

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ciencias Sociales

Escuela de Geografía

Trabajo final de graduación en la modalidad de tesis para optar por el grado de Licenciatura en Geografía.

PATRONES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN LADERAS DE LA MICROCUENCA DEL RÍO SAN LORENCITO.

Estudiante:

Andrés David Chavarría Palma

B31842

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

2019

Tribunal Examinador

Dr. Christian Birkel
Director de Tesis

Lic. Bryan Alemán Montes
Lector Evaluador

PhD. Ricardo Sánchez Murillo
Lector Evaluador

Dr. Víctor Cortés Granados
Lector Examinador

M.Sc. Francisco Solano Mata
Lector Examinador

Bach. Andrés David Chavarría Palma
Candidato

Agradecimientos

Índice

Lista de Figuras	X
Abreviaturas utilizadas	XI
Resumen	XII
Introducción	1
Capítulo 1. Aspectos generales	3
1.1 Área de estudio.....	3
1.2 Periodo de estudio.....	4
1.3 Problema de investigación.....	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
1.6 Antecedentes.....	7
1.7 Marco teórico.....	12
1.7.1 Hidrogeopedología: Interacción Agua-Suelo.....	12
1.7.2 La importancia de la humedad del suelo en el contexto de la microcuenca del Río San Lorencito.....	13
1.7.3 Estudios de variables hidrogeopedológicas en laderas.....	15
1.7.4 Aporte geográfico a la investigación.....	17
1.8 Marco metodológico.....	18
1.8.1 Metodología del primer objetivo específico.....	18
1.8.2 Metodología del segundo objetivo específico.....	21
1.8.3 Metodología del tercer objetivo específico.....	24
Capítulo 2. Caracterización biofísica del área de estudio	26
2.1 Ubicación geográfica.....	26
2.2 Climatología e Hidrología.....	26
2.3 Geoformas: Materiales, evolución y distribución.....	29
2.4 Geopedología: Tipos de suelo, distribución y características físicas-químicas.....	33
2.4.1 Características físicas del suelo en laderas A y B.....	34
2.4.1.1 Horizontes.....	34

2.4.1.2 Textura.....	35
2.4.1.3 Capacidad de almacenamiento de humedad.....	36
2.4.1.4 Infiltración.....	36
2.5 Cobertura vegetal.....	38
Capítulo 3. Patrones de humedad en el suelo a eventos hidrometeorológicos	40
3.1 Comportamiento anual de la humedad en el suelo.....	40
3.2 Patrones espaciales de humedad en el suelo según la estacionalidad climática.....	41
3.2.1 Evento hidrometeorológico de diciembre 2016.....	41
3.2.1.1 Ladera A.....	42
3.2.1.2 Ladera B.....	43
3.2.2 Evento hidrometeorológico de marzo 2017.....	44
3.2.2.1 Ladera A.....	45
3.2.2.2 Ladera B.....	47
3.2.3 Evento hidrometeorológico de mayo 2017.....	48
3.2.3.1 Ladera A.....	49
3.2.3.2 Ladera B.....	49
3.2.4 Evento hidrometeorológico de agosto 2017.....	50
3.2.4.1 Ladera A.....	51
3.2.4.2 Ladera B.....	52
Capítulo 4. Relación de los factores biofísicos en laderas con la dinámica espacio-temporal de la humedad en el suelo y su conectividad hidrológica	54
4.1 Almacenamiento de agua en la cuenca (ΔS): Porción de humedad en el suelo.....	54
4.1.1 Ladera A.....	57
4.1.2 Ladera B.....	57
4.2 Correlaciones espaciales.....	58
4.2.1 Correlación de los niveles de humedad en el suelo con variables geomorfológicas, de vegetación y de física de suelos.....	58
4.2.2 Correlación de los niveles de humedad en el suelo con variables hidrometeorológicas.....	61
4.2.2.1 Ladera A.....	62
4.2.2.2 Ladera B.....	63

4.3 Correlaciones temporales.....	64
4.3.1 Correlación de variables temporales en Ladera A.....	67
4.3.2 Correlación de variables temporales en Ladera B.....	69
Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	73
Bibliografía.....	74
Anexo 1. Balance hidrológico, propiedades físicas del suelo y características hidrometeorológicas.....	79
Cuadro 1. Balance hidrológico mensual general.....	79
Cuadro 2. Cuadro de las propiedades físicas del suelo para los puntos de muestra en ladera A (verde) y ladera B (rojo).....	80
Cuadro 3. Características hidrológicas registradas durante los eventos de tormenta seleccionados en ladera A (verde) y B (rojo). Continúa.....	81
Cuadro 4. Balance hidrológico mensual en ladera A (verde) y ladera B (rojo), Noviembre 2016 - Octubre 2017.....	85
Cuadro 5. Matriz de variables biofísicas para cada punto de muestreo, en ambas laderas (A en verde y B en rojo); utilizada para el proceso de correlación de variables por el método Spearman.....	86
Anexo 2. Propiedades físicas del suelo de las laderas, condiciones hidrometeorológicas del sitio, patrones de humedad en el suelo y coeficientes de correlación espacio-temporales de variables biofísicas.....	87
Figura 1. Perfiles comunes del suelo en ladera A y B.....	87
Figura 2. Dinámica anual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal (noviembre 2016 – octubre 2017) con eventos seleccionados marcados en color naranja.....	88
Figura 3. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; diciembre 2016.....	89
Figura 4. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post evento en ladera A; 26 de diciembre, 2016.....	89
Figura 5. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; diciembre 2016.....	90
Figura 6. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra	

gris) y post-evento en ladera B; 26 de diciembre, 2016.....	90
Figura 7. Arriba inámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; marzo 2017.....	91
Figura 8. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera A; 20-21 de marzo, 2017.....	91
Figura 9. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; marzo 2017.....	92
Figura 10. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera B; 20-21 de marzo, 2017.....	92
Figura 11. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; mayo 2017.....	93
Figura 12. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera A; 28 de mayo, 2017.....	93
Figura 13. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; mayo 2017.....	94
Figura 14. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera B; 28 de mayo, 2017.....	94
Figura 15. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; agosto 2017.....	95
Figura 16. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera A; 27 de agosto, 2017.....	95
Figura 17. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; agosto 2017.....	96
Figura 18. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera B; 27 de agosto, 2017.....	96
Figura 19. Balance hidrológico mensual, Noviembre 2016 - Octubre 2017.....	97
Figura 20. A la izquierda la matriz de correlación de variables físicas de suelo (porosidad, espacio aéreo, conductividad hidráulica, porcentaje de partículas, humedad gravimétrica y volumétrica, y densidad aparente), topográficas (altitud, pendiente y TWI), de vegetación (LAI); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades.....	98
Figura 21. A la derecha la matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de	

los coeficientes de correlación Spearman en la figura 20.....	98
Figura 22. Matriz de coeficientes de correlación de variables hidrometeorológicas (caudal, precipitación, evapotranspiración, intensidad de lluvia y almacenamiento de humedad); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades de ladera A.....	99
Figura 23. Matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 22.....	99
Figura 24. Matriz de coeficientes de correlación de variables hidrometeorológicas (caudal, precipitación, evapotranspiración, intensidad de lluvia y almacenamiento de humedad); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades en ladera B.....	100
Figura 25. Matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 24.....	100
Figura 26. Matriz de correlación temporal de variables hidrometeorológicas (caudal, precipitación, evapotranspiración e intensidad de lluvia); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades de los puntos en ladera A (SL1, SL2 y SL3) y ladera B (SL4 y SL5).....	101
Figura 27. Matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 26.....	102
Figura 29. A la derecha, matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 28.....	103
Figura 30. A la izquierda, matriz de coeficientes de correlación temporal entre profundidades de los puntos en ladera A.....	104
Figura 31. A la derecha, matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 30.....	104
Figura 32. Modelo ilustrativo de la conectividad ladera-río para ambas laderas del Río San Lorencito.....	105

Lista de Figuras

Figura 1. La cuenca de estudio del Río San Lorencito (c) en el contexto nacional y regional (a y b). Panel d muestra una vista aérea del valle en V del río con ambas laderas, y en e se visualizan la ubicación de los puntos del monitoreo. Fuente: Elaboración propia con datos del SNIT, 2019; SRTM - NASA, 2008.....	4
Figura 2. Equipo utilizado en campo para la toma de datos de contenido volumétrico de humedad (A), caudal por medio de correntómetro (B) y parámetros de calidad de agua (C).....	22
Figura 3. Método de experimentación para el cálculo de conductividad hidráulica mediante la ley de Darcy, el cual mide el flujo de líquidos en medios porosos. Los horizontes analizados mediante esta técnica fueron 10 cm, 30 cm y 50 cm, debido a su naturaleza de mejor permeabilidad.....	24
Figura 4. Variabilidad hidrometeorológica Noviembre 2016 - Noviembre 2017, en la cuenca del Río San Lorencito. Precipitación en mm/30 min (panel superior), caudal en m ³ /s (panel medio) y evapotranspiración en mm/30 min (panel inferior).....	28
Figura 6. Variables físicas de la cabecera de cuenca del Río San Lorencito.....	32
Figura 7. Proceso incipiente de proceso de pedogénesis superficial en una terraza de sedimentos coluvio-aluvial del Río San Lorencito, San Ramón.....	34

Abreviaturas utilizadas

ACCVC: Área de Conservación Cordillera Volcánica Central

Ant1: Antecedentes de precipitación de 1 día (mm)

Ant3: Antecedentes de precipitación de 3 días (mm)

Ant7: Antecedentes de precipitación de 7 días (mm)

BLT: Bosque lluvioso tropical

DT: Duración de la tormenta (horas)

ET: Evapotranspiración (mm)

I_Max: Intensidad máxima de la precipitación (mm/h)

I_Prom: Intensidad promedio de la precipitación (mm/h)

LAI: Leaf Area Index (Índice de área foliar)

msnm: Metros sobre el nivel del mar

Max: Valor máximo de humedad durante el evento (mm/100 mm de suelo)

Min: Valor mínimo de humedad durante el evento (mm/100 mm de suelo)

P: Precipitación (mm)

Prof: Profundidad (cm)

Prom: Valor promedio de humedad durante el evento (mm/100 mm de suelo)

Q: Caudal (m³/s o mm)

T: Goteo (*Throughfall*)

TR: Tiempo de retraso entre valor inicial de humedad y valor máximo (horas)

TWI: Topographical Wetness Index (Índice de humedad topográfica)

ReBAMB: Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes

UCR: Universidad de Costa Rica

ZCT: Zona Crítica Terrestre

ΔS : Almacenamiento de agua (mm)

Resumen

Los patrones espaciales y temporales de la humedad en suelos manifiestan gran sintonía con el régimen de lluvia, las propiedades de infiltración en suelos y su distribución, el rol ecohidrológico del bosque y el control topográfico de pendientes. El conocimiento de la dinámica de la humedad en el suelo ayuda a desarrollar balances hidrológicos mejor diseñados que contribuyen a un manejo óptimo de las unidades que conforman la cuenca. En la cabecera de cuenca del Rio San Lorencito (3,26 km²), Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes (ReBAMB), se encontró que durante la estación lluviosa los contenidos de humedad en el suelo en ambas laderas del río se duplican o más en comparación con la estación seca. La estacionalidad climática es un factor que alterna la predominancia de los procesos hidrológicos en laderas: en estación seca dominan procesos de infiltración y almacenamiento de humedad en las laderas, y en estación lluviosa la activación de flujos laterales subsuperficiales transportados a través de conductos preferenciales. Se registra una alta capacidad de transferencias de agua a través de los suelos de la cuenca debido a altos indicadores de porosidad, conductividad hidráulica, texturas gruesas en las partículas del suelo de las laderas y baja densidad aparente. Además, las zonas de mayor contenido volumétrico de humedad en ambas laderas coinciden en áreas cercanas al río, de menores pendientes y densa vegetación; mientras que las zonas de menor contenido de humedad se comportan inversamente. La extensión de estas zonas de humedad aumentan su área durante la estación lluviosa, incidiendo en un vínculo más fuerte de conectividad hidrológica entre ladera y río durante periodos húmedos. Las mediciones de humedad de suelo permitieron construir balances hidrológicos más integrales al incorporar la variabilidad del volumen almacenado en el suelo. De esta forma se conoció mejor la importancia del aporte de la humedad en laderas con respecto a aquellos meses de déficit y superávit de agua en el año de análisis.

Introducción

El Bosque Lluvioso Tropical (BLT) representa uno de los ecosistemas más diversos, dinámicos y ricos en la provisión de servicios ecosistémicos tales como oxígeno, plantas medicinales, biodiversidad, recurso hídrico y entre otros. Se le considera un ambiente frágil por su dependencia a un alto régimen de precipitaciones, que por el aumento de la temperatura global y la posible disminución de lluvia anual, pone en riesgo la funcionalidad de su estructura y las relaciones biogeoquímicas que este tipo de bosque posee (*Hunter, 2017*).

La fragilidad del BLT radica en el potencial debilitamiento del principal rasgo característico que poseen estos sitios: la abundante presencia del agua como motor principal de las relaciones ecológicas. Ante algún escenario de desequilibrio hídrico en estos ecosistemas, ya sean sequías o estaciones secas prolongadas, es muy probable que se empiece a experimentar obstáculos en el funcionamiento ecológico del BLT, consecuentemente afectando las comunidades dependientes de la producción de recursos naturales en estos sitios. Por esto el agua se considera la «sangre» que alimenta los flujos de vida que se movilizan dentro de estos ecosistemas, permitiendo así la preservación genética de flora y fauna, el fortalecimiento del hábitat de especies y la provisión de recursos naturales esenciales (*Bruijnzeel, Mulligan, y Scatena, 2011*).

La importancia en los estudios del agua para este ecosistema muestra la necesidad de monitorear y comprender el estado de este para el mantenimiento y buen funcionamiento. Los procesos hidrológicos en el trópico lluvioso son sumamente dinámicos, por lo que su variabilidad exige mejores técnicas de medición para investigar. Para interpretar el BLT en cuanto al recurso hídrico de calidad y cantidad, se debe conocer detalladamente el proceso de tránsito del agua por la unidad geográfica de cuenca.

La práctica de la Geografía desde un abordaje Hidrológico busca una comprensión detallada de los procesos hidrológicos en diferentes ambientes biofísicos con miras a fortalecer los insumos técnicos para futuras respuestas en el manejo integrado de recursos naturales y de las cuencas hidrográficas inmersas en

las zonas de vida de bosques lluviosos tropicales.

Para esta investigación, la humedad en los suelos de las laderas cumplen un rol específico dentro de la totalidad del ciclo del agua, el cual representa una porción estratégica para el mantenimiento de las zonas de recarga hídrica en cuencas. El conocimiento técnico que puede generar la Geografía al respecto sobre los procesos hidrológicos en laderas resulta importante debido al objetivo de proporcionar herramientas de diagnóstico y gestión que propicien el aprovechamiento responsable del recurso hídrico en el paisaje.

En ese aspecto de integrar los procesos hidrológicos en laderas con bosque lluvioso, la **Hidrogeopedología**, área temática de este trabajo final de graduación que comprende la unión entre las ciencias del suelo y su interacción con el ciclo del agua. Al enfocarse en la variable suelo como matriz que condiciona múltiples procesos hidrológicos en las cuencas (infiltración, almacenamiento de humedad y escorrentía), es fundamental descubrir las diferencias espacio-temporales que condicionan las características que definen cada proceso hidropedológico, por tipo de origen litológico, atributos topográficos, vegetación, física de suelos o balance hídrico. Esta variabilidad espacio temporal de la humedad en el suelo puede ayudar a comparar el mismo comportamiento de distribución entre bosques pluviales en el trópico o incluso en una misma área de estudio pero en diversas escalas espaciales y temporales.

Capítulo 1. Aspectos generales

1.1 Área de estudio

El área de estudio es la cuenca alta del río San Lorencito, con una extensión de 3,26 km² y ubicado dentro de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes en el cantón San Ramón de la provincia Alajuela (**Figura 1**).

La cuenca del Río San Lorencito está constituido de materiales volcánicos al estar inmerso en una área geográfica de estructuras volcánicas antiguas. La cuenca cuenta en su totalidad con cobertura forestal de tipo bosque pluvial premontano (*UCR, ACCVC y Onca Natural, 2008; citado en Solano-Rivera y Granados-Bolaños, 2017*).

Esta cuenca al encontrarse en un área protegida bajo la categoría de reserva biológica, el cual, sus objetivos primordiales son la total conservación y protección del ecosistema, permitiendo realizar el monitoreo hidrológico en un bosque inalterado por actividad antrópica. Además de la preservación del sitio, la educación ambiental y la investigación son actividades exclusivas de esta categoría de manejo.

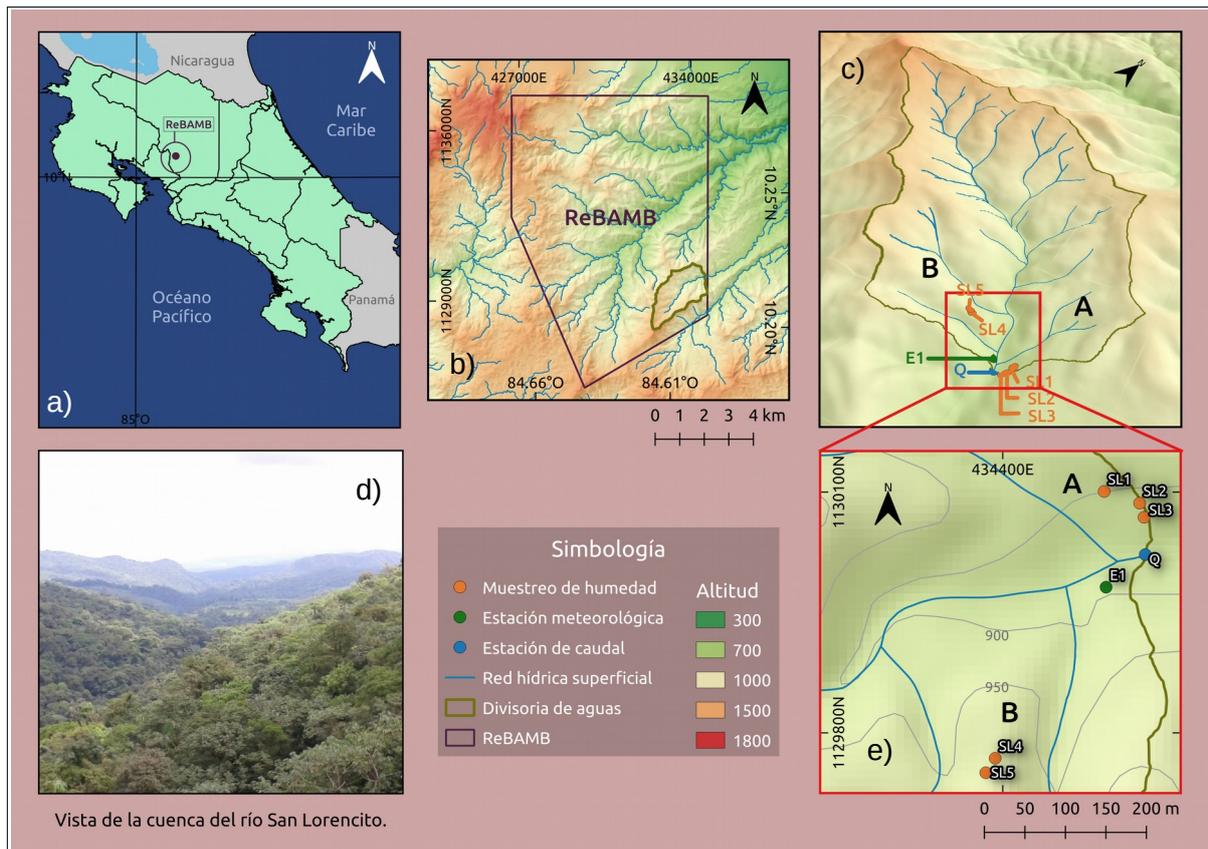


Figura 1. La cuenca de estudio del Río San Lorencito (c) en el contexto nacional y regional (a y b). Panel d muestra una vista agua abajo del valle en V del río con ambas laderas, y en e se visualizan la ubicación de los puntos del monitoreo. Fuente: Elaboración propia con datos del SNIT, 2019; SRTM - NASA, 2008.

1.2 Periodo de estudio

El periodo de estudio comprende el monitoreo y trabajo de campo del 12 de noviembre del 2016 al 31 de octubre del 2017. Se establece esta temporalidad para comprender la dinámica estacional (estación seca, de diciembre a abril; y lluviosa, de mayo a noviembre) de los patrones de humedad a diferentes profundidades en el suelo.

1.3 Problema de investigación

Los bosques lluviosos tropicales suelen sufrir cambios negativos por desequilibrios en el clima y la fragmentación de los bosques (Brodie, Post y Laurance, 2011), lo que puede causar desequilibrios en el aporte y el almacenamiento del agua

necesaria al ecosistema para su óptimo funcionamiento. Estos sitios naturales cumplen diferentes funciones, como por ejemplo son reguladores del clima global, capturan carbono de la atmósfera y proveen recurso hídrico para actividades y consumo humano (Naidoo et al., 2008). Costa Rica tiene sitios con este tipo de bosques, por lo que la protección de estos ecosistemas y el agua es un asunto estratégico para el beneficio de su población; y cuyas instituciones pertinentes deben velar por el estado de tal recurso.

Por esto, se busca comprender una parte más del fraccionamiento del agua en el ingreso del agua al sistema de cuenca: la distribución espacio-temporal de la humedad en el suelo y la generación de escorrentía a escala de ladera. Cuando la lluvia llega a la superficie puede infiltrar y contribuir al almacenamiento en el suelo. Luego la humedad se divide en el proceso de percolación hacia niveles subterráneos o comienza su recorrido por diferentes flujos preferenciales sobre o a través de la ladera; todo esto dependiente de las variables físicas del suelo, la geomorfología y la vegetación. El porcentaje de agua que viaja lateralmente por la ladera ejerce una conexión directa contribuyendo al caudal de los ríos.

Con base en lo anterior, surgen las siguientes incógnitas como parte del planteamiento del problema: *¿Cómo se almacena la humedad en el suelo espacial y temporalmente a nivel de ladera y perfil, según el régimen climático local? ¿Cuáles tipos de escorrentía dominan el área de estudio? ¿Cuáles son los factores ambientales que condicionan el transporte lateral de la humedad? ¿Qué importancia tienen estos flujos de ladera en la conformación del caudal total de la cuenca?*

Bajo estas preguntas, la intención de investigar esta dinámica hidropedológica va en miras de aportar conocimiento científico relevante sobre este tipo de ecosistemas, además de aportar una nueva metodología de medición de la humedad en suelos. La línea de investigación de esta tesis se realizó con la meta de abordar otro de los ejes del proyecto de investigación «*Laboratorio Experimental de hidrogeomorfología en la cuenca de San Lorencito ReBAMB*» de la Escuela de Geografía de la UCR, con el que se pretendió validar un modelo hidrológico predictivo para ambientes tropicales, compuesto por diversos componentes del sistema hidrológico de cuenca, entre ellos la dinámica del agua en laderas.

1.4 Justificación

El trabajo de investigación plantea contribuir a las diversas aplicaciones en la tarea del manejo integral de cuencas hidrográficas y el consumo responsable de los recursos hídricos mediante la integración del conocimiento de los procesos de laderas que componen la escala de cuenca. Las estrategias de gestión de cuencas son abordadas por una serie de criterios técnicos económicos, sociales, políticos y ambientales. Es importante seguir mejorando la calidad y precisión de la información científica mediante el enfoque de la Geografía física para el monitoreo de la distribución, disponibilidad y calidad del agua; elemento vital para el desarrollo social, cultural y económico de las poblaciones.

Este trabajo busca generar un mejor conocimiento sobre el funcionamiento de las cuencas a través de escalas más específicas, como las escalas de laderas y pedón, y desde la multidisciplinariedad de la Geografía por medio de la Pedología, Hidrología, Geomorfología, Ecología y Meteorología. Los resultados de esta investigación buscan aportar conclusiones específicas de los procesos hidrológicos que están presentes a escala de ladera para los ecosistemas de bosque lluvioso tropical con suelos de origen volcánico, tales como las cabecera de diversas cuencas importantes del país emplazadas sobre materiales y geoformas de origen volcánico y de gran valor por la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

Para validar la metodología de esta investigación en otras cuencas con diferentes contextos de usos, tamaños, materiales y geoformas, es necesario primero estudiar y describir esas unidades para calcular la distribución más acertada en la toma de datos hidrometeorológicos, topográficos, de vegetación y de humedad; y con ello lograr una representatividad óptima para ilustrar mejor los patrones de humedad y sus correlaciones más importantes. Lo que se hereda con esta investigación a futuros esfuerzos académicos en esta área, son los métodos estadísticos y de laboratorio realizados para el análisis del caso del río San Lorencito para replicar en el análisis y discusión del conjunto de datos hidrometeorológicos y de los suelos en otros contextos espaciales.

Más allá de la generación de conocimiento científico, esta investigación propone una nueva línea de trabajo dentro del área temática de la Hidrogeopedología. Se pretende incentivar la importancia de los estudios de los

procesos hidrológicos a escala de ladera desde una óptica naturalista, fundamento para llevar conocimiento detallado de las estructuras de las piasajes para su buen ordenamiento. Esta área temática pretende además difundir el interés por conocer a mejor resolución los procesos hidrológicos a escala de ladera en zonas de gran riqueza hídrica, y fomentar la necesidad de producir conocimiento técnico basado en el enfoque holístico e integral que brinda la Geografía.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Comprender los patrones espacio-temporales de la humedad en el suelo y la conectividad hidrológica entre ladera y caudal en la microcuenca del río San Lorencito, Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, San Ramón.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Analizar la distribución espacial del contenido volumétrico de humedad entre horizontes, y a lo largo de una sección transversal entre dos laderas y el cauce principal, durante los cambios estacionales desde Noviembre 2016 hasta Octubre 2017.
2. Identificar las variables hidrometeorológicas, ecológicas, geopedológicas y geomorfológicas más importantes del sitio que sostienen una correlación significativa y que más condicionan los patrones espacio-temporales observados de la humedad en el suelo.
3. Describir el comportamiento hidrogeopedológico de ambas laderas en función de la conectividad hidrológica lateral y vertical para el aporte de humedad al caudal del río San Lorencito.

1.6 Antecedentes

Existe en el ámbito científico mundial una disciplina específica denominada «Hidropedología», surge por primera vez en el 2003, el cual busca retratar la

relación recíproca y dinámica entre el componente suelo y el componente agua (*Lin, McDonnell, Nimmo y Pachepsky, 2015*). El suelo hace referencia a la capa que se encuentra entre la roca madre y el límite de la biosfera, mientras que el agua es uno de los principales agentes de transporte entre el límite exterior y la roca madre a través del suelo. La interacción debe ser estudiada por medio de un enfoque de sistemas donde elementos físicos, químicos y biológicos reaccionan por la influencia de fuerzas internas y externas (*Or, Tuller y Wraith, 2009*). La Hidropedología ofrece esta visión integral en el estudio de estos acontecimientos en la Zona Crítica Terrestre (ZCT), la unidad que unifica la atmósfera, biosfera, litosfera, hidrosfera y pedosfera en una misma zona en constante interacción (*Lin, McDonnell, Nimmo y Pachepsky, 2015*).

Bruijnzeel (2004) presenta un estudio que expone una metodología para la comprensión detallada del comportamiento hidrológico espacial y temporal de cuencas en bosques tropicales, tomando variables de análisis como la perturbación boscosa, usos de la tierra, climas, régimen de lluvias y conservación y física de suelos. Esta última variable se presenta como de suma importancia a considerar, ya que los suelos, independientemente de los cambios en el uso de la tierra que ocurren en el tiempo, condicionan en gran medida las características de los flujos preferenciales en las laderas y en la intensidad del transporte de sedimentos. Así comienza la preocupación por el estudio de los procesos que ocurren en las partes altas y que pueden repercutir en las zonas bajas de las cuencas.

En bosques tropicales la física de suelos juega un rol importante para el conocimiento de los tipos de flujos que ocurren en las laderas. En la literatura (*Zimmermann, Zimmermann, Turner, Francke y Elsenbeer, 2014*) se remarca la importancia del seguimiento y el conocimiento de la conectividad entre ladera y el caudal. La escorrentía superficial se caracteriza por ser flujos preferenciales más evidentes y fáciles de rastrear que la escorrentía sub-superficial, haciendo más difícil el seguimiento de estos flujos por los canales de transición en las laderas tropicales.

Tetzlaff, Birkel, Dick, Geris y Soulsby (2014) remarcan la poca participación de la Hidropedología en el entendimiento de la distribución espacial de eventos hidrológicos relacionadas con las unidades hidropedológicas, donde se ha

comprobado la evidente variabilidad hídrica entre diferentes unidades espaciales. Aunado a lo anterior, las diferencias de estos eventos suelen variar dependiendo de la resolución temporal, el periodo de recolección de datos, las condiciones ambientales y por supuesto la escala espacial de estudio (*Gwak y Kim, 2017*). Sin embargo, se debe aclarar que el uso de distintas escalas no suele excluir procesos hidrológicos, más bien se establecen en el espacio geográfico diversas relaciones multiescalares claves en el funcionamiento total del balance hídrico de la cuenca (*Muñoz-Villers y McDonnell, 2012*).

La cuantificación de la humedad en el suelo es una técnica en auge que permite comprobar algunas hipótesis acerca de los mecanismos de escorrentía que suceden a escala de ladera o de cuenca y la capacidad de infiltración en el suelo (*Zhao et al, 2015*). Al medir el estado húmedo del suelo en determinado tiempo y a distintas profundidades, y a lo largo del perfil de ladera también, es posible conocer el comportamiento de los flujos preferenciales pre, durante y post tormenta. Añadiendo a lo anterior, la estacionalidad climática juega un rol muy importante en el tipo de respuestas a las tormentas y en la cantidad de agua que el suelo mantiene en el sistema durante las épocas críticas de aporte de agua por medio de la precipitación. Por eso, tal como mencionan *Bronstert y Plate (1997)* los estudios a escala de ladera son de gran relevancia porque los paisajes pueden ser considerados como un «mosaico de laderas» por el cual se ha reportado que un 95% del agua del caudal ha pasado sobre o por medio del perfil de las laderas de la cuenca.

Se puede concluir que entre ecosistemas parecidos existen mecanismos comunes entre sí; siempre hay posibilidades de contar con diferencias únicas en los componentes hidrometeorológicos que son parte de los sitios estudiados. Un ejemplo es que en los bosques lluviosos tropicales se ha logrado identificar aspectos como la rápida transición de precipitación a escorrentía superficial o sub-superficial en las laderas (*Muñoz-Villers y McDonnell, 2012*), sin embargo, cabe la duda de si la transición y acumulación de humedad ocurre de la misma forma en dichos bosques con diferentes especies vegetales de por medio, con condiciones diferentes en la génesis de suelos y con variables frecuencias en cuanto a los antecedentes de tormentas en el sitio. Esto debe conducir a un análisis detallado de

la distribución de la humedad en el suelo junto con una debida cantidad de factores físicos a ser tomados en cuenta de forma sistemática y no excluida unos de otros, ya que la interacción entre ellos son aspectos inherentes de cualquier proceso natural en una unidad hidropedológica específica (Gwak y Kim, 2017).

En Costa Rica esta ha sido un área temática escasamente utilizada en las investigaciones sobre el conocimiento de los procesos hidrológicos a escala de perfil y de ladera. La relación suelo-agua representa uno de varios pasos en la construcción de modelos hidrológicos que retratan la base física de las cuencas hidrográficas, teniendo como uno de los objetivos finales la conservación de una gran parte de ellas para la protección del recurso hídrico junto con una gestión integral al lado de comunidades beneficiadas. Un factor geográfico que no debe pasar por inadvertido, es que el territorio continental de Costa Rica posee un componente volcánico predominante en muchas de las cuencas nacionales, debido al evidente origen reciente o antiguo de vulcanismo. Una muestra importantes es que la mayoría de la población del país (52,7%) está localizada en las ciudades de Alajuela, Cartago, Heredia, San José y cantones aledaños (*Observatorio Urbano de la Gran Área Metropolitana, 2017*), poblaciones asentadas sobre formaciones de origen volcánico. Dichos asentamientos son proveídos de recurso hídrico que provienen mayoritariamente de las cuencas hidrológicas ubicadas en las partes altas de la Cordillera Volcánica Central.

La interacción Suelo-Agua no ha sido aplicada en el país desde un enfoque natural y en ecosistemas inalterados con importantes características volcánicas. En la literatura científica hay muchas áreas en el planeta con estas características que no han sido abordadas por la Hidropedología, tal como lo concluye *Muñoz-Villers y McDonnell (2012)*, investigadores de un ecosistema de bosque nuboso asociado a una geología volcánica en México. A pesar de pocos esfuerzos en el área temática a nivel nacional, existen algunos estudios que enfocan sus esfuerzos en investigar la distribución espacio-temporal de la humedad en el suelo a una escala específica de ladera. Estas investigaciones se dedican a la comprensión del almacenamiento temporal de humedad en el suelo y no tanto sobre los mecanismos de transporte/almacenamiento de la humedad. Los enfoques existentes son estudiados a partir de áreas en sistemas agroforestales (*Largaespada-Zelaya, 2013; Gómez-*

Delgado et al, 2011) o en la comparación de los resultados con diferentes usos de la tierra, tales como pastos, bosque y cultivos de café (*Toohey, Boll, Brooks y Jones*, 2018). Además, no todos los estudios se encuentran inmersos en áreas de origen volcánico, aparte de *Toohey, Boll, Brooks y Jones* (2018) y *Gómez-Delgado et al.* (2011).

El estudio elaborado por *Muñoz-Villers y McDonnell* (2012) marca una profunda preocupación por el vacío existente en el conocimiento acerca de los procesos de generación de escorrentía y distribución de la humedad en el suelo a nivel de ladera, pero con un énfasis en los bosques nubosos con suelos de origen volcánico. Esta preocupación abarca más allá de las fronteras nacionales y busca apoyo por divulgar la importancia de los estudios en estos ambientes específicos. La investigación de *Muñoz-Villers y McDonnell* (2012) marca el uso de vasta información hidrometeorológica (datos de precipitación, temperatura, humedad relativa, humedad del suelo en diferentes profundidades, nivel de caudal, profundidad de la Cuadro de agua, entre otros) y de diversos trazadores químicos del agua como el análisis de los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$; todos estos como elementos de apoyo para dicho trabajo. El análisis de estos datos permite conocer no sólo los fenómenos que ocurren en el espacio y el tiempo, sino que invitan a mejorar los instrumentos técnicos que sustentan las metodologías de manejo para cuencas hidrográficas.

Para el caso de antecedentes ejecutados en la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, en San Ramón de Alajuela; el marco del proyecto de laboratorio experimental de hidrología isotópica tropical y sus líneas de investigación en la microcuenca del Río San Lorencito han sido ampliamente abordadas; abarcando temas de dinámica de transporte de sedimentos (*Solano-Rivera y Granados-Bolaños*, 2017), implementación de modelos hidrológicos (*Dehaspe, Birkel, Tetzlaff, Sánchez-Murillo, Durán-Quesada y Soulsby*, 2018) y estudios avanzados de suelos (*Veas-Ayala*, 2009; *Schulz*, 2018). Uno de los puntos de interés a investigar coincide con la necesidad de analizar los procesos de conectividad hidrológica entre laderas y caudal mediante sensores de alta resolución temporal, cuya escala espacial de catena o ladera tampoco había sido intervenida anteriormente con mayor detalle. Por eso esta investigación se planteó investigar en profundo las laderas dentro del

sistema de drenaje natural de cuenca, cuya comprensión de las dinámicas en la humedad del suelo son necesarias para integrar y robustecer los modelos digitales de escenarios futuros del recurso hídrico.

Es por ello que basado en el contexto geográfico del Río San Lorencito ubicada dentro de un bosque lluvioso tropical, y con suelos derivados de productos volcánicos de gran desarrollo; se siguió la investigación de *Muñoz-Villers y McDonnell* (2012) en una cuenca de bosque nuboso y de suelos recientes de tipo Andisol, como aquel de gran importancia a replicar en el área de estudio seleccionado para este trabajo final de graduación.

1.7 Marco teórico

1.7.1 Hidrogeopedología: Interacción Agua-Suelo.

Suelo y agua, elementos vitales para el desarrollo y establecimiento de las múltiples formas de vida en el planeta. Ambos elementos, junto a otras esferas, constituyen puentes para el estudio, comprensión y protección de la Zona Crítica Terrestre (ZCT), unidad geográfica que los incluye y a otros sistemas físicos. La ZCT se define como «la capa terrestre externa que se extiende desde los límites exteriores de la vegetación descendiendo hacia las zonas que incluye las aguas subterráneas. Esta zona sostiene la gran mayoría de la vida terrestre en el planeta» (*Ibáñez, 2007*). De esta forma se manifiestan las relaciones entre diferentes esferas físicas; tales como la biosfera, atmósfera, litosfera e hidrósfera. Las interacciones en esta unidad diversa determinan la dinámica evolutiva de cada elemento biótico y abiótico de los distintos entornos naturales a lo largo y ancho de la superficie del planeta. Este concepto permite converger todo el conocimiento bajo una lógica integral que promover la preservación y conservación de esta zona que sostiene la vida en la Tierra.

Bajo ese mismo enfoque sistémico de la ZCT, se desenvuelve internamente la Hidrología y la Pedología en donde solapan los campos de acción de uno con el otro. Esta inevitable interacción conforma la subdisciplina denominada Hidropedología. Esta área de conocimiento «ha surgido en recientes años como un campo de estudio interdisciplinario viable que enfatiza procesos pedológicos e

hidrológicos interactivos y sus mecanismos característicos a través del tiempo del espacio» (*Lin et al.*, 2010, citado en *Vogel, Clothier, Li y Lin*, 2013). Esta subdisciplina posee la gran ventaja de ser pensada y utilizada desde dos puntos de vista, según sea el enfoque principal que se le quiera dar a alguno de los dos elementos centrales; agua o suelo. Según el enfoque prioritario que se quiera seguir, hidrológico o pedológico, la participación de ambos es inseparable para la comprensión de los procesos a escala de perfil, ladera y cuenca. Algunos de estos campos de acción de la Hidropedología son (*Lin, McDonnell, Nimmo y Pachepsky*, 2015):

- El problema de la separación de la Ecohidrología, donde se ha comprobado alguna relación con el balance del agua en el suelo.
- La necesidad de cuantificar y entender la arquitectura del suelo y los flujos preferenciales a lo largo del espacio y el tiempo, en diversos suelos y paisajes.
- El agua como controlador de procesos de génesis de suelos; y la importancia de la información hidrológica en la comprensión, mapeo y modelación de la complejidad de la formación del suelo y otros procesos.
- Avance en la colaboración de investigaciones acerca la Hidropedología y los estudios de la Zona Crítica Terrestre; en temas como química de suelos, ecología de suelos, Hidrogeofísica y Geomorfología de Suelos.

Para esta investigación, se decidió modificar el concepto «Hidropedología» a «Hidrogeopedología» para incorporar el componente geomorfológico en el estudio de los patrones espacio-temporales del agua en los suelos de las laderas. La dinámica temporal de la humedad del suelo es producto de las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo, la variabilidad climática de una determinada área, pero sobre todo también de la distribución de las geoformas que determinan la distribución de los procesos naturales y los materiales. El carácter geopedológico afianza aún más la relación del relieve en los procesos de génesis y evolución de suelos (proporción de partículas, presencia de horizontes, transporte de material, sedimentación), ya que son procesos de enorme relevancia para conocer y describir mejor el por qué de la condición actual de los suelos que facilitan o impiden la red

de flujos preferenciales del agua.

1.7.2 La importancia de la humedad del suelo en el contexto de la microcuenca del Río San Lorencito.

El estudio de la humedad del suelo es importante para complementar mejor los modelos que proveen escenarios futuros del comportamiento de los sistemas hidrológicos. Dentro de las líneas de investigación que establecieron *Dehaspe et al.* (2018) para el modelado de la microcuenca, para su estudio del transporte, almacenamiento y aporte de las fuentes de agua; se genera esta línea de trabajo en esta tesis que aborda los patrones de humedad en las laderas para integrar los modelos hidrológicos con datos generados en estas subunidades de ladera. Así se pretende complementar esfuerzos para generar mejores predicciones en el modelo construido para el San Lorencito por parte de los anteriores autores.

Las laderas son una etapa del ciclo del agua en donde los flujos de este líquido aportan a los caudales del río mediante diferentes mecanismos de almacenamiento y transferencia. Para comprender detalladamente los patrones de humedad en el suelo, la escala de ladera es la idónea para saber en detalle el papel que juegan los horizontes en la conectividad hidrológica de la cuenca durante el año. En el caso de las cuencas hidrológicas, la interrelación de otras escalas más pequeñas no se pueden omitir debido a que los procesos hidrológicos se encuentran en sincronía dentro de esta unidad de drenaje natural. *Tetzlaff, Birkel, Dick, Geris, y Soulsby* (2014) indican que los estudios donde se integran las escalas de (1) perfil del suelo, (2) de ladera y (3) de cuenca, sobre prolongados periodos y en combinación de observaciones empíricas con modelos cuantitativos, son una manera más certera para mejorar el entendimiento de las dinámicas espacio-temporales de cómo el agua es particionado, almacenado y descargado en el sistema (*Tetzlaff, Birkel, Dick, Geris, y Soulsby, 2014*).

La ladera formada por un sistema inter-granular permite al agua infiltrar y moverse a través de la matriz del suelo. Esta matriz se compone a su vez por una gran red de pequeñas estructuras o agujeros, y macro-poros, agujeros de mayor tamaño que se forman por la presencia de raíces en descomposición y fauna subterránea que construye estos pasadizos. Esta red ocasiona que el agua siga estos flujos preferenciales, y en algunas ocasiones sea llevada a las zonas de

drenaje rápidamente (*Tarboton, 2003*).

Estos movimientos del agua en laderas se le denomina escorrentía, la cual *Aparicio-Mijares (1989)* define como «el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca». Además «el agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca». Esta aclaración demuestra la existencia de algunos tipos de escorrentía que se movilizan sobre o debajo de la superficie del suelo, las cuales son la escorrentía superficial y la escorrentía sub-superficial.

1.7.3 Estudios de variables hidrogeopedológicas en laderas.

Para un mejor entendimiento de la dinámica de humedad del suelo se requiere del análisis de las características físicas, químicas y biológicas del suelo; el rol de la vegetación, la estacionalidad climática y la geomorfología. En el caso del suelo, este se define es una continuación de partículas sólidas (minerales y materia orgánica), agua y aire. En el caso de la porción de agua en el suelo, todo comienza en la consideración de cuánta agua ingresa al suelo durante un periodo determinado, lo que se traduce en una tasa de infiltración. Esta capacidad de infiltración de agua en el suelo depende del contenido de agua inicial que posee el suelo y la capacidad física del mismo para transmitir el agua por la matriz (*Davie, 2008*).

Tanto el contenido gravimétrico de la humedad del suelo como el contenido volumétrico de agua en el suelo son variables que ilustran la proporción del agua en la matriz del suelo. Tanto el contenido volumétrico y el gravimétrico están relacionados por la densidad del suelo, definido como la proporción de suelo seco en el volumen total del suelo, lo que indica el nivel de compactación que posee un suelo (*Davie, 2008*).

Otros componentes en el estudio de la humedad en el suelo son el contenido de agua saturada, «que se define como la máxima cantidad de agua saturada que el suelo puede mantener» (*Davie, 2008*). Esta característica es utilizada para conocer las condiciones de humedad que permitirían la activación de movimientos laterales por el suelo. Muy de la mano del anterior está la porosidad, que se define como la propiedad que define la fracción del espacio poroso en el volumen total del suelo (*Davie, 2008*).

Las propiedades físicas del suelo que facilitan o impiden el transporte de flujos son necesarias para identificar el potencial de contenido de humedad que se puede almacenar, pero además de los patrones de movimiento lateral y vertical que ocurren en las laderas. Propiedades como las texturas en horizontes, densidad de partículas, porosidad y espacio aéreo son características muy importantes de conocer para determinar si existe o no la alta capacidad de transferencia de agua. De comprobar una alta permeabilidad de los suelos, estos tendrán a cargo un rol fundamental en el almacenamiento de enormes volúmenes de humedad para la recarga hídrica constante al caudal principal.

Las variables hidroclimáticas son otro conjunto de características indispensables para el análisis de humedad en laderas. Pero datos como precipitación, evapotranspiración y caudal deben ser vistos a una resolución de tiempo más fina para comprender el comportamiento de las laderas mediante eventos de tormentas, por lo que es fundamental pensar en variables hidrometeorológicas. No basta con determinar el comportamiento anual o a largo plazo de estas variables, sino en determinar los estados de antecedentes de humedad y la reacción de los procesos de infiltración y transporte del agua en diferentes condiciones climáticas y meteorológicas que experimenten los suelos en las laderas. Justo esta visión de análisis a detalle de tormentas seleccionadas fue llevado a cabo por *Tenelanda-Patiño, Crespo-Sánchez y Mosquera-Rojas (2018)*, quienes determinaron mediante correlaciones estadísticas la fuerza de aquellas variables que determinaron y facilitaron patrones llamativos de recarga de humedad estacional o de transporte instantáneo hacia el caudal.

Otras de las variables geográficas que son parte del análisis de los procesos de conectividad hidrológica en laderas tiene que ver que con las geoformas presentes en la microcuenca que conllevan a la configuración estructural de las laderas, y que condicionan la arquitectura de los suelos por su ubicación. Aspectos como la pendiente, la morfodinámica en laderas y sus formas, hacen de estos componentes que pueden ser cuantificados y útiles para verificar mediante correlaciones si hay o no una relación importante en los patrones de humedad en las laderas durante cada lapso estacional que enfrente la microcuenca.

También está el caso de la cobertura vegetal que juega un rol en la creación

de una red subterránea de macroporos que establecen vías preferenciales del movimiento de agua entre horizontes. La densidad de la cobertura forestal para el área de estudio se determinó con el fin de comparar estos parámetros en los sitios escogidos de monitoreo de humedad, para indagar el nivel de la fuerza de relación que ejerce el bosque sobre la distribución de la humedad. Incluso, la misma dinámica geomorfológica influye a su vez en el comportamiento de densidad del área foliar a través del espacio, donde la pendiente influye en la distribución de vegetación, y por ende en el almacenamiento de humedad, su movimiento y en la construcción de condiciones aptas de permeabilidad en los suelos (*Ger mann, Lange, y Lüscher, 2012*).

La importancia de estos estudios a escala de ladera no radica únicamente en observar la variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo, sino más bien averiguar la fuerza y dirección entre distintos factores que explican detalladamente los procesos hidrogeopedológicos a lo largo de la estacionalidad anual en laderas; tal como lo aplican *Gwak y Kim (2017)* en su estudio. La medición de tendencias de estas variables se comprueban mediante la correlación estadística que describen con un valor la fuerte asociación, o no, entre dos variables. Teniendo una amplia gama de parámetros ambientales del área de estudio, se puede indagar mejor cuáles son aquellas relaciones importantes que condicionan los patrones de humedad en el espacio y en el tiempo.

1.7.4 Aporte geográfico a la investigación.

La caracterización de este proceso hidrológico es parte esencial en el conocimiento de la distribución del agua y su tiempo de tránsito hacia la conformación del caudal principal de la red hídrica superficial.

El aporte holístico de las escalas espaciales es un aspecto que Geografía contribuye constantemente al entendimiento de esos procesos naturales. Las escalas espaciales no son atributos aislados de una investigación; estos más bien intercambian constantemente flujos de materia y energía. Desde la escala de cuenca hasta la escala de la arquitectura del suelos en esa sucesión de laderas interconectadas, son el ejemplo que invitan a pensar en un sistema dinámico multi-escala que dotan de vida al sistema hidrológico que se funciona en lo subterráneo y superficial (*Lin, 2012a*). El enfoque que integra las escalas pedón, ladera y cuenca

permiten darle seguimiento del movimiento del agua y su papel en el funcionamiento del sistema. La clave de esta idea es entender mejor el funcionamiento del almacenamiento y descarga del agua en diferentes unidades de paisaje, para luego conocer el funcionamiento detallado de la cuenca (*Tetzlaff, Birkel, Dick, Geris, y Soulsby, 2014*).

Aunado al rol de las escalas espaciales y temporales, el paisaje puede llegar a convertirse en un mosaico de diferentes usos de la tierra que pueden llegar a incidir notablemente en los patrones de humedad en el suelo durante diferentes estaciones. El caso de *Toohey, Boll, Brooks y Jones (2018)* en el país, invita cada vez a verificar el comportamiento de humedad en diferentes tipos de suelos, pero al mismo tiempo entre diferentes usos de la tierra que se le dota un paisaje; ya sea con mayor o leve influencia humana. Estas variables que moldean el territorio como un sistema integrado, la Geografía trata de no pasarlos por alto. La comprensión de estos procesos naturales son esenciales para su conservación en la función para el mantenimiento equilibrado entre actividades humanas y su entorno natural mediato.

Otro aporte geográfico a este tema, es la integración del trabajo de laboratorio para relacionar para la cuantificación de las variables biofísicas y sus relaciones. El aporte geográfico mediante el uso de herramientas y técnicas de medición permiten la comprobación y argumentación de hipótesis de los procesos de almacenamiento y transporte de humedad a través del suelo. La Geografía, en su meta por comprender la conectividad hidrológica entre laderas y caudal, utiliza su carácter analítico gracias al pensamiento geográfico y sus pilares: El enlace entre la localización, asociación, distribución, interacción y evolución de los patrones de humedad del suelo y las características biofísicas presentes en la escala de pedón, laderas y microcuenca.

1.8 Marco metodológico

1.8.1 Metodología del primer objetivo específico

1. Delimitación del área de estudio y los sitios de instalación de los equipos de monitoreo. Se escogió siete sitios para la instalación de sensores que registran la precipitación, la evapotranspiración, el caudal del río San Lorencito y la

humedad del suelo en distintas profundidades de la ladera (10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm y 90 cm). El criterio de instalación de los equipos es detallado en el siguiente punto.

2. El periodo de estudio comprendió la recolección de datos durante un año hidrológico (noviembre 2016 - octubre 2017), para abarcar un rango temporal que permita mostrar contrastes en el régimen de humedad en los suelos. Los datos de humedad de suelos se obtuvieron de la siguiente manera:

a) **Contenido volumétrico del agua en el perfil del suelo:** Esta medición se realizó mediante la colocación de cinco sondas (**Figura 2A**) de humedad fabricadas por la empresa Odyssey, tres de ellas ubicadas en la ladera de la margen izquierda del río (Ladera A), y las otras dos en la margen derecha (Ladera B). En A se instalaron tres equipos de humedad con distanciamiento entre el punto 1 y 2 de 46 metros y entre el punto 2 y 3 de aproximadamente 18 metros. Mientras que en la ladera B, se instalaron dos equipos con una distancia que separa el punto 4 del 5 de unos 21 metros (**Figura 1**). Estas sondas poseen sensores que realizan mediciones de volumen de humedad al mismo tiempo a distintas profundidades, los cuales son: 10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm y 90 cm. La resolución temporal de los datos fue de 15 minutos, los cuales se almacenan en su memoria interna hasta la descarga de los mismos. La orientación de los equipos de humedad en ladera A mantienen una posición descendiente hacia el río San Lorencito, mientras que en B el monitoreo de la humedad fue orientado en dirección al tributario cercano del lado oeste de esa ladera, ya que su divisoria de aguas se usa como sendero de acceso e imposibilita crear un transecto directo al río principal. Además, esta instalación de sensores pretende seguir un trayecto potencial donde se registren flujos laterales desde una parte superior de la ladera hasta el cauce. La accesibilidad al terreno también fue un aspecto importante para la instalación de equipo.

3. Con la recolección de datos obtenidos en campo y los procesados en el laboratorio de Geografía Física, se procedió a realizar una base de datos en formato de Excel Office para centralizar toda la información generada de las

variables de interés expuestas en el primer y segundo apartado de este marco metodológico.

4. Se realizó un proceso de control de calidad que identificó minuciosamente aquellos datos anormales en la base de datos. Fue importante identificar esos vacíos de datos ocasionados por problemas técnicos con los sensores, porque interrumpen la continuidad temporal de los registros y generan datos extremos irreales con tendencias muy superiores o inferiores a las normales.
5. Después de optimizar al máximo la base de datos, se comenzó con el proceso de generación de estadísticas básicas. Las estadísticas fueron generadas y analizadas a través del lenguaje estadístico R, el cual posee una amplia selección de métodos estadísticos acordes con el análisis que se deseó emplear. Este lenguaje se considera una herramienta robusta para estas labores debido a su amplia documentación existente y su naturaleza de código abierto y uso gratuito. Las estadísticas a analizar son las siguientes:
 - a) **Estadísticas de tendencia central y dispersión:** Se generaron estadísticas de tendencia central y dispersión para el conjunto de datos de humedad del suelo, precipitación, evapotranspiración y caudal. Estas estadísticas contemplaron el número de registros, la media, el mínimo, el máximo y la desviación estándar.
6. Para entender los patrones de distribución de la humedad en ambas laderas, se escogieron y graficaron cuatro eventos de tormenta bajo el criterio mínimo de 2 mm de lluvia y separados entre una hora de diferencia; además de estar contar con ejemplos en diferentes estaciones del año (transición húmedo-seco, época seca, transición seca-húmedo y época lluviosa) para comprender específicamente la dinámica espacio-temporal de los datos de humedad en las cinco profundidades. Los valores de los niveles de humedad se complementaron con otros datos para justificar cada una de las reacciones registradas en las cinco locaciones de monitoreo, como por ejemplo:
 - a) **Tiempos de retraso del aporte de tormentas (horas):** Para conocer el tiempo de reacción en el cambio máximo de humedad en las diferentes profundidades, a causa del ingreso de humedad por tormentas, se calculó el tiempo en horas que tomó alcanzar el punto máximo de humedad a

partir del nivel inicial base. De esta forma se facilitó conocer los procesos de infiltración o escorrentía por perfil y ladera, según la estacionalidad climática y las características de la tormenta.

- b) **Antecedentes de humedad:** Se generaron datos sobre las condiciones de humedad a diferentes plazos previos a los eventos de tormenta seleccionados. Se obtuvieron los antecedentes de lluvia de 1, 3 y 7 días anteriores al momento del inicio de la tormenta.

1.8.2 Metodología del segundo objetivo específico

1. Para comprobar la relación entre variables hidrometeorológicas, geopedológicas y ecológicas, se obtuvo cada variable de la siguientes manera:

- a) **Precipitación y Evapotranspiración:** Los datos de lluvia y evapotranspiración se obtuvieron mediante la instalación de una estación meteorológica (figura 3) cercanas a la cuenca de estudio. La estación se encuentra fuera de la cuenca de estudio, a una distancia de poco más de 1 km al NO del punto de aforo. La estación pertenece al Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, cuyos datos son suministrados como parte de la colaboración entre esta unidad académica y el proyecto de investigación de Hidrología Isotópica. La resolución temporal de los datos meteorológicos es de 30 minutos.
- b) **Caudal:** Las mediciones de caudal se realizaron mediante el método de velocidad-área con la utilización de un correntómetro marca Global Water (**Figura 2B**) que permite la medición de la velocidad (m/s) en secciones con flujos laminares y separados cada 50 cm a lo largo de un eje transversal de un margen del río al otro. Mediante cálculos matemáticos se realiza la estimación del caudal a través del método de área $Q=A*V$; dónde **Q** es caudal, **A** es el área de la sección aforada y **V** la velocidad de agua que transita por la sección. Los aforos se efectuaban al menos una vez cada mes. El otro método para convertir la medición puntal de un aforo a un hidrograma continuo, se usó la estación Global Water (**Figura 2C**) con data logger modelo GL-500-7-2, cuyo sensor se encontraba sumergido en el río para registrar la profundidad de agua. La ubicación de

los sensores para el cálculo de estos datos de caudal se debe a que se encuentran en el punto de salida de la microcuenca.

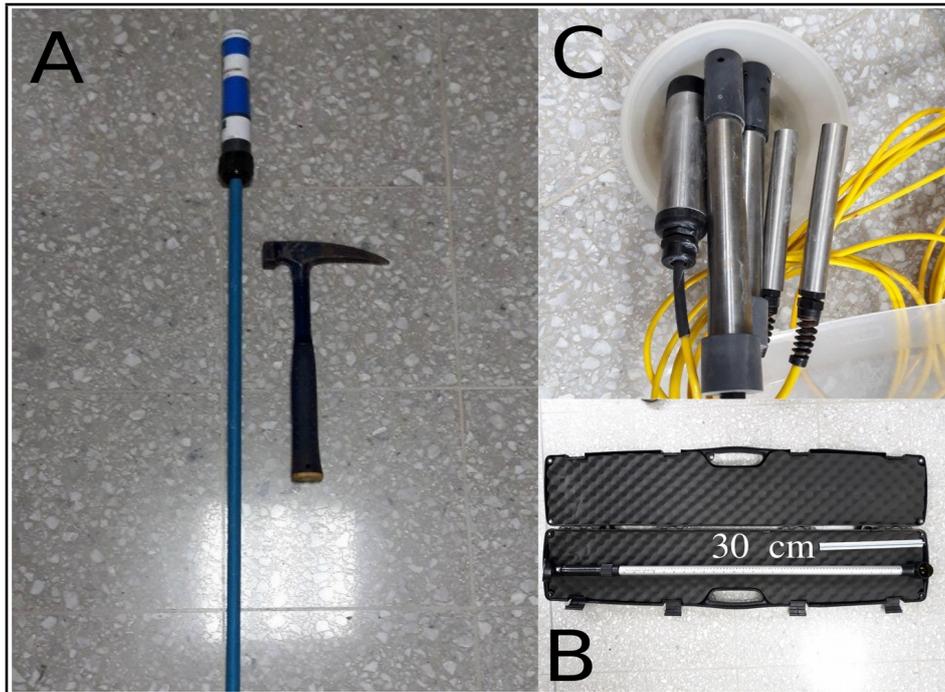


Figura 2. Equipo utilizado en campo para la toma de datos de contenido volumétrico de humedad (A), caudal por medio de correntómetro (B) y parámetros de calidad de agua (C).

- c) Se realizó una caracterización preliminar de los suelos presentes en los puntos de instalación de cada una de las sondas de humedad. Esta descripción consistió en la denominación del tipo de suelo presente en cada sitio, la textura, el color y la definición de los horizontes del suelo. Esta información se recopiló con el afán de cumplir también con los pasos de calibración de las sondas antes de coleccionar datos en campo. Este proceso se realizó mediante comprobación al tacto, el uso de barreno y observaciones *in situ*.
- d) Se realizaron tres calicatas de los cinco sitios de monitoreo de humedad de suelo, para extraer muestras de suelo a 10 cm, 30 cm y 50 cm de profundidad, y así cuantificar variables físicas (porcentaje de partículas, densidad de partículas, porosidad, contenido de humedad, espacio aéreo y conductividad hidráulica) del suelo en esos horizontes superficiales. De

las tres calicatas, dos se realizaron en ladera A (**SL1** y **SL3**) y una en ladera B (**SL5**). Para los demás puntos de muestreo no cubiertos, se complementaron las variables físicas del trabajo de *Schulz* (2018).

- e) El análisis de laboratorio de las muestras de suelo extraídas, cuantifica las siguientes variables físicas de suelo siguiendo las fórmulas y técnicas de *Henríquez y Cabalceta* (2012):
- I. **Porcentaje de partículas:** Utilizando el método de sedimentación de Boyucos se cuantificó la proporción de las partículas en las muestras y la respectiva textura.
 - II. **Densidad aparente [DA]:** Por medio de la fórmula de **DA = masa/volumen** se puede conocer la densidad aparente del suelo excluyendo la masa del agua y el aire. Para ello se extrae la muestra por cada profundidad mediante un cilindro metálico cuyo volumen es conocido.
 - III. **Porosidad [P]:** Se calculó por medio de la fórmula **P = (1-da/dr) * 100**, que da como resultado el porcentaje de espacio poroso de la muestra. En este caso, **dr** (densidad real) se asumió con el valor de **2,65**, ya que es una medida estándar para cualquier tipo de suelo.
 - IV. **Humedad gravimétrica [HG]:** Esta medición se refiere a la relación del peso del agua, con respecto a la masa del suelo seco. Se calculó mediante la fórmula **HG = (masa del suelo - masa del suelo seco) / masa del suelo seco**. Este valor se representa en porcentaje multiplicando el resultado por 100.
 - V. **Humedad volumétrica [HV]:** Se calculó mediante la fórmula **HV = HG*DA**. Este dato fue requerido para conocer el espacio aéreo de la muestra, y se refiere a la relación del volumen del agua con respecto al volumen de la muestra de suelo. Este dato se representa en porcentaje multiplicando el resultado por 100.
 - VI. **Espacio aéreo [EA]:** Se calculó con la fórmula de **EA = P - HV**. Este cálculo permite conocer la porción de porosidad ocupada por el aire, y así conocer el nivel de saturación del suelo. Se representa por medio de porcentaje.

VII. **Conductividad hidráulica [CH]:** Este cálculo se determinó mediante el uso de la ley de Darcy con el uso de muestras de suelo en cilindros (**Figura 3**), probetas para simular el caudal en la muestra de suelo, y parámetros como área transversal del flujo, velocidad y altura de la muestra. Fue posible determinar las características del movimiento de la humedad a través del perfil y la capacidad del suelo saturado para permitir el movimiento del agua (mm/h).

- f) Las variables de Índice de Área Foliar (LAI) y el Índice de Humedad Topográfica (TWI) de la microcuenca del Río San Lorencito fueron suministrados gracias a la información creada en formato ráster por *Solano-Rivera y Granados Bolaños (2017)*.



Figura 3. Método de experimentación para el cálculo de conductividad hidráulica mediante la ley de Darcy, el cual mide el flujo de líquidos en medios porosos. Los horizontes analizados mediante esta técnica fueron 10 cm, 30 cm y 50 cm, debido a su naturaleza de mejor permeabilidad.

1.8.3 Metodología del tercer objetivo específico

1. Se realizó un análisis confrontativo con el balance hídrico de la cuenca y los valores de contenido volumétrico en las cinco profundidades observadas en los

suelos de ambas laderas. La variabilidad temporal en la proporción de entradas y salidas de agua permitieron observar la dinámica de superávit y déficit de almacenamiento de humedad a lo largo del año de análisis. Estas observaciones a través de ΔS , en combinación con la distribución vertical y horizontal de la humedad, fueron capaces de enlazar información sobre los cambios de humedad y los procesos de aporte de las laderas al caudal principal. Para comprender la dinámica hidrológica con ΔS (mm), basta con utilizar la fórmula básica del balance hídrico (Davie, 2008): $\Delta S = P - Q - ET$; donde **P** es precipitación, **Q** equivale a caudal de salida y **ET** es evapotranspiración. Mediante la graficación de este balance hídrico se analizaron los patrones hidrológicos temporales en la cuenca.

2. Para indagar acerca de las posibles relaciones entre los diferentes elementos hidrometeorológicos, pedológicos, de vegetación y geomorfológicos; y los patrones de distribución de la humedad en el suelo, se procedió a generar los coeficientes de Correlación Spearman (*Spearman Rank Correlation Coefficient*) mediante la programación en R. Este método es no-paramétrico apto para distribuciones no-normales. Así se determinan aquellas relaciones de mayor importancia que explican el modelo de la dinámica de volumen de humedad en diferentes profundidades del perfil del suelo y la activación de flujos preferenciales en la conectividad ladera-río. Dicha información se representó en forma de matrices de correlación y de significancias (librerías R «corrplot y ggplot»). El tipo de correlaciones efectuadas fueron de carácter espacial (correlaciones de valores promedios de humedad del suelo con variables de la física de suelo y variables hidrometeorológicas), y de carácter temporal (correlaciones de la humedad del suelo entre todos los meses del año y variables hidrometeorológicas). Ambos tipos de correlaciones fueron diferenciados para cada una de las laderas monitoreadas.

Capítulo 2. Caracterización biofísica del área de estudio

En este capítulo se estará reuniendo toda aquellas informaciones de los componentes biofísicos que constituyen el área de estudio, tanto en su magnitud espacial de cuenca como en lo identificado por ladera. Aquí se reunió lo fundamental para comprender el contexto físico en el que se manifiestan los patrones de distribución espacial y temporal de la humedad en el suelo registrados durante el periodo de análisis. En base también de esta información, los componentes hidroclimáticos, geomorfológicos, geopedológicos y ecológicos serán hojas de ruta para la discusión y comprensión en la conectividad hidrológica de las laderas.

2.1 Ubicación geográfica

La cuenca del Río San Lorencito se encuentra en el distrito Los Ángeles, perteneciente al cantón San Ramón de la provincia Alajuela. Esta cuenca además se encuentra dentro de los límites de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, asignada con la categoría de manejo Reserva Biológica (*UCR, ACCVC y Onca Natural*, 2008). Esta categoría se dedica exclusivamente a las labores de conservación, educación ambiental e investigación científica, según establece la ley de creación de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes cuya vigencia data desde 1993 (*Ley N° 7354*). Las coordenadas geográficas del punto de salida de la cuenca son 84°35'49.83" O y 10°13'8.28" N, mientras que las coordenadas proyectadas en CRTM05 son 434576E y 1130022N (**Figura 1b**).

2.2 Climatología e Hidrología

El clima de la microcuenca presenta una dinámica bastante húmeda por su ubicación en la vertiente Caribe, por lo cual recibe un régimen de precipitación muy alto. Se

tiene contabilizado un promedio de lluvias que oscila entre los 2500 y 3500 mm anuales, una temperatura media anual de 21°C, una humedad relativa promedio del 98% y la evapotranspiración registra un promedio anual entre los 600 - 800 mm (UCR, ACCVC y *Onca Natural*, 2008; *Solano-Rivera y Granados-Bolaños*, 2017; *Dehaspe et al.*, 2018).

La cuenca drena hacia el Caribe, aunque al estar cerca de la divisoria continental entre las vertientes Pacífico y Caribe, la influencia de ambas se mantiene como un componente más en su dinámica climatológica. *Solano-Rivera y Granados-Bolaños* (2017) recalcan que el régimen climático de la cuenca está marcado por una época seca que va desde los meses de enero a abril, y una estación lluviosa entre los meses de mayo a diciembre. Los mismos autores describen la climatología de la cuenca con la presencia de «*violentas lluvias torrenciales durante la época lluviosa, y una disminución considerable de la precipitación en la época seca*» (p. 23).

Las condiciones hidroclimáticas para el periodo de esta investigación, entre noviembre 2016 y octubre 2017, registra para la precipitación una estacionalidad marcada en el tiempo, con una estación lluviosa de mayo a noviembre y una estación seca de diciembre a abril (**Figura 4**). El total de precipitación registrado en el periodo seleccionado fue de 3417 mm, siendo el mes con menor lluvia febrero con 11 mm, y agosto el mes con mayor cantidad de lluvia con un total de 512 mm. El promedio de lluvia para los doce meses fue de 285 mm. La transición de estación seca a lluviosa comienza en marzo, aunque no sería hasta el mes de mayo donde la precipitación alcanza mayor volumen. En junio disminuyen las lluvias en sincronía con el «*veranillo*» (**Anexo 1 - Cuadro 1**).

El caudal del río San Lorencito, muestra una dinámica muy activa en correspondencia con los niveles estacionales de precipitación (**Figura 4**). Los meses secos generan disminuciones muy evidentes en la cantidad de agua del río, pero fuentes de agua subterráneas sostienen el caudal de manera permanente durante todo el año (*Dralle, Karst y Thompson*, 2016). El total del caudal en el periodo seleccionado fue de 2149 mm, siendo el mes con menor caudal febrero con 27 mm, y noviembre del 2016 el mes con mayor caudal con un total de 309 mm. El promedio de caudal para este tiempo fue de 179 mm. Los meses picos de caudal ocurren en

los meses de mayo y noviembre, meses de mayor aporte de agua y reducidas tasas de evapotranspiración (**Anexo 1 - Cuadro 1**),

La evapotranspiración anual registró una dinámica inversa a los patrones de lluvia y caudal. En estación seca, debido a mayor tiempo de radiación solar, y a los niveles bajos de caudal; se generó más evaporación y transpiración a raíz de la abundante humedad aportada y almacenada desde la época lluviosa (**Figura 4**). El total de evapotranspiración registrado en el tiempo seleccionado fue de 484 mm, siendo el mes con menor evapotranspiración noviembre del 2016 con 17 mm, y septiembre el mes con mayor evapotranspiración con un total de 54 mm. El promedio anual fue de 40 mm (**Anexo 1 - Cuadro 1**).

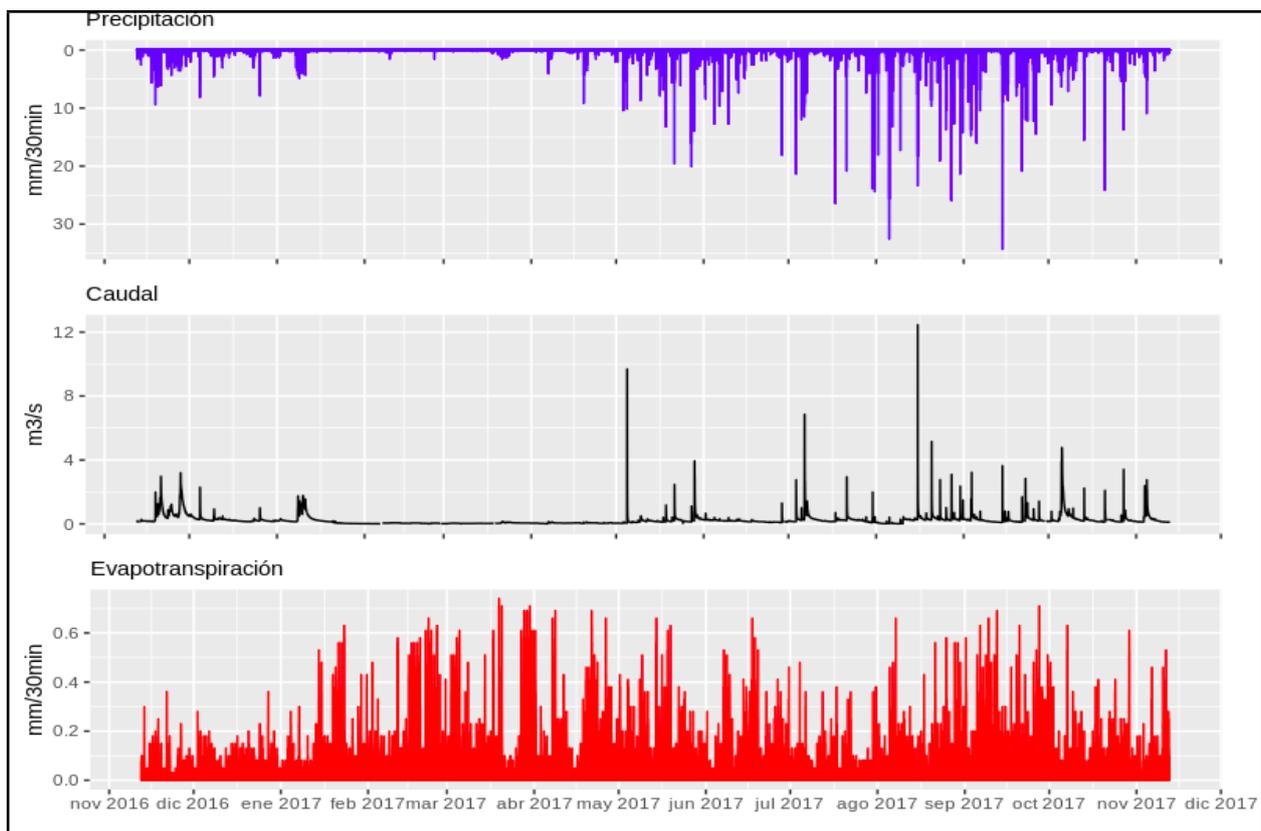


Figura 4. Variabilidad hidrometeorológica Noviembre 2016 - Noviembre 2017, en la cuenca del Río San Lorencito. Precipitación en mm/30 min (panel superior), caudal en m³/s (panel medio) y evapotranspiración en mm/30 min (panel inferior).

2.3 Geoformas: Materiales, evolución y distribución

Leer las geoformas encontradas en las laderas estudiadas para esta microcuenca, permiten agregar información detallada para comprender cómo es la conectividad hidrológica de las laderas en la microcuenca del río San Lorencito. Para empezar, la geología de la microcuenca del Río San Lorencito es de origen volcánico, ya que forma parte de la Cordillera de Tilarán dentro del grupo de rocas volcánicas Aguacate, que a su vez la cuenca pertenece a la Formación Monteverde (*Solano-Rivera y Granados-Bolaños, 2017*). Según fuentes bibliográficas, los materiales de esta formación se estiman en un origen entre 1 a 2 millones de años (Pleistoceno), formados por «una extensa plataforma de lavas andesíticas» (*Gillot et al., 1984 en Alvarado-Induni, 2011*). *Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017, p. 23)* comprueban más detalladamente la estructura de los materiales de esta unidad: «*El material de la cuenca está compuesto por lavas frescas andesíticas hasta andesitas traquíticas, compuestas por fenocristales de plagioclasa, augita, hipersteno, magnetita y ocasionalmente hornblenda, biotita u olivino*». La composición química de la rocas reafirma el componente volcánico que predomina en el sitio y en su geoformas más comunes a encontrar. En este ambiente morfogenético volcánico, y especialmente en las laderas, predominan los relieves formados por extensas coladas de lava, ahora profundamente disectadas por la acción erosiva de la red hídrica superficial de esta cuenca.

La gradiente altitudinal de la microcuenca va desde los 900 msnm hasta aproximadamente los 1400 msnm, y con un área de 3,26 km². Esta microcuenca se encuentra dispuesta a través de una serie de fallas que cruzan una orientación SO-NE a través del cauce del San Lorencito y San Lorenzo, siendo este sistema parte del fallamiento local de la dinámica volcano-tectónica de la cordillera de Tilarán (*Chaves y Sáenz, 1974 en Alvarado-Induni, 2011*). Este componente estructural origina el levantamiento de bloques importantes en la microcuenca, observando en varios puntos del cauce principal y las laderas predominancia de pendientes altas (valores de pendiente de hasta 45°), escarpes con afloramientos rocosos, deslizamientos, desprendimientos, cascadas y una red de tributarios con diferencias de altitud abruptas a lo largo de sus cauces. En la **Figura 5** se ilustra el contexto de cada ladera desde una perspectiva aérea y longitudinal.

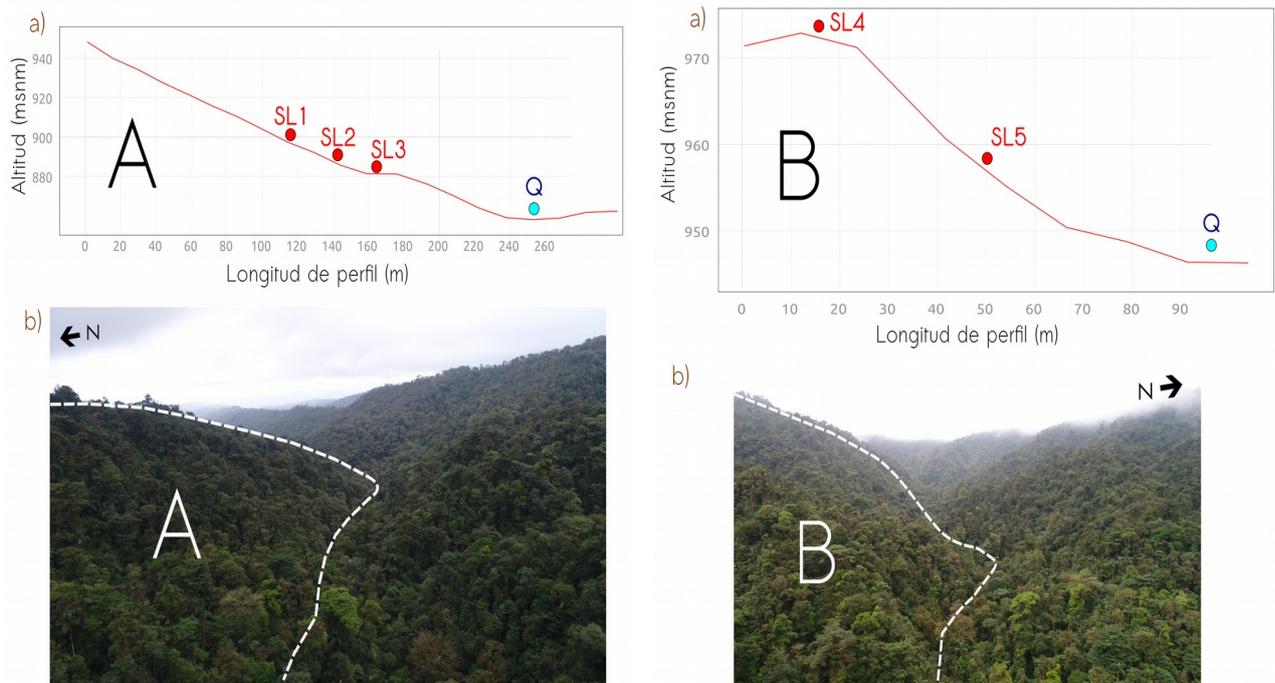


Figura 5. Perfil longitudinal (a) de ambas laderas monitoreadas con vistas de perfil (b). En ladera A (izquierda) la fotografía es con vista aguas abajo; mientras que la vista de ladera B (derecha) es hacia aguas arriba.

Una diferencia importante a señalar entre laderas, es que el valor promedio de la pendiente en A (22°) es levemente inferior que B (25°) (**Figura 6.3**). Aunado a lo anterior, y tomando en cuenta la variabilidad espacial del índice de humedad topográfica (TWI) para la microcuenca (**Figura 6.1**), es posible diferenciar las zonas preferenciales de la acumulación de humedad por topografía en cada ladera, aclarando que este índice comparativo entre más alto sea su valor mayor probabilidad de acumulación de fluidos habrá en ese punto del terreno. En el caso de ladera A su índice promedio (6,16) indica una mayor oportunidad de almacenamiento de humedad en comparación con B (3,49). Esta condición de mayor acumulación de humedad en A, demostraría un rol más importante de conectividad hidrológica a largo plazo con respecto a su ladera antagónica, aunque se espera corroborar más su fuerza con el análisis estadístico de los datos de humedad en capítulos siguientes. En el caso de B, la explicación es distinta, en

donde la condición mayormente vertical de esta ladera y su morfología impulsarían aún más los procesos de escorrentía y una función hidrológica más notable en lapsos de tiempo más cortos, específicamente en las fases pre-, durante y post- de los eventos de tormentas.

La cuenca también posee una amplia red de drenaje de tributarios, muchas de ellas debido a cicatrices de deslizamientos. Sin embargo, la red de tributarios recae en su gran mayoría en la ladera A, la cual, como se explicó anteriormente por sus condiciones de menor verticalidad y más probabilidad de acumulación de humedad por topografía, esta ladera aporta flujos de acumulación en laderas mejor asentados que en B.

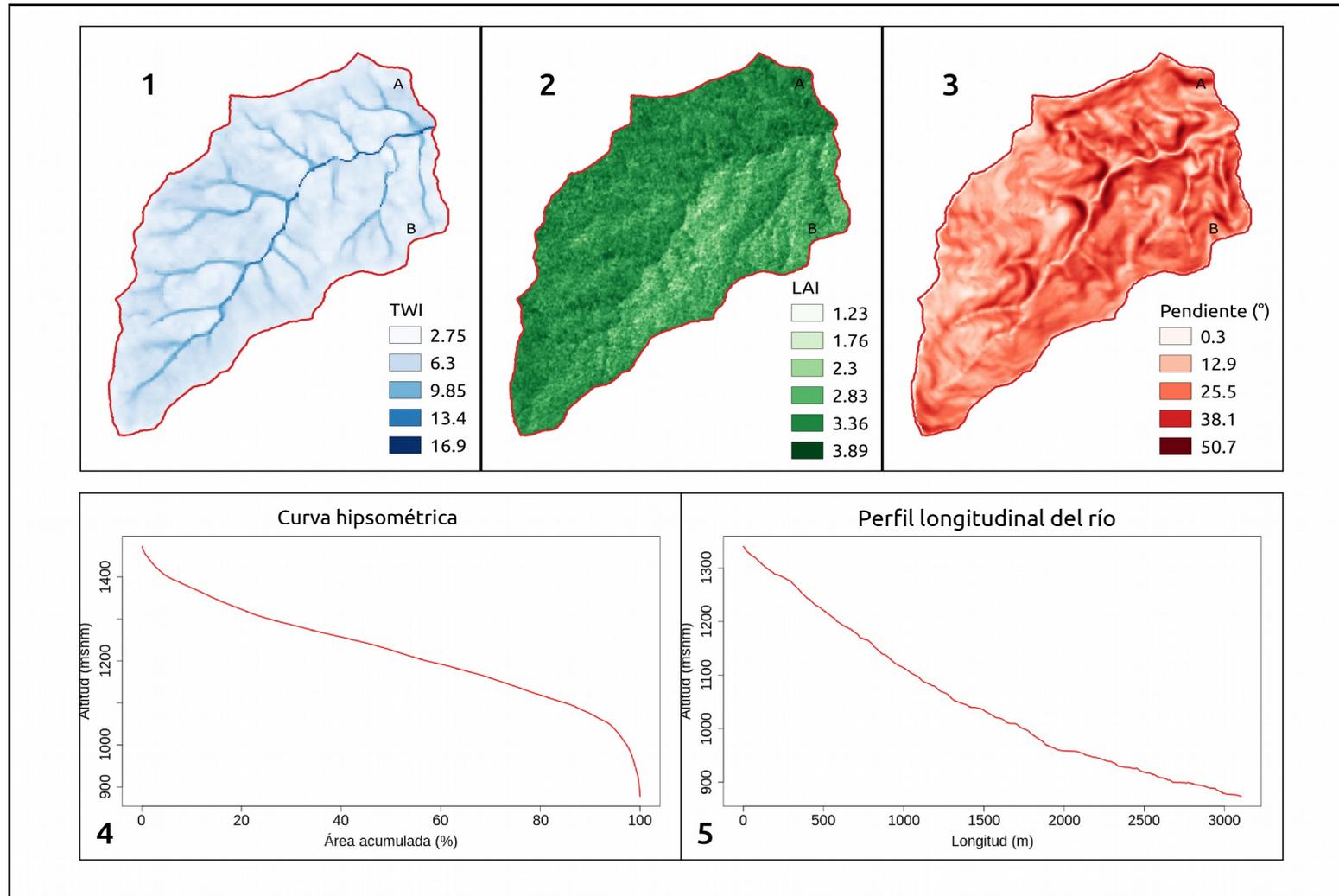


Figura 6. Variables físicas de la cabecera de cuenca del Río San Lorencito con índice de humedad topográfica (1), índice de área foliar (2) y pendiente en grados (3).

2.4 Geopedología: Tipos de suelo, distribución y características físicas-químicas.

Los suelos de la microcuenca han sido clasificados como Andisoles y Entisoles, según *Veas-Ayala (2009)* y *Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017)*. La primera clasificación, andisoles, se ajusta por la dominancia en gran parte de sus horizontes de una arcilla de estructura amorfa que se denomina «alofana» (*Schulz, 2018*), la cual se origina por la deposición en el terreno de diversas capas depositadas de ceniza volcánica, o sea «*vidrio volcánico fino, poroso y permeable y por ende de poca resistencia a la meteorización química*» (*Alvarado, Mata y Chinchilla, 2014*). La distribución de estos suelos en el sitio de estudio se localizan comúnmente en gran parte de la microcuenca, y al menos en cada una de las laderas monitoreadas. El espesor del suelo en estas varía según la posición en la ladera, donde en la parte alta de las laderas es posible contar con espesores menores a 60 cm, mientras que los espesores crecen conforme se desciende en las laderas (*Solano-Rivera y Granados-Bolaños, 2017*). Estos últimos autores establecen que los mecanismos de transporte principales del suelo en laderas se da por la erosión laminar y procesos de remoción en masa.

Con respecto a los suelos andisoles observados en las laderas A y B, hay una semejanza entre los resultados en campo y el análisis que establecen *Alvarado, Mata y Chinchilla (2014)*, en donde aquellos andisoles en pisos premontanos entre 800 y 1500 msnm y régimen de humedad ústico «*forman suelos pardos-amarillentos halloysita y alofana en el horizonte superior, y en los que se pueden encontrar metahalloysita, gibbsita, ferri-hidrita, goethita y caolinita en su subsuelo*» (Figura 10).

En el caso de la mención de los suelos entisoles, los cuales no cuenta una distinción significativa de horizontes, son posibles de observar al pie de las laderas mediante la constitución de terrazas aluviales con leves procesos de pedogénesis, donde es posible observar, en varios puntos a orillas del cauce del San Lorencito, capas someras de suelo con espesores de entre 10 – 30 cm, por encima de bancos de acumulación de material coluvio-aluvial; por ejemplo cantos rodados, arenas y guijarros acumulados por corrientes fluviales de gran energía o procesos de remoción en masa desde las laderas (**Figura 7**).



Figura 7. Proceso incipiente de proceso de pedogénesis superficial en una terraza de sedimentos coluvio-aluvial del Río San Lorencito, San Ramón.

2.4.1 Características físicas del suelo en laderas A y B.

2.4.1.1 Horizontes

Las calicatas de referencia realizadas cerca de cada uno de los puntos de los sensores de humedad muestran mucha similitud entre cada ladera. De esta forma fue posible establecer perfiles verticales comunes para A y B.

El perfil común para la ladera A (**Anexo 2 - Figura 1**) está compuesta superficialmente por una delgada capa (1 cm) de mantillo compuesto por hojas. El primer horizonte del suelo tiene una profundidad que va desde los 0 cm a los 12 cm, con una textura al tacto franco-arenosa, un color gris oscuro (10YR-4/1 según la Tabla de Colores de Munsell) y con presencia importante de raíces finas y gruesas (*Horizonte A1*). Desde los 12 cm en adelante el horizonte mantiene una textura al tacto franco-arcillosa, de color café muy claro (10YR-7/4 según la Cuadro de Munsell) y con notable presencia de raíces finas y gruesas en todo el perfil descubierto (*Horizonte B1*).

En el caso de la ladera B (**Anexo 2 - Figura 1**), el perfil común está compuesto superficialmente por una delgada capa de 2 cm de materia orgánica, compuesta por un manto de hojas y en presencia de raíces finas. En cuanto al primer horizonte entre los 0 cm y 12 cm, de color café oscuro grisáceo (10YR-4/2 según la Cuadro de Munsell), se caracteriza por estar formado por partículas

moderadamente gruesas, clasificada con una textura al tacto como arenoso-limoso (*Horizonte A1*). El segundo horizonte va desde los 12 cm hasta los 26 cm de profundidad, con un color café claro amarillento (10YR-6/4 según la Cuadro de Munsell) y una textura determinada al tacto como franca (*Horizonte A2*). El tercer horizonte está formado desde los 26 cm hasta los 75 cm, con una coloración café muy claro (10YR-7/4 según la Cuadro de Munsell) y con una textura al tacto franco-arcillosa (*Horizonte B1*). Y a partir de los 75 cm de profundidad en adelante el último horizonte acumula las partículas más finas, clasificada al tacto como arcillosa (*Horizonte B2*). En los perfiles observados para esta ladera, la presencia de raíces en toda la dimensión del perfil es evidente, variando desde tamaños finos hasta raíces gruesas alrededor de los 5 cm. Esto es una incidencia positiva tanto en la consolidación de pedrs, y la creación de macro y microporos en la matriz del perfil (Lin, 2012b).

2.4.1.2 Textura

El componente espacial en las proporciones de las partículas del suelo para los puntos de muestreo, muestran diferencias de distribución según la posición en la ladera y también la profundidad del perfil.

Si se observa en la **Anexo 1 - Cuadro 2**, la composición promedio de ladera B apunta a una proporción más alta de partículas finas en sus perfiles observados (limos y arcillas) que en la ladera A. El promedio de las arenas en ladera A y ladera B son respectivamente 69% y 57%; en las arcillas la proporción es de 17% y 24% respectivamente; y en limos 13% y 19%. La incidencia de mayores niveles de pendiente en ladera B, ocasiona que las partículas más gruesas se acumulen en la ladera en menor tiempo comparado con las partículas más finas. Una prueba de que la parción de arenas no suelen depositarse amplios lapsos de tiempo en laderas, es que este tipo de textura domina la composición de los sedimentos que acarrea el San Lorencito, gracias a la comprobación de *Solano-Rivera y Granados-Bolaños* (2017). La evidencia de una leve mayor proporción de partículas más gruesas en los horizontes de ladera A coinciden con la presencia de zonas de deposición más estables en el transecto monitoreado.

En cuanto a la composición del perfil y sus horizontes, el tamaño de las

partículas descende conforme aumenta la profundidad en cada uno de los perfiles registrados. Conectado a lo anterior con la morfología de horizontes formados y la proporción de partículas en cada ladera, según *Lin* (2012b), esta distribución de los suelos a escala de ladera ocurre como manifestación de la interrelación entre los procesos de pedogénesis, geomorfología y las vías preferenciales del agua en el suelo.

2.4.1.3 Capacidad de almacenamiento de humedad

El rango de los valores en densidad aparente va desde los $0,26 \text{ g/cm}^{-3}$ a los $0,85 \text{ g/cm}^{-3}$, una variabilidad bastante amplia; pero que según *Alvarado y Forsythe* (2005) los suelos jóvenes en los que domina la alofana en las arcillas suelen tener valores de densidad aparente entre los $0,3 \text{ g/cm}^{-3}$ y $0,7 \text{ g/cm}^{-3}$. También *Henríquez y Cabalceta* (2012) mencionan que los Andisoles para ser considerados como tal sus valores deben ser inferiores a $0,8 \text{ g/cm}^{-3}$ en 45 cm de profundidad.

La capacidad de almacenamiento y transferencia de humedad en estos suelos con baja densidad es una de característica importante para lograr dichas funciones en estos suelos. En la **Anexo 1 - Cuadro 2** es posible relacionar estas capacidades con los valores altos de humedad gravimétrica y volumétrica en ambas laderas que garantizan una muy buena capacidad para mantener agua almacenada. Para el caso de la humedad gravimétrica en todos los puntos de muestreo, el valor mínimo es de 63,54% y el valor máximo de 172,93%. Mientras que para los datos de humedad volumétrica, el valor mínimo y máximo fueron respectivamente de 26,52% y 80,59%.

Para *Henríquez, Cabalceta, Bertsch y Alvarado* (2014), los Andisoles mantienen una muy buena estructura para la retención de humedad y para el drenaje también. De esta forma, ambas laderas se puede decir que mantienen características aptas para recibir grandes aportes de agua que ayuden a mantener el sistema hidrológico activo.

2.4.1.4 Infiltración

Los datos de porosidad, espacio aéreo y conductividad hidráulica mostraron resultados altos que comprueban la cualidad de estos suelos en la función de transferencia de grandes volúmenes de agua por la matriz del suelo hacia sistemas

subterráneos o hacia la red hídrica superficial.

Al echar un vistazo a los resultados de conductividad hidráulica en el **Anexo 1 - Cuadro 2**, a primera impresión se logra detallar tasas de conductividad bastantes altas en ambas laderas, con un promedio de ambas laderas de 96 mm/h. El rol que juegan las texturas francas, la baja densidad aparente y las capacidades almacenamiento de humedad, permiten condiciones de infiltración y movimiento del agua importantes para el mantenimiento hidrológico estable del bosque lluvioso premontano.

En los primeros 10 cm de profundidad de los suelos de ambas laderas se manifiestan resultados altos en la tasa de conductividad, con un promedio de 119,03 mm/h. Esto es un indicador importante de entrada para establecer el primer control que va influenciar el tipo de movimiento predominante de los flujos en las laderas, que para este caso dominan los procesos subsuperficial. Las condiciones altas de infiltración propician que el agua ingrese al suelo sin ningún obstáculo, dejando que los procesos hidrológicos en ambas laderas sean predominantemente en el sub-suelo.

En la ladera A, a partir de 30 cm la capacidad de infiltración (54,32 mm/h en promedio para ambas laderas) disminuyó con respecto se aumentaba en profundidad, con tasas disminuidas en comparación con las altas tasas registradas para 10 cm. Este comportamiento coincide con el horizonte B1, donde este horizonte cuenta con una textura franco-arcillosa debido al aumento en las proporciones de texturas finas (arcilla y limos). Esta condición de discordancia entre horizontes, es una condición ambiental que influyen en los patrones espacio-temporales en el movimiento de fluidos en ladera (*Jarvis, Moeys, Koestel y Hollis, 2012*), ya que en este caso la diferencia textural y de conductividad hidráulica disminuye en el movimiento vertical y propicia que el flujo se movilice horizontalmente.

Para la ladera B, las condiciones en su tasa de conductividad hidráulica entre distintos niveles de profundidad siempre mantuvieron valores muy altos. Como se verá más adelante, los niveles de humedad en *SL4* en todos sus niveles de profundidad registraron valores muy mínimos durante el año en compración de otros puntos, por lo que si se toma su componente topográfico en una pendiente de 27° (**Anexo 1 - Cuadro 2**), esta se convierte en una causa que pueda ocasionar tasas

muy altas de conductividad hidráulica, aunado al transporte constante de partículas gruesas que se van movilizandando en las laderas, por acción de la erosión laminar. En SL5 se registró un comportamiento de disminución de conductividad hidráulica conforme al aumenta de profundidad, dirección en la cual la textura de los horizontes profundos se vuelven más arcillosos.

2.5 Cobertura vegetal

Existen condiciones en la microcuenca que propician un ambiente ideal para la proliferación de especies de flora y fauna. En la ReBAMB, en cuanto a especies vegetales se tienen 1150 especies contabilizadas; mientras que la fauna contiene 56 especies de mamíferos no voladores, 75 especies de murciélagos, 256 especies de aves, 30 especies de anfibios y 35 especies de reptiles (UCR, ACCVC y *Onca Natural*, 2008). Según los parámetros de la clasificación de Holdridge (1967), en la cuenca predomina el Bosque pluvial premontano tropical (bp-P). Según Quesada-Monge (2007, p. 10) «los bosques en esta zona de vida son siempreverdes, con abundantes epífitas, con alta diversidad, densos, con alturas que superan los 30 m».

La estructura del bosque en la cuenca está constituida por al menos cuatro estratos identificados en diferentes investigaciones: el estrato superior constituido por árboles de 30 - 40 m de altura, el estrato medio entre 15 - 25 m de altura, el estrato inferior entre 5 - 10 m de altura, y por último el estrato más bajo en 0,5 - 2 m de altura (Salazar-Rodríguez, 2000, 2007; Wattenberg, Breckle y Ortiz-Vargas, 1996).

Estos rasgos de densidad y altura de la cobertura boscosa fueron complementados por Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017) mediante el uso de sistemas de información geográfica y la creación del índice de área foliar (LAI) para la microcuenca. Los resultados de este ejercicio indican mejor la diferenciación del comportamiento espacial del bosque en ambas laderas. Según el índice, la densidad de la cobertura forestal en ladera A es mucho menor (2,16) que en la ladera B (3,38), tomando en cuenta que la primera posee una pendiente promedio menor que la segunda (**Figura 6.2**). A pesar de estos valores, la presencia de bosque maduro en toda la microcuenca determina un papel activo en la conservación de los suelo y en la regulación de los procesos hidrológicos

subsuperficiales en la unidad de cuenca y ladera. La permanencia de la cobertura forestal le suma resiliencia al sistema para evitar la pérdida masiva del suelo mediante erosión, y por ende mantener tal recurso para el sostenimiento del sistema hidrológico.

El bosque es un componente del paisaje que juega un rol vital en la configuración de rutas preferenciales en las laderas para la conducción de flujos superficiales, subsuperficiales y verticales a través del suelo. Estas rutas en las laderas son fabricadas por el sistema radicular de la enorme diversidad de especies forestales presentes y por la fauna subterránea, ayudando a crear condiciones físicas ideales para el tránsito y almacenamiento de grandes volúmenes de agua que alimentan el sistema durante todo el año (*Germann, Lange, y Lüscher, 2012*).

Capítulo 3. Patrones de humedad en el suelo a eventos hidrometeorológicos

Para este capítulo se estará analizando en concreto los patrones espacio-temporales de la humedad en el suelo a través de cuatro eventos de tormenta seleccionados según la estación del año en la que se encuentran, y por sus características de duración, antecedentes de humedad y respuestas del contenido de humedad en el suelo ante la entrada de precipitación al sistema. Además se espera complementar dichos comportamientos de la humedad con una discusión en relación a las condiciones geopedológicas y vegetales en ambas laderas.

3.1 Comportamiento anual de la humedad en el suelo

La distribución vertical y horizontal de la humedad en las laderas se encuentra relacionada en gran parte relacionada a la variabilidad estacional que se vive a lo largo del año. Las épocas de abundancia en entradas de agua al sistema producen incrementos importantes en el contenido de humedad en los suelos, contrario a los descensos inmediatos en épocas de ausencia de lluvias.

La totalidad de resultados obtenidos en la medición de la humedad en los cinco puntos de muestreo, y en sus diferentes profundidades, muestran dinámicas variables a escala temporal anual que ejemplifican el funcionamiento hidrológico en las laderas para el suministro a los caudales de la red hídrica superficial y a los reservorios subterráneos. A pesar de ello, las laderas pueden mostrar heterogeneidades marcadas en sus patrones de humedad, ya sea por diferencias entre variables ambientales que causan discontinuidades espaciales en los flujos de humedad.

Se puede distinguir en la **Anexo 2 - Figura 2**, que los niveles más someros del perfil de suelo en todos los puntos, es decir < 50 cm, registran patrones de humedad bastantes activos al recibir la entrada de precipitación por medio de eventos de tormenta. Entre 10 cm y 30 cm, las entradas de agua ocasionaron dinámicas más rápidas de cambio en el contenido de humedad almacenado para esas

profundidades (*Muñoz-Villers y McDonnell, 2012*).

En cambio, los niveles más profundos del suelo (70 cm y 90 cm) solieron mantener en todo el año los niveles de humedad más altos para cada uno de los perfiles monitoreados. Estas profundidades en algunas veces lograron ser superados por otras profundidades, sin embargo eso se logró en un tiempo corto, alineado a la duración de las tormentas. Estos niveles al estar más alejados de la superficie y al contar con características de textura que ralentizan el movimiento vertical y horizontal de los flujos de agua, la reacción del aporte de agua a cada evento de tormenta tornó en respuestas tardías y con señales débiles en el cambio del contenido de humedad, tal como también lo registran (*Muñoz-Villers y McDonnell, 2012*).

En el siguiente análisis se escogieron cuatro eventos de tormenta que caracterizaron precisamente la dinámica del transporte y el almacenamiento de la humedad en los perfiles del suelo en diferentes estaciones del año. Cada evento de tormenta seleccionado (señalados en color naranja en la **Anexo 2 - Figura 2**) busca entender las respuestas de la entrada de humedad, en cada profundidad y en conexión con la ladera, bajo diferentes condiciones de antecedentes de humedad en el suelo. Dentro de esta selección de eventos, se analizan aquellos registrados en la estación de transición de húmedo a seco (diciembre 2016), estación seca (marzo 2017), transición de seco a húmeda (mayo 2017) y estación lluviosa (agosto 2017).

3.2 Patrones espaciales de humedad en el suelo según la estacionalidad climática.

3.2.1 Evento hidrometeorológico de diciembre 2016

En el último mes del año 2016 se registró una dinámica de disminución de la estación lluviosa debido a la entrada de condiciones atmosféricas que propician la entrada de la estación seca. Durante diciembre se registraron en total 197.77 mm de precipitación. Se identificaron 19 eventos de tormenta para este mes, cada uno superando los 2 mm de lluvia acumulada como mínimo para considerarse evento importante. De los eventos seleccionados para este mes se tiene un total de 150,6 mm, representando un 76,15% del total de lluvia mensual. El evento de tormenta

con el máximo en precipitación registró 33,03 mm en un tiempo estimado de 5,5 horas, mientras que el evento mínimo fue de 2,02 mm en 2,5 horas. El promedio de precipitación entre todos los eventos seleccionados del mes es de 7,93 mm.

Mientras tanto, el caudal del río San Lorencito presenta cuatro importantes ascensos de nivel en este mes, coincidiendo con los picos más notables de lluvia en la primera y tercera semana. El máximo fue de 2,29 m³/s, el mínimo de 0,14 m³/s y el promedio mensual es de 0,26 m³/s.

Se elige el evento número 16 del mes de diciembre para el análisis de todos los puntos de muestreo (del 25/12/16 a las 21:00 al 26/12/16 a las 00:30; área sombreada en la **Anexo 2 - Figuras 3 y 5**). Este evento de tormenta fue determinado como el segundo de mayor cantidad de precipitación registrada en el mes con 27,69 mm, y con una duración de 3,5 horas continuas. Además, se registró una intensidad de lluvia promedio de 44,53 mm/h y un máximo de 84,6 mm/h (**Anexo 1 - Cuadro 3**).

Para el evento número 16, los antecedentes de precipitación 1,3 y 7 días antes de la tormenta seleccionada fueron en ese orden 1,01 mm, 27,38 mm y 38 mm, registrando en solo 3 días el 72,05% de lo acumulado en una semana (**Anexo 1 - Cuadro 3**). Para este evento observado a final de mes, los 3 días anteriores al evento seleccionado se registró mayor cantidad de lluvia, por lo que las condiciones de humedad fueron más intensas. La importancia de escoger este evento es para comprender la dinámica hidrológica en los suelos en esta temporada de transición que va de la temporada lluviosa pasada a una nueva estación seca.

3.2.1.1 Ladera A

Las respuestas del contenido de humedad por ingreso de lluvia se reactivaron más rápido entre 10 cm y 50 cm, con amplias diferencias entre valores mínimos y máximos. Mientras que entre 70 cm y 90 cm el contenido de agua fue constante, con ligeras varianzas entre valores máximos de aportes de lluvia, y con tiempos de retraso más retardados (**Anexo 2 - Figura 4**). Los tiempos de retraso hacia el pico máximo de humedad, en cada nivel de profundidad y a causa de la tormenta, oscilan entre 2,5 y 6 horas empezado el evento de tormenta; aumentando el valor de horas en función del aumento de la profundidad en el perfil del suelo (**Anexo 1 -**

Cuadro 3). Este aumento en el tiempo de retraso se condiciona por el asentamiento de partículas más finas en horizontes más profundos, y por ende las condiciones de densidad y las disperejidades en la conductividad retrasan la llegada de la influencia de las tormentas a mayores profundidades.

El patrón común de aporte de humedad en las laderas por entradas de lluvias generaba patrones en los datos de incrementos espontáneos en el contenido de humedad. Se reconoce este patrón por el registro de un pico o nivel clímax de humedad en función del volumen e intensidad de la lluvia. Luego de terminado el aporte de precipitación, la humedad en suelos vuelve a retornar a niveles estables de humedad similares a los que se registraban en cada profundidad antes del comienzo de la tormenta (**Anexo 2 – Figura 4**).

En 90 cm registró un patrón importante a señalar. Al ser el nivel más profundo del perfil monitoreado, los tiempos de duración en los cambios de humedad son más lentos y retardados. Este retraso tiene dos efectos en esta profundidad: primero que no se registran cambios de aumento amplios y espontáneos de contenido de humedad, ya que durante el año la profundidad se mantiene en valores volumétricos similares de forma constante. Y segundo, es una profundidad susceptible a registrar levemente el efecto de onda de presión de aportes superiores por precipitación (*Farrick y Branfireun, 2014*), el cual tiende a movilizar la humedad a zonas no saturadas. Este efecto registró en los datos un patrón único de disminución espontánea de los niveles de humedad en todos los puntos de A a esta misma profundida, recuperando horas después los valores iniciales de humedad gracias al aporte de humedad que llegó de capas sobreyacentes (**Anexo 2 – Figura 4**). Este mismo efecto se identifica en ladera B para el mismo nivel de profundidad (**Anexo 2 – Figura 6**).

El agua infiltra sin dificultad en el suelo siguiendo la matriz de de macroporos y microporos de esos suelos de alta capacidad de conductividad hidráulica. Esto ocasiona que en SL3, al estar en la zona más cercana al río, la acumulación de humedad sea mayor y la conectividad entre río y ladera esté presente (**Anexo 2 – Figura 4**).

3.2.1.2 Ladera B

Se debe aclarar que los valores de humedad para SL4 en este mes no fueron

incluidos debido a la ausencia de datos a causa de errores en la lectura con los sensores de este punto, por lo que solo se ilustra en ladera B los patrones registrados para el punto SL5. Además, para este punto se excluye los datos incompletos de 50 cm durante la tormenta.

Los niveles de humedad más bajos se registraron en 30 cm, y Los valores de mayor contenido volumétrico fueron referidos a las profundidades de 70 cm y 90 cm. La respuesta del contenido de humedad en SL5 con respecto al aporte de lluvia por tormenta, registraron patrones amplios y espontáneos en cambios máximos de contenido de humedad entre 10 cm y 70 cm de profundidad. Esto induce una mayor capacidad hidráulica y transporte de humedad en los suelos de B, en comparación con los de ladera A; aunque la función de retención de humedad en los horizontes es débil por mantener registrar siempre valores muy bajos (**Anexo 2 – Figura 6**). La condición topográfica que mantiene el sitio, debido la inclinación abrupta del terreno en los puntos de instalación de los equipos de humedad, le agrega una condición más en el rápido transpor de la humedad a traves de sus recorridos preferenciales en el suelo.

Los tiempos de retraso entre el valor inicial de humedad y el valor máximo alcanzado por efecto de la tormenta, en las profundidades monitoreadas, ronda entre las 2,5 y 4,5 horas (**Anexo 1 - Cuadro 3**). La tendencia es al aumento de horas hacia niveles más profundas (**Anexo 2 – Figura 6**).

Se logró registrar un patrón único en 70 cm, el cual se identificó como un patrón sostenido de valores máximos de humedad por algunas horas después de terminado el evento; hasta retornar a los niveles estables de la profundidad. Un patrón similar, no tan definido como 70 cm, se logró registrar también en 10 cm. Estas representaciones que se pueden observar en la **Anexo 2 – Figura 6** indicaron la posibilidad de referirse a estas profundidades como zona exclusivas para flujos preferenciales laterales en B. Al mantener valores máximos de contenido de humedad por un lapso temporal sostenido, ocasiona que se alcance un valor umbral de saturación en esta sección vertical de la ladera, facilitando las condiciones para la activación de procesos de escorrentía espontáneos en dirección a la red hídrica superficial.

3.2.2 Evento hidrometeorológico de marzo 2017

En los días transcurridos de marzo la condición climática de la microcuenca es de sequía, en lo que respecta a la ausencia notable de los aportes de precipitación en el ecosistema húmedo que caracteriza el área de estudio. Durante este mes se registraron en total 46,53 mm de precipitación, el segundo mes más seco del año de análisis. Se identificaron 7 eventos de tormenta para marzo, concentradas todas durante la tercera semana del mes. De los eventos seleccionados para este mes se tiene un total de 26,12 mm, representando un 56,14% del total de lluvia mensual. El evento de tormenta con el máximo en precipitación registró 7,10 mm en un tiempo estimado de 4 horas, mientras que el evento mínimo fue de 2,29 mm en 2 horas. El promedio de precipitación total entre todos los eventos seleccionados del mes es de 3,73 mm.

Mientras tanto, el caudal del río San Lorencito presenta niveles bastantes bajos y marcado con respecto en su estación seca. El máximo fue de 0,161 mm/30 min, el mínimo de 0,009 mm/30 min y el promedio mensual es de 0,26 mm/30 min.

Se elige el evento número 1 del mes de marzo para el análisis de todos los puntos de muestreo (del 20/03/17 a las 22:00 al 21/03/17 a las 03:00; área sombreada en la **Anexo 2 – Figura 7**). Este evento de tormenta se da a cabo luego de una larga temporada sin eventos que superan los 2 mm de lluvia, y se cataloga como el segundo de mayor cantidad de precipitación registrada en el mes con 6,86 mm, y con una duración de 5 horas continuas. Además, se registró una intensidad de lluvia promedio de 3,12 mm/h y un máximo de 4,8 mm/h. Con esto, se elige analizar un evento de este mes para comprender la dinámica de humedad en los suelos para la temporada con menos lluvia del año.

Para el evento número 1, los antecedentes de precipitación para 1 día antes de la tormenta fueron de 2,77 mm, mientras que las condiciones acumuladas de humedad por tormentas para 3 y 7 días atrás fueron de 5,31 mm. Con esto es posible darse una leve idea de las condiciones secas imperantes incluso más de tres días atrás.

3.2.2.1 Ladera A

El contenido volumétrico de humedad en general para ambas laderas registró una

disminución considerable durante la estación seca. La tendencia fue a la disminución desde el evento seleccionado en diciembre, a consecuencia del bajo aporte de lluvias de la estación seca (**Anexo 2 – Figuras 7 y 8**).

Con respecto a la repuesta de los suelos y el aporte de lluvia para esta estación, se registraron patrones de recarga de humedad sostenidos por varios días en todas las profundidades (**Anexo 2 – Figura 8**). En 10 cm se registró una dinámica de incremento inmediata al aporte de agua de lluvia, y con un seguimiento en el aumento de la humedad por largo tiempo en toda la ladera. La humedad siguió infiltrando a través de capas de suelo más profundas entre 30 cm y 90 cm, pero cada vez a un ritmo lento y paulatino conforme se aumentaba la profundidad. Los tiempos de retrasos entre los valores mínimos y máximos por aporte de la tormenta van desde 3,5 a 96 horas (**Anexo 1 – Cuadro 3**).

Basado en los patrones de humedad en **Anexo 2 – Figura 8** y en los resultados de *Tenelanda-Patiño, Crespo-Sánchez y Mosquera-Rojas (2018)*, los umbrales máximos de contenido de humedad en el suelo suelen ser más altos en estación seca y bajos en estación húmeda. La disminución del contenido de humedad en el suelo en la temporada seca amplía la brecha de los valores umbrales de saturación en cada horizonte. Ante el aporte de humedad de alguna tormenta, el proceso de infiltración y almacenamiento predomina mucho antes de la activación de los procesos de escorrentía a lo largo del transecto de la ladera.

Las características del evento de tormenta seleccionado incidieron en un aporte significativo de humedad a los suelos que permitió reactivar un proceso de recuperación de volumen de humedad en el perfil y ladera. Otro de los resultados que *Tenelanda-Patiño, Crespo-Sánchez y Mosquera-Rojas (2018)* indican en su investigación, es que los cambios de humedad en el suelo responden en gran fuerza con el volumen e intensidad de las lluvias. Para este caso, se evidencia que la magnitud del aporte de humedad por tormenta incide en el almacenamiento de agua en el suelo por amplios periodos continuos, y por ende se explique la aparición del patrón de aumento sostenido registrado para los suelos de esta investigación (**Anexo 2 – Figuras 7 y 8**).

En esta ladera, los valores más altos de humedad en promedio suelen estar ubicados en el punto SL3, en la ladera baja (**Anexo 2 – Figura 8**). El contenido de

humedad mayor en esta zona está cerca de las fuentes que alimentan el caudal del San Lorencito, manteniendo la conectividad hidrológica presente durante la época seca. Esta zona además es importante para el recibimiento constante de flujos laterales subsuperficiales que provienen de partes más altas y de mayor pendiente en A.

3.2.2.2 Ladera B

Cabe especificar primero que los datos entre 10 cm y 50 cm en SL4, y 50 cm en SL5, no fueron incluidos en el análisis de este mes debido a problemas de lectura en los sensores que registran los niveles de humedad en tales profundidades.

Para el caso de SL4, el punto superior en ladera B, la tardanza que tomó para registrar cambios en el nivel de humedad por efectos de la tormenta en 70 cm y 90 cm, fue a las 20 y 24 horas respectivamente (**Anexo 1 – Cuadro 3**). A partir de ese momento, los niveles de humedad registraron un patrón de incremento paulatino, lento y sostenido por varios días. La infiltración de agua en los suelos de esta ladera juega un importante rol de aporte constante de agua al sistema en periodos secos. No fue posible verificar la dinámica en el horizonte superficial para esta época, pero se puede inferir los datos de otros eventos posteriores, que las propiedades físicas del suelo en estas profundidades soportan el ingreso de grandes cantidades de lluvia que son el sustento mayoritariamente para procesos de infiltración y almacenamiento en suelos no saturados durante amplios plazos.

En el punto SL5, los patrones de humedad durante y terminada la tormenta, muestran rápidas respuestas de incremento de niveles de humedad en las profundidades superficiales entre 10 cm y 30 cm. Además, en esas profundidades las respuestas no solo responden espontáneamente, sino más bien sostienen un alza continua del contenido de humedad durante lapsos de días. El aporte de humedad no es exclusivamente vertical en el perfil monitoreado, sino además hay una conectividad horizontal de partes más altas de las laderas en el que el agua va transitando moderadamente durante esta época, lo que ayuda a sostener el aporte de agua de las laderas.

Para el caso de las profundidades en 70 cm y 90 cm, la respuesta no es inmediata al comienzo de la tormenta. En 70 cm la curva de crecimiento del nivel de humedad se da muy ligeramente, y continúa por varios horas y días; mientras que

para 90 cm ocurrió un patrón de disminución ligera de la humedad en esa profundidad (**Anexo 2 – Figuras 9 y 10**).

Para entonces, la capa más profunda y su patrón registrado en los datos, evidencia para dicho momento del mes el aporte de humedad contenida en tal profundidad hacia zonas aún más profundas del perfil y a zonas de la ladera más cercanas a la red hídrica superficial. La inversión de las tendencias entre 70 cm y 90 cm (**Anexo 2 – Figuras 9 y 10**) es muestra además de la sincronía de procesos hidrológicos en laderas, creando fases intercaladas entre aportes positivos y negativos a lo largo del perfil vertical del suelo.

3.2.3 Evento hidrometeorológico de mayo 2017

En este mes de mayo se comenzó a notar un incremento en la entrada de las primeras lluvias que marchan hacia la estación lluviosa, por lo que se le denominó la estación transición de seca a húmeda. Durante este tercer mes de análisis se registraron en total 387,71 mm de precipitación, mes en el que vuelve a introducirse poco a poco la estacionalidad lluviosa del sitio. Se identificaron 25 eventos de tormenta para este periodo. De los eventos seleccionados para este mes se tiene un total de 351,63 mm, representando un 92,12% del total de lluvia mensual. El evento de tormenta con el máximo en precipitación registró 61,21 mm en un tiempo estimado de 5,5 horas, mientras que el evento mínimo fue de 2,28 mm en 0,5 horas. El promedio de precipitación total entre todos los eventos seleccionados del mes es de 14,07 mm.

Mientras tanto, el caudal del río San Lorencito recuperó un poco su nivel luego de atravesar la estación seca. El máximo fue de 9,68 mm/30 min, el mínimo de 0,039 mm/30 min y el promedio mensual es de 0,23 mm/30 min.

Se elige el evento número 23 del mes de mayo para el análisis de todos los puntos de muestreo (del 28/05/17 a las 13:30 hasta las 19:00; área sombreada en la **Anexo 2 – Figura 11**). Este evento de tormenta es el de mayor cantidad de precipitación recolectada de todos los eventos identificados para este mes, con un total de 61,21 mm. Además se registró una intensidad de lluvia promedio de 76,78 mm/h y un máximo de 201 mm/h. Se escoge esta tormenta con la intención de averiguar la dinámica en un evento de gran aporte de lluvias y con suelos con antecedentes de humedad notables.

Para el evento número 23, los antecedentes de precipitación para 1, 3 y 7 días antes del evento fueron respectivamente de 58,15 mm, 59,41 mm y 106,08 mm (**Anexo 1 – Cuadro 3**). Solo en los tres días anteriores se registró el 56% del total precipitado en siete días.

3.2.3.1 Ladera A

Los datos de 90 cm para los puntos SL1 y SL3 no forman parte del análisis debido a errores de lectura de los sensores.

La respuesta en los contenidos de humedad en los suelos de A retorna al patrón visto en diciembre 2016, con curvas de crecimiento espontáneas en forma de clímax y retornando en poco tiempo a un nivel estable de humedad similar horas antes del comienzo de la tormenta (**Anexo 2 – Figura 12**). Los tiempos de retraso registrados desde el comienzo de la tormenta hasta el nivel máximo de humedad se registraron en 5 y 6,5 horas, entre todas las profundidades monitoreadas (**Anexo 1 – Cuadro 3**). Los tiempos de retrasos entre profundidades cercanas no se dieron tan distante como en meses anteriores con tiempos más prolongado. La activación de flujos verticales se desarrolla sin problemas en un entorno de mayor humedad.

En los primeros 50 cm se registraron patrones más sobresalientes por cambios de nivel de humedad más amplios que en las otras profundidades. Sin embargo, a partir de esa profundidad los cambios de humedad por el aporte de lluvia se registran cada vez menos abruptos conforme se aumenta la profundidad (**Anexo 2 – Figura 12**).

De los tres puntos de muestreo en la ladera, aquellos niveles más altos de contenido volumétrico de humedad en suelos para este mes se encontraron en SL1 (**Anexo 2 – Figura 12**). La entrada de la estación lluviosa recargó mayoritariamente las zonas superiores en A, áreas donde se registraban valores más bajos de humedad durante periodo seco. Con la humedad recargada en plena transición a estación lluviosa, la parte superior de A comenzó su fase de almacenamiento de humedad para reponer lo aportado al sistema en meses de déficit de entradas de agua.

3.2.3.2 Ladera B

Los tiempos de retraso entre los niveles iniciales de humedad, al comenzar la

tormenta hasta alcanzar el punto máximo, ocurren entre 4 y 5,5 horas (**Anexo 1 – Cuadro 3**). Se identificaron para B, patrones con respuestas casi inmediatas entre 10 cm y 50 cm por influencia de la tormenta. De 70 cm de profundidad en adelante, los cambios de humedad fueron más retrasados y ligeros en el caso de SL4. Sin embargo, en SL5 el patrón de curva de cambio de humedad en 70 cm llega a un punto clímax que se mantuvo sostenido por varias horas, retornando finalmente de nuevo a un nivel base luego de no recibir más contenido de humedad. Este patrón se observa también en el evento seleccionado de diciembre, por lo que se cataloga esta profundidad en este punto de la ladera como una zona preferencial en los suelos para la conducción de flujos laterales subsuperficiales en esta ladera en medio de antecedentes con suelos saturados (**Anexo 2 – Figura 14**).

La distribución de la humedad en ladera B indicó una zona de mayor acumulación de humedad en SL5, y valores volumétricos de humedad muy bajos en SL4 (**Anexo 2 – Figura 13**). Esta última se encuentra en la parte alta de la sección de la ladera monitoreada, en condiciones topográficas de alta pendiente que propician el rápido movimiento del agua laderas abajo. Mientras tanto, en SL5 se encuentran más cercana a las zonas de la red hídrica superficial donde confluyen flujos preferenciales de zonas más elevadas en la ladera. Sin embargo, en todo el trasecto de esta ladera se obtuvieron buenos valores de infiltración y densidad en concordancia con la dominancia de arenas en los horizontes, proveyendo condiciones de porosidad óptimas (**Anexo 1 – Cuadro 2**).

Como fue de esperar, en ese tiempo de entrada a la estación lluviosa, la tendencia de los antecedentes de humedad en los suelos de esta ladera, así como en A, se mantuvieron al alza, recuperando mayores niveles de humedad y volviendo a reactivar procesos de conectividad lateral característicos de una estación más húmeda; tales como la escorrentía subsuperficial espontánea en horizontes someros durante eventos de tormenta.

3.2.4 Evento hidrometeorológico de agosto 2017

Agosto es el mes cuando el vigor de estación lluviosa se asienta sobre la microcuenca. Durante este mes se registraron en total 511,61 mm de precipitación, siendo este mes el más lluvioso de todo el año. Se identificaron 31 eventos de

tormenta para este mes. De los eventos seleccionados para este mes se tiene un total de 471,31 mm de precipitación, representando el 92,12% del total de lluvia mensual. El evento de tormenta con el máximo en precipitación registró 65,77 mm en un tiempo estimado de 2 horas, mientras que el evento mínimo fue de 2,03 mm en 0,5 horas. El promedio de precipitación total entre todos los eventos seleccionados del mes es de 15,20 mm.

Mientras tanto, el nivel máximo registrado de caudal del río San Lorencito fue de 12,46 mm/30 min, el mínimo de 0,012 mm/30 min y el promedio mensual es de 0,28 mm/30 min.

Se elige el evento número 26 del mes de marzo para el análisis de todos los puntos de muestreo (del 27/08/17 a las 15:30 hasta las 16:30; área sombreada en la **Anexo 2 – Figura 15**). Este evento registra un total de 27,95 mm en una duración de 1 hora. Además se registró una intensidad de lluvia promedio de 124,45 mm/h y un máximo de 183,1 mm/h. La particularidad de analizar un evento en este mes es por la presencia de varios evento de gran volumen de agua precipitada en un periodo relativamente corto o fugaz, como el seleccionado. Aparte de analizar los suelos con antecedentes bastantes húmedos, se espera comprender la respuesta a eventos cortos pero de intensidad alta.

Para el evento número 26, los antecedentes de precipitación para 1, 3 y 7 días antes del evento fueron respectivamente de 12,44 mm, 55,6 mm y 94,3 mm. Solo en los tres días anteriores al evento se registró el 58,96% del total precipitado en siete días atrás.

3.2.4.1 Ladera A

Los datos de 90 cm en todas los puntos de esta ladera, así como los datos de 70 cm en el punto SL1, fueron removidos del análisis por problemas de calidad en la lectura hecha por los sensores.

Los patrones de respuesta del contenido volumétrico de humedad en los suelos, en momentos de la tormenta, mostraron los patrones de curvas de crecimiento espontáneas vistas anteriormente en aquellos meses con altos antecedentes de humedad. Los tiempos de retrasos entre los valores iniciales de humedad y los valores máximos alcanzado durante el evento, rondan entre 1 y 3

horas después de iniciado el aporte de lluvia, incrementando el retraso con respecto al incremento de la profundidad. Es en la **Anexo 2 – Figura 16** se detalla que las profundidades entre 10 cm y 50 cm es la zona en ladera A que registra cambios del nivel de humedad más evidentes, espontáneos, amplios y con poco retraso a partir del comienzo del aporte de lluvias. Esto evidencia de nuevo que gran parte del aporte de agua se moviliza por este medio fortaleciendo la conectividad lateral en condiciones del suelo bastantes húmedas.

Los niveles registrados de humedad en A mostraron grandes cantidades almacenadas en la parte superior (SL1) e inferior (SL3) de la ladera (**Anexo 2 – Figura 16**). En estación lluviosa, toda esta ladera simuló contener reservorios importantes de agua. En SL3 se registró una mayor amplitud en las curvas de crecimiento de humedad durante el desarrollo de las tormentas, específicamente en los primeros 50 cm de profundidad. Justamente los suelos en este punto inferior en A mantienen una muy fuerte característica de acumulación de humedad debido al aporte de partes más altas de la ladera. Sus propiedades físicas le dotan de una densidad bastante amplia para la transferencia masiva de humedad.

3.2.4.2 Ladera B

Los datos de 50 cm en SL4 fueron excluidos del análisis por errores de lectura de los sensores en esa profundidad.

Los patrones de humedad varían entre los dos puntos de esta ladera. En el caso de SL4 los valores de humedad, además de estar en niveles muy bajos en comparación con SL5, los patrones de cambio de nivel de humedad son leves en la mayoría de las profundidades del perfil, siendo los cambios de humedad a 10 cm más dinámicos y amplios con los aportes de lluvia (**Anexo 2 – Figura 17**). Esto se debe a que en un contexto temporal húmedo, los umbrales de capacidad de almacenamiento en gran parte del espesor del suelo están cerca de alcanzarse. Sin embargo, aún queda una brecha mayor a los 10 cm.

Para el caso de SL5, los patrones de humedad entre tormentas fueron más activos en 10 cm y 70 cm. Los niveles de humedad en este espesor de 70 cm se mantuvieron bastante altos, lo que permite pensar en una mayor activación de estos horizontes como una zona preferencial para el movimiento de flujos laterales subsuperficiales hacia ladera abajo. Por ejemplo, la activación de procesos de

escorrentía se complementa con los datos registrados en 50 cm durante y después de la tormenta, los cuales registraron una curva de crecimiento de humedad más amplia de las cinco profundidades. La repetición del patrón de pico de curva sostenido en 70 cm que se identifica en meses anteriores, y en momentos de aportes de lluvia, establece un patrón que ilustra la activación de escorrentía en estas capas del perfil. La humedad en esta ladera mantiene valores más altos de contenido en la parte inferior (SL5), cercana a la zona de acumulación de la red hídrica superficial (**Anexo 2 – Figura 18**).

Ladera B repite en esta estación lluviosa como la ladera que registra una mayor amplitud en su espesor para llevar a cabo la activación de procesos de escorrentía y transporte lateral de humedad en dirección al pie de la ladera. Contrario a su ladera antagónica, la amplitud de esta zona preferencial para tales procesos de conectividad en A, se registra específicamente en los primeros 50 cm de sus suelos.

Finalmente, la selección de estos cuatro eventos de tormentas permitieron conocer mucho mejor las respuestas básicas del suelo en las laderas seleccionadas del San Lorencito durante los procesos de almacenamiento y transporte del agua ante diferentes condiciones de humedad en las laderas y en los horizontes monitoreados. Las laderas jugaron un rol importante en la conectividad hidrológica de la cuenca durante meses de déficit en entradas de lluvia. Básicamente en A y B las condiciones de humedad siempre se mantuvieron activas durante el año, con volúmenes importantes de agua en todo el perfil observado y actuando como reservorios de agua importantes durante los meses más secos. En el siguiente capítulo, se ilustrará las relaciones más destacadas entre variables físicas que condicionan en gran medida la distribución vertical y horizontal de la humedad en las laderas.

Capítulo 4. Relación de los factores biofísicos en laderas con la dinámica espacio-temporal de la humedad en el suelo y su conectividad hidrológica

En este capítulo se cuantifica la fuerza de las relaciones y se indica la dirección de las relaciones entre la humedad del suelo y los factores físicos del suelo, topográficos, hidrometeorológicos y de vegetación. Por medio del uso del método Spearman se busca tener argumentos adicionales que permitan comprender los patrones espacio-temporales de la humedad en el suelo registrados en los anteriores eventos de tormentas seleccionados en el capítulo anterior. Este capítulo de correlaciones se dividen en correlaciones espaciales y temporales, para conocer ambas dimensiones en la conectividad hidrológica de la ladera.

4.1 Almacenamiento de agua en la cuenca (ΔS): Porción de humedad en el suelo.

Uno de los elementos que compone el balance hídrico es la porción de agua que se aloja o almacena en la cuenca, el cual incide en el sostenimiento de un caudal en momentos cuando el balance producido sea positivo o negativo entre las entradas y salidas de masa en la cuenca. ¿Pero dónde se aloja esta porción de agua? ¿De que manera contribuye esta agua almacenada al sistema?. Desde luego, los suelos mantienen gran parte de esa porción del balance que no cuenta como entradas o salidas. Posterior a la entrada de lluvia, las salidas en el suelo pueden manifestarse como evaporación o escorrentía directa al cauce; sin embargo una gran parte de la humedad se mantiene almacenada durante amplios lapsos de tiempo, alimentando el sistema paulatinamente por medio de la infiltración y la percolación a sistemas subterráneos.

Para calcular el balance, primero se empieza calculando las anomalías entre que surgen entre las entradas de agua y las salidas del sistema. En la **Anexo 2** –

Figura 19 el almacenamiento del agua (ΔS) registra el mayor déficit de humedad en el mes de enero con -82,70 mm, el de mayor nivel de humedad fue agosto con 237,18 y el promedio general durante todo el periodo de análisis fue de 65,36 mm.

Si se trazan patrones generales en los niveles de contenido de humedad en el suelo para las cinco profundidades en ambas laderas, saldrán dos temporadas con tendencia al alza; la primera entre noviembre del 2016 hasta enero del 2017, y la segunda temporada con un mayor repunte de humedad desde mayo hasta octubre del mismo 2017. Los niveles más bajos de contenido de humedad en el suelo para A y B coinciden con los meses de déficit de lluvias entre febrero y abril (**Anexo 2 – Figura 19**). Este patrón de los datos de niveles de humedad en suelo frente a lo encontrado en ΔS permite esclarecer un primer vínculo entre el rol que juegan los aportes de humedad de las laderas a la conformación del caudal principal del río en meses secos. La variabilidad del contenido de humedad presente en el suelo, según la profundidad, dependen en gran medida también de los amplios o escasos aportes de humedad, la capacidad de retención del agua y las características pedológicas y topográficas de las laderas (McGuire y McDonnell, 2010).

La humedad total en los primeros 90 cm del suelo se saca por medio de la sumatoria de promedios de humedad en las cinco profundidades monitoreadas en cada mes. Mediante estas observaciones se puede conocer un panorama típico de las condiciones de humedad, por temporada, para todo el espectro de horizontes del suelo que componen las laderas. En la **Anexo 2 – Figura 19**, en complemento con los datos en el **Anexo 1 – Cuadro 1**, se reconocen de manera general dos patrones generales coincidentes entre almacenamiento y contenido volumétrico de humedad durante el año: al principio del periodo (Noviembre 2016 - Mayo 2017) en el que se reconocen niveles bajos de humedad en concordancia con los resultados negativos o en déficit de ΔS ; y un segundo periodo con niveles de humedad superiores en concordancia con los meses de superávit en ΔS (Junio - Octubre 2017).

Analizando con más detalle la dinámica promedio de humedad por profundidad (**Anexo 2 – Figura 19**), coinciden en ambas laderas los primeros 50 cm como las zonas donde se manifestaron cambios más radicales de contenido de humedad en el suelo entre estación lluviosa y seca. Estas capas superficiales demostraron tener una conexión más cercana con los cambios de humedad en base

a la estación imperante y la buena capacidad de transferencia de humedad en suelos porosos, retratando sin retraso y dificultad los cambios de humedad según la estación climática en la que se encontraban. De manera más retardada y no tan evidente, los cambios de humedad registrada a partir de 70 cm en adelante mantuvo levemente variables en gran parte del año. Donde se manifestó un descenso en contenido de humedad más notable en esta zona profunda fue en el mes de marzo.

Durante los meses déficit en ΔS (diciembre 2016 – marzo 2017) los niveles de humedad en las capas superficiales tendieron a compensar el contenido de humedad en zonas más profundas. La respuesta de las capas profundas del suelo, 70 cm – 90 cm, ante la ausencia de tormentas en meses secos, se tornó menos crítica gracias a los aportes sincronizados de horizontes superiores para la contribución gradual de agua a los sistemas subterráneos y/o la red hídrica superficiales (**Anexo 2 – Figura 19**).

En el mes de agosto, momento en que se registró la mayor balance positivo de humedad en el año, los niveles de humedad en todas las profundidades registraron contenidos muy cercanos entre sí, con una diferencia de aproximada de 9 mm entre el valor mínimo y máximo (**Anexo 2 – Figura 19**). Los niveles de humedad mostraron una capacidad de almacenamiento bastante alto en los niveles superficiales de los suelos (< 50 cm), asimilando condiciones de saturación en niveles profundos del suelo (> 50 cm). Este rango estrecho de diferencias de humedad indicaron la buena capacidad física de los suelos en el manejo de altos volúmenes de agua a través de las laderas.

El espesor del suelo en las laderas de esta microcuenca mantiene un papel muy importante en la conectividad hidrológica, debido a la considerable variedad de funciones y mecanismos para el almacenamiento y transferencia del agua en sistema. Para empezar, el desarrollo de un sustrato profundo, la actividad biológica en el suelo y la red radicular del bosque que abarcar gran parte de los horizontes formados, son factores fundamentales para el amplio de flujos de preferenciales de las entradas de agua en las laderas. Este espectro amplio en la formación de los suelos de ambas laderas permite el establecimiento de flujos horizontales y laterales, cada una dominando profundidades específicas del espectro del suelo. Los horizontes, en concordancia con sus propiedades de conductividad, textura y

porosidad, condicionan la dirección predominante de los flujos.

Otras de las ventajas del desarrollo del espesor ancho del suelo, y en sincronía con sus propiedades hidráulicas, es la capacidad robusta de almacenamiento de la humedad por largos periodos de tiempo. Esta característica le permite al sistema hidrológico de la microcuenca contar con una reserva importante de humedad en sus laderas, con la cual el caudal principal se mantiene activo en sus aportes de agua en aquellas estaciones secas donde el balance hídrico cae en déficit. El almacenamiento de humedad en los suelos de las laderas juega un gran rol estratégico en la resiliencia del ecosistema en condiciones hidroclimáticas adversas.

4.1.1 Ladera A

Para el caso del almacenamiento de agua (ΔS) en la ladera A (**Anexo 1 – Cuadro 4**) y sus niveles de humedad, desde el primer mes de observación hasta abril 2017, los niveles de humedad se mantuvieron entre los más bajos en coincidencia con los meses de menos aportes de precipitación, bajo caudal y alta evapotranspiración. En el caso del mes de febrero, a causa de problemas de lectura en el equipo instalado en campo, no se registraron los niveles de humedad en ninguno de los puntos de muestreo de la ladera A. Sin embargo, la tendencia observada en la **Anexo 1 – Cuadro 1**, y sumado a que ese mes fue el más seco, los niveles de humedad en cada profundidad podrían haber sido los de menor nivel registrado durante el año de observación. A pesar de no tener contribuciones en entradas de agua, la ladera cumplió con su función de aporte al sistema sin tener que vaciar todo su contenido en cada uno de los horizontes registrados por los sensores.

Durante los meses siguientes de mayo a octubre los niveles de humedad incrementaron en concordancia con la llegada de estación lluviosa. En el primer mes de esta estación, el nivel de humedad en 90 cm no aumenta tan ampliamente en comparación con las otras profundidades, sino que el retraso en el aumento de la humedad en ese horizonte se registró en el mes siguiente, en junio, debido a la tardanza del proceso de infiltración de aquellos nuevos aportes de agua (**Anexo 1 – Cuadro 4**).

4.1.2 Ladera B

Una comparación general entre laderas y sus niveles promedio de humedad, indicaron que en la ladera A se registran valores más altos de contenido de humedad almacenados en comparación con la ladera B. En la primera se registran un rango de valores promedio mensuales de humedad en el suelo desde 20 mm hasta 42 mm; mientras que en la segunda ladera ese rango ronda entre 14 mm y 35 mm (**Anexo 1 – Cuadro 4**). Esta lectura de niveles en los contenidos de humedad en B comprueban su mayor velocidad de transferencia de humedad a raíz de sus características de suelos con menor densidad de partículas, altas tasas de conductividad hidráulica y porosidad, valores de pendiente alta y menores índices de TWI y LAI (**Anexo 1 – Cuadro 5**). Estas características justifican la retención de menos humedad a partir del tránsito de flujos más rápidos en comparación con los registrados en la ladera opuesta.

4.2 Correlaciones espaciales

En este apartado de correlaciones espaciales se analizan los coeficientes de correlación de Spearman entre la variabilidad de los patrones de las físicas del suelo y el contenido de humedad promedio en las profundidades registradas para cada uno de los puntos de muestra en ambas laderas.

4.2.1 Correlación de los niveles de humedad en el suelo con variables geomorfológicas, de vegetación y de física de suelos.

El porcentaje de las partículas del suelo suele estar acompañado de algunas relaciones espaciales que condicionan su distribución. Para el caso de la porción de arenas, esta arrojó coeficientes altos negativos con la *altitud* (-0,97), el *porcentaje de arcillas* (-0,87), el *índice de área foliar* (LAI, -0,67) y el porcentaje de limos (-0,55). Las arenas ganan proporción conforme se disminuye la altura en laderas, áreas donde los espesores de suelo aumentan y los contenidos de humedad son altos gracias a que los suelos arenosos permiten la capacidad de infiltración altas tasas de entradas de agua (**Anexo 2 - Figuras 20 y 21**).

En el caso del porcentaje de las arcillas, los coeficientes más sobresalientes con esta estuvieron relacionados con las variables *altitud* (0,8) y el *índice de área*

foliar (0,5). Para el porcentaje de limos, los coeficientes más llamativos con otras variables espaciales son la *altitud* (0,62) (**Anexo 2 - Figuras 20 y 21**). La proporción de limos y arcillas crecen en medida de que aumente la altitud, ocasionando que los horizontes se compongan más de estas partículas más final estos puntos de la ladera al exportar las partículas más gruesas ladera abajo por medio de procesos erosivos o remoción. El hecho de contar con horizontes más limo-arcillosos en partes altas recalca la función de retención de humedad a largos plazos y de transferencia paulatina aportes verticales y horizontal en las laderas.

La densidad aparente del suelo destacó relaciones muy importantes con la *humedad volumétrica* (0,6), *porosidad* (-1, $p = 0,01$) y *espacio aéreo* (-0,9), indicando que a mayor densidad de partículas menor porcentaje de porosidad y espacio aéreo se reflejará en los suelos de ambas laderas (**Anexo 2 - Figuras 20 y 21**). Bajo este principio físico, la humedad se explica en gran parte con estos coeficientes, ya que un suelo muy denso va poder acumular humedad pero con ciertas limitaciones; en el caso inverso, un suelo poco denso permite mucho espacio entre partículas permitiendo escurrir el agua con mayor facilidad y velocidad. Es por ello que el amplio espesor de las laderas de la microcuenca permite el equilibrio de contar con horizontes menos densos en la parte superficial y los horizontes más densos los horizontes subyaciendo los primeros, para cumplir las condiciones idóneas para la activación de procesos de transferencia de humedad por las laderas a diferentes escalas de tiempo.

La porosidad, aparte de tener una relación muy fuerte y negativa con densidad aparente, posee una relación muy fuerte positiva con *espacio aéreo* (0,9). Esta crea relación al tomar en cuenta que el espacio aéreo aumenta si la existencia y capacidad de poros en el suelo es mayor. De ser un suelo reducido en poros, tanto para el aire como como para canales preferenciales del agua, el espacio aéreo también disminuirá su capacidad (**Anexo 2 - Figuras 20 y 21**). Sin embargo, el buen porcentaje de porosidad reflejado, al menos para los suelos de ambas laderas estudiadas, le brinda una buena condición en conductividad de fluidos en los suelos.

En el **Anexo 2 - Figuras 20 y 21** la humedad volumétrica registra importantes correlaciones con *espacio aéreo* (-0,8, $p = 0,05$), el *porcentaje de arcillas* (0,5), el *índice de área foliar* (-0,5), *porosidad* (-0,6) y *humedad gravimétrica* (0,6). Para el

caso de la *humedad gravimétrica* tenemos relaciones que sobresalen como *pendiente* (-0,67) y *porcentaje de limos* (0,67). Estas relaciones denominaron la preferencia de zonas con mayor humedad en condiciones pedológicas con texturas finas (limos y arcillas), con menor porosidad, y donde la pendiente sea cada vez menor donde facilite la acumulación de agua en dichas zonas de las laderas.

Otras asociaciones interesantes de visualizar, fueron la conductividad hidráulica con la *altitud* (0,9, $p = 0,1$), la *pendiente* (0,67) y el *índice de masa foliar - LAI* (0,9) (**Anexo 2 - Figuras 20 y 21**). La conductividad hidráulica de los suelos de A y B registra mayor asociación en aquellos sitios donde el modelado de pendiente alta facilita el transporte de humedad por la ladera desde partes de mayor altitud. Junto a esto último, el papel ecológico que fungen la cobertura boscosa en la conectividad hidrológica se evidencia con el alto coeficiente del LAI, que demuestra como la cobertura forestal configura con su amplio y denso sistema radicular la creación de condiciones óptimas de agregación y porosidad que ayudan a mantener un acceso rápido del agua.

Por último, en el caso del índice de humedad topográfica (TWI) las correlaciones que arrojaron algunas asociaciones de valor son el *porcentaje de arenas* (0,72), el *porcentaje de arcillas* (-0,7), *altitud* (-0,8, $p = 0,05$), *pendiente* (-0,82), el *índice de área foliar* (-0,8) y la *conductividad hidráulica* (-0,9, $p = 0,1$). Al contrario de las relaciones que arroja la conductividad hidráulica, el TWI muestra relaciones altas negativas con las partículas finas y altas positivas con las arenas (**Anexo 2 - Figuras 20 y 21**). La acumulación de humedad a través del factor topográfico es un índice que se compara en el ámbito superficial de los suelos. Es por eso que si este índice se alinea de manera inversa con la altitud, pendiente, LAI y la conductividad, dentro del contexto de las laderas estudiadas, es porque estas condiciones topográfica propician el transporte en lugar del almacenamiento de humedad. Lo anterior se explica aún mejor con la correlación de las texturas, coincidiendo espacialmente con la dinámica registrada en las partes más bajas de las laderas, las cuales reúnen condiciones de mayor proporción de arenas y contenido volumétrico de humedad.

En el caso de la relación de los promedio de humedad de suelo junto a las variables físicas del suelo, la variable más relevante que arroja correlaciones altas

con todas las profundidades es el porcentaje de *humedad gravimétrica*, que van desde 0,6 hasta 1. Otra variable significativa es el *espacio aéreo* del suelo que mantienen relaciones negativas entre -0,6 y -0,8. Con esto se deduce el comportamiento inverso de ambas variables: menos espacio aéreo traducido en mayor retención de agua y lento tránsito de humedad durante el año (**Anexo 2 - Figuras 20 y 21**).

4.2.2 Correlación de los niveles de humedad en el suelo con variables hidrometeorológicas

Para este análisis se utilizaron las variables hidrometeorológicas en contraste con los niveles de humedad para cada profundidad (**Anexo 1 – Cuadro 4**). Así se conoce mejor la importancia, o no, de la relación entre los patrones de humedad por ladera en la variabilidad meteorológica anual de la cuenca.

La variable de precipitación en la matriz de correlación (**Anexo 2 - Figuras 22 y 23**) mantuvo importantes relaciones positivas con relevante significancia ($p = 0,01$) con *caudal* (0,82), *intensidad promedio y máxima de lluvia* (0,92 y 0,9), y *almacenamiento* (0,87). Esto quiere decir que los aumentos o disminuciones en los niveles de lluvia mensuales actúan hacia la misma dirección y en fuerte asociación con la variabilidad del contenido de humedad en los suelos.

El apartado de almacenamiento (ΔS) registró correlaciones positivas de alto valor con *precipitación* (0,87, $p = 0,01$) y las *intensidades promedio y máxima de la lluvia* (0,78 y 0,82, $p = 0,01$). Estos valores explican que el almacenamiento de agua en la cuenca aumenta o disminuye si la cantidad de lluvia o intensidad también crecen o decrecen respectivamente (**Anexo 2 - Figuras 22 y 23**). Las entradas de agua al sistema, por medio del suelo en las laderas A y B, influyeron notablemente en la dinámica de acumulación de humedad en la cuenca. La alta capacidad de infiltración en los suelos automatizó el proceso de infiltración del agua, en lugar del escurrimiento superficial. La gran mayoría de los procesos de conectividad hidrológica se dieron en el contexto subsuperficial de las laderas, siempre en completa sincronía con los cambios meteorológicos.

Otras relaciones llamativas en los **Anexo 2 - Figuras 22 y 23** entre variables hidrometeorológicas son las que caudal posee con *evapotranspiración* (-0,79, $p = 0,1$) e *intensidad promedio y máxima de lluvia* (0,8 y 0,72, $p = 0,05$). En el caso del

coeficiente negativo entre caudal y evapotranspiración, esta asociación registró la consecuencia de la salida del agua del sistema y su reflejo en el nivel de caudal. Parte de la evaporación del agua también se da en los suelos. Sin embargo, la relación del caudal con las intensidades fue positiva porque entre más aporte de cantidad y frecuencia de agua por medio de la lluvia el caudal garantizó aumento en su volumen. Además, tomar en cuenta que a mayor intensidad de una tormenta, la activación de la escorrentía subsuperficial en horizontes superficiales de las laderas (50 cm) se potenció en ambas laderas. La cuantificación de este proceso se detalla a continuación para cada ladera monitoreada.

4.2.2.1 Ladera A

Las correlaciones entre el contenido de humedad y las variables hidrometeorológicas mostraron algunas relaciones explicativas de los patrones de humedad entre diferentes profundidades. Observando las **Anexo 2 - Figuras 22 y 23**, se nota de primera entrada una correspondencia alta de todas las profundidades medidas con la variable de humedad total del perfil. Esta apreciación se da porque cada profundidad es parte fundamental en la dinámica vertical y horizontal de la distribución de humedad. Casi todas las profundidades registraron coeficientes entre 0,83 y 0,62. La conectividad en los cambios de niveles de humedad en la totalidad de los horizontes existe, y se puede probar por medio estos coeficientes altos.

La relación entre precipitación y el contenido de *humedad a 10 cm* (0,71, $p = 0,1$) es el coeficiente más alto registrado en comparación con las otras profundidades. Por ejemplo, entre 30 cm de profundidad y los 70 cm los coeficientes rondan entre los 0,47 y los 0,53; y en los 90 cm aún menor con 0,25. Los primeros 10 cm de profundidad en el suelo indicaron una relación más fuerte por su cercanía en la entrada de la humedad en la parte superficial del suelo y la presencia de un horizonte con mejores características que propician la infiltración. Al descender en profundidad se registró una menor asociación con la precipitación, esto a causa de la tardanza que toma el agua transitar verticalmente por el perfil hacia horizontes cada vez limo-arcillosos.

La intensidad promedio y máxima de la lluvia, en confabulación con la precipitación, generan mayor asociación y significancia con la *humedad a 10 cm*

(0,55 y 0,7, $p = 0,1$). De la misma forma, la cercanía con la profundidad más superficial tiene una mayor relación con el comportamiento de la intensidad de la lluvia, pero en mayor valor con la intensidad máxima. La intensidad de la precipitación, o de la tormenta, surge como uno de los factores principales que condiciona el tipo de proceso hidrológico que se activa en las laderas, como el periodo de activación de los flujos laterales superficiales.

Las otras relaciones importantes que se obtuvieron en los **Anexo 2 - Figuras 22 y 23** tienen que ver entre las profundidades y ΔS . En los primeros 70 cm de profundidad, los niveles de humedad registraron coeficientes entre 0,68 y 0,74 con ΔS . El almacenamiento de agua (ΔS) coincide con importantes relaciones positivas en gran parte de las cinco profundidades monitoreadas, lo que demuestra una fuerte sincronía entre la porción de acumulación en el balance hídrico y el reservorio de humedad que se almacenan las laderas. Sin embargo, en 90 cm la asociación perdió fuerza debido a que los cambios en los niveles de contenido de humedad en ese horizonte fueron realmente poco variables en comparación a los extremos que registró el ΔS . En ladera A, las anomalías del balance hídrico durante el año reflejaron más fuertemente su influencia en los patrones de humedad en el suelo en los primeros 70 cm de profundidad. Esto último se le atribuye a la predominancia de los procesos de acumulación y aporte al sistema en lapsos de tiempo más prolongados.

4.2.2.2 Ladera B

Las correlaciones del contenido de humedad en ladera B se asimila con las mismas variables hidrometeorológicas que sobresalen en la ladera A. Primeramente, todas las profundidades mantuvieron coeficientes altos con la variable *humedad total del perfil*, desde 0,78 hasta 0,9 y con significancias de 0,01 y 0,05 (**Anexo 2 - Figuras 24 y 25**). En esta ladera, los cambios en el contenido de humedad del perfil total fueron dependientes en gran medida de los niveles que registran cada una de las profundidades monitoreadas. Este indicador respondió la conectividad vertical de flujos en esta ladera. El espesor del suelo es mantuvo un rol importante como reservorio para el aporte constante al sistema de la microcuenca.

La precipitación y el contenido de la humedad en los suelos registraron coeficientes entre 0,55 y 0,75. Sobresalió que 50 cm fue el que tuvo un coeficiente

mayor al de los demás (0,75). En comparación con la ladera opuesta, en B la precipitación mostró levemente mayor asociación con el cambio de los patrones de humedad. La condición de tener suelos con mayor conductividad hidráulica en esta ladera, más la influencia de la entrada de precipitación, generó con mayor facilidad cambios de nivel en los contenidos de agua en cada una de las cinco profundidades.

La características de la intensidad le brindó un factor extra en los cambios de patrones de humedad, tal como en A. Para esta ladera B, la intensidad máxima de la lluvia tuvo también una alta asociación con los valores de humedad en todas las profundidades, con valores coeficientes que van desde 0,59 a 0,73. Tomando en cuenta la fuerte relación entre *lluvia e intensidad*, hubo argumentos para pensar que ambas cumplen la función controladoras hidrometeorológicas en la distribución vertical y horizontal de la humedad en ambas laderas (**Anexo 2 - Figuras 24 y 25**). La condiciones de humedad en B no solo interactuaron más fuerte con la dinámica de las tormentas, sino que además las 5 profundidades monitoreadas solieron ser más activas en la conectividad hidrológica lateral en lapsos de más rápidos que en la ladera opuesta. Como se ha escrito anteriormente, el componente topográfico más fuerte en B dispuso de los 90 cm de espesor del suelo como rutas bastantes activas para el tránsito de flujo de escorrentía subsuperficial.

Con respecto al almacenamiento de agua (ΔS) se registraron relaciones regularmente consolidadas con los niveles de humedad en las diferentes profundidades. En 50 cm y 90 cm es donde se manifestaron coeficientes mayores a los demás (0,53 y 0,69 respectivamente), pero en ninguna de esas profundidades se registran significancias importantes (**Anexo 2 - Figuras 24 y 25**). Comparado con la ladera opuesta, la asociación entre los datos de humedad y la dinámica de almacenamiento fue débil, explicado por la predominancia de esta ladera por los flujos laterales hacia el caudal. El almacenamiento de humedad en el balance hídrico refleja un estado general de la microcuenca para ese periodo, lo cual refleja parcialmente su función de reservorio. Sin embargo, estos coeficientes que arrojaron las asociaciones indican que el componente de almacenamiento fue más débil que en A, a pesar de que los suelos monitoreados nunca dejaron de contener humedad.

4.3 Correlaciones temporales

En esta sección se realizó, para cada una de las profundidades en los cinco puntos de muestreo en ambas laderas, correlaciones temporales entre el contenido de humedad y las variables hidrometeorológicas, ambos recolectados con una frecuencia de cada 30 minutos para todo el conjunto de datos registrado en el año de observación. Se realizó esta evaluación para corroborar con un conjunto de datos más extenso la asociación de la humedad con las variables a lo largo del año. En las **Anexo 2 - Figuras 26 y 27**, se muestran los resultados de esa correlación efectuada.

Entre los resultados, se resaltó de nuevo la fuerte asociación entre precipitación e *intensidad de la lluvia*, con un coeficiente de correlación de 0,8 y un valor p inferior a 0,01. Las demás relaciones lucen débiles, quizás resaltando muy levemente los coeficientes entre *precipitación - caudal* (0,28, $p < 0,01$) e *intensidad - caudal* (0,26, $p < 0,01$). Este resultado entre precipitación y caudal es importante debido a que demuestra que la conformación del caudal depende débilmente de las entradas de lluvia. Los cambios de caudal no solo se debieron gracias al aporte directo de la precipitación, sino de otras fuentes como el aporte subterráneo del caudal base y el aporte subsuperficial de los flujos de retorno de las laderas.

Los coeficientes entre contenido de humedad para las cinco profundidades y *precipitación/intensidad/evapotranspiración*, arrojaron valores de correlación bajos. En el caso de las asociaciones con la lluvia, estas indicaron que los patrones de humedad en el suelo no son únicamente influenciados por las entradas de precipitación. Los suelos cambian su contenido de humedad por efecto de los procesos verticales y horizontales de almacenamiento y transporte del agua en la ladera, procesos continuos que son parte de procesos internos de las laderas que influyen en los cambios de humedad y en el aporte de agua al sistema hidrológico.

Se mostró un buen nivel de asociación en los coeficientes de correlación entre algunas profundidades y la variable *caudal* durante todo el año. Tomando los coeficientes iguales o mayores a 0,30, fue posible asociar estos resultados con la activación de aquellos horizontes en las laderas que fungieron como rutas preferenciales promoviendo la conectividad entre ladera y el aporte de agua a la red hídrica superficial. Estas pruebas son importante para reconstruir las posibles rutas

que toma el agua en sus movimientos en cada ladera (**Anexo 2 – Figura 26**).

Los flujos subsuperficiales laterales no se movilizaron ladera abajo uniformemente por discontinuidades horizontales y verticales físicas en los suelos, tales como cambios en la tasas de conductividad, texturas, densidades y porosidad. Si tomamos el ejemplo de ladera A y su punto más elevado (*SL1*), se puede ver en la **Anexo 2 - Figura 26** que de sus cinco profundidades solo 10 cm y 30 cm mantuvieron coeficientes mayores con caudal, en comparación con las demás profundidades (0,32 y 0,35 respectivamente). En el caso de *SL2* los coeficientes de correlación con caudal se convierten más relevantes entre los niveles 10 cm y 70 cm (0,27 – 0,37); mientras que para el punto *SL3* las profundidades de 10 cm y 50 cm mantienen coeficientes mayores que los demás niveles (0,43 y 0,45 respectivamente).

Con los anteriores coeficientes es posible determinar cuales son las rutas preferenciales en suelo que mantienen una sincronización más fuerte con el crecimiento con el caudal. En *SL1* las capas superficiales resultaron tener más sincronía con caudal (10 cm y 30 cm), ya que estas profundidades de textura arenosa y altas tasas de conductividad hidráulica facilitaron el movimiento de infiltración y flujo lateral durante este punto de la ladera. En el punto intermedio de A, osea *SL2*, los contenidos de humedad en los primeros 70 cm de profundidad mantuvieron alguna asociación con caudal, punto en donde las propiedades de infiltración son bastante positivas. Para el caso del punto inferior de esta misma ladera, *SL3*, la acumulación de la humedad en la parte baja de la ladera permite una conectividad directa y más fuerte con el caudal del río San Lorencito, ya que los coeficientes en 10 cm y 50 cm son aún mayores que los de los puntos inferiores de A (**Anexo 1 - Cuadro 2**).

Mientras tanto en ladera B, se presentaron en *SL4* coeficientes más relevantes con caudal en las profundidades de 30 cm, 70 cm y 90 cm (0,41 – 0,31 – 0,33 respectivamente); mientras que en *SL5* las profundidades 10 cm, 30 cm y 70 cm (0,46 – 0,43 – 0,4) resultaron con coeficientes más altos (**Anexo 2 - Figura 26**). Comparados con los coeficientes en A, estos son más altos por la definición de esta ladera como prioritariamente propensa a los procesos laterales de la humedad en las laderas. Los coeficientes muestran levemente mayor asociación con los cambios

de caudal, reforzando el hallazgo de vincular a ladera B como mayor productora de los aportes espontáneos al caudal a causa de las entradas de precipitación por tormentas.

La misma relación vista en ladera A sobre la generación de escorrentía subsuperficial se evidenció en B, aunque con un poco de más fuerza. En ambas laderas se demuestra la tendencia del aumento de los coeficientes de correlación entre caudal y humedad, en relación con el aumento de la profundidad. Esto induce a que conforme el valor de correlación se hace más fuerte en profundidad, existe una mayor asociación en la generación de flujos lateral subsuperficiales que se conectan por rutas preferenciales a lo largo de la ladera. Estas rutas cumplen eficientemente su función de conectividad hidrológica gracias a las propiedades de infiltración, geomorfológicas y la morfología de la red de macro/microporos en los suelos (Gwak y Kim, 2017; Tenelanda-Patiño, Crespo-Sánchez y Mosquera-Rojas, 2018).

Mediante los coeficientes de correlación, se pudo esclarecer la distribución de la humedad en las laderas a través de transectos en laderas, fijando posibles comportamientos subsuperficiales en las laderas de la cuenca (**Anexo 2 – Figura 32**). Sin embargo, la activación de la escorrentía no es la única constante de transferencia en laderas que se dio en todo el año. La presencia de diversos patrones estacionales climáticos influye en la activación de uno u otros procesos en mayor medida. En las siguientes dos secciones se analizaron los coeficientes de correlación resultantes entre los contenidos de humedad en las diferentes profundidades de los puntos de muestreo de cada ladera.

4.3.1 Correlación de variables temporales en Ladera A

La correlación temporal entre profundidades de esta ladera arrojaron resultados que ilustraron mejor la conectividad entre procesos laterales y verticales en las laderas. Para la ladera A se encontraron resultados bastante positivos casi en su totalidad, mostrando evidencias de relaciones positivas y significativas de conectividad en los procesos hidropedológicos entre horizontes y la ladera (**Anexo 2 - Figuras 28 y 29**).

En el caso de *SL1* (**Anexo 2 - Figuras 28 y 29**), cada profundidad está fuertemente asociada con la profundidad que lo subyace y sobreyace, a excepción de 90 cm que no registraron coeficientes confiables debido a pocos datos

registrados por errores en el sensor. Los coeficientes en las relaciones entre horizontes de *SL1* fueron desde 0,88 hasta 0,92, con valores de significancia (*p*) menores a 0,01. Interesante notar que los coeficientes entre profundidades no directamente emparentados (por ejemplo, 10 cm con 50 cm, o 30 cm con 70 cm) fueron decreciendo aunque siempre con valores altos y estadísticamente significativa. Estos datos de correlación justifican la conectividad vertical constante y casi instantánea con variables tiempos de retrasos. Los procesos verticales en las laderas siempre mantienen activos sus procesos, variando sus intensidad según los regímenes de entradas de humedad, los atributos físicos del suelo y la posición de la ladera.

Los hallazgos para *SL2* (**Anexo 2 - Figuras 28 y 29**) son muy similares al punto anterior, sin embargo, se logra observar una leve diferencia. El coeficiente de correlación entre los 10 cm y los 30 cm fue muy bajo comparado con los homólogos en los otros dos puntos de A (0,53, $p < 0,01$). Este resultado indicó la existencia de una horizonte a 30 cm que ocasiona una especie de discontinuidad en la conductividad hidráulica. Basado en el **Anexo 1 - Cuadro 2**, la tasa de infiltración que se obtuvo de la muestra de suelo a esta profundidad reflejó una capacidad más lenta de transferir fluidos. Esta discontinuidad produce que los fluidos no tengan tanta permeabilidad hacia horizontes inferiores, sino más bien propicia que la mayoría de los fluidos se desvien hacia movimiento laterales.

En *SL3* se registró un comportamiento muy similar al de *SL1*. Entre profundidades cercanas, los coeficientes rondan entre 0,79 y 0,93 con significancias menores a 0,01. En este caso es muy reconocible el hecho de que la conectividad vertical del perfil fue estable y respondió a las asociaciones típicas entre profundidades sobre y subyacentes (**Anexo 2 - Figuras 28 y 29**). Estos coeficientes para el punto inferior de ladera A demostraron una actividad intensa en la convergencia de movimientos laterales y verticales de humedad en el suelo.

Se indagó sobre la conectividad lateral de la ladera a través de los coeficientes entre mismos niveles de profundidades en los tres puntos de muestreo. Empezando por los 10 cm, se registra 0.88 para *SL1* y *SL2* de coeficiente de correlación y 0.85 para *SL2* y *SL3*; ambos con significancias (*p*) menores a 0,01. Vemos como la conectividad fue positiva y alta para los tres puntos en la zona superficial de los

suelos de la ladera, lo que indicaría un horizonte bastante activo y conectado para alojar y transferir grandes volúmenes de humedad (**Anexo 2 - Figuras 28 y 29**).

Otros dos horizontes en A que manifestaron tener una buena conectividad lateral fueron 50 cm y 70 cm. El primero registró entre *SL1* y *SL2* un coeficiente de 0,61, y entre *SL2* y *SL3* un valor de 0,63; ambos con significancias (*p*) menores a 0,01. La segunda profundidad registró *SL1* y *SL2* el coeficiente arroja un valor de 0,74, mientras que entre *SL2* y *SL3* un valor de 0,9. Ambos mantienen las significancias (*p*) por debajo de 0,01 (**Anexo 2 - Figuras 28 y 29**). El espectro geopedológico por donde los procesos hidrológicos se movilizan en A es bastante amplio y con asociaciones estadísticas fuertes. Estos resultados le dotan una mejor comprensión del papel que juega esta ladera en el aporte de agua a la microcuenca.

4.3.2 Correlación de variables temporales en Ladera B

En ladera B hubo asociaciones positivas más altas que en A, demostrando ser una ladera aún más activa y sincronizada entre horizontes y posiciones de la ladera (**Anexo 2 - Figuras 30 y 31**). Cabe aclarar que los coeficientes registrados para “sl4_50cm” y “sl5_90cm” tuvieron ausencia de datos durante casi todo el año en estas profundidades. Este faltante de datos ocasionó coeficientes muy poco relevantes.

Para el caso de la conectividad vertical en B, se rescató el caso de *SL4* con relaciones positivas y altas entre las profundidades de 10 cm y 30 cm (0,93, $p < 0,01$), y entre 70 cm con 90 cm (0,94, $p < 0,01$). Los coeficientes registrados para *SL5* entre las profundidades cercanas rondaron desde 0,59 hasta 0,96, todos con valores *p* menores a 0,01. El valor más pequeño de 0,59 corresponde al coeficiente de correlación entre 70 cm y 90 cm, registrando una leve disminución en asociación en la conectividad de estas profundidades (**Anexo 2 - Figuras 30 y 31**). Esto indicó que los cambios de humedad entre los dos horizontes más profundos se dio con mayor retraso en comparación con los demás horizontes, pero con ligera interrupción.

En cuanto a los coeficientes registrados para verificar movimientos laterales en la ladera, las mismas profundidades en cada uno de los dos puntos de muestreo revelan algunas profundidades en conexión mediante la ladera. Los coeficientes más representativos se dan en las profundidades de 10 cm, 30 cm y 70 cm entre los

puntos SL4 y SL5. Respectivamente los coeficientes de correlación son 0,9, 0,92 y 0,96; con valores de significancia menores a 0,01 (**Anexo 2 - Figuras 30 y 31**). Para ladera B, los primeros 70 cm son una ruta preferencial para los flujos horizontales que recorren la ladera desde su punto más alto. Una vez se comprueba que el potencial de conducir procesos laterales en esta ladera.

Finalmente, en el **Anexo 2 - Figuras 32** se resume e ilustra la rutas preferenciales del movimiento de agua en las dos laderas estudiadas. La propuesta parte de la comprobación estadística del comportamiento de los cambios de humedad con cada una de las variables biofísicas de las laderas. Gracias a la forma de haber visualizado los coeficientes y discutido dichos hallazgos en este capítulo, se pudo crear una primera hoja de ruta que ilustra y comprende los procesos hidrológicos a escala de ladera a través de sus patrones de distribución espacial ante la influencia de la estacionalidad climática anual.

Queda respaldado, con las correlaciones efectuadas, que las laderas mantienen rutas preferenciales entre los primeros 70 cm de profundidad, suelos que mantienen el potencial de transferir altos volúmenes de agua con tiempos de retraso estrechos. Esta activación de flujos horizontales y verticales subsuperficiales son áreas de gran importancia en el manejo de los suelos de la microcuenca, ya que transportan la mayoría de la humedad durante eventos de tormentas hacia el caudal principal. Esta conectividad casi automática se fundamenta con condiciones ideales de infiltración, porosidad y conductividad en los suelos encontrados en esta zona.

Apartir de los 70 cm en adelante se pudo apreciar que los contenidos de humedad no sufrieron cambios extremos, registrando levemente cambios en sus niveles de humedad en lapsos de tiempo muy largos. Aún así, esta zona de los perfiles de ambas laderas siempre contuvieron los mayores niveles de humedad durante todo el año, siendo el proceso de almacenamiento y aporte a niveles subterráneos los de mayor importancia en la conectividad hidrológica de la cuenca.

Las relaciones entre variables topográficas y ecológicas también fueron resaltadas como condicionante de la distribución espacial de la humedad. Estos hallazgos en este capítulo cumplen con retratar mejor el funcionamiento de las unidades de ladera en el rol de conectividad entre el agua almacenada y su aporte en los ritmos estacionales del caudal y la variabilidad climática del área de estudio.

Conclusiones

Se concluye que los objetivos de este trabajo de investigación fueron cumplidos gracias a los resultados, hallazgos y discusiones que demuestran la dinámica espacio-temporal hidropedológica en la cuenca del Río San Lorencito. A continuación se mencionan las conclusiones principales de este trabajo:

- El contenido de humedad a escala pedón y catena incrementa en estación lluviosa y decrece en estación seca. Esta diferencia temporal de volumen de humedad en los suelos priorizó el tipo de movimiento (lateral o vertical) del agua a través de las diferentes profundidades durante los eventos de tormenta desarrollados en tales estaciones.
- En época seca predomina la infiltración vertical de la humedad en laderas, mientras que en estación lluviosa los flujos sub-superficiales laterales se activan por condiciones de mayor saturación en los suelos. Estos movimientos mantuvieron cubierta la continuidad del caudal del río gracias al aporte constante de agua al sistema hidrológico, ya fuera por contribuciones verticales durante niveles críticos de humedad en estación seca; o flujos laterales sub-superficiales en tiempos con antecedentes de humedad muy altos.
- Resultados muy favorables de porosidad, conductividad hidráulica, porcentaje de arenas e intensidad de lluvia; permiten la transferencia y almacenamiento de altos volúmenes de humedad en los suelos de ambas laderas. Estas características físicas concuerdan con la buena capacidad de los suelos volcánicos andisoles en la función de recarga hídrica vista en *Muñoz-Villers y McDonnell (2012)*.
- Zonas con mayor contenido de humedad en laderas concuerdan en áreas de menor pendiente y altitud. Los contenidos volumétricos de humedad en el suelo mostraron correspondencia alta con el índice de humedad topográfica (TWI), aumentando la humedad mientras la pendiente decrecía. En el caso de la altitud, la humedad se acumuló en la parte baja de la ladera debido a la

gradiente altitudinal y la cercanía de la tabla de agua en esa zona próxima al cauce de la red hídrica superficial. El contenido de humedad en los puntos más cercanos al río de ambas laderas registraron valores mayores que los demás puntos de muestreo ladera arriba.

- Existe una conectividad hidrológica lateral constante entre ladera y río, con mayor frecuencia de aportes inmediatos al caudal en estación lluviosa y transferencias más lentas en periodos secos. Los primeros 70 cm de profundidad, en ambas laderas, mostraron ser la ruta más activa y variable en los patrones de humedad durante tormentas y en los cambios estacionales durante el año. Mientras que entre 70 cm y 90 cm la variación en los niveles de humedad fue muy reducida y con cambios de contenido más retardados, propiciando en mayor medida el almacenamiento de humedad durante largos periodos y con aportes paulatinos a niveles subterráneos.

Recomendaciones

Con base en las conclusiones expuestas, y en la adquisición de mejores perspectivas metodológicas, se exponen las siguientes recomendaciones a tomar en cuenta en futuros esfuerzos semejantes:

- Densificar la red de monitoreo de la distribución espacio-temporal de la humedad en el suelo en más áreas de la cuenca para conocer mejor la dinámica hidropedológica en varias zonas importantes de la cuenca.
- Incentivar el interés de investigar la dinámica hidropedológica en diferentes contextos de uso de la tierra, morfología de cuencas y tipos de suelo.
- Vincular esta metodología de análisis de los procesos hidrológicos en ladera con técnicas adicionales y novedosas como el uso de isótopos estables de muestras de humedad en el suelo, para determinar tiempos de tránsito del agua y la cuantificación del aporte estimado de humedad de las laderas al caudal principal.
- Estudiar en detalle el rol específico de la vegetación y la densidad radicular en el desarrollo evolutivo de la red de macro/micro-poros a escala de pedón y su conectividad en la escala de catena.
- Comparar los datos de humedad en el suelo obtenidos mediante diferentes técnicas de medición *in situ*, automatizadas y remotas para establecer diferencias y similitudes en cuanto a la precisión y veracidad de los resultados (Robinson et al, 2008).
- Promover los estudios hidropedológicos a escala de ladera en el país para garantizar procesos de diagnóstico más completos y robustos en el trabajo de la gestión integrada de cuencas hidrográficas y del recurso hídrico.
- Verificar el tiempo de tránsito del agua almacenada en laderas de la microcuenca del San Lorencito, mediante el análisis isotópico de muestras de agua recolectadas a lo largo de un transecto con dirección al caudal principal, y a diferentes profundidades del suelo (Muñoz-Villers y McDonnell, 2012).

Bibliografía

Alvarado-Induni, G. (2011). *Los volcanes de Costa Rica: geología, historia, riqueza natural y su gente*. (3 ed.). San Jose: EUNED.

Alvarado, A. y Forsythe, W. (2005). Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(1), 85–94. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/>

Alvarado, A., Mata, R., y Chinchilla, M. (2014). Arcillas identificadas en Suelos de Costa Rica a nivel generalizado durante el período 1931-2014: I. Historia, metodología de análisis y mineralogía de arcillas en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Agronomía Costarricense*, 38(1), 75–106.

Aparicio-Mijares, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de superficie*. México D.F.: Editorial LIMUSA.

Basher, L. (1997). Is pedology dead and buried? *Soil Research*, 35(5), 979–994. Recuperado de <https://doi.org/10.1071/S96110>

Brodie, J., Post, E. y Laurance, W. (2012). Climate change and tropical biodiversity: a new focus. *Trends in Ecology & Evolution*, 27(3), 145–150. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.09.008>

Bronstert, A. y Plate, E. (1997). Modelling of runoff generation and soil moisture dynamics for hillslopes and micro-catchments. *Journal of Hydrology*, 198(1–4), 177–195. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03306-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03306-9)

Bruijnzeel, L. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>

Bruijnzeel, L. A., Mulligan, M. y Scatena, F. N. (2011). Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes*, 25(3), 465–498. <https://doi.org/10.1002/hyp.7974>

Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. (2nd ed.). New York: Routledge.

Dehaspe, J., Birkel, C., Tetzlaff, D., Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M., y Soulsby, C. (2018). Spatially distributed tracer-aided modelling to explore water and isotope transport, storage and mixing in a pristine, humid tropical catchment. *Hydrological Processes*, 32(21), 3206–3224. <https://doi.org/10.1002/hyp.13258>

Dralle, D., Karst, N. J. y Thompson, S. E. (2016). Dry season streamflow persistence in seasonal climates. *Water Resources Research*, 52(1), 90–107. <https://doi.org/10.1002/2015WR017752>

Farrick, K. K. y Branfireun, B. A. (2014). Soil water storage, rainfall and runoff relationships in a tropical dry forest catchment. *Water Resources Research*, 50(12), 9236–9250. <https://doi.org/10.1002/2014WR016045>

Gómez-Delgado, F., Roupsard, O., le Maire, G., Taugourdeau, S., Pérez, A., van Oijen, M. y Moussa, R. (2011). Modelling the hydrological behaviour of a coffee agroforestry basin in Costa Rica. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(1), 369–392. <https://doi.org/10.5194/hess-15-369-2011>

Germann, P., Lange, B., y Lüscher, P. (2012). Preferential Flow Dynamics and Plant Rooting Systems. Lin, H (Editor), *Hydropedology* (pp. 121–141). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00004-6>

Gwak, Y. y Kim, S. (2017). Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. *Hydrological Processes*, 31(2), 431–445. <https://doi.org/10.1002/hyp.11039>

Henríquez, C. y Cabalceta, G. (2012). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. (2nd ed.). San José: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.

Henríquez, C., Cabalceta, G., Bertsch, F. y Alvarado, A. (2014). *Principales suelos de Costa Rica*. Consulta [31 Mayo 2019]. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/> (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Gobierno de Costa Rica).

Holdridge, L. R. (1967). *Life zone ecology*. Tropical Science Center, San José, Costa Rica, 206. Recuperado de <http://reddcr.go.cr/>

Hunter, P. (2017). Restoring tropical rain forests. *EMBO Reports*, 18(4), 523–525. <https://doi.org/10.15252/embr.201744118>

Ibáñez, J. (2007). *De la Edafología a la Zona Crítica Terrestre: ¿Iniciativa Institucional o Cambio de Paradigma Científico?*. [Conference Paper (pdf)]. III Simposio Sobre El Control de La Degradación de Suelos y La Desertificación. Fuerteventura, Islas Canarias, España. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>

Ibáñez, J., Ruiz-Ramos, M., Zinck, J. y Bru, A. (2005). Classical Pedology Questioned and Defended. *Eurasian Soil Science*, 38(1), S75–S80. Recuperado de <https://www.researchgate.net/>

Jarvis, N., Moeyes, J., Koestel, J. y Hollis, J. (2012). Preferential Flow in a Pedological Perspective. Lin, H (Editor), *Hydropedology* (pp. 75–120). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00003-4>

Largaespada-Zelaya, K. (2013). *Distribución espacial de la humedad y su relación con algunas propiedades físicas en un suelo sembrado con banano en Limón, Costa Rica*. (Tesis de Licenciatura en Ingeniería Agronómica). Universidad de Costa

Rica, Sede del Atlántico.

Ley de creación de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes. (Ley N° 7354, 1993). Costa Rica

Lin, H. (2012a). *Hydropedology: Addressing Fundamentals and Building Bridges to Understand Complex Pedologic and Hydrologic Interactions*. Lin, H (Editor), *Hydropedology* (pp. 3–39). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00001-0>

Lin, H. (2012b). Understanding Soil Architecture and Its Functional Manifestation across Scales. Lin, H (Editor), *Hydropedology* (pp. 41–74). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00002-2>

Lin, H., McDonnell, J. J., Nimmo, J. R. y Pachepsky, Y. A. (2015). *Hydropedology: Synergistic integration of soil science and hydrology in the Critical Zone. Hydrological Processes*, 29(21), 4559–4561. <https://doi.org/10.1002/hyp.10686>

McGuire, K. J. y McDonnell, J. J. (2010). Hydrological connectivity of hillslopes and streams: Characteristic time scales and nonlinearities. *Water Resources Research*, 46(10). <https://doi.org/10.1029/2010WR009341>

Muñoz-Villers, L. E. y McDonnell, J. J. (2012). Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research*, 48(9), L31–L34. <https://doi.org/10.1029/2011WR011316>

Naidoo, R., Balmford, A., Costanza, R., Fisher, B., Green, R. E., Lehner, B. y Ricketts, T. H. (2008). Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(28), 9495–9500. <https://doi.org/10.1073/pnas.0707823105>

Observatorio Urbano de la Gran Área Metropolitana. (2017). *La Gran Área Metropolitana*. Consulta [10 April 2017]. Recuperado de <http://ougam.ucr.ac.cr/>

Or, D., Tuller, M. y Wraith, J. (2009). *Agricultural & Environmental Soil Physics*. [pdf]

Quesada-Monge, R. (2007). *Los bosques de Costa Rica*. IX Congreso Nacional de Ciencias: Exploraciones Fuera y Dentro Del Aula, 16. Recuperado de <http://www.cientec.or.cr/>

Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R. y Wendroth, O. (2008). Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>

Salazar-Rodríguez, H. (2000). *Reserva Biológica Alberto Ml. Brenes: Veinticinco años de conservación, investigación y bioalfabetización*. San Ramón: Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica.

Salazar-Rodríguez, H. (2007). La investigación en la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes, San Ramón, Costa Rica (1975-2005). *Revista Pensamiento Actual*, 7(8–9), 114–123.

Schulz, K. (2018). *Iodine distribution, speciation and mobility in volcanic soils of a tropical forest – a case study from Costa Rica*. [pdf]. (Tesis de Maestría). Technical University of Braunschweig.

Solano-Rivera, V. y Granados-Bolaños, S. (2017). *Dinámica de transporte de sedimentos en la cuenca del Río San Lorencito (Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes) utilizando sensores de alta resolución temporal, 2015-2016*. [pdf]. (Tesis de Licenciatura en Geografía). Universidad de Costa Rica.

Tarboton, D. (2003). *Rainfall Runoff Processes*. Recuperado de https://digitalcommons.usu.edu/cee_facpub/2570

Tenelanda-Patiño, D., Crespo-Sánchez, P. y Mosquera-Rojas, G. (2018). Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera Altoandina. *Maskana*, 9(2), 53–65. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.07>

Tetzlaff, D., Birkel, C., Dick, J., Geris, J. y Soulsby, C. (2014). Storage dynamics in hydrogeological units control hillslope connectivity, runoff generation, and the evolution of catchment transit time distributions. *Water Resources Research*, 50(2), 969–985. <https://doi.org/10.1002/2013WR014147>

Toohey, R. C., Boll, J., Brooks, E. S. y Jones, J. R. (2018). Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica. *Geoderma*, 315, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.044>

Universidad de Costa Rica - Sede de Occidente, Área de Conservación Cordillera Volcánica Central y Onca Natural. (2008). *Plan General de Manejo de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes*. [pdf]. Recuperado de <http://www.sinac.go.cr/>

Veas-Ayala, N. (2009). *Caracterización y estimación de la erosión laminar en un bosque premontano a partir de un modelo hidrológico. Microcuenca del Río San Lorencito, Cordillera Volcánica de Tilarán, Costa Rica*. (Tesis de Licenciatura en Geografía). Universidad de Costa Rica.

Vogel, H. J., Clothier, B., Li, X.Y. y Lin, H. S. (2013). Hydrogeology—A Perspective on Current Research. *Vadose Zone Journal*, 12(4). <https://doi.org/10.2136/vzj2013.09.0161>

Wattenberg, I., Breckle, S. W. y Ortiz-Vargas, R. (1996). La diversidad de especies de árboles y la estructura de un bosque muy húmedo premontano en la Reserva Biológica Alberto Brenes. *Revista Pensamiento Actual*, 2(2), 1–11. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/>

Zhao, N., Yu, F., Li, C., Zhang, L., Liu, J., Mu, W. y Wang, H. (2015). Soil Moisture Dynamics and Effects on Runoff Generation at Small Hillslope Scale. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(7), 05014024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001062](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001062)

Zimmermann, B., Zimmermann, A., Turner, B. L., Francke, T. y Elsenbeer, H. (2014). Connectivity of overland flow by drainage network expansion in a rain forest catchment. *Water Resources Research*, 50(2), 1457–1473. <https://doi.org/10.1002/2012WR012660>

Anexo 1. Balance hidrológico, propiedades físicas del suelo y características hidrometeorológicas.

Mes	Humedad 10 cm (mm)	Humedad 30 cm (mm)	Humedad 50 cm (mm)	Humedad 70 cm (mm)	Humedad 90 cm (mm)	Humedad del perfil completo	Q (mm)	P (mm)	ET (mm)	I_Prom	I_Max	ΔS
<i>Noviembre</i>	13,51	16,74	16,06	16,66	24,96	87,93	309,1	388,66	17,01	2,75	168,1	62,55
<i>Diciembre</i>	18,27	20,15	21,37	26,57	30,45	116,81	212,84	197,77	31,18	0,78	63,2	-46,25
<i>Enero</i>	23,63	27,27	22,47	35,36	37,76	146,49	197,05	155,47	41,12	0,91	95	-82,7
<i>Febrero</i>	19,31	17,25	NA	33,95	32,84	103,35*	27,39	10,59	46,54	0,1	51,1	-63,34
<i>Marzo</i>	17,5	22,39	21,25	25,58	30,02	116,74	37,82	46,53	53,1	0,09	23,1	-44,39
<i>Abril</i>	15,58	20,26	29,94	32,51	34,74	133,03	41,86	88,69	49,47	0,72	116,1	-2,64
<i>Mayo</i>	18,51	26,36	23,29	37,23	30,72	136,11	191,57	387,71	44,17	1,98	159	151,97
<i>Junio</i>	24,98	31,23	33,98	41,16	41,86	173,21	142,44	284,3	43,26	1,78	142	98,6
<i>Julio</i>	29,32	32,8	35,08	41,69	34,28	173,17	247,38	467,34	26,81	2,49	200,4	193,15
<i>Agosto</i>	35,54	34,45	36,07	42,11	44,89	193,06	234,03	511,61	40,4	2,85	185,2	237,18
<i>Septiembre</i>	36,64	28,52	25	37,17	48,85	176,18	208,94	432,87	53,59	2,7	247,9	170,34
<i>Octubre</i>	34,07	27,74	33,96	34,59	44,53	174,89	298,29	445,84	37,68	2,26	247,9	109,87

Cuadro 1. Balance hidrológico mensual general, Noviembre 2016 - Octubre 2017.

* Valor total de humedad sin el dato de 50 cm.

Punto	Altitud (msnm)	Pendiente (°)	Profundidad (cm)	Promedio humedad (mm/100 mm de suelo)	Desviación estándar	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Conductividad hidráulica (mm/h)	Porosidad (%)	Espacio aéreo (%)
SL1	900	24	10	23,44	10,19	80	8	12	0,38	98,02	42,72	228,53	85,66	42,94
			30	45,69	14,98	60	18	22	0,34	91,26	34,09	43,35	87,17	53,08
			50	37,24	12,80	66	14	20	0,43	85,19	42,30	238,21	83,77	41,47
SL2	893	19	10	22,31	3,16	73	15	12	0,85	63,54	53,81	69,46	67,92	14,11
			30	18,56	2,43	64	21	15	0,34	104,62	35,09	8,66	87,17	52,08
			50	24,62	2,22	55	26	19	0,73	87,52	63,47	105,32	72,45	8,98
SL3	885	23	10	32,72	11,29	83	12	6	0,37	112,77	50,51	43,35	86,04	35,53
			30	34,61	9,35	80	12	8	0,26	93,23	27,36	0	90,19	62,83
			50	31,42	2,13	65	29	6	0,26	99,21	26,52	0	90,19	63,67
SL4	957	27	10	6,01	5,09	78	12	11	0,43	119,40	51,63	138,43	83,77	32,14
			30	3,44	1,89	75	17	8	0,33	166,62	54,63	92,99	87,55	32,92
			50	NA	NA	45	29	26	0,44	172,93	80,59	138,75	83,4	2,81
SL5	948	23	10	39,89	18,66	60	17	23	0,46	134,83	50,51	115,36	82,64	32,13
			30	33,08	15,68	40	38	22	0,4	102,36	27	126,59	84,91	57,91
			50	33,81	9,79	44	32	24	0,46	99,21	26,52	69,18	82,64	56,12

Cuadro 2. Cuadro de las propiedades físicas del suelo para los puntos de muestra en ladera A (verde) y ladera B (rojo).

Evento	Prof	Min	Max	Prom	TR	DT	I_Max	Ant1	Ant3	Ant7
1	SL1_10	21,71	26,42	23,96	2,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL1_30	29,45	30,51	29,94	2,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL1_50	21	22,17	21,35	2,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL1_70	29,54	29,89	29,66	3,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL1_90	32,07	32,67	32,39	5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL2_10	18,88	22,98	20,39	2,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL2_30	21,01	22,33	21,31	3,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL2_50	26,14	26,39	26,22	3,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL2_70	29,33	29,42	29,38	5,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL2_90	28,79	29,18	29,01	6	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL3_10	24,44	30,62	27,38	2,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL3_30	39,78	46,68	42,84	3	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL3_50	31,16	35,67	33,07	3	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL3_70	47,48	49,35	48,04	3	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL3_90	55,47	56,89	56,21	6	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL4_10	NA	NA	NA	NA	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL4_30	NA	NA	NA	NA	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL4_50	NA	NA	NA	NA	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL4_70	NA	NA	NA	NA	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL4_90	NA	NA	NA	NA	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL5_10	25,14	28,68	26,79	2,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL5_30	10	14,94	12,01	2,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL5_50	NA	NA	NA	NA	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL5_70	34,18	36,41	34,89	3	3,5	84,6	1,01	27,38	38
	SL5_90	32,31	32,68	32,53	4,5	3,5	84,6	1,01	27,38	38

Cuadro 3. Características hidrológicas registradas durante los eventos de tormenta seleccionados en ladera A (verde) y B (rojo). Continúa...

Evento	Prof	Min	Max	Prom	TR	DT	I_Max	Ant1	Ant3	Ant7
2	SL1_10	12,19	14,07	12,92	3,5	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL1_30	23,06	23,51	23,25	36	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL1_50	13,58	13,66	13,62	24	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL1_70	24,1	24,16	24,13	40	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL1_90	29,02	29,07	29,05	72	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL2_10	11,21	15,4	13,37	5	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL2_30	11,14	11,26	11,19	20	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL2_50	16,96	17,14	17,05	36	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL2_70	22,86	22,92	22,90	60	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL2_90	25,56	25,6	25,59	96	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL3_10	20,08	21,99	21,27	4	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL3_30	31,56	33,87	32,34	1,5	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL3_50	25,93	26,02	25,98	23	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL3_70	39,4	39,46	39,43	40	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL3_90	51,06	51,15	51,10	> 96	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL4_10	NA	NA	NA	NA	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL4_30	NA	NA	NA	NA	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL4_50	NA	NA	NA	NA	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL4_70	2,59	2,61	2,60	20	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL4_90	6,38	6,4	6,39	27	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL5_10	11,38	13,47	12,48	5	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL5_30	13,73	14,93	14,54	5	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL5_50	NA	NA	NA	NA	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL5_70	32,34	32,84	32,63	NA	5	4,8	2,77	5,31	5,31
	SL5_90	32,33	32,48	32,42	NA	5	4,8	2,77	5,31	5,31

Cuadro 3. Continuación...

Evento	Prof	Min	Max	Prom	TR	DT	I_Max	Ant1	Ant3	Ant7
3	SL1_10	21,24	26,36	23,31	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL1_30	58,52	61,31	59,70	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL1_50	46,52	49,09	47,37	5,5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL1_70	61,75	62,39	62,00	6	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL1_90	NA	NA	NA	NA	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL2_10	22,93	27,99	25,12	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL2_30	18,76	21,17	19,86	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL2_50	25,55	27,49	26,37	5,5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL2_70	29,95	32,17	30,59	5,5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL2_90	29,97	31,2	30,37	6,5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL3_10	24,22	28,61	25,96	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL3_30	36,93	49,07	39,48	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL3_50	31,34	40,56	32,93	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL3_70	47	50,48	48,26	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL3_90	NA	NA	NA	NA	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL4_10	2,55	7,1	5,32	4	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL4_30	2,31	3,48	2,82	4	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL4_50	NA	NA	NA	NA	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL4_70	5,37	6,37	5,97	4	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL4_90	9,71	10,34	9,94	5,5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL5_10	29,18	32,49	30,88	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL5_30	18,79	22,05	20,37	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL5_50	10	36,15	15,72	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL5_70	62,32	67,49	65,74	5	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08
	SL5_90	NA	NA	NA	NA	5,5	201,4	58,15	59,41	106,08

Cuadro 3. Continuación...

Evento	Prof	Min	Max	Prom	TR	DT	I_Max	Ant1	Ant3	Ant7
4	SL1_10	45,5	46,03	45,77	2	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL1_30	60,09	60,57	60,33	2,5	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL1_50	47,06	47,08	47,07	3	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL1_70	NA	NA	0,00	0	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL1_90	NA	NA	0,00	0	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL2_10	26,44	28	27,22	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL2_30	20,26	21,89	21,08	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL2_50	25,66	25,88	25,77	2	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL2_70	30,34	30,35	30,35	2	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL2_90	NA	NA	0,00	0	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL3_10	54,5	57,79	56,15	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL3_30	41,62	47,38	44,50	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL3_50	33,16	35,91	34,54	2	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL3_70	47,81	47,86	47,84	2	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL3_90	NA	NA	0,00	0	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL4_10	5,06	6,3	5,68	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL4_30	2,87	2,91	2,89	1,5	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL4_50	NA	NA	0,00	NA	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL4_70	6,68	6,7	6,69	3	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL4_90	10,76	10,77	10,77	4	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL5_10	61,15	62,08	61,62	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL5_30	51,25	55,1	53,18	1,5	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL5_50	38	66,55	52,28	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL5_70	62,79	66,13	64,46	1	1	183,1	12,44	55,6	94,93
	SL5_90	60,74	61,22	60,98	2	1	183,1	12,44	55,6	94,93

Cuadro 3. Continuación...

Mes	Humedad 10 cm (mm)	Humedad 30 cm (mm)	Humedad 50 cm (mm)	Humedad 70 cm (mm)	Humedad 90 cm (mm)	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Humedad del perfil completo (mm)	Q (mm)	P (mm)	ET (mm)	I_Prom (mm/h)	I_Max (mm/h)	ΔS (mm)
Noviembre	16,16	18,56	16,63	20,58	28,64	20,11	5,08	100,57	309,1	388,66	17,01	2,75	168,1	62,55
Diciembre	21,01	23,31	24,89	31,86	37,46	27,71	6,79	138,53	212,84	197,77	31,18	0,78	63,2	-46,25
Enero	22,91	30,7	26,22	35,68	39,46	30,99	6,74	154,97	197,05	155,47	41,12	0,91	95	-82,7
Febrero	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	27,39	10,59	46,54	0,1	51,1	-63,34
Marzo	17,76	24,72	21,25	30,53	36,68	26,19	7,53	130,94	37,82	46,53	53,1	0,09	23,1	-44,39
Abril	19,51	28,31	29,94	41,54	38,92	31,64	8,83	158,22	41,86	88,69	49,47	0,72	116,1	-2,64
Mayo	22	37,43	33,44	45,66	28,24	33,35	8,99	166,77	191,57	387,71	44,17	1,98	159	151,97
Junio	23,46	38,4	34,4	46,16	48,08	38,10	9,91	190,5	142,44	284,3	43,26	1,78	142	98,6
Julio	28,79	39,18	35,09	46,65	31,34	36,21	7,03	181,05	247,38	467,34	26,81	2,49	200,4	193,15
Agosto	37,74	40,11	35,59	47	53,98	42,88	7,54	214,42	234,03	511,61	40,4	2,85	185,2	237,18
Septiembre	40,15	30,82	29,72	39,28	61,74	40,34	12,87	201,71	208,94	432,87	53,59	2,7	247,9	170,34
Octubre	27	26,84	26,92	33,11	61,48	35,07	15,01	175,35	298,29	445,84	37,68	2,26	247,9	109,87
Noviembre	10,86	11,28	14,33	18,27	19,43	14,83	3,92	74,19	309,1	388,66	17,01	2,75	168,1	62,55
Diciembre	14,16	10,64	10,80	18,61	19,94	14,83	4,32	74,17	212,84	197,77	31,18	0,78	63,2	-46,25
Enero	25,79	16,99	11,20	34,40	32,65	24,21	9,99	121,05	197,05	155,47	41,12	0,91	95	-82,7
Febrero	19,31	17,25	NA	33,94	32,84	25,84	8,78	104,46 *	27,39	10,59	46,54	0,1	51,1	-63,34
Marzo	16,70	15,39	NA	18,15	20,03	17,57	1,99	78,11 *	37,82	46,53	53,1	0,09	23,1	-44,39
Abril	9,66	8,18	NA	18,96	28,45	16,31	9,39	133,44 *	41,86	88,69	49,47	0,72	116,1	-2,64
Mayo	13,28	9,73	8,06	24,57	34,44	18,02	11,21	90,10	191,57	387,71	44,17	1,98	159	151,97
Junio	27,26	20,46	32,73	33,65	35,64	29,95	6,15	149,76	142,44	284,3	43,26	1,78	142	98,6
Julio	30,10	23,23	35,03	34,23	35,72	31,66	5,19	158,34	247,38	467,34	26,81	2,49	200,4	193,15
Agosto	32,24	25,96	37,48	34,76	35,80	33,25	4,50	166,25	234,03	511,61	40,4	2,85	185,2	237,18
Septiembre	33,12	26,21	20,28	35,05	35,97	30,13	6,70	150,64	208,94	432,87	53,59	2,7	247,9	170,34
Octubre	37,60	28,18	40,99	35,33	36,14	35,65	4,70	178,26	298,29	445,84	37,68	2,26	247,9	109,87

Cuadro 4. Balance hidrológico mensual en ladera A (verde) y ladera B (rojo), Noviembre 2016 - Octubre 2017.

* Valor total de humedad sin el dato de 50 cm.

Punto	10 cm (mm)	30 cm (mm)	50 cm (mm)	70 cm (mm)	90 cm (mm)	TWI	Pendiente (°)	LAI	Altitud (msnm)	Arenas (%)	Arcillas (%)	Limos (%)	Humedad gravimétrica (%)	Humedad volumétrica (%)	Densidad aparente (g/cm3)	Porosidad (%)	Espacio aéreo (%)	Conductividad hidráulica (mm/h)
SL1	22,51	42,74	33,60	46,48	27,36	5,6	24	3,49	900	66	27	7	103	39,14	0,38	85,66	46,52	61,14
SL2	21,90	19,08	24,41	28,23	36,70	6,6	19	1,63	893	69	13	18	112	33,6	0,3	88,68	55,08	43,49
SL3	30,63	33,61	28,79	41,99	53,42	6,3	23	1,37	885	76	18	7	85	54,4	0,64	75,85	21,45	10,52
SL4	4,56	3,04	0,63	4,99	9,38	3,36	27	3,56	975	66	19	15	77	30,8	0,4	84,91	54,11	123,39
SL5	36,45	27,86	26,45	46,81	47,91	3,63	23	3,19	958	48	29	23	152	60,95	0,46	82,64	21,69	103,71

Cuadro 5. Matriz de variables biofísicas para cada punto de muestreo, en ambas laderas (**A** en verde y **B** en rojo); utilizada para el proceso de correlación de variables por el método Spearman.

Anexo 2. Propiedades físicas del suelo de las laderas, condiciones hidrometeorológicas del sitio, patrones de humedad en el suelo y coeficientes de correlación espacio-temporales de variables biofísicas.

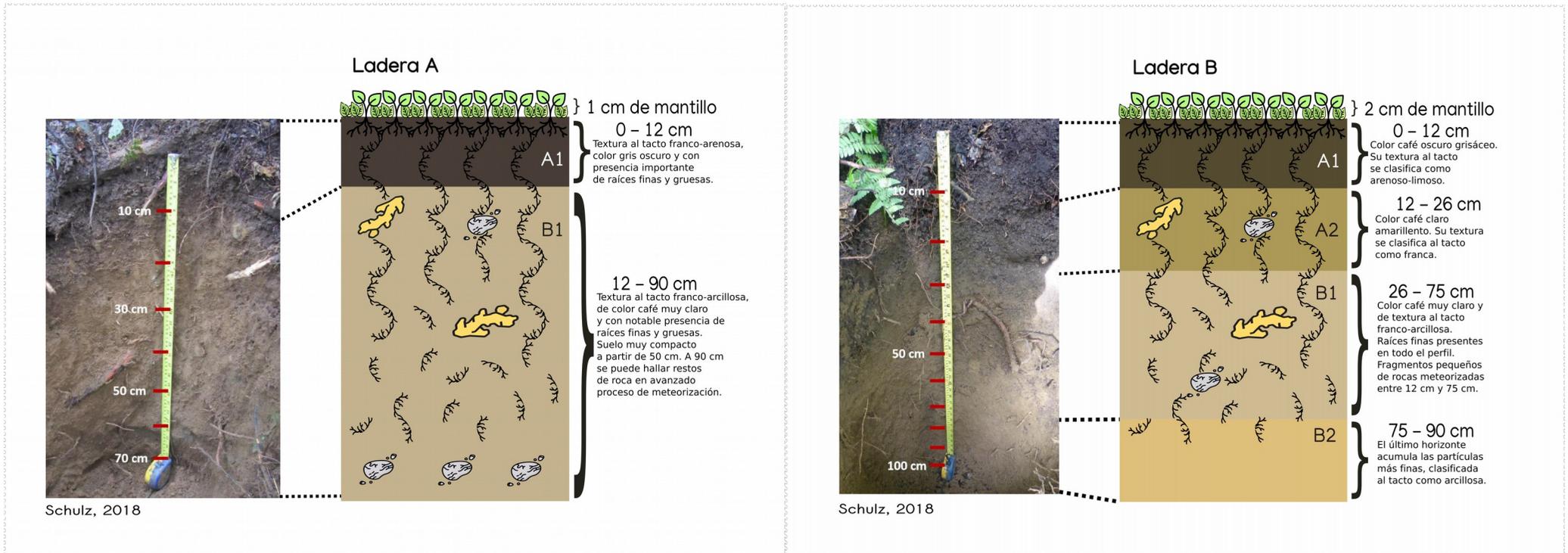


Figura 1. Perfiles comunes del suelo en ladera A y B. En ambas casos la presencia de raíces finas y gruesas en los perfiles es notoria y abundante. Ladera A mantiene un desarrollo de horizontes menor que en B. En la primera fue más frecuente encontrar restos de roca en el perfil que en la segunda. Los resultados arrojaron texturas ligeramente más gruesas en B que en A.

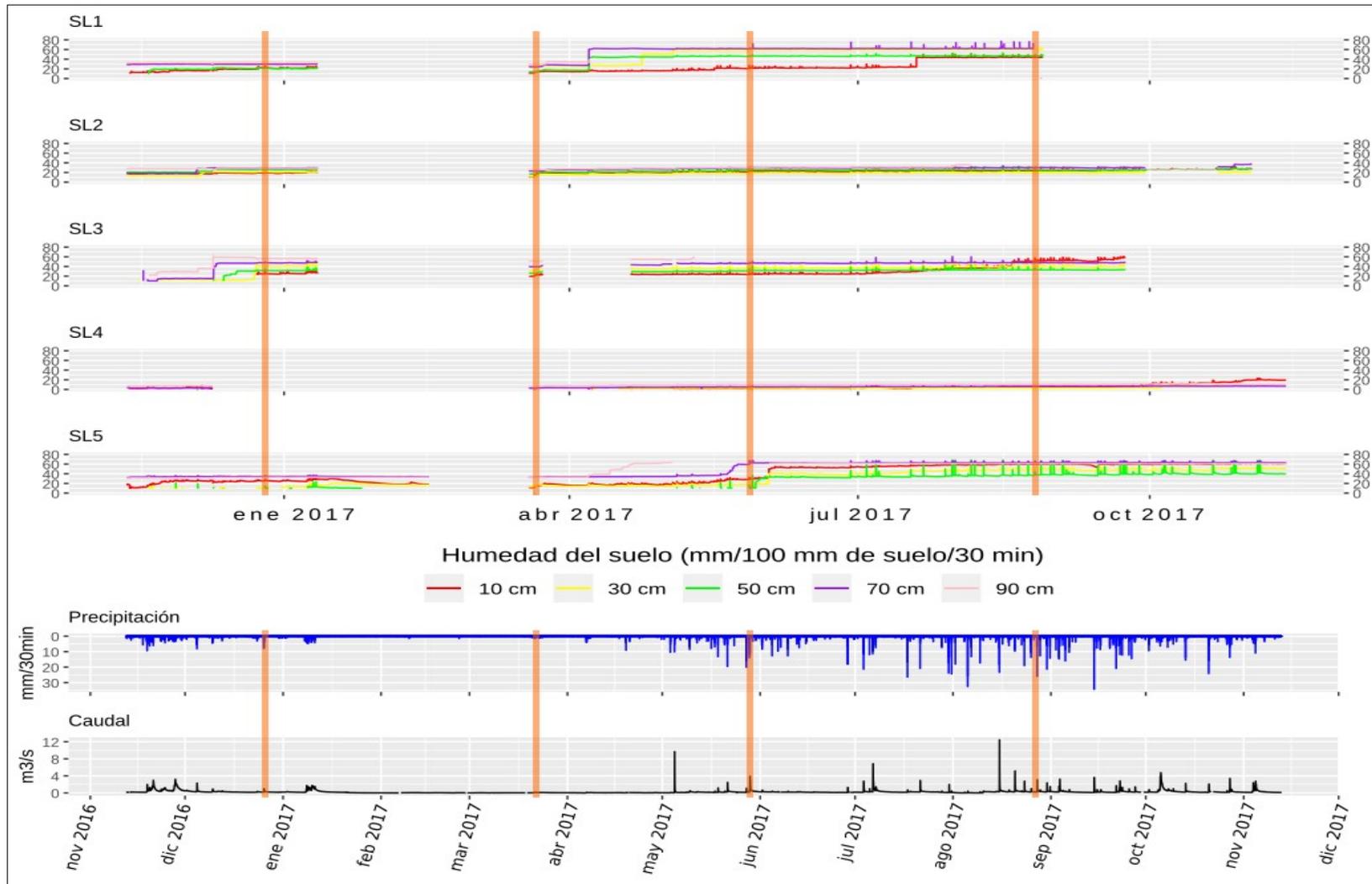


Figura 2. Dinámica anual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal (noviembre 2016 – octubre 2017) con eventos seleccionados marcados en color naranja.

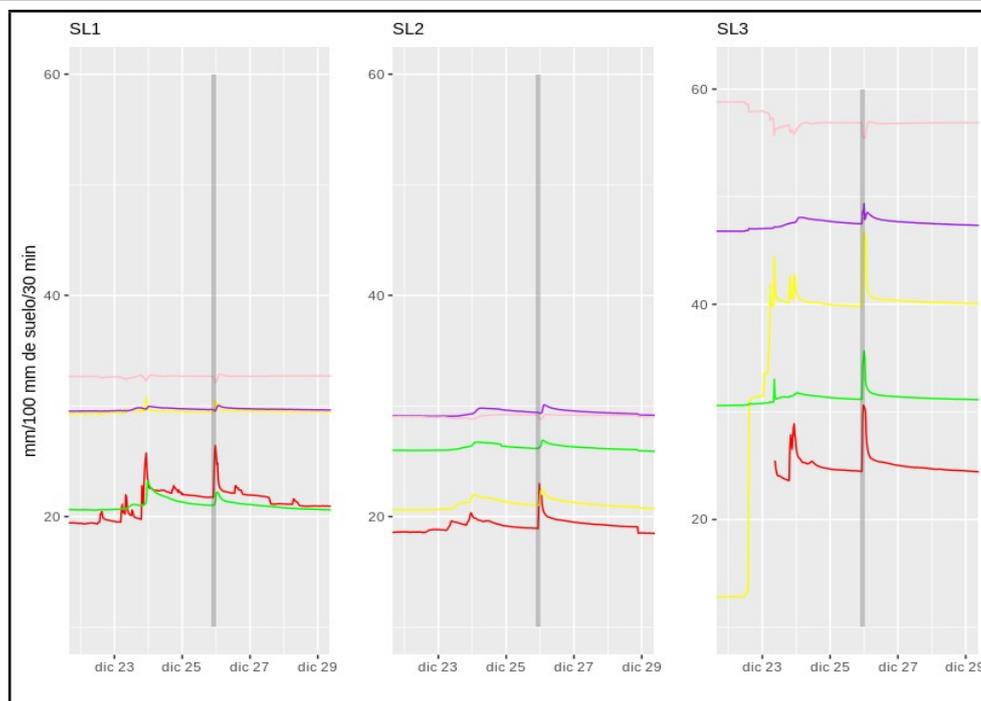
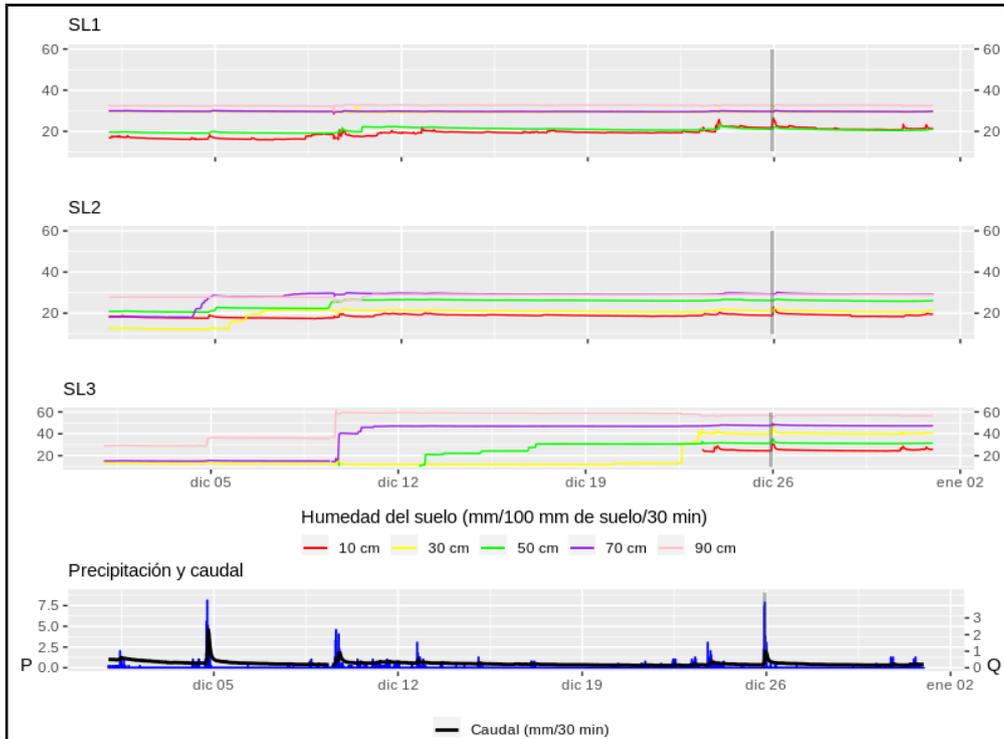


Figura 3. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; diciembre 2016, con evento marcado en gris.

Figura 4. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post evento en ladera A; 26 de diciembre, 2016.

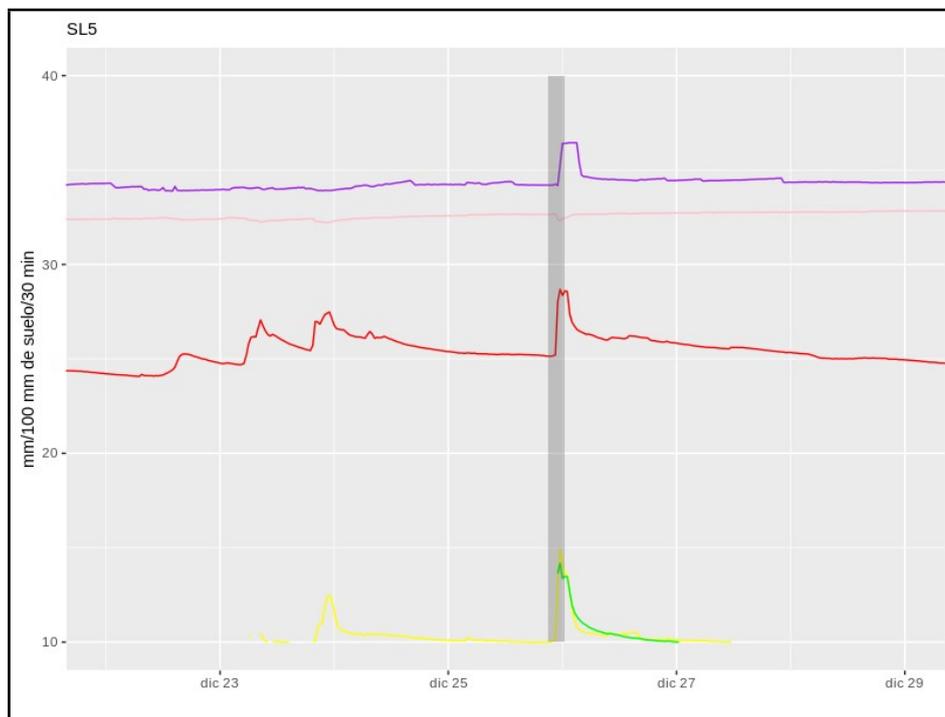
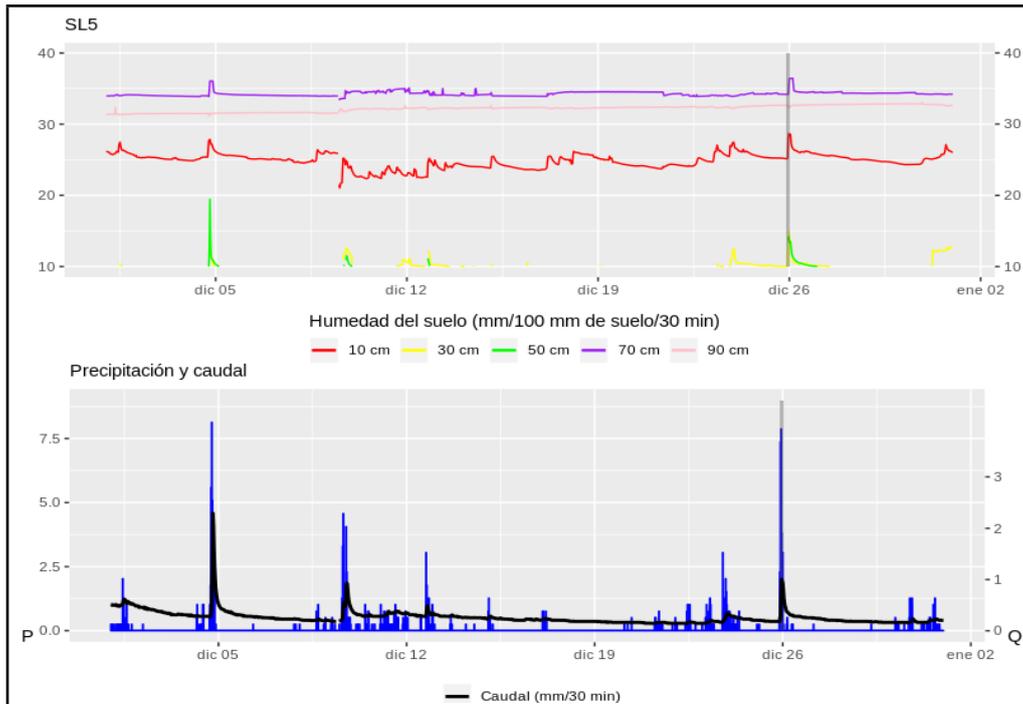


Figura 5. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; diciembre 2016, con evento marcado en gris.

Figura 6. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera B; 26 de diciembre, 2016.

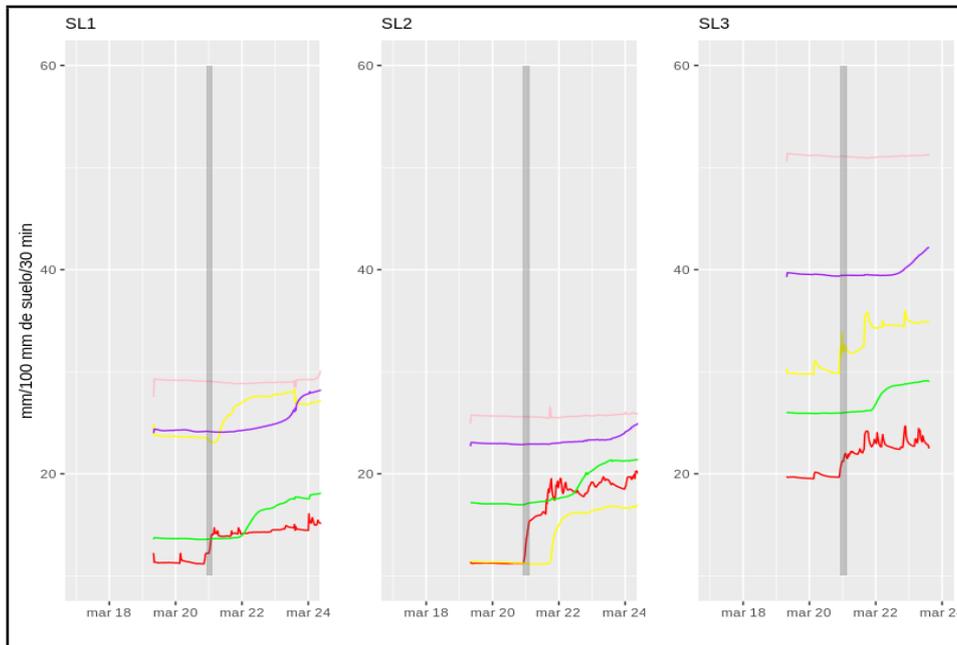
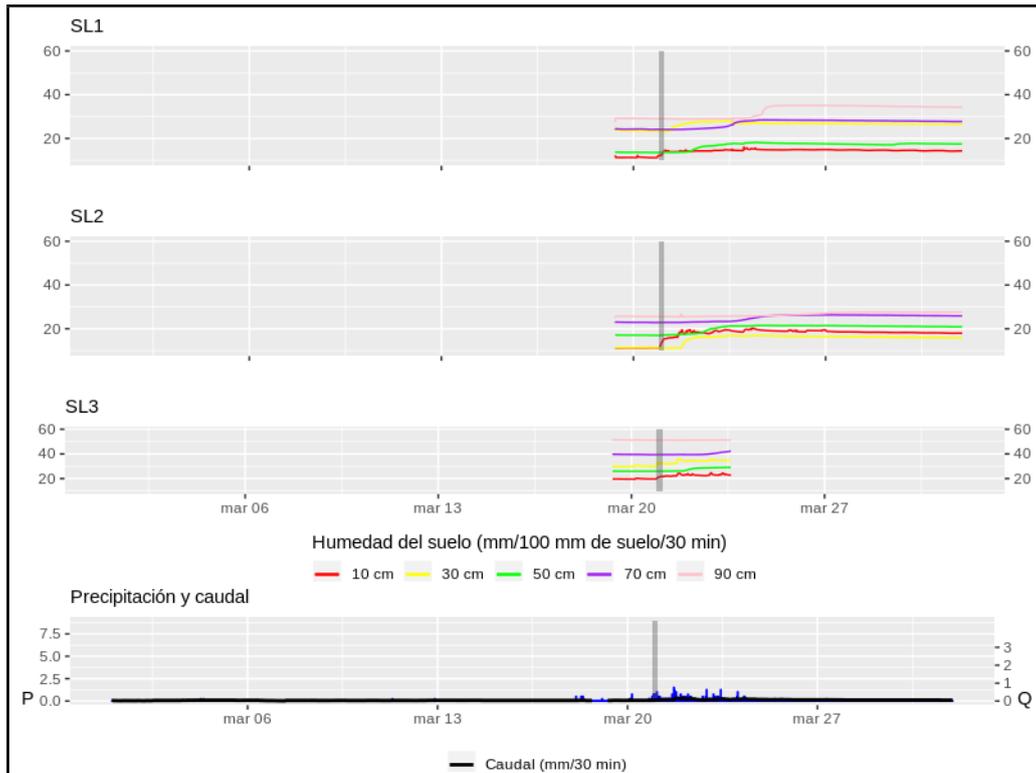


Figura 7. Arriba inámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; marzo 2017, con evento marcado en gris.

Figura 8. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera A; 20-21 de marzo, 2017.

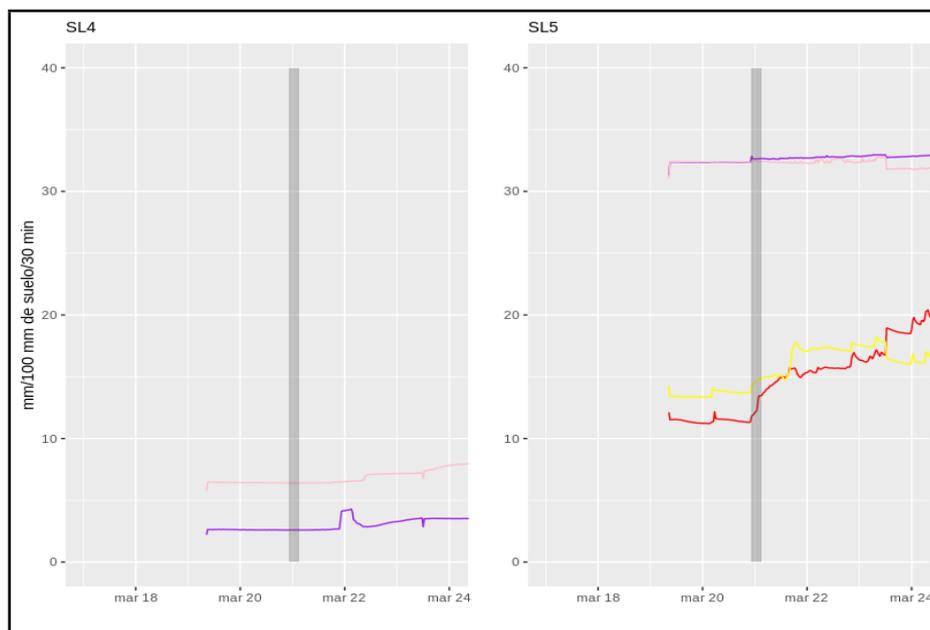
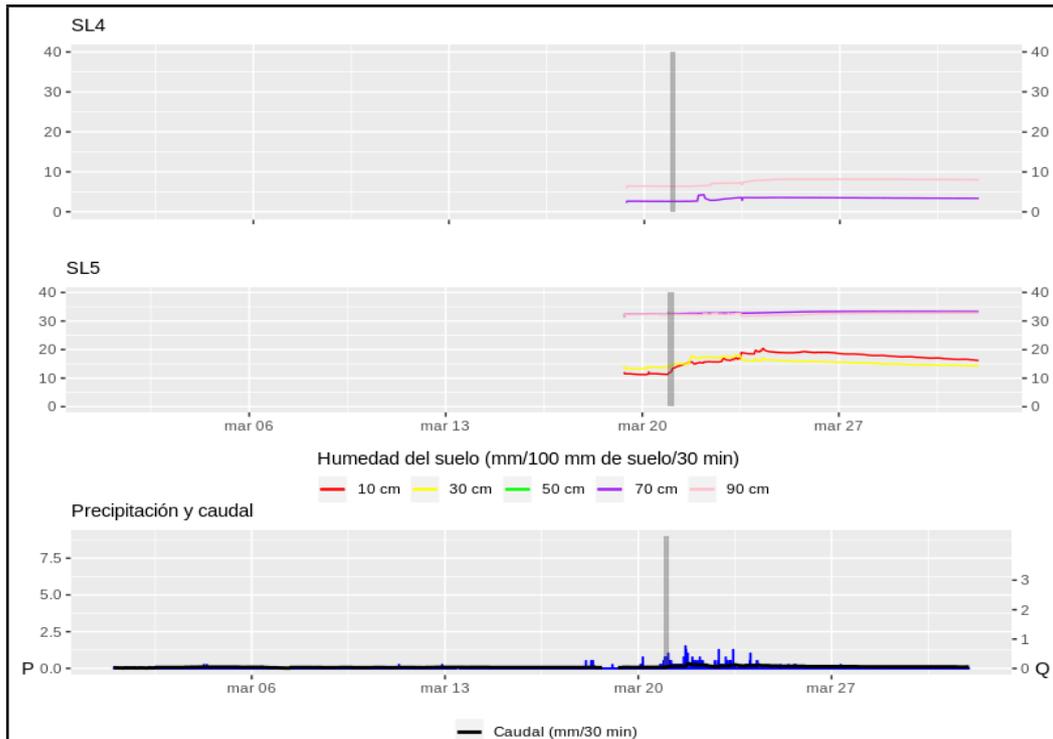


Figura 9. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; marzo 2017, con evento marcado en gris.

Figura 10. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera B; 20-21 de marzo, 2017.

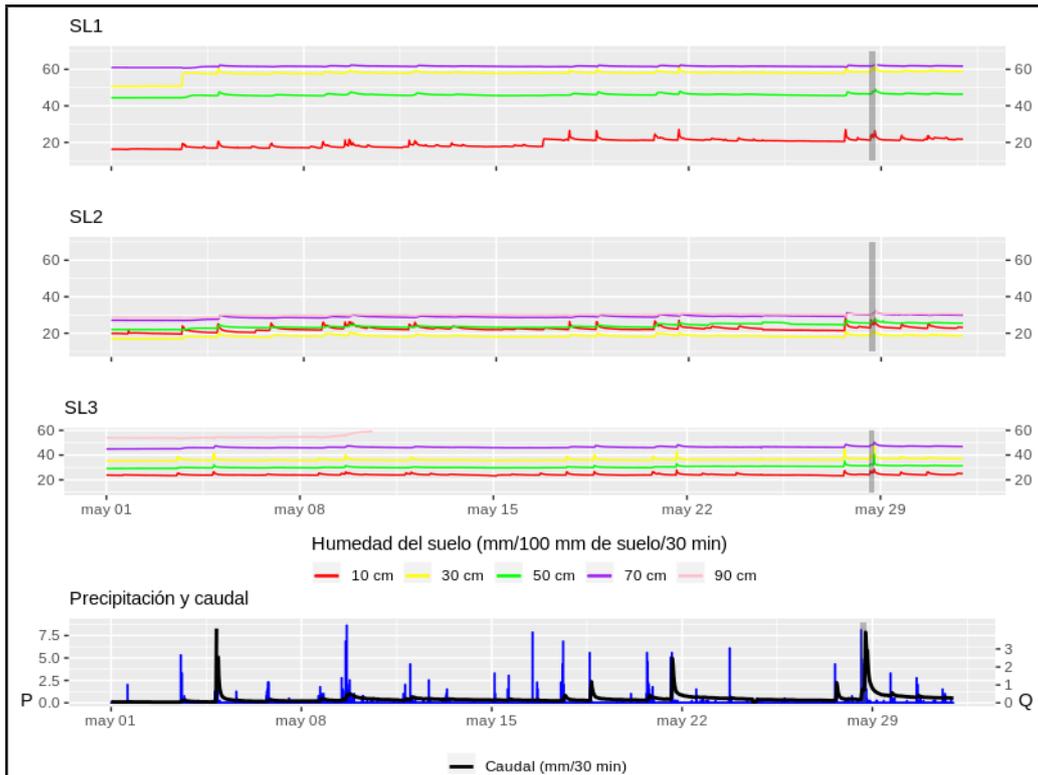


Figura 11. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; mayo 2017, con evento marcado en gris.

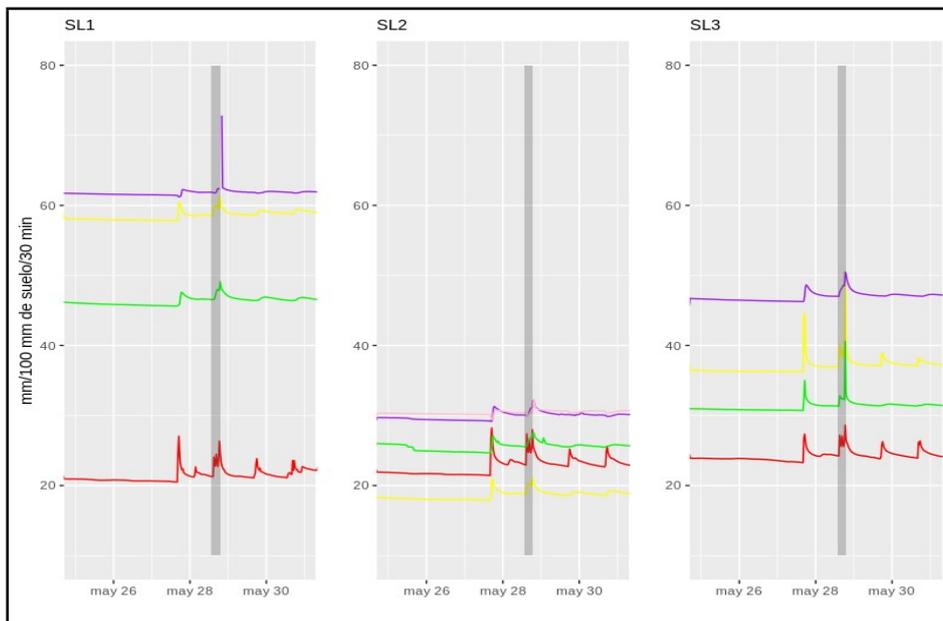


Figura 12. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera A; 28 de mayo, 2017.

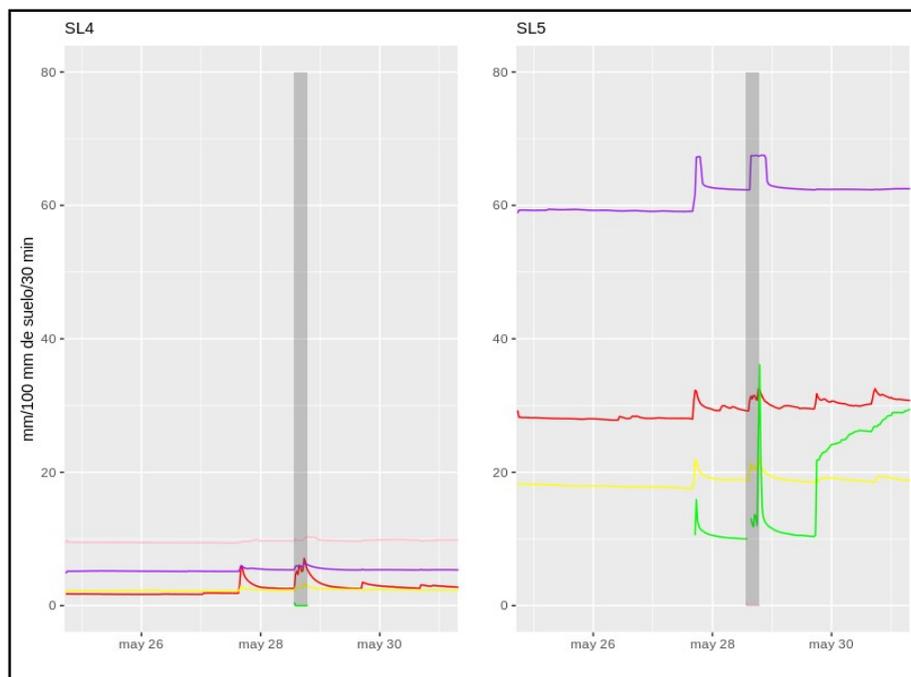
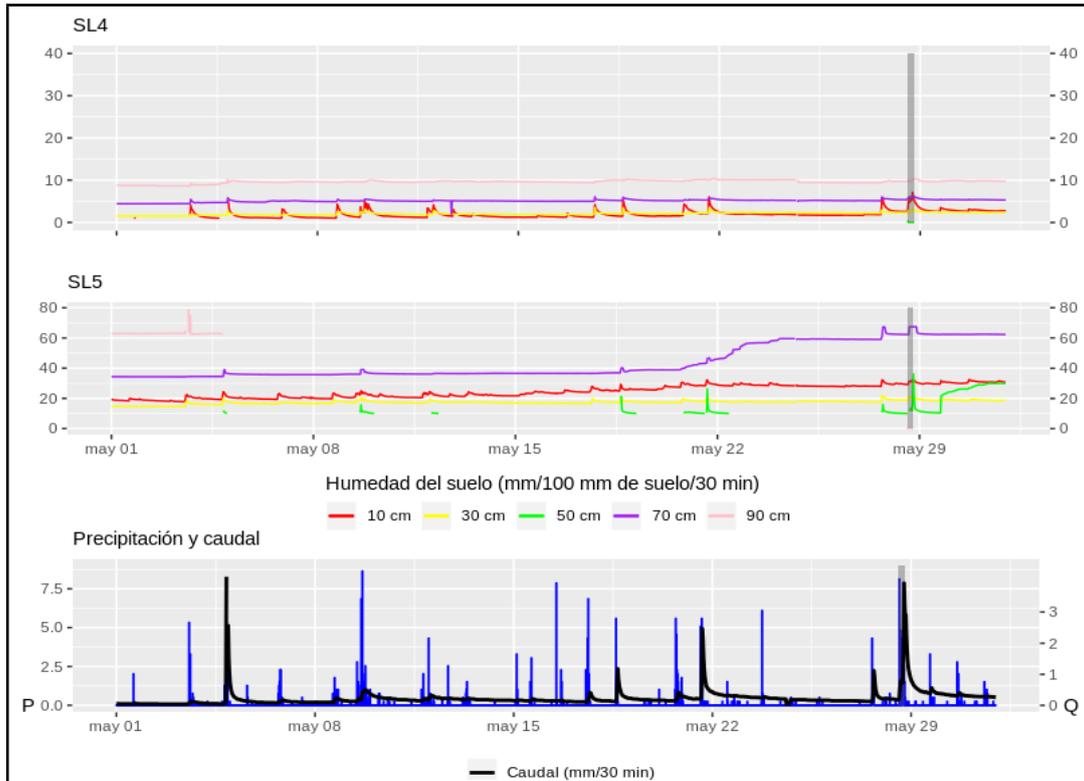


Figura 13. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; mayo 2017, con evento marcado en gris.

Figura 14. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera B; 28 de mayo, 2017.

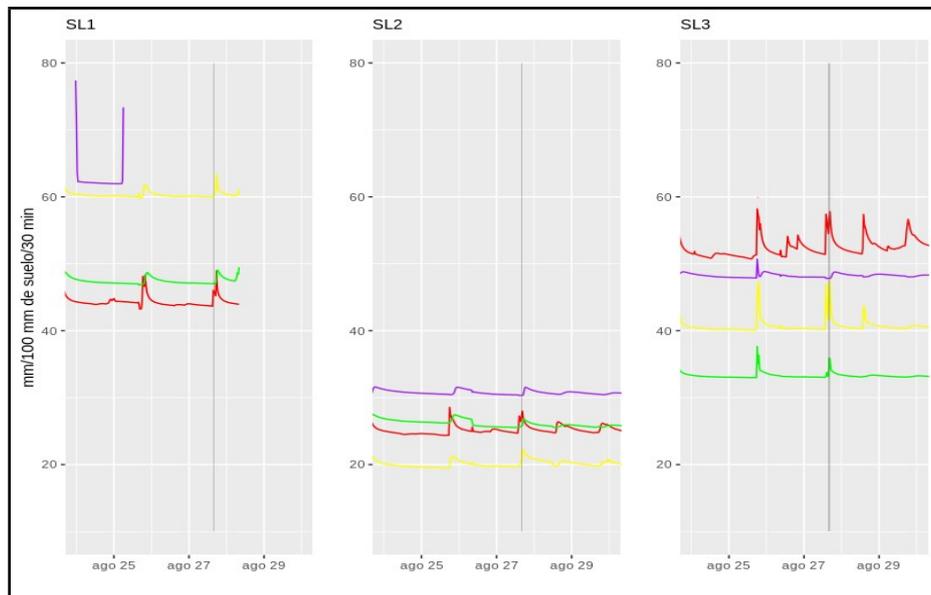
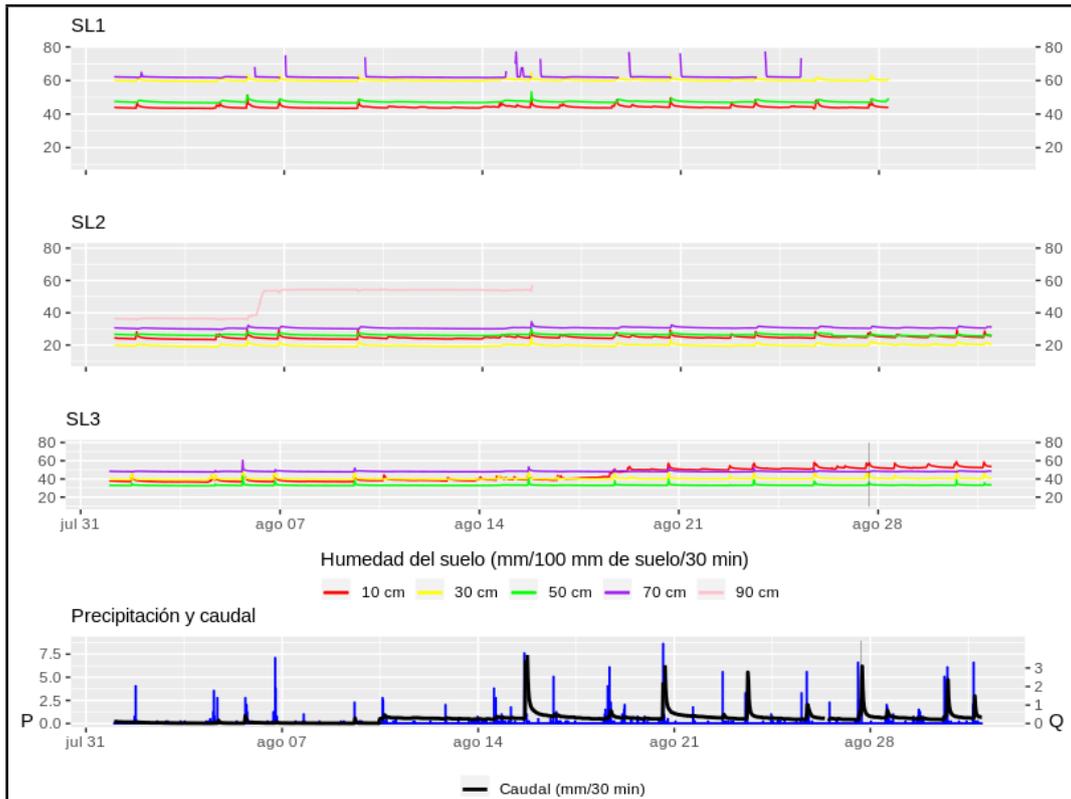


Figura 15. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera A; agosto 2017, con evento marcado en gris.

Figura 16. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera A; 27 de agosto, 2017.

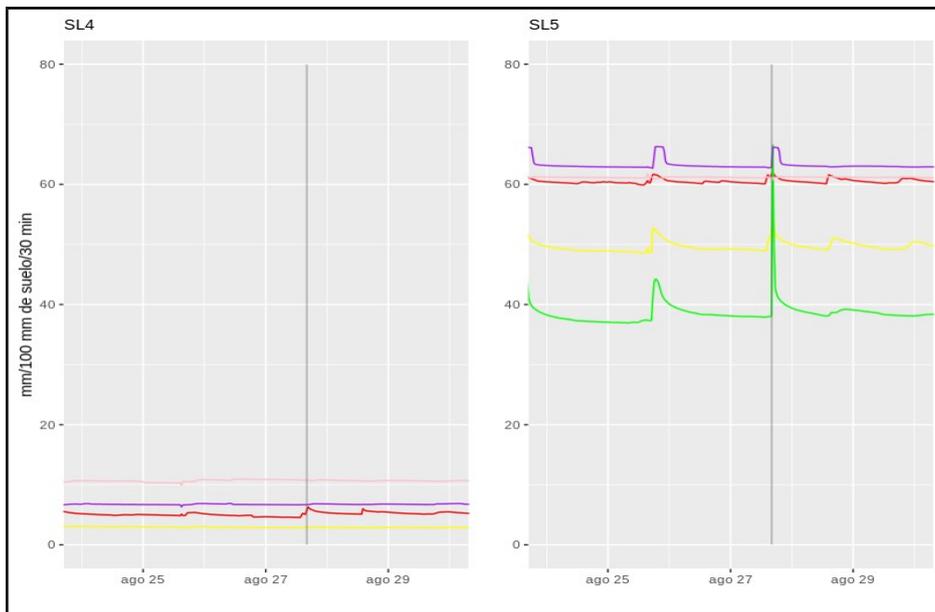
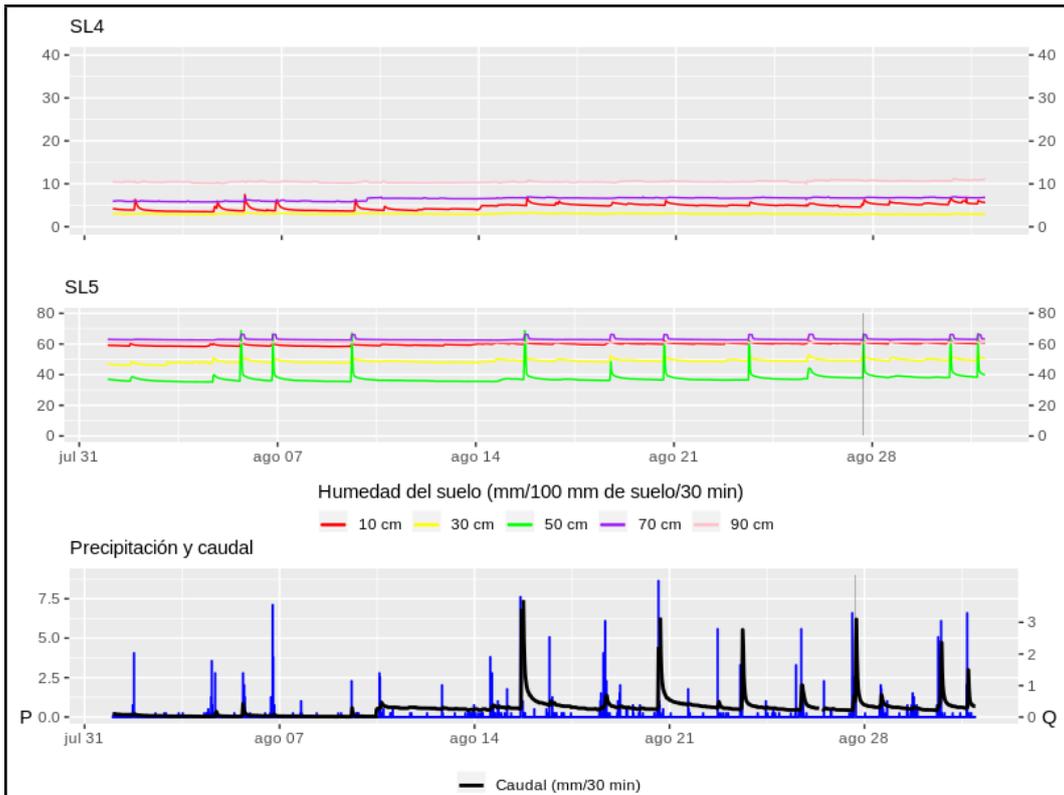


Figura 17. Arriba dinámica mensual de la humedad del suelo por sonda, precipitación y caudal en ladera B; agosto 2017, con evento marcado en gris.

Figura 18. Abajo dinámica de la humedad del suelo pre-evento, evento (sombra gris) y post-evento en ladera B; 27 de agosto, 2017.

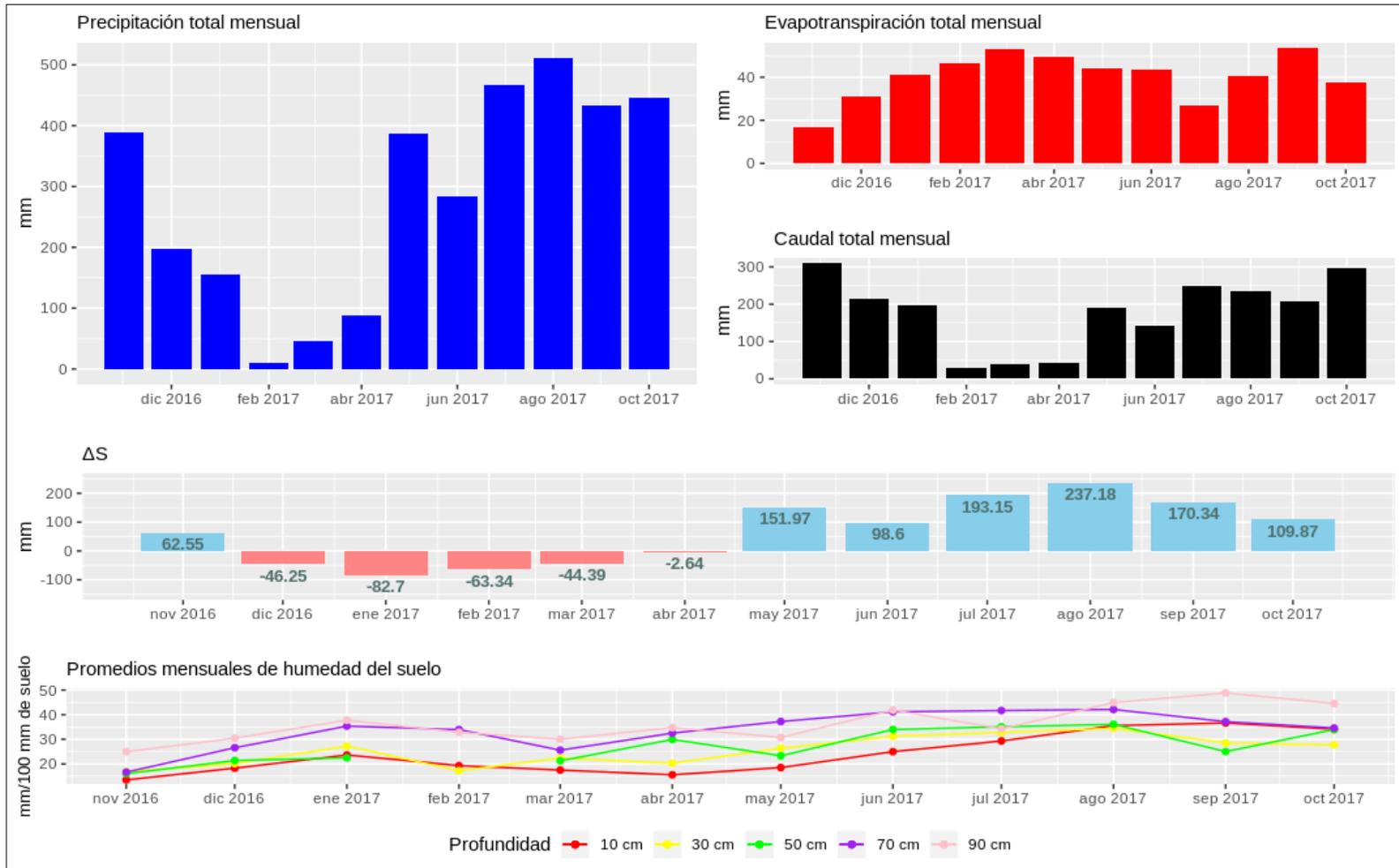


Figura 19. Balance hidrológico mensual, Noviembre 2016 - Octubre 2017. Precipitación mensual en mm (panel superior izquierda), caudal mensual en mm (panel superior derecho), evapotranspiración mensual en mm (panel superior derecho), balance de almacenamiento de agua en mm – ΔS (panel medio) y nivel promedio de humedad en suelo por profundidad en mm/100 mm de suelo (panel inferior).

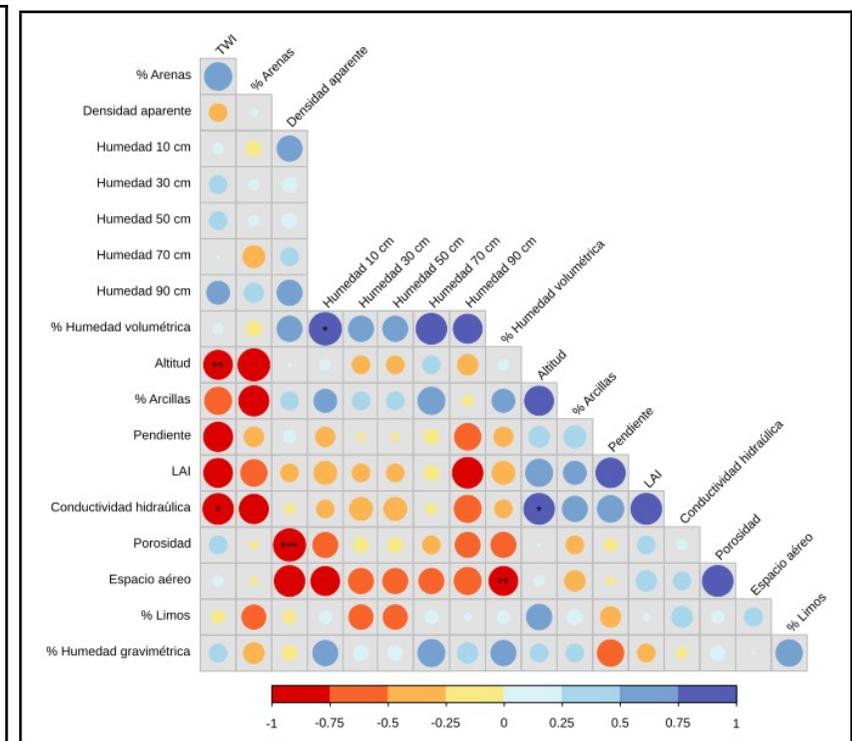
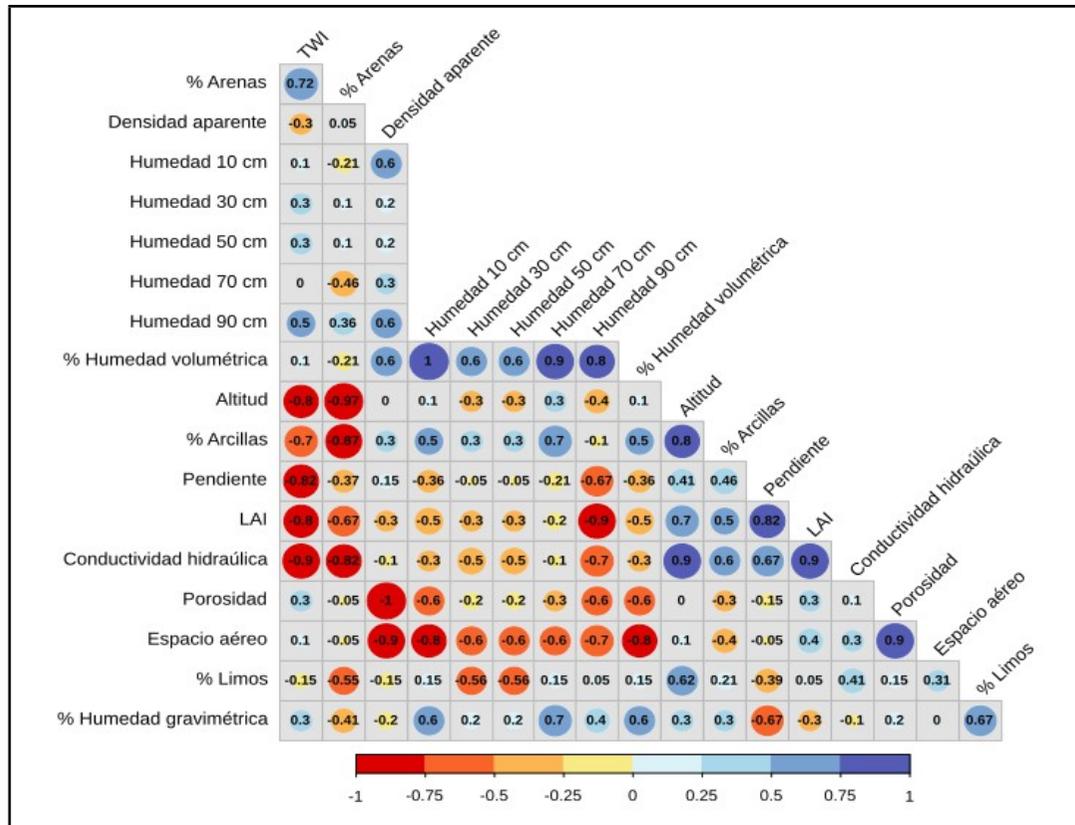


Figura 20. A la izquierda la matriz de correlación de variables físicas de suelo (porosidad, espacio aéreo, conductividad hidráulica, porcentaje de partículas, humedad gravimétrica y volumétrica, y densidad aparente), topográficas (altitud, pendiente y TWI), de vegetación (LAI); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades.

Figura 21. A la derecha la matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 20.

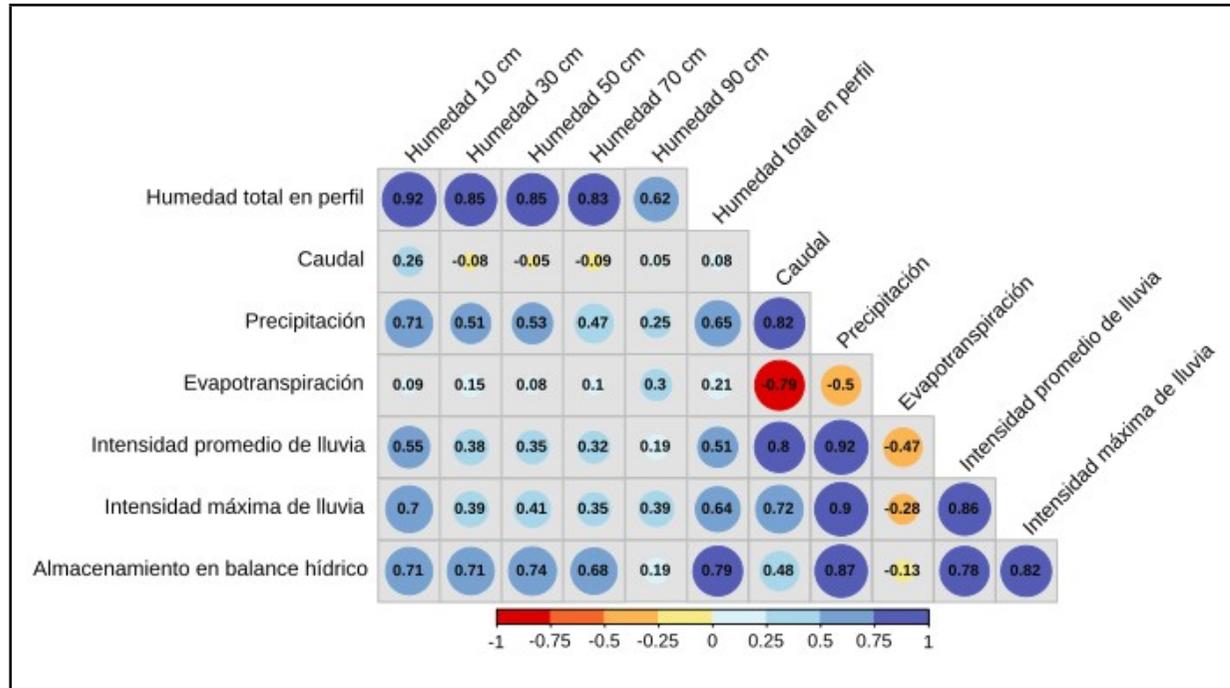


Figura 22. Matriz de coeficientes de correlación de variables hidrometeorológicas (caudal, precipitación, evapotranspiración, intensidad de lluvia y almacenamiento de humedad); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades de ladera A.

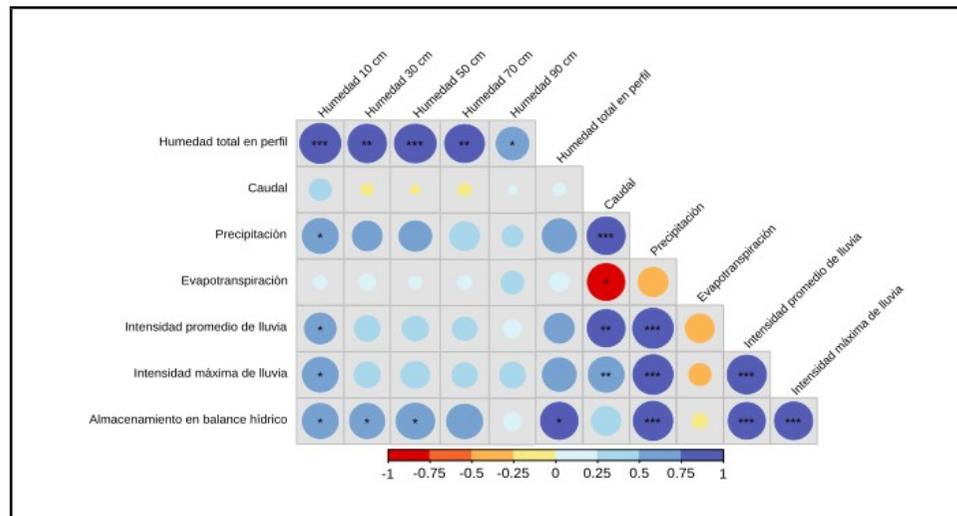


Figura 23. Matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 22.

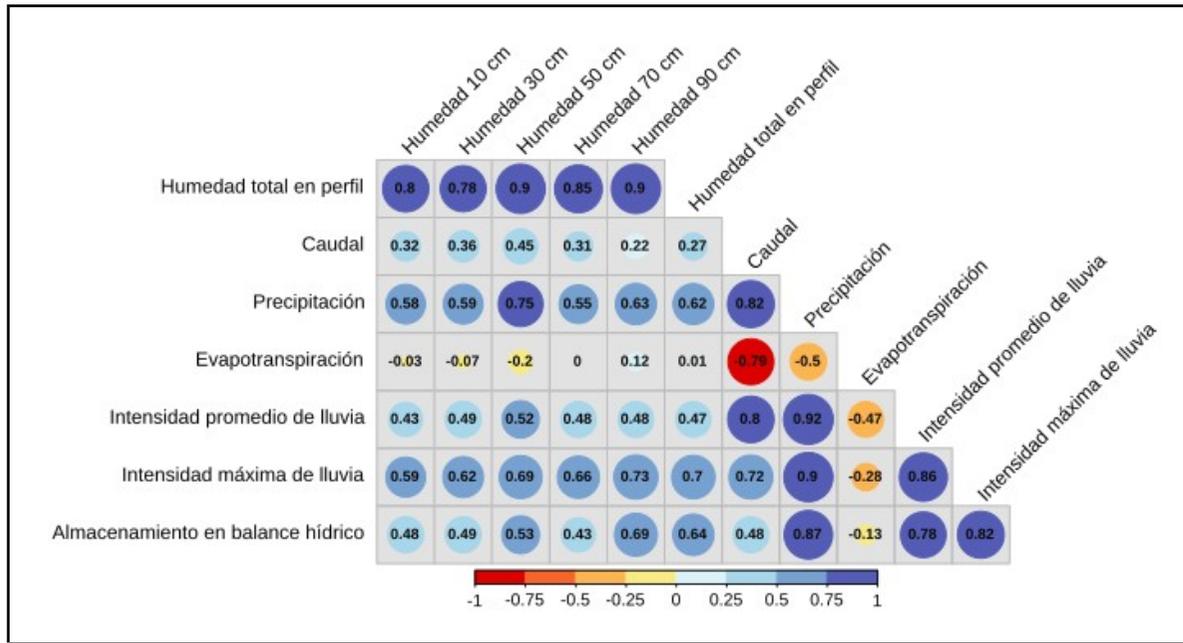


Figura 24. Matriz de coeficientes de correlación de variables hidrometeorológicas (caudal, precipitación, evapotranspiración, intensidad de lluvia y almacenamiento de humedad); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades en ladera B.

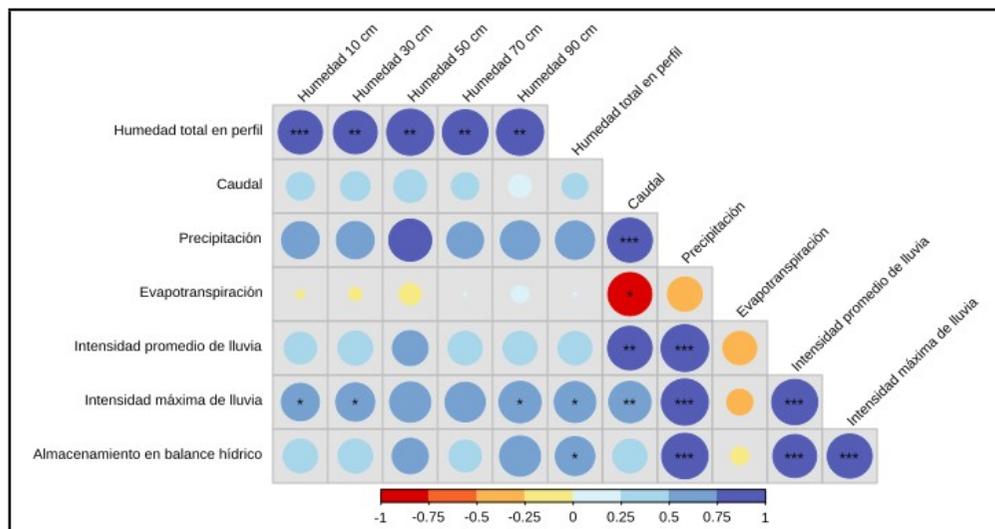


Figura 25. Matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 24.

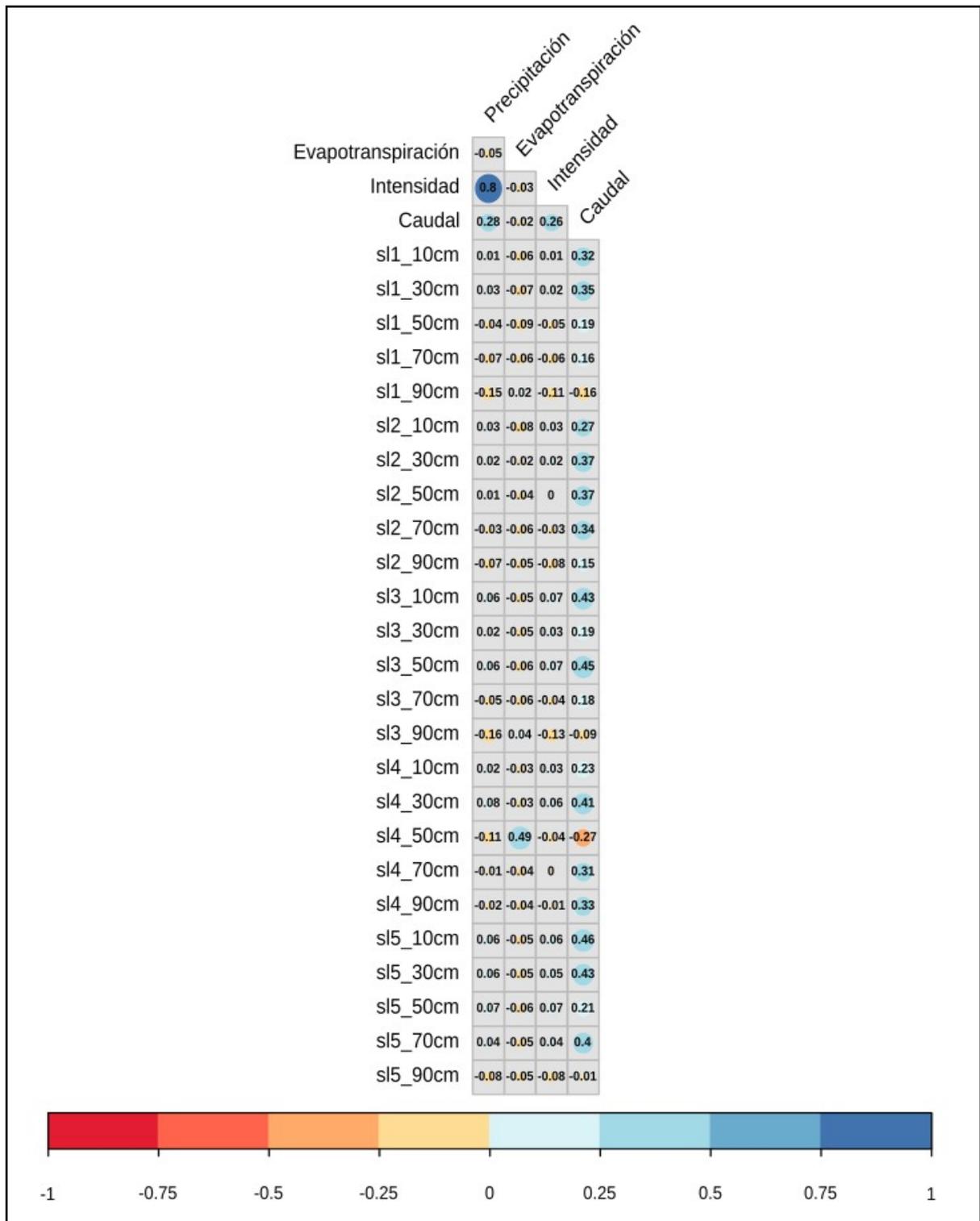


Figura 26. Matriz de correlación temporal de variables hidrometeorológicas (caudal, precipitación, evapotranspiración e intensidad de lluvia); con la humedad en el suelo en cada una de las cinco profundidades de los puntos en ladera A (SL1, SL2 y SL3) y ladera B (SL4 y SL5).

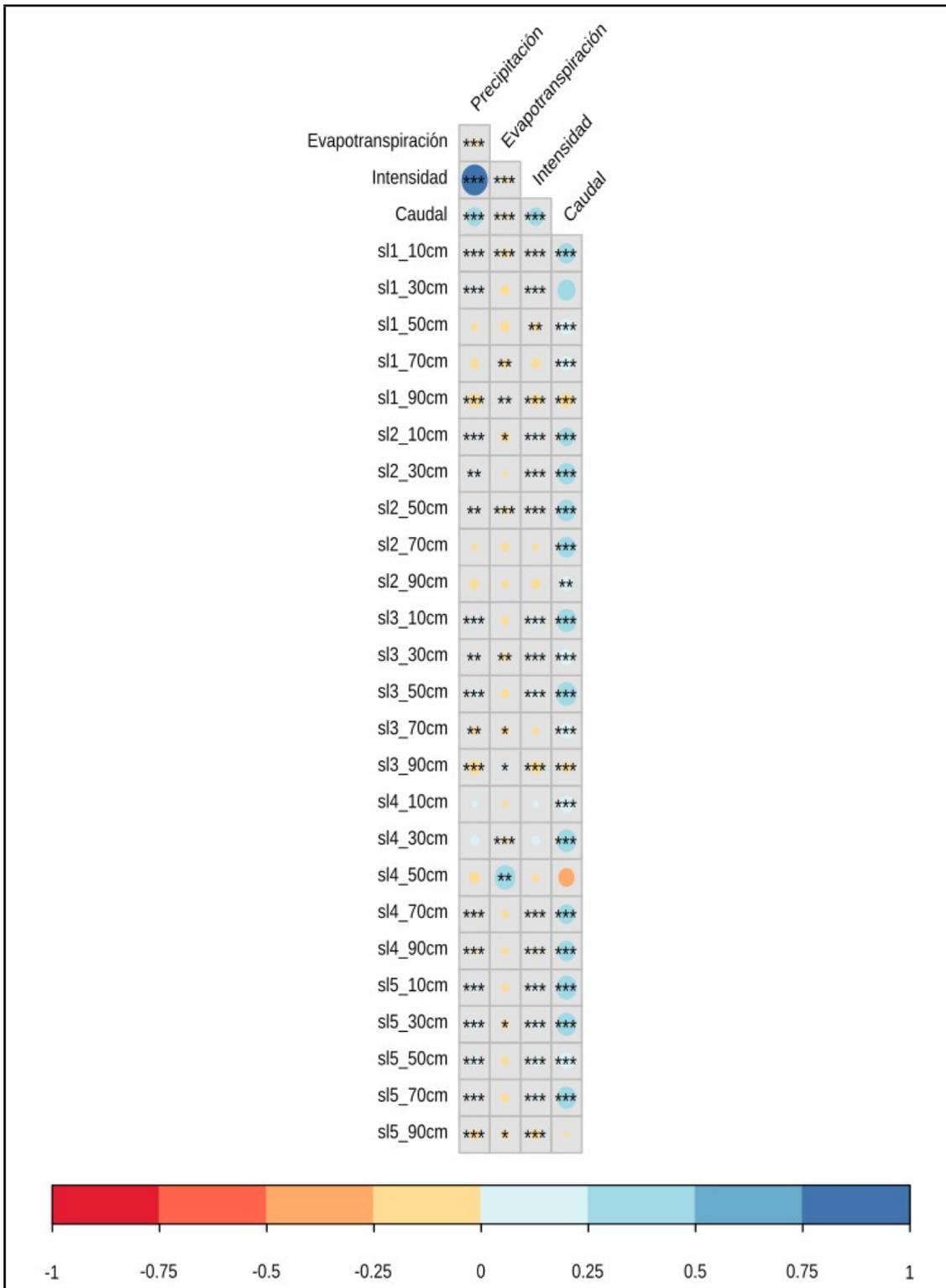


Figura 27. Matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 26.

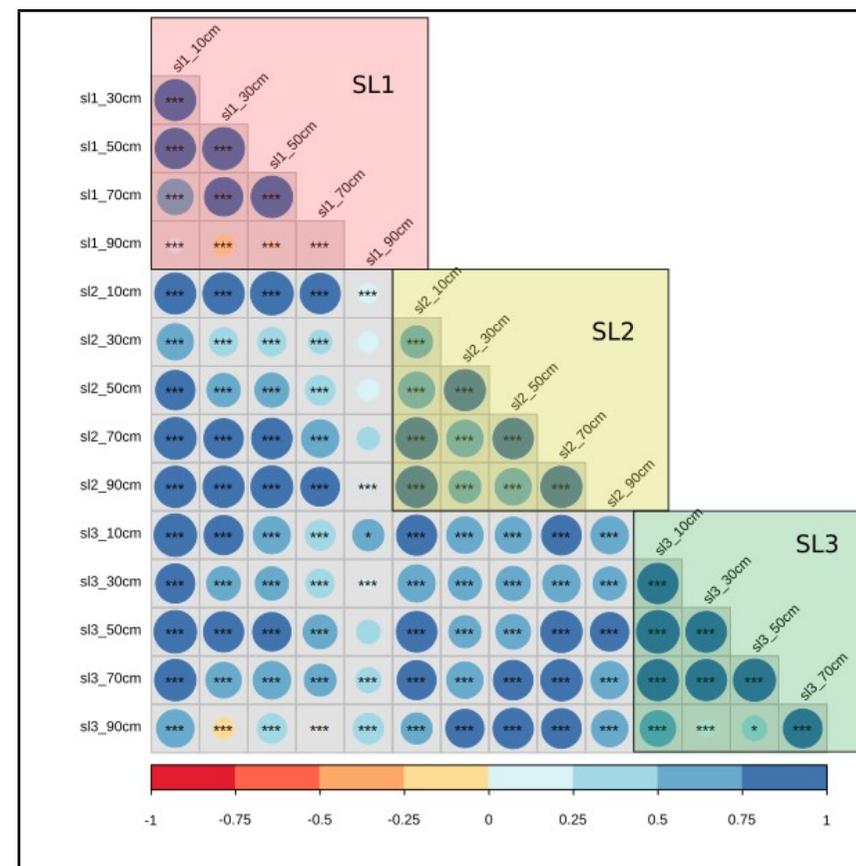
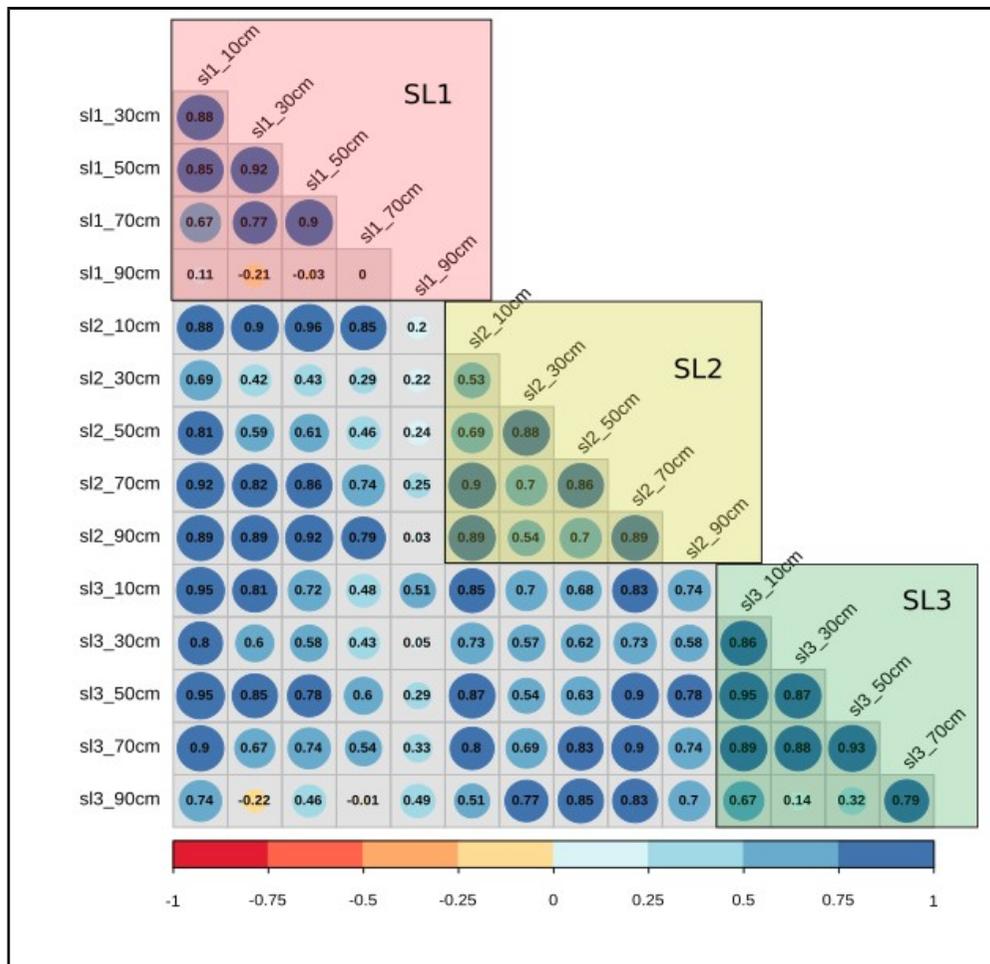


Figura 28. A la izquierda, matriz de coeficientes de correlación temporal entre profundidades de los puntos en ladera A.

Figura 29. A la derecha, matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 28.

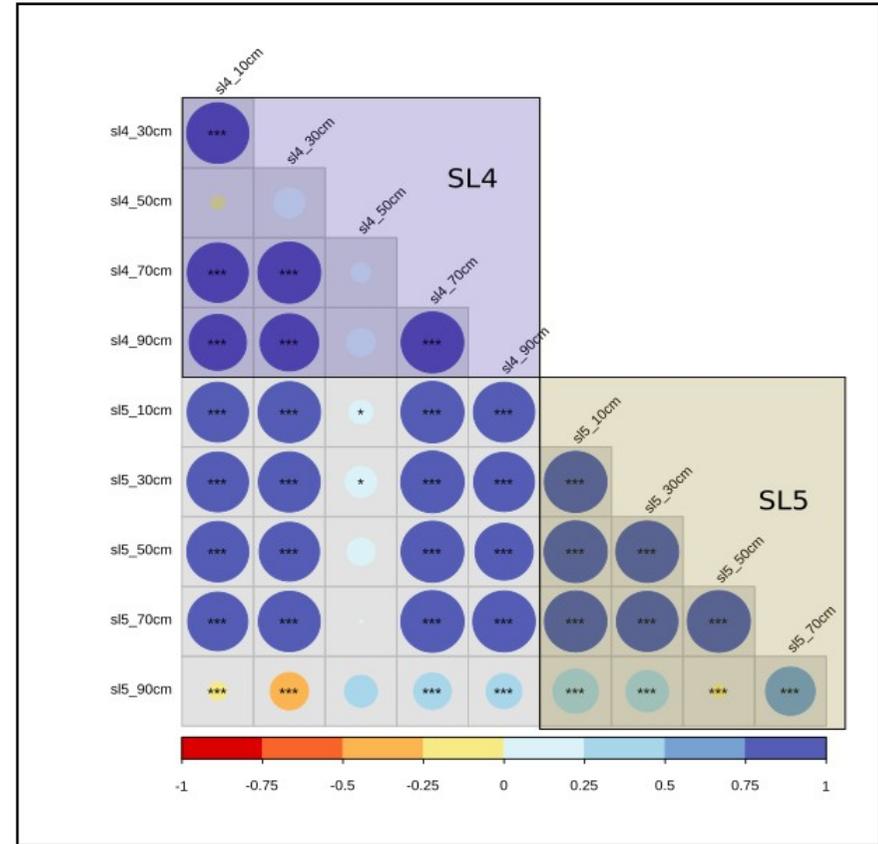
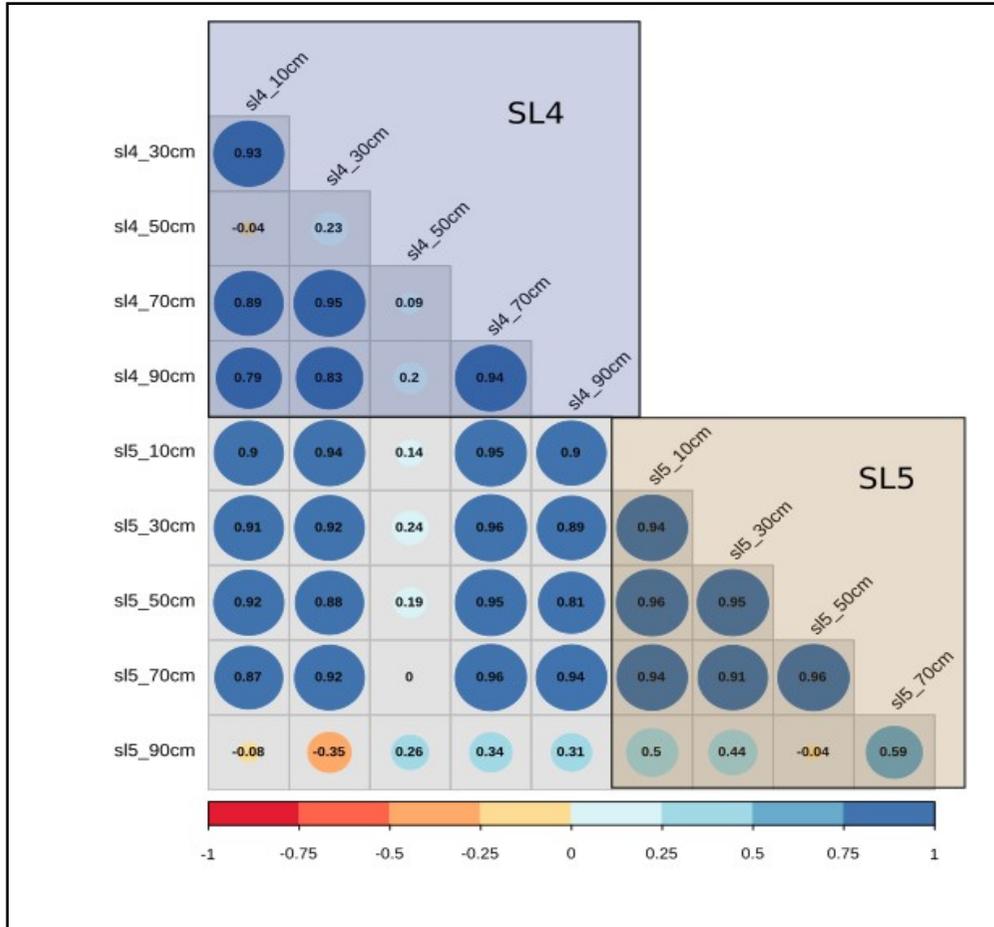


Figura 30. A la izquierda, matriz de coeficientes de correlación temporal entre profundidades de los puntos en ladera A.

Figura 31. A la derecha, matriz de significancias (p: *** 0,01, ** 0,05, * 0,1) de los coeficientes de correlación Spearman en la figura 30.

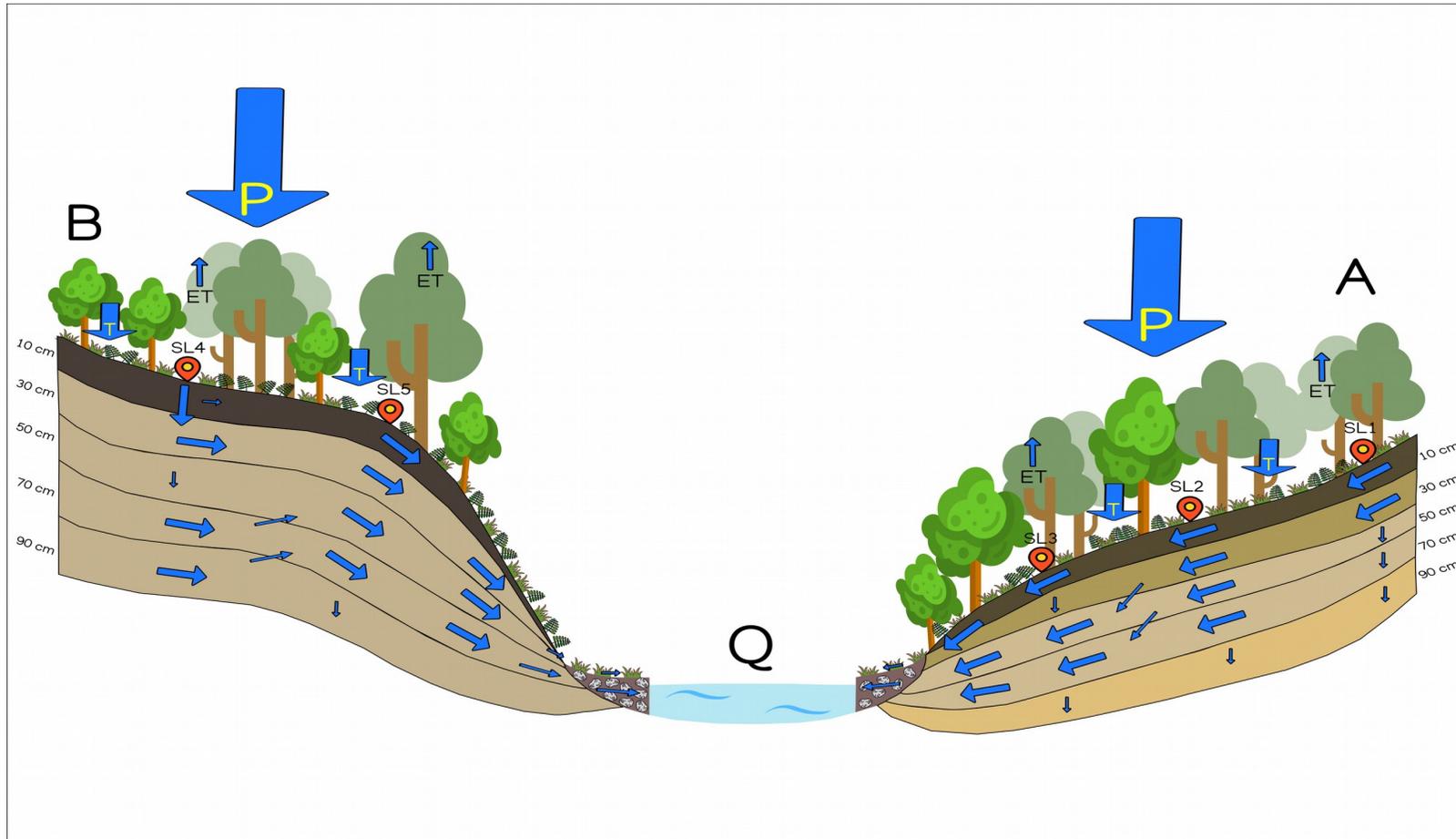


Figura 32. Modelo ilustrativo de la conectividad ladera-río para ambas laderas del Río San Lorencito. Los primeros 70 cm de profundidad en A y B funcionan como rutas preferenciales en la transferencia de humedad hacia el caudal (Q); a excepción de algunas capas poco permeables que funcionan como desviadores de flujos laterales y zonas de almacenamiento. Cerca del río, los flujos de retorno son aportados subsuperficialmente a través de las terrazas, y en menor medida, superficialmente en arroyos sobre estas áreas de acumulación.