, C., & Fölster, H. (1999). Litter and fine-root production in three types of tropical premontane rain forest in SE Venezuela. *Plant Ecology*, 143(2), 171-187. <https://doi.org/10.1023/A:1009844226078>

Quinto Mosquera, H., Moreno Hurtado, F., Caicedo Moreno, H. Y., & Perez Luis, M. T. Y. P. L. (2016). Biomasa De Raíces Finas Y Fertilidad Del Suelo En Bosques Pluviales Tropicales Del Pacífico Colombiano. *Colombia Forestal*, 19(1), 53. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a04>

Ramírez Rodríguez, A. I. (2011). Contribución hidrológica de la precipitación horizontal en un bosque nublado de la zona del Trifinio, América Central.

Rapp, J. M., & Silman, M. R. (2012). Diurnal, seasonal, and altitudinal trends in microclimate across a tropical montane cloud forest. *Climate Research*, 55(1), 17–32. <https://doi.org/10.3354/cr01127>

Reich, P. B., Luo, Y., Bradford, J. B., Poorter, H., Perry, C. H., & Oleksyn, J. (2014). Temperature drives global patterns in forest biomass distribution in leaves, stems, and roots. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(38), 13721-13726. <https://doi.org/10.1073/pnas.1216053111>

Rivera Campos. (2007). Composición florística y análisis de diversidad arbórea en un área de bosque montano en el Centro de Investigación Wayqecha, Kosñipata Cusco. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Rosado, B. H. P., Martins, A. C., Colomeu, T. C., Oliveira, R. S., Joly, C. A., & Aidar, M. P. M. (2011). Fine root biomass and root length density in a lowland and a montane tropical rain forest, SP, Brazil. *Biota Neotropica*, 11(3), 203-209. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032011000300018>

Rowland, L., Da Costa, A. C. L., Oliveira, A. A. R., Oliveira, R. S., Bittencourt, P. L., Costa, P. B., Giles, A. L., Sosa, A. I., Coughlin, I., Godlee, J. L., Vasconcelos, S. S., Junior, J. A. S., Ferreira, L. V., Mencuccini, M., & Meir, P. (2018). Drought stress and tree size determine stem CO₂ efflux in a tropical forest. *New Phytologist*, 218(4), 1393-1405. <https://doi.org/10.1111/nph.15024>

Rowland, L., da Costa, A. C. L., Galbraith, D. R., Oliveira, R. S., Binks, O. J., Oliveira, A. A. R., Pullen, A. M., Doughty, C. E., Metcalfe, D. B., Vasconcelos, S. S., Ferreira, L. V., Malhi, Y., & Meir, P. (2015). Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature*, 528(7580), 119–122. <https://doi.org/10.1038/nature15539>

Salinas, N., Cosio, E. G., Silman, M., Meir, P., Nottingham, A. T., Roman-Cuesta, R. M., & Malhi, Y. (2021). Editorial: Tropical Montane Forests in a Changing Environment. *Frontiers in Plant Science*, 12, 712748. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.712748>

Sierra Cornejo, N., Hertel, D., Becker, J. N., Hemp, A., & Leuschner, C. (2020). Biomass, Morphology, and Dynamics of the Fine Root System Across a 3,000-M Elevation Gradient on Mt. Kilimanjaro. *Frontiers in Plant Science*, 11, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00013>

Sierra Cornejo, N., Becker, J. N., Hemp, A., & Hertel, D. (2023). Effects of land-use change and disturbance on the fine root biomass, dynamics, morphology, and related C and N fluxes to the soil of forest ecosystems at different elevations at Mt. Kilimanjaro (Tanzania). *Oecologia*, 201(4), 1089-1107.

Soethe, N., Lehmann, J., & Engels, C. (2006). The Vertical Pattern of Rooting and Nutrient Uptake at Different Altitudes of a South Ecuadorian Montane Forest. *Plant and Soil*, 286(1-2), 287-299. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9044-0>

Soethe, N., Lehmann, J., & Engels, C. (2007). Carbon and nutrient stocks in roots of forests at different altitudes in the Ecuadorian Andes. *Journal of Tropical Ecology*, 23(3), 319-328. <https://doi.org/10.1017/S0266467407004002>

Stadmuller, T. (1986). *Los_bosques_nublados stadmuller*.

Strand, A. E., Pritchard, S. G., McCormack, M. L., Davis, M. A., & Oren, R. (2008). Irreconcilable Differences: Fine-Root Life Spans and Soil Carbon Persistence. *Science*, 319(5862), 456-458. <https://doi.org/10.1126/science.1151382>

Tejedor, G., Álvarez, E., Arango Caro, S., Araujo Murakami, A., Blundo, C., Espinoza, T. E. B., La Torre cuadros, M. A., Gaviria, J., Gutiérrez, N., Jørgensen, P. M., León, B., Camacho, R.

L., Malizia, L., Millán, B., Moraes, M., Pacheco, S., Benayas, J. M. R., & Reynel, C. (2012). Evaluación del estado de conservación de los bosques montanos en los Andes tropicales.

Tello, J. S., Myers, J. A., Macía, M. J., Fuentes, A. F., Cayola, L., Arellano, G., Loza, M. I., Torrez, V., Cornejo, M., Miranda, T. B., & Jørgensen, P. M. (2015). Elevational Gradients in β -Diversity Reflect Variation in the Strength of Local Community Assembly Mechanisms across Spatial Scales. *PLOS ONE*, 10(3), e0121458. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121458>

Tito Leon, R. (2019). Sobrevivencia, crecimiento y herbivoría de *Weinmannia Bangii* Rusby (cunnoniaceae) en relación a la altitud en el bosque nuboso de KOSÑIPATA – Paucartambo – Cusco. Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco.

Tovar, C., Arnillas, C. A., Cuesta, F., & Buytaert, W. (2013). Diverging Responses of Tropical Andean Biomes under Future Climate Conditions. *PLoS ONE*, 8(5), e63634. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063634>

Vásquez Ramírez, A. A., Guanuchi Orellana, L. M., Cahuana Tapia, R. D., Vera Treves, R. M., & Holgado Tisoc, J. (2023). Métodos de investigación científica. Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología INUDI Perú. <https://doi.org/10.35622/inudi.b.094>

Vega Jácome, F. (2018). Variabilidad espacio-temporal de las sequías en el Perú y el peligro asociado al Fenómeno del Niño (Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina). Repositorio institucional UNALM.

Verma, A. K., Garkoti, S. C., Singh, S., Kumar, S., & Kumar, M. (2021). Fine root production and nutrient dynamics in relation to stand characteristics of chir pine mixed banj oak forests in central Himalaya. *Flora*, 279, 151808. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151808>

Vogt, K. A., Grier, C. C., & Vogt, D. J. (1986). Production, Turnover, and Nutrient Dynamics of Above- and Belowground Detritus of World Forests. En *Advances in Ecological Research* (Vol. 15, pp. 303-377). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60122-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60122-1)

Wangdi, N., Om, K., Thinley, C., Drukpa, D., Dorji, T., Darabant, A., Chhetri, P. Bdr., Ahmed, I. U., Staudhammer, C. L., Jandl, R., Schindlbacher, A., Hietz, P., Katzensteiner, K., Godbold, D., & Gratzer, G. (2017). Climate Change in Remote Mountain Regions: A Throughfall-

Exclusion Experiment to Simulate Monsoon Failure in the Himalayas. *Mountain Research and Development*, 37(3), 294. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00097.1>

Weemstra, M., Mommer, L., Visser, E. J. W., Van Ruijven, J., Kuyper, T. W., Mohren, G. M. J., & Sterck, F. J. (2016). Towards a multidimensional root trait framework: A tree root review. *New Phytologist*, 211(4), 1159-1169. <https://doi.org/10.1111/nph.14003>

Yaffar, D., Addo-Danso, S. D., Powers, J. S., & Meier, I. C. (2023). Fundamental but underrepresented: Root carbon stocks in African montane forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1273996. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1273996>

Yaffar, D., Lugli, L. F., Wong, M. Y., Norby, R. J., Addo-Danso, S. D., Arnaud, M., ... & Cusack, D. F. (2024). Tropical root responses to global changes: a synthesis. *Global change biology*, 30(7), e17420.

Young, K. R. (1992). Biogeography of the montane forest zone of the eastern slopes of Peru.

Zhang, X., Xing, Y., Yan, G., Han, S., & Wang, Q. (2019). Effects of precipitation change on fine root morphology and dynamics at a global scale: A meta-analysis. *Canadian Journal of Soil Science*, 99(1), 1-11. <https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0114>

Zimmermann, M., Leifeld, J., Conen, F., Bird, M. I., & Meir, P. (2012). Composition and physical protection of soil organic matter explain soil respiration temperature sensitivity? *Biogeochemistry*, 107(1-3), 423-436. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9562-y>

Zimmermann, M., Meir, P., Bird, M. I., Malhi, Y., & Ccahuana, A. J. Q. (2010). Temporal variation and climate dependence of soil respiration and its components along a 3000 m altitudinal tropical forest gradient. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4), 2010GB003787. <https://doi.org/10.1029/2010GB003787>

ANEXOS

Anexo 1. Biomasa, Necromasa y Stock de raíces finas, de los años 2021, 2022 y 2023.

Parcela	Año	Biomasa (Mg C ha ⁻¹)			Necromasa (Mg C ha ⁻¹)			Stock (Mg C ha ⁻¹)	
		Media	SE	%	Media	SE	%	Media	SE
CON-PV	2021	—	—	—	—	—	—	2.87	0.30
TRT-PV	2021	—	—	—	—	—	—	1.2	0.21
CON-PH	2021	—	—	—	—	—	—	1.52	0.39
TRT-PH	2021	—	—	—	—	—	—	1.66	0.35
CON-PV	2022	2.81	0.51	80.51%	0.8	0.4	19.49%	4.03	1.13
TRT-PV	2022	2.85	0.43	77.84%	0.7	0.2	22.16%	3.65	0.67
CON-PH	2022	2.01	0.45	90.54%	0.2	0.1	9.46%	2.41	0.54
TRT-PH	2022	2.22	0.68	92.50%	0.2	0	7.50%	2.87	0.87
CON-PV	2023	—	—	—	—	—	—	2.64	0.82
TRT-PV	2023	—	—	—	—	—	—	2.67	0.79
CON-PH	2023	—	—	—	—	—	—	3.39	0.79
CON-PH	2023	—	—	—	—	—	—	3.96	0.9

Anexo 2. Datos de biomasa y necromasa de raíces finas del año 2022

Parcela	año	IC	biomasa	necromasa
CON-PH	2022	1	3.787344	0.5054543
CON-PH	2022	2	1.825174	0.1587571
CON-PH	2022	3	1.621333	0.2017289
CON-PH	2022	4	1.403435	0.1356796
CON-PH	2022	5	1.39908	0.038993
CON-PV	2022	3	2.069543	0.0695292
CON-PV	2022	4	4.325354	1.8645631
CON-PV	2022	5	2.263859	0.4917642
CON-PV	2022	6	2.581915	0.7657879
TRT-PH	2022	1	1.304839	0.1062359
TRT-PH	2022	2	1.212008	0.1324965
TRT-PH	2022	3	1.111321	0.1300774
TRT-PH	2022	4	4.5859	0.3473715
TRT-PH	2022	5	2.891131	0.1810707
TRT-PV	2022	1	3.04019	0.9382953

TRT-PV	2022	2	1.264994	0.5434235
TRT-PV	2022	3	3.637772	0.9408873
TRT-PV	2022	4	2.674548	0.1444331
TRT-PV	2022	5	3.634667	0.890239

Anexo 3. Biomasa de raíces finas, biomasa de raíces finas y necromasa de acuerdo a la profundidad del suelo

Parcela	Profundidad del suelo (cm)	Biomasa			Necromasa			Stock	
		(Mg C ha ⁻¹)			(Mg C ha ⁻¹)			(Mg C ha ⁻¹)	
		Media	SE	%	Media	SE	%	Media	SE
CON-PV	0-10	1.31	0.20	85.8	0.22	0.13	14.2	1.53	0.24
CON-PV	10-20	0.98	0.16	76	0.31	0.09	24	1.29	0.18
CON-PV	20-30	0.53	0.30	65.9	0.27	0.20	34.1	0.80	0.35
TRT-PV	0-10	1.90	0.28	80.5	0.46	0.12	19.5	2.35	0.40
TRT-PV	10-20	0.47	0.13	82.7	0.10	0.05	17.3	0.57	0.14
TRT-PV	20-30	0.48	0.15	78.5	0.13	0.07	21.5	0.61	0.16
CON-PH	0-10	1.05	0.27	93.1	0.08	0.02	6.9	1.13	0.27
CON-PH	10-20	0.49	0.20	87.3	0.07	0.06	12.7	0.56	0.21
CON-PH	20-30	0.45	0.12	88.8	0.06	0.02	11.2	0.51	0.12
TRT-PH	0-10	0.94	0.27	95	0.05	0.02	5	0.99	0.28
TRT-PH	10-20	0.76	0.30	96.2	0.03	0.01	3.8	0.79	0.31
TRT-PH	20-30	0.51	0.15	83.9	0.10	0.03	16.1	0.34	0.09

Anexo 4. Datos de la biomasa y necromasa de raíces finas de acuerdo a la profundidad del suelo del año 2022

Parcela	año	IC	profundidad	biomasa	necromasa
CON-PV	2022	3	10	1.25	0.01
CON-PV	2022	3	20	0.62	0.05
CON-PV	2022	3	30	0.20	0.01
CON-PV	2022	4	10	1.68	0.58
CON-PV	2022	4	20	1.23	0.43

CON-PV	2022	4	30	1.41	0.86
CON-PV	2022	5	10	0.79	0.06
CON-PV	2022	5	20	1.24	0.40
CON-PV	2022	5	30	0.24	0.03
CON-PV	2022	6	10	1.51	0.21
CON-PV	2022	6	20	0.81	0.36
CON-PV	2022	6	30	0.26	0.19
TRT-PV	2022	1	10	1.71	0.77
TRT-PV	2022	1	20	0.50	0.02
TRT-PV	2022	1	30	0.83	0.14
TRT-PV	2022	2	10	0.96	0.44
TRT-PV	2022	2	20	0.22	0.06
TRT-PV	2022	2	30	0.08	0.04
TRT-PV	2022	3	10	2.10	0.30
TRT-PV	2022	3	20	0.74	0.26
TRT-PV	2022	3	30	0.80	0.38
TRT-PV	2022	4	10	2.10	0.12
TRT-PV	2022	4	20	0.13	0.01
TRT-PV	2022	4	30	0.44	0.02
TRT-PV	2022	5	10	2.63	0.68
TRT-PV	2022	5	20	0.75	0.14
TRT-PV	2022	5	30	0.26	0.07
CON-PH	2022	1	10	2.10	0.13
CON-PH	2022	1	20	1.31	0.30
CON-PH	2022	1	30	0.37	0.08
CON-PH	2022	2	10	0.61	0.03
CON-PH	2022	2	20	0.28	0.00
CON-PH	2022	2	30	0.93	0.12
CON-PH	2022	3	10	1.08	0.14
CON-PH	2022	3	20	0.26	0.05
CON-PH	2022	3	30	0.28	0.01
CON-PH	2022	4	10	0.77	0.09
CON-PH	2022	4	20	0.31	0.01
CON-PH	2022	4	30	0.32	0.03
CON-PH	2022	5	10	0.70	0.00
CON-PH	2022	5	20	0.32	0.00
CON-PH	2022	5	30	0.38	0.04
TRT-PH	2022	1	10	0.73	0.04
TRT-PH	2022	1	20	0.23	0.00
TRT-PH	2022	1	30	0.35	0.07

TRT-PH	2022	2	10	0.41	0.01
TRT-PH	2022	2	20	0.29	0.03
TRT-PH	2022	2	30	0.50	0.09
TRT-PH	2022	3	10	0.42	0.04
TRT-PH	2022	3	20	0.53	0.03
TRT-PH	2022	3	30	0.16	0.06
TRT-PH	2022	4	10	1.65	0.05
TRT-PH	2022	4	20	1.86	0.07
TRT-PH	2022	4	30	1.08	0.23
TRT-PH	2022	5	10	1.50	0.11
TRT-PH	2022	5	20	0.90	0.02
TRT-PH	2022	5	30	0.49	0.05

Anexo 5. Datos del stock de carbono de raíces finas del año 2021 a 2023

Parcela	año	mes	día	IC	biomasa
CON-PV	2021	5	6	3	3.17
CON-PV	2021	5	6	4	3.57
CON-PV	2021	5	6	5	2.46
CON-PV	2021	5	6	6	2.29
CON-PV	2022	5	3	3	2.09
CON-PV	2022	5	3	4	7.25
CON-PV	2022	5	3	5	2.85
CON-PV	2022	5	3	6	3.93
CON-PV	2023	11	13	3	1.75
CON-PV	2023	11	13	4	1.62
CON-PV	2023	11	13	5	2.11
CON-PV	2023	11	13	6	5.07
TRT-PV	2021	5	6	1	1.74
TRT-PV	2021	5	6	2	0.63
TRT-PV	2021	5	6	3	1.49
TRT-PV	2021	5	6	4	0.83
TRT-PV	2021	5	6	5	1.31
TRT-PV	2022	5	3	1	4.17
TRT-PV	2022	5	3	2	1.63
TRT-PV	2022	5	3	3	5.36
TRT-PV	2022	5	3	4	2.57
TRT-PV	2022	5	3	5	4.46

TRT-PV	2023	11	13	1	2.57
TRT-PV	2023	11	13	2	1.01
TRT-PV	2023	11	13	3	0.85
TRT-PV	2023	11	13	4	4.34
TRT-PV	2023	11	13	5	4.57
CON-PH	2021	5	7	1	2.80
CON-PH	2021	5	7	2	1.06
CON-PH	2021	5	7	3	1.14
CON-PH	2021	5	7	4	2.03
CON-PH	2021	5	7	5	0.59
CON-PH	2022	5	3	1	4.51
CON-PH	2022	5	3	2	2.36
CON-PH	2022	5	3	3	1.95
CON-PH	2022	5	3	4	1.64
CON-PH	2022	5	3	5	1.60
CON-PH	2023	11	13	1	5.20
CON-PH	2023	11	13	2	5.12
CON-PH	2023	11	13	3	1.87
CON-PH	2023	11	13	4	3.36
CON-PH	2023	11	13	5	1.39
TRT-PH	2021	5	7	1	1.34
TRT-PH	2021	5	7	2	1.12
TRT-PH	2021	5	7	3	0.87
TRT-PH	2021	5	7	4	2.63
TRT-PH	2021	5	7	5	2.33
TRT-PH	2022	5	3	1	1.72
TRT-PH	2022	5	3	2	1.69
TRT-PH	2022	5	3	3	1.37
TRT-PH	2022	5	3	4	5.96
TRT-PH	2022	5	3	5	3.59
TRT-PH	2023	11	13	1	1.35
TRT-PH	2023	11	13	2	4.60
TRT-PH	2023	11	13	3	2.47
TRT-PH	2023	11	13	4	5.03
TRT-PH	2023	11	13	5	6.35

Anexo 6. *Productividad interanual de raíces finas correspondiente al periodo 2021, 2022 y 2023*

Parcela	Año	Productividad (Mg C ha ⁻¹ año ⁻¹)	
		Media	SE
CON-PV	2021	0.71	0.30
	2022	1.38	0.36
	2023	1.60	0.38
TRT-PV	2021	1.17	0.35
	2022	1.49	0.25
	2023	0.90	0.20
CON-PH	2021	2.17	0.59
	2022	1.20	0.24
	2023	0.71	0.12
TRT-PH	2021	1.46	0.46
	2022	0.70	0.10
	2023	1.11	0.21

Anexo 7. *Datos crudos de productividad de raíces finas del año 2021 al 2023*

Parcela	año	mes	día	IC	productividad mes	productivida d año
CON-PV	2021	5	6	3	0.0004	0.0050
CON-PV	2021	5	6	4	0.0004	0.0047
CON-PV	2021	5	6	5	0.0003	0.0032
CON-PV	2021	5	6	6	0.0154	0.1846
CON-PV	2021	8	2	3	0.0122	0.1459
CON-PV	2021	8	2	4	0.2057	2.4688
CON-PV	2021	8	2	5	0.2638	3.1657
CON-PV	2021	8	2	6	0.0416	0.4993
CON-PV	2021	11	1	3	0.0146	0.1751
CON-PV	2021	11	1	4	0.0589	0.7069
CON-PV	2021	11	1	5	0.0797	0.9566
CON-PV	2021	11	1	6	0.0130	0.1559
CON-PV	2022	2	1	3	0.0507	0.6078
CON-PV	2022	2	1	4	0.0113	0.1354
CON-PV	2022	2	1	5	0.0232	0.2779
CON-PV	2022	2	1	6	0.0750	0.8996

CON-PV	2022	5	3	3	0.2766	3.3190
CON-PV	2022	5	3	4	0.0125	0.1502
CON-PV	2022	5	3	5	0.0337	0.4050
CON-PV	2022	5	3	6	0.0761	0.9129
CON-PV	2022	8	2	3	0.1425	1.7104
CON-PV	2022	8	2	4	0.2422	2.9069
CON-PV	2022	8	2	5	0.1197	1.4365
CON-PV	2022	8	2	6	0.0553	0.6634
CON-PV	2022	11	8	3	0.0732	0.8779
CON-PV	2022	11	8	4	0.1721	2.0656
CON-PV	2022	11	8	5	0.4576	5.4906
CON-PV	2022	11	8	6	0.0218	0.2613
CON-PV	2023	2	28	3	0.0492	0.5908
CON-PV	2023	2	28	4	0.1038	1.2455
CON-PV	2023	2	28	5	0.2472	2.9669
CON-PV	2023	2	28	6	0.0581	0.6970
CON-PV	2023	11	13	3	0.0359	0.4313
CON-PV	2023	11	13	4	0.2675	3.2103
CON-PV	2023	11	13	5	0.1210	1.4515
CON-PV	2023	11	13	6	0.1819	2.1828
TRT-PV	2021	5	6	1	0.0031	0.0376
TRT-PV	2021	5	6	2	0.0178	0.2136
TRT-PV	2021	5	6	3	0.0005	0.0056
TRT-PV	2021	5	6	4	0.0061	0.0733
TRT-PV	2021	5	6	5	0.0108	0.1291
TRT-PV	2021	8	2	1	0.3943	4.7312
TRT-PV	2021	8	2	2	0.0820	0.9843
TRT-PV	2021	8	2	3	0.2251	2.7015
TRT-PV	2021	8	2	4	0.2421	2.9053
TRT-PV	2021	8	2	5	0.1496	1.7947
TRT-PV	2021	11	1	1	0.1206	1.4471
TRT-PV	2021	11	1	2	0.0333	0.3993
TRT-PV	2021	11	1	3	0.0333	0.3990
TRT-PV	2021	11	1	4	0.0277	0.3319
TRT-PV	2021	11	1	5	0.1184	1.4204
TRT-PV	2022	2	1	1	0.0712	0.8547
TRT-PV	2022	2	1	2	0.0237	0.2847
TRT-PV	2022	2	1	3	0.0078	0.0942
TRT-PV	2022	2	1	4	0.0560	0.6721

TRT-PV	2022	2	1	5	0.0400	0.4799
TRT-PV	2022	5	3	1	0.3968	4.7619
TRT-PV	2022	5	3	2	0.1593	1.9120
TRT-PV	2022	5	3	3	0.1520	1.8245
TRT-PV	2022	5	3	4	0.2503	3.0031
TRT-PV	2022	5	3	5	0.1265	1.5176
TRT-PV	2022	8	2	1	0.1533	1.8390
TRT-PV	2022	8	2	2	0.1114	1.3367
TRT-PV	2022	8	2	3	0.1169	1.4025
TRT-PV	2022	8	2	4	0.2073	2.4880
TRT-PV	2022	8	2	5	0.1089	1.3072
TRT-PV	2022	11	8	1	0.2227	2.6719
TRT-PV	2022	11	8	2	0.0565	0.6786
TRT-PV	2022	11	8	3	0.0646	0.7755
TRT-PV	2022	11	8	4	0.0977	1.1727
TRT-PV	2022	11	8	5	0.0584	0.7013
TRT-PV	2023	2	28	1	0.1521	1.8249
TRT-PV	2023	2	28	2	0.0791	0.9491
TRT-PV	2023	2	28	3	0.0636	0.7634
TRT-PV	2023	2	28	4	0.0529	0.6349
TRT-PV	2023	2	28	5	0.0977	1.1729
TRT-PV	2023	11	13	1	0.1670	2.0039
TRT-PV	2023	11	13	2	0.0687	0.8238
TRT-PV	2023	11	13	3	0.0045	0.0540
TRT-PV	2023	11	13	4	0.0091	0.1087
TRT-PV	2023	11	13	5	0.0541	0.6495
CON-PH	2021	5	7	1	0.0034	0.0411
CON-PH	2021	5	7	2	0.0084	0.1012
CON-PH	2021	5	7	3	0.0151	0.1815
CON-PH	2021	5	7	4	0.0024	0.0285
CON-PH	2021	5	7	5	0.0115	0.1383
CON-PH	2021	8	2	1	0.1781	2.1374
CON-PH	2021	8	2	2	0.6358	7.6291
CON-PH	2021	8	2	3	0.0698	0.8373
CON-PH	2021	8	2	4	0.1600	1.9196
CON-PH	2021	8	2	5	0.4805	5.7655
CON-PH	2021	11	1	1	0.3775	4.5299
CON-PH	2021	11	1	2	0.1283	1.5396
CON-PH	2021	11	1	3	0.2818	3.3821

CON-PH	2021	11	1	4	0.1290	1.5481
CON-PH	2021	11	1	5	0.2267	2.7198
CON-PH	2022	2	1	1	0.0744	0.8933
CON-PH	2022	2	1	2	0.0772	0.9264
CON-PH	2022	2	1	3	0.0673	0.8072
CON-PH	2022	2	1	4	0.0066	0.0789
CON-PH	2022	2	1	5	0.0590	0.7075
CON-PH	2022	5	3	1	0.1069	1.2830
CON-PH	2022	5	3	2	0.0859	1.0309
CON-PH	2022	5	3	3	0.0317	0.3805
CON-PH	2022	5	3	4	0.0240	0.2878
CON-PH	2022	5	3	5	0.0765	0.9175
CON-PH	2022	8	2	1	0.1470	1.7640
CON-PH	2022	8	2	2	0.0937	1.1242
CON-PH	2022	8	2	3	0.0837	1.0044
CON-PH	2022	8	2	4	0.0622	0.7460
CON-PH	2022	8	2	5	0.0999	1.1989
CON-PH	2022	11	8	1	0.4312	5.1738
CON-PH	2022	11	8	2	0.0693	0.8321
CON-PH	2022	11	8	3	0.0582	0.6980
CON-PH	2022	11	8	4	0.1617	1.9404
CON-PH	2022	11	8	5	0.1840	2.2083
CON-PH	2023	2	28	1	0.0411	0.4936
CON-PH	2023	2	28	2	0.0139	0.1666
CON-PH	2023	2	28	3	0.0951	1.1416
CON-PH	2023	2	28	4	0.0650	0.7797
CON-PH	2023	2	28	5	0.0388	0.4661
CON-PH	2023	11	13	1	0.1034	1.2408
CON-PH	2023	11	13	2	0.0975	1.1699
CON-PH	2023	11	13	3	0.0542	0.6509
CON-PH	2023	11	13	4	0.0633	0.7597
CON-PH	2023	11	13	5	0.0153	0.1832
TRT-PH	2021	5	7	1	0.0020	0.0234
TRT-PH	2021	5	7	2	0.0010	0.0116
TRT-PH	2021	5	7	3	0.0101	0.1216
TRT-PH	2021	5	7	4	0.0049	0.0587
TRT-PH	2021	5	7	5	0.0191	0.2287
TRT-PH	2021	8	2	1	0.1537	1.8440
TRT-PH	2021	8	2	2	0.2980	3.5764

TRT-PH	2021	8	2	3	0.0179	0.2147
TRT-PH	2021	8	2	4	0.2156	2.5874
TRT-PH	2021	8	2	5	0.3498	4.1977
TRT-PH	2021	11	1	1	0.0215	0.2575
TRT-PH	2021	11	1	2	0.0633	0.7591
TRT-PH	2021	11	1	3	0.0485	0.5818
TRT-PH	2021	11	1	4	0.1655	1.9854
TRT-PH	2021	11	1	5	0.4563	5.4753
TRT-PH	2022	2	1	1	0.0080	0.0958
TRT-PH	2022	2	1	2	0.0392	0.4706
TRT-PH	2022	2	1	3	0.0058	0.0697
TRT-PH	2022	2	1	4	0.0360	0.4320
TRT-PH	2022	2	1	5	0.0375	0.4502
TRT-PH	2022	5	3	1	0.0481	0.5777
TRT-PH	2022	5	3	2	0.0291	0.3490
TRT-PH	2022	5	3	3	0.0237	0.2850
TRT-PH	2022	5	3	4	0.0465	0.5586
TRT-PH	2022	5	3	5	0.0556	0.6668
TRT-PH	2022	8	2	1	0.1249	1.4984
TRT-PH	2022	8	2	2	0.0900	1.0806
TRT-PH	2022	8	2	3	0.0970	1.1646
TRT-PH	2022	8	2	4	0.1418	1.7018
TRT-PH	2022	8	2	5	0.0933	1.1199
TRT-PH	2022	11	8	1	0.0963	1.1551
TRT-PH	2022	11	8	2	0.0271	0.3250
TRT-PH	2022	11	8	3	0.0735	0.8825
TRT-PH	2022	11	8	4	0.0688	0.8254
TRT-PH	2022	11	8	5	0.0319	0.3826
TRT-PH	2023	2	28	1	0.0192	0.2298
TRT-PH	2023	2	28	2	0.0925	1.1094
TRT-PH	2023	2	28	3	0.0197	0.2366
TRT-PH	2023	2	28	4	0.0951	1.1411
TRT-PH	2023	2	28	5	0.1294	1.5534
TRT-PH	2023	11	13	1	0.0845	1.0137
TRT-PH	2023	11	13	2	0.1065	1.2781
TRT-PH	2023	11	13	3	0.0419	0.5034
TRT-PH	2023	11	13	4	0.1647	1.9762
TRT-PH	2023	11	13	5	0.1743	2.0921

Anexo 8. Datos para hallar el tiempo de residencia y tasa de renovación del año 2022

Parcela	IC	biomasa	productividad
CON-PV	3	2.070	0.893
CON-PV	4	4.325	2.341
CON-PV	5	2.264	2.829
CON-PV	6	2.582	0.948
TRT-PV	2	1.265	0.940
TRT-PV	3	3.638	0.741
TRT-PV	4	2.675	1.088
TRT-PV	5	3.635	0.951
CON-PH	1	3.787	2.159
CON-PH	2	1.825	0.817
CON-PH	3	1.621	0.868
CON-PH	4	1.403	1.052
CON-PH	5	1.399	1.008
TRT-PH	1	1.305	0.966
TRT-PH	2	1.212	0.942
TRT-PH	3	1.111	0.691
TRT-PH	4	4.586	1.402
TRT-PH	5	2.891	1.281
TRT-PH	1	3.040	2.075

Anexo 9. Longitud total y específica de las raíces finas a nivel de comunidades

Parcela	Profundidad del suelo	Longitud total (km m ⁻²)		SRL (km kg ⁻¹)	
		Media	SE	Media	SE
CON-PV	0-10	1.63	0.18	2.73	0.47
CON-PV	10-20	0.84	0.11	2.07	0.36
CON-PV	20-30	0.4	0.04	5.49	1.25
TRT-PV	0-10	1.41	0.11	1.93	0.31
TRT-PV	10-20	0.53	0.09	2.46	0.43
TRT-PV	20-30	0.45	0.11	3.55	0.81
CON-PH	0-10	2.06	0.4	3.41	0.42
CON-PH	10-20	0.93	0.2	3.75	0.52
CON-PH	20-30	0.67	0.12	3.21	0.58
TRT-PH	0-10	1.8	0.47	3.34	0.39

TRT-PH	10-20	1.12	0.34	2.57	0.34
TRT-PH	20-30	0.78	0.14	3.57	0.6

Anexo 10. Datos de la longitud específica de raíces finas de la comunidad vegetal

Parcela	IC	profundidad	longitud_cm	masa_seca_g	SRL_cm_g	SRL_km_k g
CON-PV	3	10	2201.13	2.10	1048.16	10.48
CON-PV	3	20	863.99	1.07	807.46	8.07
CON-PV	3	30	524.61	0.32	1639.40	16.39
CON-PV	4	10	1608.22	1.89	850.91	8.51
CON-PV	4	20	906.48	1.22	743.02	7.43
CON-PV	4	30	498.75	1.10	453.41	4.53
CON-PV	5	10	1402.95	1.17	1199.10	11.99
CON-PV	5	20	1349.21	1.80	749.56	7.50
CON-PV	5	30	492.80	0.35	1408.01	14.08
CON-PV	6	10	2218.90	2.07	1071.93	10.72
CON-PV	6	20	733.05	0.84	872.68	8.73
CON-PV	6	30	330.41	0.06	5162.67	51.63
TRT-PV	1	10	1395.21	1.78	783.82	7.84
TRT-PV	1	20	761.40	0.95	801.47	8.01
TRT-PV	1	30	793.84	1.45	547.47	5.47
TRT-PV	2	10	1342.76	1.02	1316.43	13.16
TRT-PV	2	20	489.75	0.33	1484.08	14.84
TRT-PV	2	30	189.16	0.05	3783.10	37.83
TRT-PV	3	10	1510.30	3.08	490.36	4.90
TRT-PV	3	20	656.69	0.87	754.81	7.55
TRT-PV	3	30	375.04	0.84	446.47	4.46
TRT-PV	4	10	1789.75	3.24	552.39	5.52
TRT-PV	4	20	254.64	0.25	1018.56	10.19
TRT-PV	4	30	820.44	0.80	1025.55	10.26
TRT-PV	5	10	2024.51	3.88	521.78	5.22
TRT-PV	5	20	845.94	1.18	716.90	7.17
TRT-PV	5	30	404.71	0.34	1190.33	11.90
CON-PH	1	10	4141.19	3.67	1128.39	11.28
CON-PH	1	20	1924.35	1.81	1063.18	10.63
CON-PH	1	30	836.52	0.53	1578.34	15.78
CON-PH	2	10	1498.66	1.20	1248.89	12.49
CON-PH	2	20	645.74	0.55	1174.07	11.74

CON-PH	2	30	596.21	1.45	411.18	4.11
CON-PH	3	10	2030.67	1.64	1238.22	12.38
CON-PH	3	20	737.06	0.43	1714.09	17.14
CON-PH	3	30	390.98	0.58	674.11	6.74
CON-PH	4	10	1890.25	1.41	1340.60	13.41
CON-PH	4	20	839.40	0.54	1554.44	15.54
CON-PH	4	30	821.22	0.50	1642.44	16.42
CON-PH	5	10	2121.35	1.32	1607.09	16.07
CON-PH	5	20	1165.41	0.64	1820.95	18.21
CON-PH	5	30	1171.88	0.60	1953.14	19.53
TRT-PH	1	10	1675.92	1.36	1232.30	12.32
TRT-PH	1	20	566.95	0.48	1181.14	11.81
TRT-PH	1	30	584.12	0.57	1024.78	10.25
TRT-PH	2	10	809.40	0.88	919.77	9.20
TRT-PH	2	20	513.84	0.50	1027.67	10.28
TRT-PH	2	30	1350.39	0.75	1800.52	18.01
TRT-PH	3	10	1154.34	0.61	1892.36	18.92
TRT-PH	3	20	1103.47	1.01	1092.55	10.93
TRT-PH	3	30	517.61	0.20	2588.06	25.88
TRT-PH	4	10	3497.30	3.02	1158.05	11.58
TRT-PH	4	20	2637.75	3.41	773.53	7.74
TRT-PH	4	30	1071.99	1.82	589.00	5.89
TRT-PH	5	10	3120.91	2.52	1238.46	12.38
TRT-PH	5	20	1553.31	1.88	826.23	8.26
TRT-PH	5	30	865.09	0.90	961.21	9.61

Anexo 11. Promedio (Media) y el error estándar (se) de la longitud total y específica de raíces finas

Parcela	Especie arbórea	Longitud total (km m ⁻²)		SRL (km kg ⁻¹)	
		Media	SE	Media	SE
CON-PV	<i>Clusia alata</i>	0.61	0.15	3.98	0.49
CON-PV	<i>Clusia flaviflora</i>	0.47	0.10	3.27	0.73
CON-PV	<i>Meliosma frondosa</i>	0.60	0.09	4.76	1.94
CON-PV	<i>Prunus integrifolia</i>	1.57	0.15	7.59	1.45
CON-PV	<i>Weinmannia bangii</i>	2.75	0.43	13.73	3.58
CON-PV	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.47	0.36	15.51	5.34

CON-PV	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.11	0.52	11.71	1.52
TRT-PV	<i>Clusia alata</i>	0.59	0.11	4.7	1.03
TRT-PV	<i>Clusia flaviflora</i>	0.56	0.03	2.66	0.31
TRT-PV	<i>Meliosma frondosa</i>	1.10	0.23	17.73	7.66
TRT-PV	<i>Prunus integrifolia</i>	1.52	0.14	6.84	0.5
TRT-PV	<i>Weinmannia bangii</i>	2.03	0.39	11.97	1.84
TRT-PV	<i>Weinmannia crassifolia</i>	0.69	0.18	4.67	1.14
CON-PH	<i>Meliosma frondosa</i>	1.24	0.17	5.14	0.59
CON-PH	<i>Miconia micropetala</i>	1.82	0.33	12.82	3.05
CON-PH	<i>Myrsine coriaceae</i>	0.65	0.13	3.20	0.75
CON-PH	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.18	0.08	5.97	0.49
CON-PH	<i>Prunus integrifolia</i>	1.38	0.21	7.27	1.63
CON-PH	<i>Weinmannia bangii</i>	2.20	0.2	11.46	1.22
CON-PH	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.53	0.36	6.10	1.48
TRT-PH	<i>Meliosma frondosa</i>	1.15	0.36	5.49	1.12
TRT-PH	<i>Miconia micropetala</i>	1.52	0.38	7.30	1.75
TRT-PH	<i>Myrsine coriaceae</i>	1.07	0.13	5.28	0.68
TRT-PH	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.21	0.02	6.84	0.87
TRT-PH	<i>Prunus integrifolia</i>	1.29	0.23	6.32	1.46
TRT-PH	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.24	0.14	7.05	0.96

Anexo 12. Datos de la longitud específica de las raíces finas de las especies arbóreas

Parcela	Familia	Especie	masa_Seca_g	longitud_cm	SRL_cm_g	SRL_km_kg
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	2.16	913.99	422.36	4.22
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.18	358.09	303.98	3.04
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.70	795.77	467.55	4.68
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.31	727.02	555.40	5.55
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.18	503.45	231.05	2.31
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.60	282.10	176.87	1.77
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.27	180.64	142.35	1.42
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.74	927.62	533.12	5.33
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.72	551.86	321.04	3.21
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.12	882.12	417.08	4.17

CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.98	520.45	174.47	1.74
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	0.78	650.02	837.65	8.38
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.41	1657.74	686.72	6.87
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.43	2355.29	971.25	9.71
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.15	1650.67	524.02	5.24
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.59	1903.08	1199.93	12.00
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.27	1344.08	411.16	4.11
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.17	2609.44	1204.73	12.05
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	NA	3972.44	NA	NA
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.81	3912.62	2156.90	21.57
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.68	2027.90	756.11	7.56
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.35	3308.15	1406.53	14.07
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.19	3698.69	3102.93	31.03
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.26	1988.80	879.22	8.79
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.76	2250.26	815.61	8.16
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.08	924.74	856.24	8.56
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.11	3061.34	984.04	9.84
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.51	2012.54	1329.29	13.29
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.36	3571.95	1513.54	15.14
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.98	603.64	305.18	3.05
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.43	480.95	336.80	3.37
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	0.98	811.28	825.31	8.25
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.87	1094.16	584.49	5.84
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.28	380.73	297.22	2.97
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.26	698.47	309.74	3.10
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.03	567.03	279.60	2.80
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.53	698.19	275.86	2.76
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.14	676.76	316.25	3.16
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	3.62	534.90	147.72	1.48
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.52	1217.85	799.11	7.99
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.40	1729.70	1235.50	12.35
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	0.25	817.79	3284.30	32.84
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.37	1523.84	642.16	6.42
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.91	1566.46	819.28	8.19
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.29	2329.78	708.14	7.08
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.70	1402.62	519.10	5.19
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.48	1807.70	729.79	7.30
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.99	1383.59	695.27	6.95
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.55	3300.15	1295.70	12.96
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.14	1852.76	866.58	8.67
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.03	3453.46	1701.21	17.01

TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.09	1557.55	1425.02	14.25
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.96	354.47	180.85	1.81
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.38	412.56	299.83	3.00
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.71	677.34	396.34	3.96
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.36	1087.17	798.22	7.98
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.13	1408.08	660.76	6.61
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.13	1540.86	723.41	7.23
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.49	1507.69	1013.23	10.13
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.30	1502.16	654.25	6.54
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.18	1488.17	684.21	6.84
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.18	2633.50	1209.14	12.09
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.32	1385.77	597.83	5.98
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.73	1221.40	447.73	4.48
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.37	1104.38	465.79	4.66
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.35	1327.89	565.78	5.66
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.93	634.40	216.45	2.16
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.93	1611.62	549.85	5.50
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	3.51	1465.03	417.15	4.17
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.24	1896.80	847.16	8.47
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.63	952.13	362.17	3.62
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.53	1179.38	333.91	3.34
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.56	473.80	185.22	1.85
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.26	1168.24	516.01	5.16
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.14	3179.63	1483.73	14.84
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.78	1908.17	685.65	6.86
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.45	1772.13	723.91	7.24
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.04	2306.46	1131.73	11.32
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.23	2634.16	1183.36	11.83
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.01	2533.23	840.49	8.40
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.05	2505.56	1222.23	12.22
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.36	1444.90	1061.64	10.62
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.02	1204.23	595.86	5.96
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.05	2139.70	1046.31	10.46
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.94	1311.09	446.56	4.47
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.58	1302.34	504.00	5.04
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	1.85	440.48	238.61	2.39
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.39	3452.69	2492.91	24.93
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.45	1393.95	962.67	9.63

CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.07	726.25	350.17	3.50
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.63	1474.59	904.10	9.04
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.33	1406.76	605.06	6.05
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.41	1067.55	443.15	4.43
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.59	1598.41	616.91	6.17
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	1.86	1199.18	643.68	6.44
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.72	1605.45	932.32	9.32
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.86	2524.46	883.29	8.83
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.03	1159.21	571.04	5.71
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.20	1682.73	763.83	7.64
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.79	1764.25	984.52	9.85
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.59	1416.39	889.13	8.89
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.29	865.02	378.56	3.79
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.35	1030.95	438.14	4.38
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.29	835.12	364.36	3.64
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.28	2229.53	978.29	9.78
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.57	805.47	313.78	3.14
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.82	1539.49	846.34	8.46
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.72	1337.07	490.85	4.91
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.80	1351.35	749.92	7.50
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.20	903.11	410.13	4.10
TRT-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.06	1512.31	733.06	7.33
TRT-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.48	2559.42	1031.61	10.32
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.59	1695.85	654.52	6.55
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.71	791.16	462.67	4.63
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.72	1006.15	369.37	3.69
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.26	1048.92	465.15	4.65
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.97	1529.83	514.75	5.15
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.99	503.44	168.15	1.68
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.77	1945.12	703.23	7.03
TRT-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.63	1118.27	425.36	4.25

Anexo 13. Promedio (Media) y el error estándar (se) del área total y área específica de raíces finas ($m^2 m^{-2}$)

Parcela	Profundidad	Área total ($m^2 m^{-2}$)		SRA ($m^2 kg^{-1}$)	
	del suelo (cm)	Media	SE	Media	SE
CON-PV	0-10	1.00	0.17	6.22	0.48

CON-PV	10-20	0.49	0.08	4.53	0.15
CON-PV	20-30	0.26	0.04	11.61	6.4
TRT-PV	0-10	1.39	0.57	5.76	1.32
TRT-PV	10-20	0.46	0.19	6.85	1.31
TRT-PV	20-30	0.32	0.11	8.49	3.73
CON-PH	0-10	1.80	0.96	8.94	2.15
CON-PH	10-20	0.50	0.13	7.69	0.82
CON-PH	20-30	0.34	0.05	6.4	1.37
TRT-PH	0-10	1.02	0.33	6.71	0.59
TRT-PH	10-20	0.68	0.27	5.28	0.29
TRT-PH	20-30	0.43	0.10	6.62	0.88

Anexo 14. Datos del área específica de raíces finas de la comunidad vegetal

Parcela	IC	profundidad	longitud_cm	masa_seca_g	SRA_cm2_g	SRA_m2_kg
CON-PV	3	0-10cm	148.89	2.10	70.90	7.09
CON-PV	3	10-20cm	52.99	1.07	49.53	4.95
CON-PV	3	20-30cm	23.44	0.32	73.25	7.33
CON-PV	4	0-10cm	93.91	1.89	49.69	4.97
CON-PV	4	10-20cm	51.65	1.22	42.33	4.23
CON-PV	4	20-30cm	24.85	1.10	22.60	2.26
CON-PV	5	0-10cm	70.28	1.17	60.07	6.01
CON-PV	5	10-20cm	81.37	1.80	45.20	4.52
CON-PV	5	20-30cm	22.19	0.35	63.40	6.34
CON-PV	6	0-10cm	140.92	2.07	68.08	6.81
CON-PV	6	10-20cm	36.94	0.84	43.97	4.40
CON-PV	6	20-30cm	19.53	0.06	305.12	30.51
TRT-PV	1	0-10cm	81.86	1.78	45.99	4.60
TRT-PV	1	10-20cm	47.35	0.95	49.84	4.98
TRT-PV	1	20-30cm	43.04	1.45	29.68	2.97
TRT-PV	2	0-10cm	62.65	1.02	61.42	6.14
TRT-PV	2	10-20cm	27.28	0.33	82.67	8.27
TRT-PV	2	20-30cm	5.04	0.05	100.79	10.08
TRT-PV	3	0-10cm	125.47	3.08	40.74	4.07
TRT-PV	3	10-20cm	40.68	0.87	46.75	4.68
TRT-PV	3	20-30cm	20.06	0.84	23.89	2.39
TRT-PV	4	0-10cm	106.05	3.24	32.73	3.27

TRT-PV	4	10-20cm	12.37	0.25	49.47	4.95
TRT-PV	4	20-30cm	37.07	0.80	46.33	4.63
TRT-PV	5	0-10cm	414.94	3.88	106.94	10.69
TRT-PV	5	10-20cm	134.35	1.18	113.85	11.39
TRT-PV	5	20-30cm	76.08	0.34	223.77	22.38
CON-PH	1	0-10cm	641.35	3.67	174.75	17.48
CON-PH	1	10-20cm	115.01	1.81	63.54	6.35
CON-PH	1	20-30cm	44.47	0.53	83.91	8.39
CON-PH	2	0-10cm	68.58	1.20	57.15	5.71
CON-PH	2	10-20cm	30.83	0.55	56.05	5.61
CON-PH	2	20-30cm	26.15	1.45	18.04	1.80
CON-PH	3	0-10cm	119.49	1.64	72.86	7.29
CON-PH	3	10-20cm	44.02	0.43	102.36	10.24
CON-PH	3	20-30cm	28.07	0.58	48.40	4.84
CON-PH	4	0-10cm	103.71	1.41	73.55	7.36
CON-PH	4	10-20cm	41.42	0.54	76.70	7.67
CON-PH	4	20-30cm	38.47	0.50	76.94	7.69
CON-PH	5	0-10cm	90.58	1.32	68.62	6.86
CON-PH	5	10-20cm	55.01	0.64	85.96	8.60
CON-PH	5	20-30cm	55.59	0.60	92.66	9.27
TRT-PH	1	0-10cm	78.90	1.36	58.01	5.80
TRT-PH	1	10-20cm	30.17	0.48	62.85	6.29
TRT-PH	1	20-30cm	30.73	0.57	53.91	5.39
TRT-PH	2	0-10cm	45.21	0.88	51.37	5.14
TRT-PH	2	10-20cm	24.41	0.50	48.81	4.88
TRT-PH	2	20-30cm	57.11	0.75	76.14	7.61
TRT-PH	3	0-10cm	49.75	0.61	81.56	8.16
TRT-PH	3	10-20cm	47.52	1.01	47.05	4.71
TRT-PH	3	20-30cm	19.04	0.20	95.18	9.52
TRT-PH	4	0-10cm	241.09	3.02	79.83	7.98
TRT-PH	4	10-20cm	190.61	3.41	55.90	5.59
TRT-PH	4	20-30cm	84.31	1.82	46.32	4.63
TRT-PH	5	0-10cm	162.71	2.52	64.57	6.46
TRT-PH	5	10-20cm	92.95	1.88	49.44	4.94
TRT-PH	5	20-30cm	53.34	0.90	59.26	5.93

Anexo 15. Promedio (Media) y el error estándar (se) del área total y específica de raíces finas ($m^2 m^{-2}$) de las especies arbóreas.

Parcela	Especie arbórea	Área total ($m^2 m^{-2}$)		SRA ($m^2 g^{-1}$)	
		Media	SE	Media	SE
CON-PV	<i>Clusia alata</i>	2.38	1.14	14.66	4.82
CON-PV	<i>Clusia flaviflora</i>	1.23	0.26	8.55	1.78
CON-PV	<i>Meliosma frondosa</i>	1.96	0.28	14.92	5.45
CON-PV	<i>Prunus integrifolia</i>	4.62	1.6	25.53	13.17
CON-PV	<i>Weinmannia bangii</i>	8.31	2.13	47.36	14.67
CON-PV	<i>Weinmannia crassifolia</i>	6.92	1.05	43.66	15.51
CON-PV	<i>Weinmannia reticulata</i>	5.54	1.61	29.61	6.61
TRT-PV	<i>Clusia alata</i>	1.62	0.22	12.88	2.35
TRT-PV	<i>Clusia flaviflora</i>	1.71	0.1	8.13	0.94
TRT-PV	<i>Meliosma frondosa</i>	2.33	0.57	37.82	16.81
TRT-PV	<i>Prunus integrifolia</i>	2.56	0.21	11.65	1.19
TRT-PV	<i>Weinmannia bangii</i>	3.15	0.64	18.2	2.43
TRT-PV	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.19	0.29	8.03	1.89
CON-PH	<i>Meliosma frondosa</i>	2.51	0.23	10.63	1.05
CON-PH	<i>Miconia micropetala</i>	2.73	0.33	18.98	3.16
CON-PH	<i>Myrsine coriaceae</i>	1.67	0.32	8.22	1.87
CON-PH	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.71	0.24	13.79	1.47
CON-PH	<i>Prunus integrifolia</i>	2.6	0.23	13.16	1.74
CON-PH	<i>Weinmannia bangii</i>	3.12	0.24	16.23	1.51
CON-PH	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.48	0.42	9.78	1.74
TRT-PH	<i>Meliosma frondosa</i>	3.25	1.49	14.94	5.29
TRT-PH	<i>Miconia micropetala</i>	2.68	0.45	13.06	2.73
TRT-PH	<i>Myrsine coriaceae</i>	2.81	0.42	13.81	2.08
TRT-PH	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.99	0.32	16.71	2.22
TRT-PH	<i>Prunus integrifolia</i>	2.21	0.24	10.53	1.57

TRT-PH	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.31	0.42	13.29	3.08
--------	------------------------------	------	------	-------	------

Anexo 16. Promedio (Media) y el error estándar (se) de la densidad de tejido de raíces finas

Densidad de tejido de la raíz (g cm ⁻³)			
Parcela	Profundidad del suelo (cm)	Media	Se
CON-PV	0-10	0.21	0.02
CON-PV	10-20	0.31	0.02
CON-PV	20-30	0.23	0.07
TRT-PV	0-10	0.32	0.03
TRT-PV	10-20	0.27	0.02
kTRT-PV	20-30	0.38	0.07
CON-PH	0-10	0.23	0.02
CON-PH	10-20	0.20	0.02
CON-PH	20-30	0.31	0.10
TRT-PH	0-10	0.22	0.02
TRT-PH	10-20	0.27	0.02
TRT-PH	20-30	0.24	0.02

Anexo 17. Datos del área específica de raíces finas según las especies arbóreas

plot_code	Tree_Family	tree_specie	under_2 mm_g	Area_c m2	SRA_c m_g	SRA_m2_kg
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.98	181.37	91.69	9.17
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	2.16	525.94	243.04	24.30
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.18	113.21	96.11	9.61
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.70	171.26	100.62	10.06
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.31	160.81	122.85	12.28
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.18	133.35	61.20	6.12
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.60	76.94	48.24	4.82
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.27	47.07	37.09	3.71
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.74	254.56	146.30	14.63
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.72	167.03	97.17	9.72
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.12	284.86	134.68	13.47
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.98	187.64	62.90	6.29
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	0.78	194.04	250.05	25.01

CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.41	322.48	133.59	13.36
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.43	317.79	131.05	13.10
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.15	259.71	82.45	8.24
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.59	1237.42	780.21	78.02
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.27	488.53	149.44	14.94
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.17	523.01	241.46	24.15
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.81	1099.01	605.85	60.58
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.89	1561.29	825.20	82.52
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.68	595.57	222.06	22.21
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.35	907.86	386.00	38.60
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.19	1060.03	889.29	88.93
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.26	558.84	247.06	24.71
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.76	618.67	224.24	22.42
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.08	128.10	118.61	11.86
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.11	847.29	272.35	27.24
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.51	594.75	392.84	39.28
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.36	945.82	400.77	40.08
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.43	140.59	98.45	9.85
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	0.98	212.70	216.37	21.64
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.87	261.07	139.46	13.95
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.28	125.36	97.86	9.79
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.26	216.60	96.05	9.61
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.03	167.22	82.46	8.25
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.53	209.61	82.82	8.28
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.14	212.09	99.11	9.91
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	3.62	166.94	46.10	4.61
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.52	227.40	149.21	14.92
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.40	391.50	279.64	27.96
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	0.25	175.75	705.80	70.58
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.37	230.49	97.13	9.71
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.91	292.19	152.82	15.28
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.29	349.66	106.28	10.63
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.70	245.29	90.78	9.08
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.48	336.21	135.73	13.57
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.99	216.07	108.58	10.86
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.55	581.84	228.44	22.84
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.14	307.02	143.60	14.36
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.03	472.77	232.89	23.29
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.09	214.76	196.49	19.65
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.96	62.08	31.67	3.17
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.38	69.12	50.23	5.02

TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.71	126.81	74.20	7.42
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.36	182.44	133.95	13.40
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.13	236.98	111.21	11.12
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.63	197.19	120.90	12.09
TRT-PV	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.33	445.14	191.46	19.15
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.41	365.55	151.74	15.17
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.59	514.65	198.63	19.86
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	1.86	278.45	149.46	14.95
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.72	487.89	283.32	28.33
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.86	877.99	307.20	30.72
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.03	321.85	158.55	15.85
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.20	471.97	214.24	21.42
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.79	254.12	141.81	14.18
TRT-PV	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.59	318.35	199.85	19.98
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.29	173.59	75.97	7.60
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.35	194.43	82.63	8.26
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.29	145.78	63.60	6.36
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.28	322.21	141.38	14.14
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.57	168.27	65.55	6.56
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.82	215.49	118.46	11.85
TRT-PV	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.72	278.69	102.31	10.23
TRT-PV	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.80	314.87	174.74	17.47
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.20	216.02	98.10	9.81
TRT-PV	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.06	343.89	166.69	16.67
TRT-PV	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.48	367.73	148.22	14.82
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.59	313.97	121.18	12.12
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.71	187.74	109.79	10.98
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.72	214.88	78.88	7.89
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.26	214.30	95.03	9.50
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.97	293.38	98.71	9.87
TRT-PV	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.99	142.12	47.47	4.75
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.77	287.17	103.82	10.38
TRT-PV	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.63	202.50	77.02	7.70
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.13	369.58	173.51	17.35
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.49	231.94	155.87	15.59
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.30	235.37	102.51	10.25
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.18	376.01	172.88	17.29
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.18	345.26	158.52	15.85
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.32	285.66	123.24	12.32
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.73	261.43	95.83	9.58
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.37	250.48	105.64	10.56

CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.35	318.40	135.66	13.57
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.93	152.32	51.97	5.20
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.93	299.83	102.30	10.23
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	3.51	274.69	78.21	7.82
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.24	324.94	145.13	14.51
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.63	246.55	93.78	9.38
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.53	231.75	65.61	6.56
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.56	123.55	48.30	4.83
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.26	258.64	114.24	11.42
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.14	443.67	207.03	20.70
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.78	344.48	123.78	12.38
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.45	274.37	112.08	11.21
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.04	335.87	164.80	16.48
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.23	375.86	168.85	16.89
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.01	377.77	125.34	12.53
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.05	379.80	185.27	18.53
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.36	236.04	173.43	17.34
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.02	303.07	149.96	15.00
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.05	323.97	158.42	15.84
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.94	280.62	95.58	9.56
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.58	323.84	125.32	12.53
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	1.85	124.07	67.21	6.72
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.39	436.36	315.06	31.51
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.45	227.26	156.95	15.70
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.07	189.70	91.47	9.15

Anexo 18. Promedio (Media) y el error estándar (se) de la densidad de tejido de raíces finas (g cm⁻³)

Densidad de tejido de raíces finas (g cm ⁻³)			
Parcela	Especie	Media	se
CON-PV	<i>Clusia alata</i>	0.28	0.07
CON-PV	<i>Clusia flaviflora</i>	0.47	0.08
CON-PV	<i>Meliosma frondosa</i>	0.27	0.09
CON-PV	<i>Prunus integrifolia</i>	0.31	0.09
CON-PV	<i>Weinmannia bangii</i>	0.10	0.03
CON-PV	<i>Weinmannia crassifolia</i>	0.11	0.03

CON-PV	<i>Weinmannia reticulata</i>	0.18	0.08
TRT-PV	<i>Clusia alata</i>	0.30	0.03
TRT-PV	<i>Clusia flaviflora</i>	0.44	0.07
TRT-PV	<i>Meliosma frondosa</i>	0.18	0.08
TRT-PV	<i>Prunus integrifolia</i>	0.42	0.05
TRT-PV	<i>Weinmannia bangii</i>	0.30	0.04
TRT-PV	<i>Weinmannia crassifolia</i>	0.93	0.32
CON-PH	<i>Meliosma frondosa</i>	0.40	0.04
CON-PH	<i>Miconia micropetala</i>	0.27	0.03
CON-PH	<i>Myrsine coriaceae</i>	0.51	0.09
CON-PH	<i>Ocotea glabriflora</i>	0.31	0.03
CON-PH	<i>Prunus integrifolia</i>	0.33	0.03
CON-PH	<i>Weinmannia bangii</i>	0.32	0.03
CON-PH	<i>Weinmannia reticulata</i>	0.48	0.07
TRT-PH	<i>Meliosma frondosa</i>	0.34	0.09
TRT-PH	<i>Miconia micropetala</i>	0.37	0.08
TRT-PH	<i>Myrsine coriaceae</i>	0.35	0.08
TRT-PH	<i>Ocotea glabriflora</i>	0.26	0.06
TRT-PH	<i>Prunus integrifolia</i>	0.46	0.05
TRT-PH	<i>Weinmannia reticulata</i>	0.38	0.06

Anexo 19. Densidad de tejido de las raíces finas de la comunidad vegetal

Parcela	IC	profundidad	vol_cm3	masa_seca_g
CON-PV	3	10	11.71	2.10
CON-PV	3	20	4.26	1.07
CON-PV	3	30	1.56	0.32
CON-PV	4	10	7.52	1.89
CON-PV	4	20	3.63	1.22
CON-PV	4	30	2.60	1.10
CON-PV	5	10	5.11	1.17
CON-PV	5	20	6.48	1.80
CON-PV	5	30	1.56	0.35
CON-PV	6	10	10.65	2.07
CON-PV	6	20	2.34	0.84

CON-PV	6	30	0.82	0.06
TRT-PV	1	10	6.15	1.78
TRT-PV	1	20	3.59	0.95
TRT-PV	1	30	3.15	1.45
TRT-PV	2	10	4.14	1.02
TRT-PV	2	20	1.67	0.33
TRT-PV	2	30	0.17	0.05
TRT-PV	3	10	10.96	3.08
TRT-PV	3	20	3.05	0.87
TRT-PV	3	30	1.44	0.84
TRT-PV	4	10	7.99	3.24
TRT-PV	4	20	0.75	0.25
TRT-PV	4	30	2.23	0.80
TRT-PV	5	10	10.89	3.88
TRT-PV	5	20	4.53	1.18
TRT-PV	5	30	1.77	0.34
CON-PH	1	10	13.89	3.67
CON-PH	1	20	8.66	1.81
CON-PH	1	30	3.03	0.53
CON-PH	2	10	4.33	1.20
CON-PH	2	20	2.05	0.55
CON-PH	2	30	2.07	1.45
CON-PH	3	10	8.97	1.64
CON-PH	3	20	3.38	0.43
CON-PH	3	30	2.10	0.58
CON-PH	4	10	7.35	1.41
CON-PH	4	20	2.52	0.54
CON-PH	4	30	2.33	0.50
CON-PH	5	10	5.65	1.32
CON-PH	5	20	3.50	0.64
CON-PH	5	30	3.48	0.60
TRT-PH	1	10	5.06	1.36
TRT-PH	1	20	1.95	0.48
TRT-PH	1	30	1.88	0.57
TRT-PH	2	10	3.20	0.88
TRT-PH	2	20	1.65	0.50
TRT-PH	2	30	3.30	0.75
TRT-PH	3	10	3.10	0.61
TRT-PH	3	20	3.18	1.01
TRT-PH	3	30	0.98	0.20
TRT-PH	4	10	19.02	3.02

TRT-PH	4	20	16.03	3.41
TRT-PH	4	30	7.35	1.82
TRT-PH	5	10	12.16	2.52
TRT-PH	5	20	7.19	1.88
TRT-PH	5	30	3.99	0.90

Anexo 20. Densidad de tejido de las raíces finas de las especies arbóreas

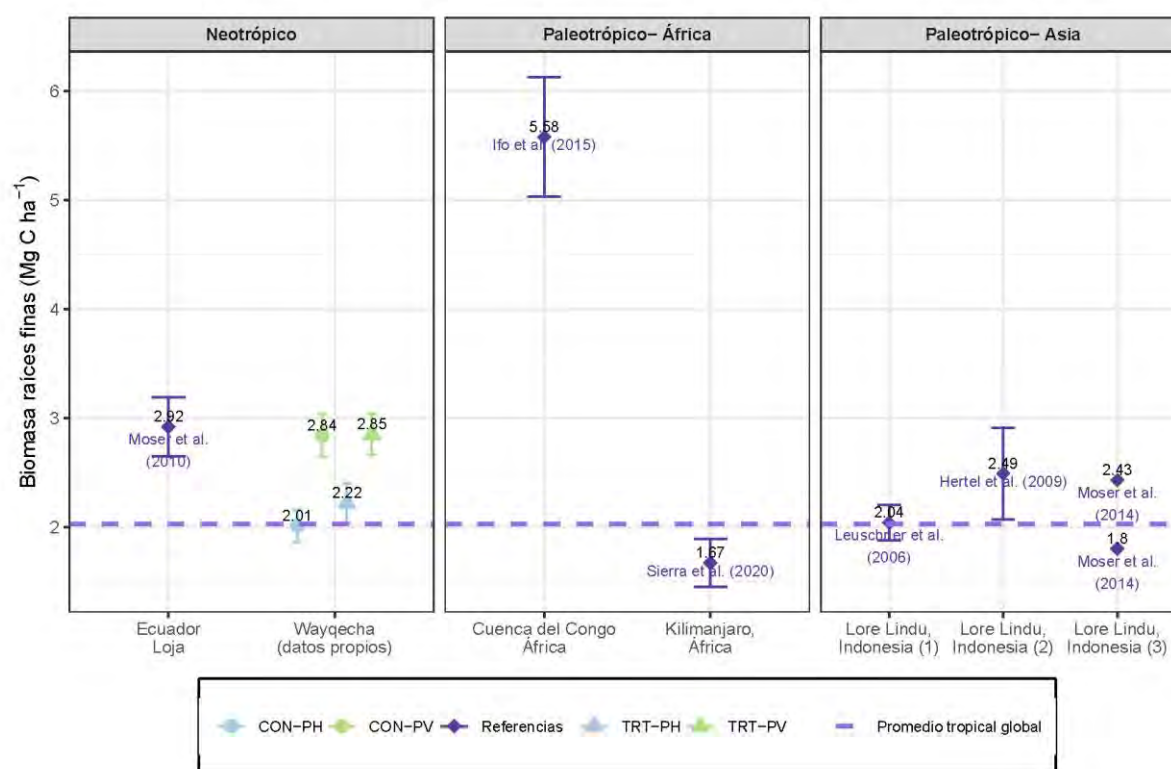
Parcela	tree_family	tree_specie	masa_seca_g	vol_cm3	RTD_g_cm3
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	2.16	13.32	0.16
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.18	4.06	0.29
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.70	4.32	0.39
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.31	4.17	0.31
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.18	3.59	0.61
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.60	2.47	0.65
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.27	1.91	0.66
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.74	7.41	0.23
CON-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	1.72	5.17	0.33
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.12	9.59	0.22
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.98	6.66	0.45
CON-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	0.78	6.04	0.13
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.41	7.73	0.31
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.43	5.81	0.42
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.15	5.37	0.59
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.59	34.07	0.05
CON-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.27	16.26	0.20
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.17	13.91	0.16
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.81	30.31	0.06
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.89	44.29	0.04
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.68	17.71	0.15
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.35	25.38	0.09
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.19	30.85	0.04
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.26	13.70	0.17
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.76	17.69	0.16
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.08	2.62	0.41
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.11	23.94	0.13
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.51	17.75	0.09
CON-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.36	26.27	0.09
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.98	5.52	0.36
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.43	4.22	0.34

TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	0.98	5.72	0.17
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.87	6.50	0.29
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia alata</i>	1.28	3.97	0.32
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.26	6.44	0.35
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.03	4.74	0.43
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.53	6.45	0.39
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	2.14	6.50	0.33
TRT-PV	Clusiaceae	<i>Clusia flaviflora</i>	3.62	5.14	0.70
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.52	4.79	0.32
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.40	9.07	0.15
TRT-PV	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	0.25	4.31	0.06
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.37	4.72	0.50
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.91	6.74	0.28
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	3.29	6.90	0.48
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.70	5.56	0.49
TRT-PV	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.48	7.51	0.33
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.99	4.49	0.44
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.55	10.58	0.24
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.14	6.77	0.32
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.03	8.56	0.24
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	1.09	4.20	0.26
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.96	0.95	2.07
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.38	1.14	1.21
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.71	2.94	0.58
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	1.36	3.84	0.35
TRT-PV	Cunoniaceae	<i>Weinmannia crassifolia</i>	2.13	5.17	0.41
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.13	9.15	0.23
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.49	4.90	0.30
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.30	5.28	0.43
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.18	9.80	0.22
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.18	6.43	0.34
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.32	6.52	0.36
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.73	6.87	0.40
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.37	6.47	0.37
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.35	8.07	0.29
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.93	4.24	0.69
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.93	6.99	0.42
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	3.51	6.54	0.54
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.24	7.10	0.32
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.63	6.65	0.40
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.53	5.73	0.62

CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.56	3.50	0.73
CON-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.26	6.32	0.36
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.14	8.64	0.25
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.78	7.61	0.37
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.45	5.79	0.42
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.04	6.90	0.30
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia bangii</i>	2.23	7.55	0.29
CON-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	3.01	7.67	0.39
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.05	7.71	0.27
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.36	4.83	0.28
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.02	7.93	0.25
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.05	6.67	0.31
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.94	7.12	0.41
CON-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.58	8.85	0.29
CON-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	1.85	3.79	0.49
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.39	8.18	0.17
CON-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	1.45	4.81	0.30
CON-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.07	5.52	0.38
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.63	4.13	0.40
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.33	14.46	0.16
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.41	12.65	0.19
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.59	16.83	0.15
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	1.86	6.89	0.27
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.72	14.89	0.12
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.86	28.32	0.10
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.03	9.78	0.21
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.20	13.73	0.16
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	1.79	4.92	0.36
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.59	7.36	0.22
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.29	4.49	0.51
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.35	4.42	0.53
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.29	3.26	0.70
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.28	6.18	0.37
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.57	4.12	0.62
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	1.82	4.46	0.41
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	2.72	6.18	0.44
TRT-PH	Lauraceae	<i>Ocotea glabriflora</i>	1.80	7.77	0.23
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	2.20	5.88	0.37
TRT-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.06	8.06	0.26
TRT-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.48	7.32	0.34
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.59	6.93	0.37

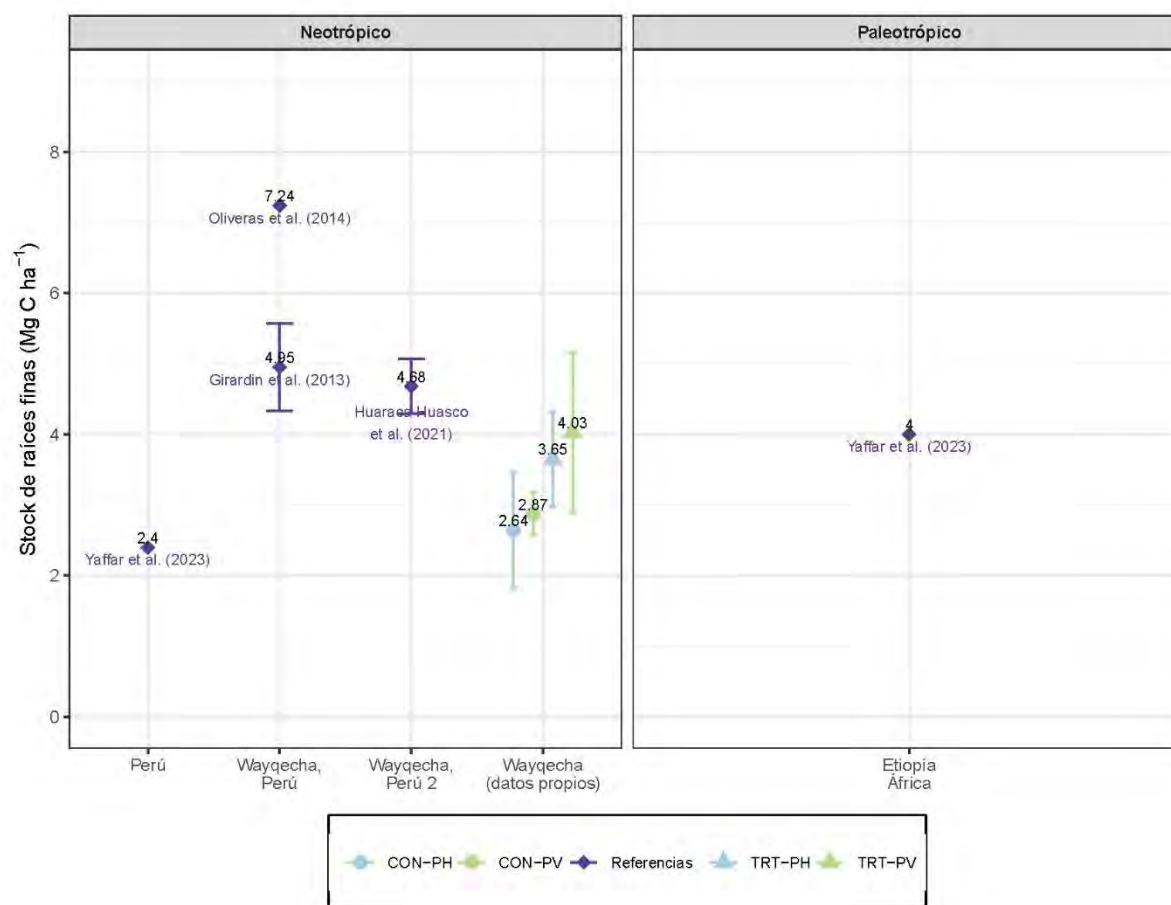
TRT-PH	Sabiaceae	<i>Meliosma frondosa</i>	1.71	5.07	0.34
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.72	5.21	0.52
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.26	5.44	0.41
TRT-PH	Rosaceae	<i>Prunus integrifolia</i>	2.97	7.07	0.42
TRT-PH	Myrsinaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	2.99	4.27	0.70
TRT-PH	Cunoniaceae	<i>Weinmannia reticulata</i>	2.77	5.98	0.46
TRT-PH	Melastomataceae	<i>Miconia micropetala</i>	2.63	5.09	0.52

Anexo 21. Comparación de la biomasa de raíces finas con estudios previos en bosques tropicales neotropicales y paleotropicales.



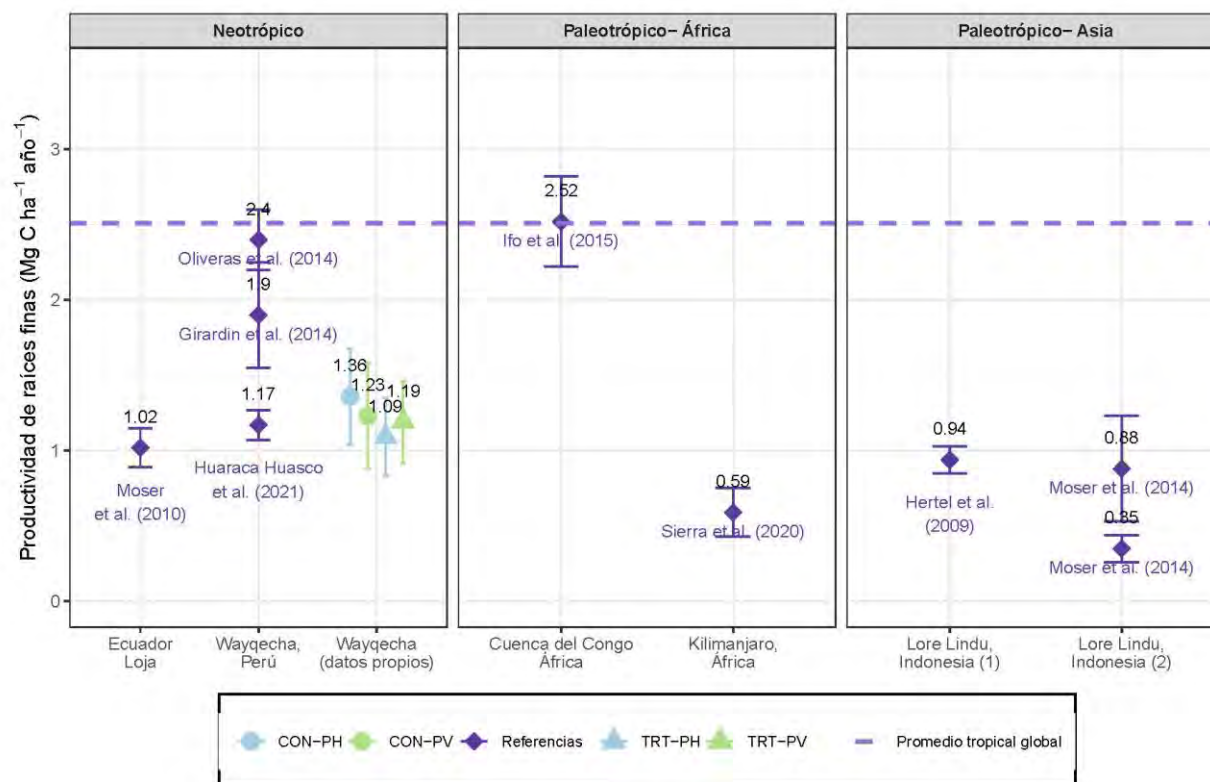
Nota. El círculo verde representa el valor de la parcela control de precipitación vertical (CON-PV), y el círculo celeste las parcelas control de precipitación horizontal (CON-PH). El triángulo verde corresponde a la parcela tratamiento de precipitación vertical (TRT-PV), y el triángulo celeste a la parcela tratamiento de precipitación horizontal (TRT-PH). Los rombos morados muestran valores reportados por otros autores en diferentes bosques tropicales del Neotrópico y Paleotrópico. La línea discontinua morada indica el promedio global de biomasa de raíces finas reportado para ecosistemas tropicales.

Anexo 22. Comparación del Stock de raíces finas con estudios previos en bosques tropicales neotropicales y paleotropicales.



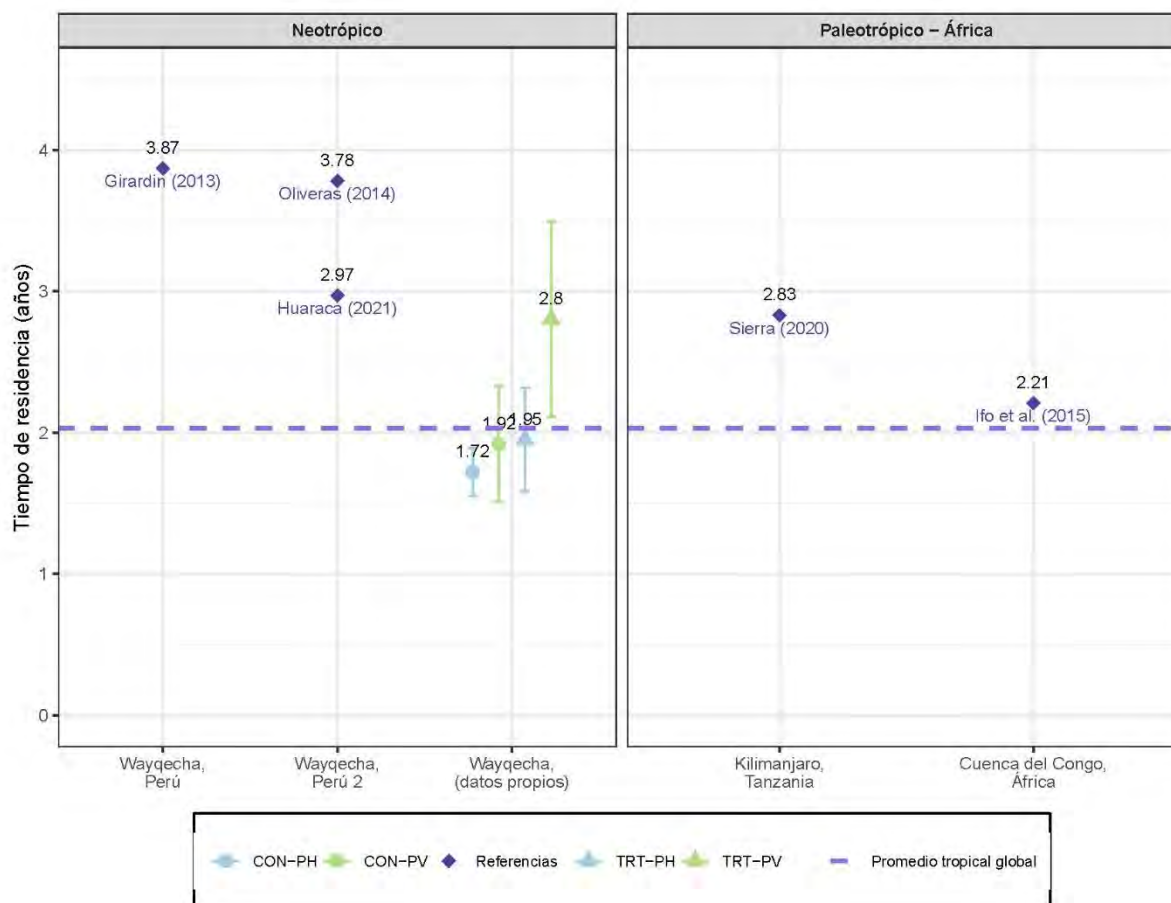
Nota. El círculo verde representa el valor de la parcela control de precipitación vertical (CON-PV), y el círculo celeste las parcelas control de precipitación horizontal (CON-PH). El triángulo verde corresponde a la parcela tratamiento de precipitación vertical (TRT-PV), y el triángulo celeste a la parcela tratamiento de precipitación horizontal (TRT-PH). Los rombos morados muestran valores reportados por otros autores en diferentes bosques tropicales del Neotrópico y Paleotrópico. La línea discontinua morada indica el promedio global de biomasa de raíces finas reportado para ecosistemas tropicales.

Anexo 23. Comparación de la productividad de raíces finas con estudios previos en bosques tropicales neotropicales y paleotropicales.



Nota. El círculo verde representa el valor de la parcela control de precipitación vertical (CON-PV), y el círculo celeste las parcelas control de precipitación horizontal (CON-PH). El triángulo verde corresponde a la parcela tratamiento de precipitación vertical (TRT-PV), y el triángulo celeste a la parcela tratamiento de precipitación horizontal (TRT-PH). Los rombos morados muestran valores reportados por otros autores en diferentes bosques tropicales del Neotrópico y Paleotrópico. La línea discontinua morada indica el promedio global de biomasa de raíces finas reportado para ecosistemas tropicales.

Anexo 24. Comparación del tiempo de residencia de raíces finas con estudios previos en bosques tropicales neotropicales y paleotropicales.



Nota. El círculo verde representa el valor de la parcela control de precipitación vertical (CON-PV), y el círculo celeste las parcelas control de precipitación horizontal (CON-PH). El triángulo verde corresponde a la parcela tratamiento de precipitación vertical (TRT-PV), y el triángulo celeste a la parcela tratamiento de precipitación horizontal (TRT-PH). Los rombos morados muestran valores reportados por otros autores en diferentes bosques tropicales del Neotrópico y Paleotrópico. La línea discontinua morada indica el promedio global de biomasa de raíces finas reportado para ecosistemas tropicales.

Anexo 25. Datos para la relación de productividad de raíces finas con la humedad y temperatura del suelo

Parcela	Año	IC	productividad	humedad del suelo	temperatura del suelo
CON-PV	2022	3	0.88	17.94	10.96
CON-PV	2022	4	2.07	17.94	10.96
CON-PV	2022	5	5.49	17.94	10.96
CON-PV	2022	6	0.26	17.94	10.96
CON-PV	2021	3	0.18	21.16	11.28
CON-PV	2021	4	0.71	21.16	11.28
CON-PV	2021	5	0.96	21.16	11.28
CON-PV	2021	6	0.16	21.16	11.28
CON-PV	2023	3	0.43	24.14	11.60
CON-PV	2023	4	3.21	24.14	11.60
CON-PV	2023	5	1.45	24.14	11.60
CON-PV	2023	6	2.18	24.14	11.60
CON-PV	2022	3	3.32	25.60	11.52
CON-PV	2022	4	0.15	25.60	11.52
CON-PV	2022	5	0.41	25.60	11.52
CON-PV	2022	6	0.91	25.60	11.52
CON-PV	2023	3	0.59	29.55	11.58
CON-PV	2023	4	1.25	29.55	11.58
CON-PV	2023	5	2.97	29.55	11.58
CON-PV	2023	6	0.70	29.55	11.58
CON-PV	2022	3	1.71	29.70	10.55
CON-PV	2022	4	2.91	29.70	10.55
CON-PV	2022	5	1.44	29.70	10.55
CON-PV	2022	6	0.66	29.70	10.55
CON-PV	2021	3	0.15	30.91	10.67
CON-PV	2021	4	2.47	30.91	10.67
CON-PV	2021	5	3.17	30.91	10.67
CON-PV	2021	6	0.50	30.91	10.67
CON-PV	2022	3	0.61	35.91	12.08
CON-PV	2022	4	0.14	35.91	12.08
CON-PV	2022	5	0.28	35.91	12.08
CON-PV	2022	6	0.90	35.91	12.08
CON-PV	2021	3	0.01	39.17	11.51
CON-PV	2021	4	0.01	39.17	11.51
CON-PV	2021	5	0.00	39.17	11.51
CON-PV	2021	6	0.19	39.17	11.51

TRT-PV	2022	4	1.17	0.28	10.25
TRT-PV	2021	1	1.45	0.72	10.40
TRT-PV	2021	2	0.40	0.72	10.40
TRT-PV	2021	3	0.40	0.72	10.40
TRT-PV	2021	4	0.33	0.72	10.40
TRT-PV	2021	5	1.42	0.72	10.40
TRT-PV	2022	4	2.49	1.66	9.98
TRT-PV	2023	4	0.64	2.12	10.67
TRT-PV	2022	1	0.86	2.21	11.20
TRT-PV	2022	2	0.29	2.21	11.20
TRT-PV	2022	3	0.09	2.21	11.20
TRT-PV	2022	4	0.67	2.21	11.20
TRT-PV	2022	5	0.48	2.21	11.20
TRT-PV	2023	4	0.11	3.24	10.96
TRT-PV	2022	1	4.76	3.54	11.05
TRT-PV	2022	2	1.91	3.54	11.05
TRT-PV	2022	3	1.82	3.54	11.05
TRT-PV	2022	4	3.00	3.54	11.05
TRT-PV	2022	5	1.52	3.54	11.05
TRT-PV	2021	1	0.04	4.01	10.72
TRT-PV	2021	2	0.21	4.01	10.72
TRT-PV	2021	3	0.01	4.01	10.72
TRT-PV	2021	4	0.07	4.01	10.72
TRT-PV	2021	5	0.13	4.01	10.72
TRT-PV	2022	5	1.31	8.06	9.98
TRT-PV	2022	5	0.70	8.06	10.65
TRT-PV	2023	5	1.17	8.28	11.27
TRT-PV	2023	5	0.65	8.67	11.34
TRT-PV	2022	1	2.67	10.37	10.60
TRT-PV	2023	1	1.83	12.27	11.03
TRT-PV	2023	1	2.00	14.40	11.40
TRT-PV	2022	2	0.68	14.70	11.09
TRT-PV	2022	3	0.78	14.70	11.09
TRT-PV	2022	1	1.84	19.68	10.15
TRT-PV	2022	2	1.34	21.02	10.66
TRT-PV	2022	3	1.40	21.02	10.66
TRT-PV	2023	2	0.82	23.93	11.60
TRT-PV	2023	3	0.05	23.93	11.60
TRT-PV	2023	2	0.95	24.32	11.43
TRT-PV	2023	3	0.76	24.32	11.43
TRT-PV	2021	1	4.73	30.91	10.67
TRT-PV	2021	2	0.98	30.91	10.67
TRT-PV	2021	3	2.70	30.91	10.67

TRT-PV	2021	4	2.91	30.91	10.67
TRT-PV	2021	5	1.80	30.91	10.67
CON-PH	2022	1	5.17	8.88	11.44
CON-PH	2023	1	1.24	10.97	12.29
CON-PH	2022	4	1.94	11.93	10.70
CON-PH	2021	1	4.53	15.01	10.93
CON-PH	2021	2	1.54	15.01	10.93
CON-PH	2021	3	3.38	15.01	10.93
CON-PH	2021	4	1.55	15.01	10.93
CON-PH	2021	5	2.72	15.01	10.93
CON-PH	2022	1	1.76	15.23	10.86
CON-PH	2023	1	0.49	15.71	11.79
CON-PH	2022	5	2.21	19.67	10.84
CON-PH	2023	5	0.18	19.76	11.41
CON-PH	2023	4	0.76	21.50	11.43
CON-PH	2022	4	0.75	21.58	10.56
CON-PH	2022	2	0.83	23.21	11.75
CON-PH	2022	3	0.70	23.21	11.75
CON-PH	2021	1	2.14	23.37	10.67
CON-PH	2021	2	7.63	23.37	10.67
CON-PH	2021	3	0.84	23.37	10.67
CON-PH	2021	4	1.92	23.37	10.67
CON-PH	2021	5	5.77	23.37	10.67
CON-PH	2023	4	0.78	25.06	11.11
CON-PH	2023	5	0.47	26.85	11.39
CON-PH	2022	1	0.89	28.10	11.56
CON-PH	2022	2	0.93	28.10	11.56
CON-PH	2022	3	0.81	28.10	11.56
CON-PH	2022	4	0.08	28.10	11.56
CON-PH	2022	5	0.71	28.10	11.56
CON-PH	2022	1	1.28	28.22	11.33
CON-PH	2022	2	1.03	28.22	11.33
CON-PH	2022	3	0.38	28.22	11.33
CON-PH	2022	4	0.29	28.22	11.33
CON-PH	2022	5	0.92	28.22	11.33
CON-PH	2022	5	1.20	28.37	10.12
CON-PH	2023	2	1.17	28.62	12.27
CON-PH	2023	3	0.65	28.62	12.27
CON-PH	2022	2	1.12	28.82	11.59
CON-PH	2022	3	1.00	28.82	11.59
CON-PH	2023	2	0.17	33.10	11.73
CON-PH	2023	3	1.14	33.10	11.73
CON-PH	2021	1	0.04	33.94	11.19

CON-PH	2021	2	0.10	33.94	11.19
CON-PH	2021	3	0.18	33.94	11.19
CON-PH	2021	4	0.03	33.94	11.19
CON-PH	2021	5	0.14	33.94	11.19
TRT-PH	2021	1	0.26	8.75	10.86
TRT-PH	2021	2	0.76	8.75	10.86
TRT-PH	2021	3	0.58	8.75	10.86
TRT-PH	2021	4	1.99	8.75	10.86
TRT-PH	2021	5	5.48	8.75	10.86
TRT-PH	2022	5	0.38	9.59	11.00
TRT-PH	2021	1	1.84	14.38	10.18
TRT-PH	2021	2	3.58	14.38	10.18
TRT-PH	2021	3	0.22	14.38	10.18
TRT-PH	2021	4	2.59	14.38	10.18
TRT-PH	2021	5	4.20	14.38	10.18
TRT-PH	2022	4	0.83	19.47	10.79
TRT-PH	2022	5	1.12	20.77	10.19
TRT-PH	2022	1	0.10	21.49	11.71
TRT-PH	2022	2	0.47	21.49	11.71
TRT-PH	2022	3	0.07	21.49	11.71
TRT-PH	2022	4	0.43	21.49	11.71
TRT-PH	2022	5	0.45	21.49	11.71
TRT-PH	2023	5	1.55	21.67	11.39
TRT-PH	2022	1	0.58	24.03	11.43
TRT-PH	2022	2	0.35	24.03	11.43
TRT-PH	2022	3	0.29	24.03	11.43
TRT-PH	2022	4	0.56	24.03	11.43
TRT-PH	2022	5	0.67	24.03	11.43
TRT-PH	2023	4	1.98	25.88	11.38
TRT-PH	2021	1	0.02	27.79	11.14
TRT-PH	2021	2	0.01	27.79	11.14
TRT-PH	2021	3	0.12	27.79	11.14
TRT-PH	2021	4	0.06	27.79	11.14
TRT-PH	2021	5	0.23	27.79	11.14
TRT-PH	2023	5	2.09	29.11	11.43
TRT-PH	2022	4	1.70	30.00	9.83
TRT-PH	2022	3	0.88	35.41	11.09
TRT-PH	2023	1	1.01	35.59	11.59
TRT-PH	2023	2	1.28	35.59	11.59
TRT-PH	2022	1	1.16	36.35	11.15
TRT-PH	2022	2	0.33	36.35	11.15
TRT-PH	2023	1	0.23	40.95	11.65
TRT-PH	2023	2	1.11	40.95	11.65

TRT-PH	2023	3	0.50	42.05	11.55
TRT-PH	2022	1	1.50	43.69	10.30
TRT-PH	2022	2	1.08	43.69	10.30
TRT-PH	2022	3	1.17	45.37	10.37
TRT-PH	2023	3	0.24	47.00	11.45
TRT-PH	2023	4	1.14	47.00	11.45

Anexo 26. Datos para la relación del tiempo de residencia de raíces finas con la humedad y temperatura del suelo

Parcela	IC	tiempo de residencia	humedad del suelo	temperatura del suelo
CON-PV	3	2.32	10.79	25.77
CON-PV	4	1.87	11.16	5.95
CON-PV	5	0.83	11.06	12.61
CON-PV	6	2.69	10.71	11.12
TRT-PV	1	1.47	10.40	3.72
TRT-PV	2	1.35	10.72	11.55
TRT-PV	3	4.91	10.59	4.05
TRT-PV	4	2.46	10.71	7.10
TRT-PV	5	3.82	10.34	7.16
CON-PH	1	1.75	10.90	18.62
CON-PH	2	2.23	11.89	22.35
CON-PH	3	1.85	11.52	9.84
CON-PH	4	1.33	10.86	19.61
CON-PH	5	1.39	10.94	13.16
TRT-PH	1	1.35	10.71	11.02
TRT-PH	2	1.29	11.06	32.77
TRT-PH	3	1.61	11.02	36.95
TRT-PH	4	3.27	10.71	17.23
TRT-PH	5	2.26	11.05	11.54

Anexo 27. Datos para relacionar la morfología de raíces finas con la humedad y temperatura del suelo

Parcela	IC	profundidad	srl km kg	sra m2 kg	vol g cm3	humedad del suelo	temperatura del suelo
CON-PV	3	10	10.48	7.09	0.18	28.98	10.61
CON-PV	3	20	8.07	4.95	0.25	28.98	10.61
CON-PV	3	30	16.39	7.33	0.21	28.98	10.61

CON-PV	4	10	8.51	4.97	0.25	28.62	11.17
CON-PV	4	20	7.43	4.23	0.34	28.62	11.17
CON-PV	4	30	4.53	2.26	0.42	28.62	11.17
CON-PV	5	10	11.99	6.01	0.23	19.55	11.05
CON-PV	5	20	7.50	4.52	0.28	19.55	11.05
CON-PV	5	30	14.08	6.34	0.22	19.55	11.05
CON-PV	6	10	10.72	6.81	0.19	34.30	10.88
CON-PV	6	20	8.73	4.40	0.36	34.30	10.88
CON-PV	6	30	51.63	30.51	0.08	34.30	10.88
TRT-PV	1	10	7.84	4.60	0.29	1.62	10.36
TRT-PV	1	20	8.01	4.98	0.26	1.62	10.36
TRT-PV	1	30	5.47	2.97	0.46	1.62	10.36
TRT-PV	2	10	13.16	6.14	0.25	14.23	10.45
TRT-PV	2	20	14.84	8.27	0.20	14.23	10.45
TRT-PV	2	30	37.83	10.08	0.30	14.23	10.45
TRT-PV	3	10	4.90	4.07	0.28	1.60	10.48
TRT-PV	3	20	7.55	4.68	0.29	1.60	10.48
TRT-PV	3	30	4.46	2.39	0.58	1.60	10.48
TRT-PV	4	10	5.52	3.27	0.41	8.08	10.43
TRT-PV	4	20	10.19	4.95	0.33	8.08	10.43
TRT-PV	4	30	10.26	4.63	0.36	8.08	10.43
TRT-PV	5	10	5.22	10.69	0.36	6.26	10.09
TRT-PV	5	20	7.17	11.39	0.26	6.26	10.09
TRT-PV	5	30	11.90	22.38	0.19	6.26	10.09
CON-PH	1	10	11.28	17.48	0.26	14.00	10.74
CON-PH	1	20	10.63	6.35	0.21	14.00	10.74
CON-PH	1	30	15.78	8.39	0.17	14.00	10.74
CON-PH	2	10	12.49	5.71	0.28	25.93	11.65
CON-PH	2	20	11.74	5.61	0.27	25.93	11.65
CON-PH	2	30	4.11	1.80	0.70	25.93	11.65
CON-PH	3	10	12.38	7.29	0.18	12.06	11.21
CON-PH	3	20	17.14	10.24	0.13	12.06	11.21
CON-PH	3	30	6.74	4.84	0.28	12.06	11.21
CON-PH	4	10	13.41	7.36	0.19	23.52	10.59
CON-PH	4	20	15.54	7.67	0.21	23.52	10.59
CON-PH	4	30	16.42	7.69	0.21	23.52	10.59
CON-PH	5	10	16.07	6.86	0.23	25.93	11.65
CON-PH	5	20	18.21	8.60	0.18	25.93	11.65
CON-PH	5	30	19.53	9.27	0.17	25.93	11.65
TRT-PH	1	10	12.32	5.80	0.27	38.91	10.85
TRT-PH	1	20	11.81	6.29	0.25	38.91	10.85
TRT-PH	1	30	10.25	5.39	0.30	38.91	10.85
TRT-PH	2	10	9.20	5.14	0.28	16.38	10.83

TRT-PH	2	20	10.28	4.88	0.30	16.38	10.83
TRT-PH	2	30	18.01	7.61	0.23	16.38	10.83
TRT-PH	3	10	18.92	8.16	0.20	13.08	10.88
TRT-PH	3	20	10.93	4.71	0.32	13.08	10.88
TRT-PH	3	30	25.88	9.52	0.20	13.08	10.88
TRT-PH	4	10	11.58	7.98	0.16	19.04	10.57
TRT-PH	4	20	7.74	5.59	0.21	19.04	10.57
TRT-PH	4	30	5.89	4.63	0.25	19.04	10.57
TRT-PH	5	10	12.38	6.46	0.21	24.06	10.42
TRT-PH	5	20	8.26	4.94	0.26	24.06	10.42
TRT-PH	5	30	9.61	5.93	0.23	24.06	10.42

Anexo 28. Fotografías de las parcelas de estudio



Parcela tratamiento de precipitación vertical mostrando su condición estructural
Fotografía cortesía de Elias Condori, comunicación personal, 2023.



Vista superior de la parcela TRT-PV



Vista inferior de la parcela TRT-PV



Parcela tratamiento de precipitación horizontal mostrando su condición estructural
Fotografía cortesía de Scott Larotta, comunicación personal, 2024.



Vista de la estructura desde una de las torres en la parcela TRT-PH



Vista del exterior de la malla con presencia de niebla, evidenciando el contraste en la entrada dentro de la parcela

Fotografía cortesía de Scott Larotta, comunicación personal 2023.

Anexo 29. Galería fotográfica del trabajo realizado

	
Instalación y Extracción de núcleos de crecimiento en las parcelas control <i>Fotografías cortesía de Elias Condori, comunicación personal, 2022.</i>	
	
<i>Señalización de nucleo de crecimiento</i>	<i>Núcleo de crecimiento instalado en el suelo</i>



Material para la extracción de raíces finas.



Localización de los núcleos de crecimiento y TMS



Núcleo de crecimiento



*Selección de raíces finas según el método de colecta establecido para comunidad
Fotografías cortesía de Elias Condori, comunicación personal, 2022.*





Localización de las especies arbóreas para la colecta de las raíces finas



Material de campo



Material biológico



Selección de muestra y Pesado de la muestra

Fotografías cortesía de David Bartholomew, comunicación personal, 2022.



Descarga de datos de temperatura y humedad del suelo desde los TMS en las parcelas experimentales de Wayqecha.



Descarga de datos de la estación meteorológica de Wayqecha



Trabajo de gabinete en Cusco



Trabajo de gabinete en Cusco



Equipo de trabajo ABIDA
Fotografía cortesía de Elias Condori, comunicación personal, 2023.

Anexo 30. Constancia de depósito de las especies arbóreas estudiadas



Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO
ABAD DEL CUSCO**



HERBARIO VARGAS CUZ

CONSTANCIA DE DEPOSITO N° 002-2026-HVC-FCB-UNSAAC

El que suscribe, **M. Sc. Wilian Nazario Cárdenas Enríquez**, Director del **Herbario Vargas CUZ** de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, hace constar que:

El Sr. Darcy Fernando Galiano Cabrera, identificado con DNI N.° 40837070, en calidad de colaborador para el proyecto de investigación: **«BOSQUE NUBLADO SIN NUBES: ENTENDIENDO LA SENSIBILIDAD DE UN CENTRO GLOBAL DE BIODIVERSIDAD AL CAMBIO CLIMATICO»**.

Ha depositado en el Herbario Vargas CUZ un total de veintiocho (28) ejemplares de muestras botánicas (Tabla 1).

Asimismo, se deja constancia que la colecta del material vegetal fue autorizada mediante RJ N.° **000004-2024-SERNANP/PNMNU-SGD**.

Tabla 1. Lista de muestras depositadas al Herbario Vargas CUZ

N°	Colección**	Familia	Especie	Ejemplares
1	375	PRIMULACEAE	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	1
2	376	CUNONIACEAE	<i>Weinmannia crassifolia</i> Ruiz & Pav.	1
3	370	ERICACEAE	<i>Cavendishia bracteata</i> (Ruiz & Pav. ex J.St.Hil.)	1
4	393	CUNONIACEAE	<i>Weinmannia bangii</i> (Rusby) Engl.	1
5	371	CLETHRACEAE	<i>Clethra cuneata</i> Rusby	1
6	385	PODOCARPACEAE	<i>Podocarpus oleifolius</i> D.Don	1
7	377	CLUSIACEAE	<i>Clusia alata</i> Planch. & Triana Planch. & Triana	1
8	378	CLUSIACEAE	<i>Clusia flaviflora</i> Engl.	1
9	386	CLUSIACEAE	<i>Clusia trochiformis</i> Vesque	1
10	394	CHLORANTHACEAE	<i>Hedyosmum cuatrecasum</i> Occhioni	1
11	379	ROSACEAE	<i>Hesperomeles ferruginea</i> (Juss. ex Pers.) Benth.	1
12	387	CUNONIACEAE	<i>Weinmannia reticulata</i> Ruiz & Pav.	1
13	388	LAURACEAE	<i>Ocotea glabriflora</i> van der Werff	1
14	365	ROSACEAE	<i>Prunus integrifolia</i> (C.Presl) Walp.	1
15	372	ERICACEAE	<i>Bejaria aestuans</i> Mutis	1
16	389	SYMPLOCACEAE	<i>Symplocos baehnii</i> J.F.Macbr.	1
17	366	MELASTOMATACEAE	<i>Miconia micropetala</i> Cogn.	1
18	380	CLETHRACEAE	<i>Clethra revoluta</i> (Ruiz & Pav.) Spreng.	1
19	367	ERICACEAE	<i>Gaultheria reticulata</i> Kunth	1



N°	Colección**	Familia	Especie	Ejemplares
20	373	ARALIACEAE	<i>Sciodaphyllum allocotanthum</i> (Harms) Lowry, G.M.P lunkett & M.M.Mora	1
21	368	LAURACEAE	<i>Ocotea andina</i> van der Werff	1
22	374	CHLORANTHACEAE	<i>Hedyosmum goudotianum</i> Solms	1
23	395	ARALIACEAE	<i>Oreopanax cuspidatus</i> Harms	1
24	381	SABIACEAE	<i>Meliosma frondosa</i> Cuatrec. & Idrobo	1
25	369	MELASTOMATAACEAE	<i>Miconia adinantha</i> Wurdack	1
26	396*	CYATHEACEAE	<i>Cyathea caracasana</i> Domin (1 de 3)	1
27	396*	CYATHEACEAE	<i>Cyathea caracasana</i> Domin (2 de 3)	1
28	396*	CYATHEACEAE	<i>Cyathea caracasana</i> Domin (3 de 3)	1
28	Total			28

(*) Tres ejemplares que corresponde a una sola especie (un solo individuo)

(**) Colección: Numero de colección del colaborador/asistente (botánico).

Nota: La colecta de muestras botánicas de la familia Cyatheaceae requiere de tres secciones (ápice, medio y base de la fronda) motivo por el cual se listan tres ejemplares.

Se expide la presente constancia (Expediente N.º 26011671), a petición formal del interesado para los fines que viera por conveniente.

Blgo. Víctor Chama Moscoso
Curador del Herbario Vargas CUZ

Cusco, 05 de febrero del 2026

M. Sc. Wilian N. Cáceres Enriquez
Director del Herbario Vargas CUZ

Anexo 31. Autorización con fines de investigación científica para trabajar en el área de estudio**RESOLUCIÓN DIRECTORAL****VISTOS:**

La carta s/n, registrada con expediente N° 2021-0044861, de fecha 30 de noviembre de 2021, conteniendo la solicitud de autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, fuera de Áreas Naturales Protegidas, presentada por el señor **Daniel Benjamin Metcalfe** (en adelante, el administrado), de nacionalidad británica, identificado con Pasaporte N° 546736081, en calidad de investigador principal y profesor del Departamento de Ecología y Ciencias Ambientales de la Universidad de Umeå (Suecia); así como, el Informe Técnico N° D000002-2022-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPF-ICV, de fecha 18 de enero de 2022, y;

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 66 de la Constitución Política del Perú de 1993 establece que los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación; y el Estado es soberano en su aprovechamiento;

Que, el artículo 9 de la Ley N° 26821, Ley Orgánica para el aprovechamiento sostenible de los Recursos Naturales, establece que el Estado promueve la investigación científica y tecnológica sobre la diversidad, calidad, composición, potencialidad y gestión de los recursos naturales. Promueve, asimismo, la información y el conocimiento de los recursos naturales. Para estos efectos, podrán otorgarse permisos para investigación;

Que, mediante el artículo 13 de la Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, se creó el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR, como un organismo público técnico especializado con personería jurídica de derecho público interno, como pliego presupuestal adscrito al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego; artículo en el que además se señala que el SERFOR es la autoridad nacional forestal y de fauna silvestre, ente rector del Sistema Nacional de Gestión Forestal y de Fauna Silvestre, constituyendo su autoridad técnico normativa a nivel nacional, encargada de dictar las normas y establecer los procedimientos relacionados a su ámbito;

Que, a través del artículo 137 de la precitada Ley N° 29763, Ley Forestal y de Fauna Silvestre, se declara de interés nacional realizar la investigación, el desarrollo tecnológico, la mejora del conocimiento y el monitoreo del estado de conservación del patrimonio forestal y de fauna silvestre de la Nación;

Que, mediante el artículo 107 de la precedente ley citada, se establece que el SERFOR, en coordinación con las autoridades regionales forestales y de fauna silvestre, aprueba la lista de ecosistemas frágiles en concordancia con la Ley N° 28611 y su modificatoria¹, Ley General del Ambiente, con base en estudios técnicos e información científica disponible, en el ámbito

¹ Ley N° 29895, Ley que modifica el artículo 99 de la Ley 28611, Ley General del Ambiente, e incorpora los páramos y jalcas al conjunto de ecosistemas frágiles, publicado en el Diario Oficial El Peruano el 18 de junio de 2012.

de su competencia. Asimismo, en esta última ley citada y su modificatoria referido al numeral 99.2 del artículo 99° señala que los ecosistemas frágiles comprenden a los desiertos, tierras semiáridas, montañas, pantanos, páramos, jalcas, bofedales, bahías, islas pequeñas, *humedales, lagunas altoandinas*, lomas costeras, **bosques de neblina**, bosques relictos, páramos y jalcas;

Que, el artículo 140 de la Ley en mención, señala que el SERFOR evalúa y otorga la autorización para extracción de recursos forestales y de fauna silvestre con fines de investigación científica cuando: (i) se incluye especies amenazadas^{2,3}, (ii) especies consideradas en los Apéndices de CITES⁴, (iii) se realiza acceso a recursos genéticos sin fines de lucro; y (iv) propósitos culturales. Asimismo, en el citado artículo de la Ley indica que la colecta o extracción de recursos forestales y de fauna silvestre con fines de investigación orientada a determinación de genotipo, filogenia, sistemática y biogeografía es autorizada siguiendo procedimientos simplificados establecidos por el SERFOR; por lo que, la presente solicitud es competencia del SERFOR, toda vez que, el estudio es una investigación básica que involucra el uso de técnicas moleculares como parte de su metodología, para la identificación de los cambios en la población microbiana de muestras (suelo y agua) asociadas a las epífitas (principalmente, angiospermas, hepáticas y musgos) presentes en las parcelas propuestas; además, las plantas que involucra la investigación estarían incluidas en el listado de especies categorizadas como amenazadas según la normativa nacional (D.S. N° 043-2006-AG);

Que, mediante el artículo 1 de la Resolución de Dirección General N° D000627-2021-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS, de fecha 15 de noviembre de 2021, la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre delegó en la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal, la función de otorgar permisos de investigación o de difusión cultural con o sin colecta de flora silvestre y sus recursos genéticos, prevista en el literal g) del artículo 53 del Reglamento de Organización y Funciones del SERFOR, aprobado por Decreto Supremo N° 007-2013-MINAGRI y modificado por Decreto Supremo N° 016-2014-MINAGRI;

Que, a través del Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, que aprueba el Reglamento para la Gestión Forestal, regula el procedimiento de otorgamiento de autorizaciones con fines de investigación científica, señalando que la investigación del Patrimonio forestal se aprueba mediante autorizaciones, salvaguardando los derechos del país respecto a su patrimonio genético nativo; además, señala que el desarrollo de actividades de investigación básica taxonómica de flora silvestre que estén relacionados con estudios moleculares con fines taxonómicos, sistemáticos, filogeográficos, biogeográficos, evolutivos y de genética de la conservación, entre otras investigaciones; y establecen para tal efecto los requisitos y consideraciones para su otorgamiento, de acuerdo con los lineamientos aprobados por el SERFOR, concordante con el numeral 5.3.2 del citado lineamientos; así como, las obligaciones materia de cumplimiento por parte del titular de la autorización;

Que, a través del Decreto Supremo N° 008-2020-SA, publicado el 11 de marzo de 2020, se declaró en Emergencia Sanitaria a nivel nacional, por el plazo de noventa (90) días calendario, por la existencia del COVID-19; así como, por Decreto Supremo N° 020-2020-SA, Decreto Supremo N° 027-2020-SA, Decreto Supremo N° 031-2020-SA, Decreto Supremo N° 009-2021-SA y Decreto Supremo N° 025-2021-SA, la Emergencia Sanitaria fue ampliada hasta el 1 de marzo de 2022;

² Decreto Supremo N° 043-2006-AG. Aprueban categorización de especies amenazadas de flora silvestre.

³ Decreto Supremo N° 004-2014-MINAGRI. Actualización de la lista de clasificación y categorización de las especies amenazadas de fauna silvestre.

⁴ Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres.

Que, mediante Decreto Supremo N° 186-2021-PCM, se prórroga el Estado de Emergencia Nacional declarado mediante Decreto Supremo N° 184-2020-PCM, prorrogado por Decreto Supremo N° 201-2020-PCM, Decreto Supremo N° 008-2021-PCM, Decreto Supremo N° 036-2021-PCM, Decreto Supremo N° 058-2021-PCM, Decreto Supremo N° 076-2021-PCM, Decreto Supremo N° 105-2021-PCM, Decreto Supremo N° 123-2021-PCM, Decreto Supremo N° 131-2021-PCM, Decreto Supremo N° 149-2021-PCM, Decreto Supremo N° 152-2021-PCM, Decreto Supremo N° 167-2021-PCM y Decreto Supremo N° 174-2021-PCM, por el plazo de treinta y un (31) días calendario, a partir del sábado 1 de enero de 2022, por las graves circunstancias que afectan la vida de las personas a consecuencia de la COVID-19;

Que, mediante la Cuarta Disposición Complementaria Transitoria del Decreto Legislativo N° 1497, publicado el 10 de mayo de 2020, se dispuso la suspensión hasta el 31 de diciembre de 2020, de la aplicación del numeral 134.3 del artículo 134 del TUO de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, respecto a la obligación de la presentación física del escrito o documentación por parte de los administrados; suspensión que por Decreto Supremo N° 205-2020-PCM, publicado el 30 de diciembre de 2020, fue prorrogada hasta el 31 de diciembre de 2021;

Que, a través de la Resolución Ministerial N° 0152-2020-MINAGRI, expedida el 28 de junio de 2020, se aprobó los “Protocolos Sanitarios ante el COVID-19, para las actividades del Sector Agricultura y Riego”, los que en Anexo forma parte el “Protocolo Sanitario Sectorial ante el COVID-19 en la Actividad Forestal”;

Que, mediante carta s/n, registrada el 30 de noviembre de 2021, el administrado requirió a la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre la autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, fuera de Áreas Naturales Protegidas, como parte del proyecto titulado: *Ampliación y mejora de un experimento único de reducción de nubes para evaluar los impactos del cambio climático futuro en la ecología de los bosques nubosos tropicales (“Extending and enhancing a unique cloud reduction experiment to assess the impacts of future climate change on tropical cloud forest ecology”)*; a realizarse en la Estación Biológica Wayqecha, ubicada en el distrito de Kosñipata, provincia de Paucartambo, departamento de Cusco. Cabe mencionar que, la estación se encuentra en el Área de Conservación Privada Wayqecha;

Que, en el actual Texto Único de Procedimientos Administrativos - TUPA del SERFOR, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2016-MINAGRI y modificado por Resolución Ministerial N° 613-2016-MINAGRI, Resolución Ministerial N° 026-2019-MINAGRI, Resolución de Dirección Ejecutiva N° D000103-2020-MINAGRI-SERFOR-DE y Resolución de Dirección Ejecutiva N° D000099-2021-MIDAGRI-SERFOR-DE; no se contempla el procedimiento de autorización para realizar investigación científica fuera de ANP;

Que, en observancia del principio de impulso de oficio, el cual se encuentra previsto en el numeral 1.3 del artículo IV del Título Preliminar del Texto Único Ordenado - TUO de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado por Decreto Supremo N° 004-2019-JUS; se desprende que las autoridades deben dirigir e impulsar de oficio el procedimiento y ordenar la realización o práctica de los actos que resulten convenientes para el esclarecimiento y resolución de las cuestiones necesarias;

Que, por tanto, en ese sentido, la solicitud en evaluación aplica lo dispuesto en el numeral 9⁵ del ANEXO N° 1 del Reglamento para la Gestión Forestal, establece los requisitos para la solicitud de autorizaciones con fines de investigación de flora silvestre en concordancia con el numeral 6.6 de los lineamientos aprobados por Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE, se establecen los siguientes requisitos para la autorización con fines de investigación científica fuera de ANP: i) Solicitud con carácter de declaración jurada que contenga información sobre el investigador, según formato; ii) Hoja de vida del investigador principal y plan de investigación, según formato; iii) Carta de presentación de los investigadores participantes, emitida por la institución académica u organización científica nacional o extranjera de procedencia; iv) Documento que acredite el consentimiento informado previo, expedido por la respectiva organización comunal representativa, de corresponder; y v) Documento que acredite el acuerdo entre las instituciones que respaldan a los investigadores nacionales y extranjeros, en caso la solicitud sea presentada por un investigador extranjero;

Que, asimismo en el marco de lo establecido en el numeral 2.2 del artículo 2 del Decreto Supremo N° 010-2015-MINAM y su modificatoria⁶, promueve el desarrollo de investigaciones al interior de las áreas naturales protegidas, señalando que las investigaciones que se desarrollen al interior de zonas de amortiguamiento, áreas de conservación regional y áreas de conservación privada se regirán de acuerdo a la legislación forestal y de fauna silvestre, como consecuencia recae su competencia ante el SERFOR o ARFFS;

Que, mediante el artículo 48 de la Resolución Presidencial N° 214-2021-SERNANP, vigente desde el 7 de octubre de 2021 dispone que las investigaciones que se desarrollen al interior de las zonas de amortiguamiento de las ANP de nivel nacional no requieren opinión del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado - SERNANP, dado que éstas son autorizadas por las autoridades que resulten competentes en dicho ámbito;

Que, mediante Carta N° D000294-2021-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPF notificada el 14 de diciembre de 2021 a la dirección electrónica autorizada en la solicitud (daniel.metcalfe@umu.se), la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal (DGSPF) informó observaciones referidas a los requisitos y al plan de investigación, siendo las siguientes: 1) presentar el documento en el cual se acredite el acuerdo entre las instituciones que respaldan a los investigadores nacionales y extranjeros; 2) se puso en conocimiento que las investigaciones desarrolladas en predios privados deben contar con su autorización de ingreso; 3) el documento debe estar redactado en tiempo futuro; 4) aclarar lo relacionado sobre la adecuación de las áreas donde se desarrollará el experimento de “reducción de nubes”; 5) respecto al numeral 5, métodos y técnicas con referencia a la pregunta 2 del plan de investigación: i) señalar de donde se obtendrán las semillas que serán plantadas en el suelo y en el sustrato acumulado en las ramas, y si ya tienen identificadas las especies con las que se trabajarán, ii) indicar la técnica o método que empleará en la identificación de los microorganismos asociados a las muestras de suelo y agua que se almacenan en las epífitas, e incluirlo en detalle y justificación del material de colecta, iii) señalar que parte de la planta de los árboles adultos y las epífitas utilizarán para analizar el

⁵ El numeral 9 del ANEXO N° 1 del Reglamento para la Gestión Forestal, establece los requisitos para la autorización con fines de investigación de flora, con o sin contrato de acceso a recursos genéticos, conforme la siguiente documentación:

- a. Solicitud con carácter de declaración jurada dirigida a la autoridad competente, según formato, que contenga hoja de vida del investigador principal, relación de investigadores y el Plan de Investigación.
- b. Carta de presentación de los investigadores participantes expedida por la institución científica de procedencia.
- c. Documento que acredite el consentimiento informado previo, expedido por la respectiva organización comunal representativa, de corresponder.
- d. Documento que acredite el acuerdo entre las instituciones que respaldan a los investigadores nacionales y extranjeros, en caso la solicitud sea presentada por un investigador extranjero.

⁶ Resolución Presidencial N° 214-2021-SERNANP, de fecha 7 de octubre de 2021. Aprueban Disposiciones Complementarias al D.S. N° 010-2015-MINAM que promueve el desarrollo de investigaciones en Áreas Naturales Protegidas.

contenido de agua y el flujo de carbono, iv) identificar e indicar el tipo de muestra que requiere para realizar el análisis de biomasa; 6) sobre la pregunta 3 de métodos y técnicas, aclarar cuando hace referencia al tiempo de seguimiento, considerando su estudio se desarrollará 24 meses; 7) sobre la pregunta 4 de métodos y técnicas incluir en el numeral 6 el tipo de muestras que empleará para los fines de determinar la conductividad hidráulica y vulnerabilidad al embolismo, y también indicar el tipo de muestra y cantidad que será necesaria para realizar el análisis del crecimiento de anillos; 8) reformular el cuadro de material biológico a coleccionar de acuerdo al tipo de muestra y los fines en que se enmarca su estudio, además indicar de qué forma se asegurará la identidad taxonómica de las especies con las que trabajará; 9) señalar el número de meses que requiere para desarrollar su investigación, y en actividades del cronograma de trabajo incluir la entrega del informe final al SERFOR, 10) incluir las medidas establecidas en la Resolución Ministerial N° 152-2020-MINAGRI, de fecha 28 de junio de 2020, que aprueba los protocolos sanitarios, donde uno de ellos es el relacionado al “Protocolo Sanitario Sectorial ante el COVID-19 en la Actividad Forestal”, para lo cual se les otorgó un plazo de diez (10) días hábiles para la subsanación de las observaciones emitidas;

Que, mediante carta s/n, registrada con expediente N° 2022-0000114 de fecha 4 de enero de 2022, el administrado remitió a la DGSPF la subsanación de observaciones efectuadas señalando lo siguiente: 1) presentó el documento “Convenio de Cooperación” entre la Universidad de Umeå y la Asociación Civil sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA, 2) presentó la autorización de ingreso a la Estación Biológica Wayqecha, 3) actualizó el tiempo a futuro en la redacción del plan de investigación, 4) aclaró que para realizar el experimento se basa en lo desarrollado en anteriores autorizaciones otorgadas en la misma estación, 5) detalló y precisó de donde provendrán las semillas y que serán seleccionadas cuando se realice el trabajo en campo, estudiar los cambios en la población microbiana de muestras asociadas a las epífitas que se realizará a través de técnicas moleculares, señalan la parte de la planta que empleará para el análisis del contenido de agua y flujo de carbono, e indica el tipo de muestra para los análisis de biomasa, 7) señaló que se realizará las mediciones regulares de carbono en las parcelas de tratamiento de forma continua por dos años, 8) reformuló el cuadro referido a la colecta del material biológico y muestras asociadas de acuerdo a su finalidad y objetivos planteados objeto de su estudio, 9) señaló que requiere 24 meses para ejecutar su investigación e incluye en cronograma de trabajo la entrega del informe final al SERFOR, 10) presentó las medidas que seguirá en base al “Protocolo Sanitario Sectorial ante el COVID-19 en la Actividad Forestal”;

Que, en ese sentido la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal (DGSPF) a través del Informe Técnico N° D000002-2022-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS-DGSPF-ICV, emitido de fecha 18 de enero de 2022; se desprende que, el administrado absolvió las observaciones efectuadas; concluyendo que, la solicitud de investigación científica de flora silvestre cumple con los requisitos exigidos en el numeral 9 del Anexo N° 1 del Reglamento para la Gestión Forestal y con los “Lineamientos para el otorgamiento de la autorización con fines de investigación científica de flora y/o fauna silvestre”, aprobado mediante Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE; así como, con los criterios para su ejecución;

Que, asimismo, se considera viable el plazo propuesto para el desarrollo de las actividades con fines de investigación de flora silvestre, esto es, por el periodo de veinticuatro (24) meses, recomendándose la aprobación de la referida solicitud de investigación científica de flora silvestre, en el marco del proyecto titulado: *Ampliación y mejora de un experimento único de reducción de nubes para evaluar los impactos del cambio climático futuro en la ecología de los bosques nubosos tropicales* (“*Extending and enhancing a unique cloud*

reduction experiment to assess the impacts of future climate change on tropical cloud forest ecology”);

Que, finalmente, en dicho informe se señala que reviste de importancia, porque proporcionará importantes aportes para otros estudios científicos en el futuro sobre los bosques nublados y su respuesta frente al cambio climático. Asimismo, se entenderá el efecto de la reducción del ingreso del agua en la diversidad, fisiología e hidrología de los bosques de neblina de la estación de Wayqecha, para la mejora en la toma de decisiones para su conservación y gestión sostenible;

Que, por otro lado, el artículo 158° del Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI, establece como obligaciones del investigador en flora silvestre las siguientes:

- “a. No extraer especímenes, ni muestras biológicas, de flora silvestre no autorizada; no ceder los mismos a terceras personas, ni utilizarlos para fines distintos a lo autorizado.*
- b. Entregar al SERFOR un informe final, en idioma español y en versión digital, como resultado de la autorización otorgada, así como copia de las publicaciones producto de la investigación realizada, e indicar el número de la Autorización en las publicaciones generadas. Esta información es ingresada al SNIFFS.*
- c. Depositar el material colectado en una institución científica nacional depositaria de material biológico, así como entregar al SERFOR la constancia de dicho depósito. En casos debidamente justificados, y siempre que el material colectado no constituya holotipos ni ejemplares únicos, el depósito se podrá realizar en una institución distinta a la mencionada; para ello se requiere la autorización del SERFOR.*
- d. Incluir a por lo menos un investigador nacional, cuando la autorización de investigación sea requerida por extranjeros.*
- e. Incluir en las publicaciones el reconocimiento correspondiente al investigador nacional que participó en la investigación, en caso la autorización haya sido otorgada a investigadores extranjeros.”*

Que, asimismo, en el marco de la autorización otorgada, el administrado considerará los siguientes compromisos:

- a. Comunicar con la debida anticipación a la Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre de Cusco del SERFOR; así como, a la jefatura del Parque Nacional del Manú, el ingreso y salida a campo.*
- b. Indicar el número de la resolución en las publicaciones generadas a partir de la autorización concedida.*
- c. Solicitar anticipadamente ante la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal del SERFOR y dentro del periodo del cronograma de trabajo del plan de investigación, cualquier cambio en las características del estudio aprobado (por ejemplo, cronograma, inclusión de especialistas, etc.), que demande la modificación de la presente resolución.*
- d. En caso sobrevenga algún hecho o evento que imposibilite la ejecución de la investigación autorizada o que origine que no se pueda continuar con el desarrollo de la misma, corresponde al administrado solicitar por escrito ante la Dirección de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal del SERFOR, la renuncia a la autorización otorgada; renuncia que deberá ser solicitada dentro del plazo de vigencia de la autorización, precisándose el hecho o evento que origina la imposibilidad de ejecutar o de continuar ejecutando la investigación aprobada, debiendo además el administrado adjuntar la documentación de sustento que estime*

necesaria, de ser el caso.

Que, por otro lado, el artículo 100 del Reglamento para la Gestión Sostenible de Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre en Comunidades Nativas y Comunidades Campesinas, señala lo siguiente:

“Investigaciones científicas realizadas dentro de las tierras de comunidades campesinas y comunidades nativas

Toda investigación científica en materia forestal y de fauna silvestre a realizarse dentro de tierras de comunidades campesinas o comunidades nativas, requiere de la autorización expresa de la comunidad y autorización otorgada por la autoridad correspondiente. (...).”

Que, en adición a ello, debemos precisar que, la presente autorización no habilita el ingreso a predios privados, en cuyos casos, deberán gestionar la autorización de ingreso correspondiente ante la autoridad o titular, según corresponda; siendo en este caso que, cuenta con la autorización respectiva para el ingreso a la Estación Biológica de Wayqecha;

Que, en ese sentido, en caso la ejecución de la investigación comprenda el ingreso a territorios de Comunidades Campesinas o Comunidades Nativas, previamente deberá solicitarse la autorización correspondiente;

Que, de conformidad con la Ley Forestal y de Fauna Silvestre, aprobada por Ley N° 29763; el Reglamento para la Gestión Forestal, aprobado mediante Decreto Supremo N° 018-2015-MINAGRI; el Decreto Supremo N° 004-2019-JUS que aprueba el Texto Único Ordenado de la Ley N° 27444 Ley del Procedimiento Administrativo General; el literal g) del Artículo 53° del Reglamento de Organización y Funciones aprobado por Decreto Supremo N° 007-2013-MINAGRI, así como su modificatoria mediante Decreto Supremo N° 014-2016-MINAGRI; la Resolución de Dirección Ejecutiva N° 060-2016-SERFOR/DE; así como, en ejercicio de la función delegada a través del artículo 1° de la Resolución de Dirección General N° D000627-2021-MIDAGRI-SERFOR-DGGSPFFS;

SE RESUELVE:

Artículo 1.- OTORGAR la autorización con fines de investigación científica de flora silvestre, fuera de Áreas Naturales Protegidas (ANP), al señor **Daniel Benjamin Metcalfe**, de nacionalidad británica, identificado con Pasaporte N° 546736081, correspondiéndole el Código de Autorización **N° AUT-IFL-2022-001**; para desarrollar el proyecto titulado: *Ampliación y mejora de un experimento único de reducción de nubes para evaluar los impactos del cambio climático futuro en la ecología de los bosques nubosos tropicales* (“*Extending and enhancing a unique cloud reduction experiment to assess the impacts of future climate change on tropical cloud forest ecology*”), conforme a las coordenadas referenciales UTM 19L 219462 E, 8540024 N; cuya vigencia se contabilizará desde el día siguiente hábil de su notificación.

Artículo 2.- Autorizar la participación de los investigadores señalados por el administrado, conforme al cuadro n° 1 del **Anexo 1** de la presente resolución.

Artículo 3.- El administrado se encuentra sujeto al cumplimiento de lo presentado en el plan de investigación y al plazo correspondiente a veinticuatro (24) meses; así como, la colecta de muestras biológicas de flora silvestre relacionadas a las estructuras botánicas como hojas, tallos, ramas, entre otros, así como muestras asociadas a las plantas epífitas y

la vegetación por parcela de evaluación, de acuerdo con lo detallado en el cuadro n° 2 del **Anexo 2** de la presente resolución.

Artículo 4.- El administrado y el equipo de investigación deberán implementar las medidas dispuestas en el “Protocolo Sanitario Sectorial ante el COVID-19 en la Actividad Forestal” establecida en la Resolución Ministerial N°152-2020-MINAGRI, de fecha 28 de junio de 2020, en lo que resulte aplicable.

Artículo 5.- La presentación del Informe Final en versión digital como resultado de la autorización otorgada, se realizará de acuerdo con los términos señalados en el **Anexo 3** de la presente resolución, la misma que será presentada dentro de los noventa (90) días calendarios posteriores a la culminación de la investigación.

Artículo 6.- La presente autorización no limita el ejercicio de las funciones y/o requisitos de las entidades, en los ámbitos en los que se realice la investigación (ARFFS, ACR, ACP y otros).

Artículo 7.- Toda modificación en el desarrollo de la investigación será comunicada al SERFOR dentro del plazo de vigencia de la presente resolución.

Artículo 8.- La presente autorización no habilita la exportación de muestras botánicas, en caso se requiera realizar esta actividad, el administrado y el equipo de investigación identificado en la presente resolución, podrá gestionar el correspondiente Permiso de Exportación ante la Dirección General de Gestión Sostenible del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre del SERFOR. Los ejemplares únicos de los grupos taxonómicos colectados y holotipos sólo podrán ser exportados en calidad de préstamo.

Artículo 9.- Notificar la presente resolución directoral al señor **Daniel Benjamin Metcalfe**, a efectos de que tome conocimiento de su contenido. Asimismo, informarle que, de creerlo conveniente, tiene el derecho de interponer los recursos impugnativos contemplados en el TUO de la Ley N° 27444, dentro del plazo de quince (15) días hábiles más el término de la distancia, en caso corresponda, contados a partir del día siguiente de notificada la misma.

Artículo 10.- Remitir la presente resolución a la Dirección de Información y Registro, a la Dirección de Control de la Gestión del Patrimonio Forestal y de Fauna Silvestre, a la Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre de Cusco del SERFOR; así como, al jefe de la Estación Biológica de Wayqecha y al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado; para su conocimiento y fines pertinentes.

Artículo 11.- Disponer la publicación de la presente resolución en el Portal Web del SERFOR: www.gob.pe/serfor

Regístrese y comuníquese,

Documento Firmado Digitalmente

HENRY SANABRIA VILLALVA

Director

Dirección de Gestión Sostenible del
Patrimonio Forestal

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre - SERFOR

ANEXO 1

Cuadro N° 1. Datos de los investigadores que participarán en la presente investigación

Nombres y Apellidos	Nacionalidad	Documento de identidad	Participación en el proyecto	Institución de procedencia
Daniel Benjamin Metcalfe	Británico	Pasaporte N° 546736081	Investigador principal	Umeå University, Suecia
Heidi Asbjornsen	Estadounidense	Pasaporte N° 568700183	Coinvestigadora	University of New Hampshire, Estados Unidos
Emily Anders	Estadounidense	Pasaporte N° 540219903	Estudiante	University of New Hampshire, Estados Unidos
Sybil Gotsch	Estadounidense	Pasaporte N° 505603209	Coinvestigadora	Franklin and Marshall College, Estados Unidos
David Clive Bartholomew	Británica	Pasaporte N° 556964990	Colaborador	Umeå University, Suecia
Beisit Luz Puma Vilca	Peruana	DNI N° 46022946	Colaboradora	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA
María Edith Ezquerra Condori	Peruana	DNI N° 44585305	Asistente de investigación	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA
Roxana Sacatuma Cruz	Peruana	DNI N° 45026872	Asistente de investigación	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA
Daniela Corrales Alvarez	Peruana	DNI N° 74912296	Asistente	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA
Blanca Rosa Espinoza Otazu	Peruana	DNI N° 48563079	Asistente	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA
When Dennis Sullca Gutiérrez	Peruana	DNI N° 47975955	Asistente	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA
Jesús Manuel Bañón Sánchez	Peruana	DNI N° 70381281	Asistente	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA

Nombres y Apellidos	Nacionalidad	Documento de identidad	Participación en el proyecto	Institución de procedencia
Darcy Fernando Galiano Cabrera	Peruana	DNI N° 40837070	Colaborador	Asociación Civil Sin Fines de Lucro para la Biodiversidad, Investigación y Desarrollo Ambiental en Ecosistemas Tropicales - ABIDA

ANEXO 2

Cuadro N° 2. Detalle de la colecta del material biológico de flora silvestre y muestras asociadas por parcela de evaluación

Grupo taxonómico	Género	Tipo de muestra	Cantidad	Finalidad de la colecta
Angiospermas	<i>Alnus, Clethra, Prunus, Weinmannia, Ocotea, Clusia, Miconia, Myrsine</i>	Hojas	50 muestras por parcela evaluada	Análisis químico
Angiospermas		Tallo	50 muestras por parcela evaluada	Análisis químico
Angiospermas		Raíz	50 muestras por parcela evaluada	Análisis químico
Angiospermas		Muestras cilíndricas del tallo	1 muestra por árbol, 8-10 árboles por parcela evaluada	Análisis del crecimiento de anillos
Angiospermas		Ramas de la copa	3 muestras por árbol, 8-10 árboles por parcela evaluada	Análisis de conductividad hidráulica y vulnerabilidad al embolismo
Angiospermas		Hojas	3 muestras por árbol, 8-10 árboles por parcela evaluada	Análisis isotópos de savia extraída de las hojas
Angiospermas		Hojas	3 muestras por árbol, 8-10 árboles por parcela evaluada	Análisis de las reservas de carbohidratos
Angiospermas	<i>Greigia, Puya, Tillandsia</i>	Hojas	50 muestras por parcela evaluada	Análisis químico
Angiospermas		Muestras de agua almacenada en los epífitos	1 muestra por especie, 5 especie por parcela evaluada	Análisis de la población microbiana
Hepáticas	<i>Marchantia, Preissia, Radula, Riccardia, Scapania, Bazzania, Herbertus, Plagiochila, Riccardia</i>	Hojas	50 muestras por parcela evaluada	Análisis químico
		Muestras de agua almacenada en los epífitos	1 muestra por especie, 5 especie por parcela evaluada	Análisis de la población microbiana
Musgo	<i>Ctenidium, Cyclocladus, Dicranum, Drepanocladus, Leptodontium, Phyllogonium, Plagiothecium, Racopilum, Rhodobryum, Zygodon, Dicranum</i>	Hojas	50 muestras por parcela evaluada	Análisis químico
		Muestras de agua almacenada en los epífitos	1 muestra por especie, 5 especie por parcela evaluada	Análisis de la población microbiana
-	-	Suelo	100 muestras (~0.5 kg) por parcela	Análisis isotópos
-	-	Agua	100 muestras (~30ml) por parcela	