

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ANÁLISIS DE LOS PROCESOS MORFODINÁMICOS FLUVIALES UTILIZANDO
TÉCNICAS FOTOGAMÉTRICAS DE ALTA RESOLUCIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO
SAN LORENCITO, RESERVA BIOLÓGICA ALBERTO MANUEL BRENES, 2017-2018

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado
en Geografía para optar al grado y título de Maestría Académica en Geografía

SEBASTIÁN GRANADOS BOLAÑOS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

Esta Tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Geografía

Jonathan Reyes Ch.

M.Sc. Jonathan Reyes Chaves
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**

C. Birkel

Dr. Christian Birkel
Profesor Guía

Dra. Alicia Correa Barahona
Lectora

Luis Guillermo Artavia Rodríguez.

M.Sc. Luis Guillermo Artavia Rodríguez
Lector

*RAMON
MC*

M.Sc. Ramón Masis Campos
**Representante del Director del
Posgrado en Geografía**

Sebastián Granados Bolaños

Sebastián Granados Bolaños
Sustentante

Nota aclaratoria: Por encontrarse fuera de la República de Costa Rica, la Dra. Alicia Correa Barahona omite estampar su rúbrica en esta hoja de aprobación, quedando de respaldo para la Universidad de Costa Rica, la grabación de la defensa de la Tesis.

Tabla de Contenido

Hoja de aprobación.....	ii
Resumen.....	v
Lista de tablas.....	vi
Lista de figuras	vii
Lista de abreviaturas.....	x
1. Aspectos generales de la investigación.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Delimitación Espacial	2
1.3 Delimitación Temporal	4
1.4 Problema de Investigación	4
1.5 Justificación	5
1.6 Objetivo general.....	6
1.7 Objetivos específicos	7
1.8 Hipótesis Nula.....	7
1.9 Hipótesis alternativa.....	7
1.10 Antecedentes	7
1.11 Marco Teórico	9
1.11.1 Fundamentos de geomorfología fluvial y morfología de canales	9
1.11.2 Dinámica de transporte de sedimentos	12
1.11.3 Fundamentos de fotogrametría RPAS aplicada.....	15
1.12 Metodología	18
1.12.1 Objetivo específico 1	18
1.12.2 Objetivo específico 2	20
1.12.3 Objetivo Específico 3.....	22
2. Resultados: Caracterización geológica y geomorfológica de la cuenca.....	23
2.1. Formación Monteverde, un vulcanismo antiguo con intensa perturbación hidrotermal .	23
2.2 Neotectonismo local y fallamiento de la cuenca del río San Lorencito.....	28
3. Resultados: Geomorfología fluvial de alta resolución RPAS del río San Lorencito.....	30
3.1 Fotogrametría y geomorfología sumergida.....	45
3.2 Interpretaciones geomorfológicas	50
3.3 La relación de las islas fluviales y tributarios provenientes de la ladera	50
3.4 Las terrazas aluviales del río San Lorencito y la evolución geomorfológica del río.....	53
3.5 Combinando fotogrametría aérea y sumergida para un mejor entendimiento de.....	53
4. Resultados: Las variaciones en la velocidad del agua y la ocurrencia de crecidas del río por eventos de precipitación en el San Lorencito	54

4.1 Caracterización estadística del periodo de estudio.....	54
4.2 Relacionando la precipitación con el transporte de sedimentos	62
4.3 Correlacionando variables múltiples.....	68
4.4 La lluvia, el motor de los cambios geomorfológicos en el río.....	69
5. Resultados: Detección y análisis de cambios geomorfológicos en el río utilizando fotogrametría RPAS de alta resolución	70
5.1 Detección de cambios durante el periodo lluvioso de 2017	71
5.2 Explorando cambios del lecho fluvial con fotogrametría sumergida	76
5.3 La ocurrencia de un evento extremo	83
5.4 Los procesos morfodinámicos del río San Lorencito	88
5.5 Retomando las hipótesis planteadas en esta investigación.....	91
6. Conclusiones	92
7. Recomendaciones	94
8. Referencias.....	95

Resumen

Esta investigación muestra resultados y aplicaciones acerca del uso de vehículos aéreos no tripulados (RPAS) comúnmente conocidos como drones en la geomorfología fluvial y análisis de procesos morfodinámicos en un río de alta pendiente, bajo substrato volcánico y con cobertura forestal prístina. Adicionalmente con el uso de la fotogrametría sumergida utilizando una cámara sumergible se llega a un mejor entendimiento de los procesos que ocurren en el río. En combinación con un monitoreo hidrométrico de alta resolución, análisis estadístico detallado y la fotogrametría aérea y sumergida se obtuvieron resultados robustos acerca de como se comporta este río en particular. Durante el periodo de investigación ocurrió una crecida extraordinaria que cambió completamente la geomorfología fluvial del río, los efectos de esta crecida fueron detalladamente analizados. Uno de los resultados más relevantes de esta investigación es el desarrollo de un método de fotogrametría sumergida para el análisis de lechos fluviales. Se concluye que este método tiene alcances relevantes para la ecología acuática y la geomorfología fluvial. En sí, esta investigación propone una aproximación de alta resolución en el entendimiento de ríos tropicales bajo estas condiciones geográficas.

Lista de tablas

Tabla 1. Parámetros de vuelo para la elaboración de la cartografía geomorfológica.	31
Tabla 2. Datos de humedad antecedente, precipitación y velocidad de los eventos.	56
Tabla 3. Promedio, desviación estándar, máximo, mínimo y la sumatoria de la humedad antecedente, precipitación y velocidad del agua.	56
Tabla 4. Umbrales de transporte de partículas durante el 2017 y el evento extremo.	60
Tabla 5. Estadística descriptiva de los umbrales de transporte de partículas incluyendo el evento extremo del 2018.	62
Tabla 6. Clasificación de la morfología de la curva histéresis.	64
Tabla 7. Matriz de correlación de Spearman de las variables de los eventos.	68
Tabla 8. Áreas y cambios detectados entre observaciones fotogramétricas RPAS.	73

Lista de figuras.

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río San Carlos en Costa Rica.	3
Figura 2. Ubicación de la cuenca según Solano-Rivera & Granados-Bolaños (2017).	4
Figura 3. Modelo de forma y estabilidad de canales tipo rápido-remanso.	10
Figura 4. Sección de lecho móvil de un río	11
Figura 5. Sección de lecho fijo de un río	11
Figura 6. Tabla de distribución de tamaños partículas según por el United States Geological Survey o Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)	13
Figura 7. Curva de Hjulström.	14
Figura 8. Pares de fotografías aéreas y puntos de amarre en Agisoft sobre una sección del río San Lorencito.	16
Figura 9. Nube de puntos densificada sobre una sección del río San Lorencito.	17
Figura 10. Modelo de superficie de una sección del río San Lorencito.	17
Figura 11. Ejemplo de un ortomosaico de baja altitud (30m) en una sección del río San Lorencito.	18
Figura 12. Distribución espacial de la Formación Monteverde y la ubicación de la cuenca del río San Lorencito dentro de ella.	24
Figura 13. Brecha meteorizada con diaclasamiento expansivo en las márgenes del río San Lorencito.	25
Figura 14. Andesitas con alteración argilítica en un tributario del río San Lorencito.	26
Figura 15. Afloramiento de brecha con meteorización esferoidal en una sección de lecho fijo del río San Lorencito.	27
Figura 16. Contexto neotectónico local de la cuenca del río San Lorencito.	29
Figura 17. Levantamientos fotogramétricos para la cartografía geomorfológica y secciones transversales del río San Lorencito.	32
Figura 18. Depósitos de aluviones en el río San Lorencito.	33
Figura 19. El profesor Guillermo Brenes Quesada (2015) sobre una sección de una terraza aluvial del río San Lorencito.	33
Figura 20. Abanico aluvial de un tributario del río San Lorencito.	34
Figura 21. Isla fluvial en el río San Lorencito.	35
Figura 22. Canal activo en el río San Lorencito.	36
Figura 23. Depósito coluvial sobre aluviones en el río San Lorencito.	37
Figura 24. Ladera denudacional y depósitos coluviales donde está asentada la estación de investigación RBAMB.	38

Figura 25. Levantamiento fotogramétrico 1 y geomorfología fluvial de alta resolución de la sección.	40
Figura 26. Levantamiento fotogramétrico 2 y geomorfología fluvial de alta resolución de la sección.	42
Figura 27. Terraza fluvial superior con un perfil de ceniza transportada eólicamente.	43
Figura 28. . Levantamiento fotogramétrico 3 y geomorfología fluvial de la sección.	45
Figura 29. Sección fluvial levantada con fotogrametría sumergida.	46
Figura 30. Ortomosaico fotogramétrico de una sección del lecho del río San Lorencito.	47
Figura 31. Secuencia para elaborar un modelo 3D de una sección fluvial sumergida.	48
Figura 32. Modelo 3D de una sección fluvial sumergida del río San Lorencito.	49
Figura 33. Utilidad del modelo 3D sumergido para la identificación de tamaños de partículas.	50
Figura 34. Raíces entrelazando aluviones en islas fluviales del río San Lorencito.	52
Figura 35. Iniciación del transporte de las partículas en función de la velocidad del agua.	57
Figura 36. Calibración de la curva de Hjulström para estimar los tamaños de partícula transportados durante el periodo de estudio.	58
Figura 37. Variaciones en la precipitación y velocidad del río durante el periodo de estudio.	59
Figura 38. Dos eventos con histéresis clase 3 y 4.	65
Figura 39. Clasificaciones de las 8 principales clases de las curvas de histéresis.	66
Figura 40. 2 eventos sin histéresis.	67
Figura 41. Sección fluvial analizada para la detección de cambios durante la época lluviosa del 2017.	72
Figura 42. Cambios detectados por la fotogrametría RPAS entre la observación 1 y 2.	75
Figura 43. Cámara sumergible GoPro 4 Silver.	76
Figura 44. Cambios sumergidos en una sección lateral del río San Lorencito.	77
Figura 45. Cambios en una sección del lecho fluvial entre las observaciones 2 y 3.	79
Figura 46. Variaciones entre las observaciones 3 y 4.	80
Figura 47. Cambios sumergidos en el talweg del río durante el periodo lluvioso 2017.	81
Figura 48. Cambios en el talweg entre la observación 4 y 5.	82

Figura 49. Relacionando precipitación y velocidad con cambios en la sección lateral y la sección del talweg.	83
Figura 50. Observación RPAS 5 antes del evento extremo.	84
Figura 51. Observación RPAS 6 posterior al evento extremo.	84
Figura 52. Comportamiento hidrométrico del evento extremo.	86
Figura 53. Sección fluvial del río San Lorencito posterior al evento extremo.	88
Figura 54. Procesos morfodinámicos del río San Lorencito.	89

Lista de abreviaturas

DTM Digital Terrain Model

DSM Digital Surface Model

RPAS Remotly Piloted Aircraft System

RBAMB Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes

Tseco Tiempo seco previo

HumAnte3d Humedad antecedente 3 días

HumAnte7d Humedad antecedente 7 días

M Magnitud

D Duración

Imax Intensidad Máxima

Val_Max Valor máximo

Vi Velocidad inicial

Vmin Velocidad mínima

Vmax Velocidad Máxima

creMax Crecimiento máximo

Trise Tiempo desde el inicio hasta el pico máximo

Tfmax Tiempo desde el pico hasta el final

P_Vlag Tiempo entre los picos de Precipitación y Velocidad del flujo

h Horas

mm Milímetros

m Metros

m/s Metros por segundo

TP_Tarena Tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de arenas

TP_Tgrava_gui Tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de grava y guijarros

TP_Tbloq Tiempo de inicio de precipitación del inicio de transporte de bloques

TT_Tarena Duración total de transporte de arenas y grava

TT_Tgrava_gui Duración total de transporte de grava_guijarros

TT_Tbloq Duración total de transporte de bloques

TamMayor_partEst Partícula de mayor tamaño transportada según la curva de Hjulström

Tam_partObs Partícula de mayor tamaño transportada observada entre observaciones fotogramétricas

area_cam Area con cambios detectada entre observaciones fotogramétrica



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Sebastián Granados Bolaños, con cédula de identidad 114100610, en mi condición de autor del TFG titulado Análisis de los procesos morfodinámicos fluviales utilizando técnicas fotogramétricas RPAS de alta resolución en la cuenca del río San Lorenzo, Reserva Biológica Alberto Manuel Barrantes, 2017-2018

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Sebastián Granados Bolaños

Número de Carné: A82814 Número de cédula: 114 10 06 10

Correo Electrónico: sebastian.granados@ucr.ac.cr

Fecha: 7/9/2021 Número de teléfono: 506 89812458

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Christian Birkel

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

1. Aspectos generales de la investigación

1.1 Introducción

Los ríos drenan agua desde los continentes hacia los océanos y son la principal ruta para el transporte de material derivado de la meteorización (Leopold et al., 1995). Esa transferencia de material y energía de mayor a menor altitud producto de la geodinámica externa del planeta genera un complejo sistema natural de drenajes que moldea la superficie terrestre. Es tan complejo los detalles de las interrelaciones que ocurren en los sistemas fluviales que describir detalladamente la sección de un río puede hacer perder la perspectiva regional o global de los sistemas hidrográficos. Sin embargo, estas complejas interacciones y variaciones entre condiciones locales como litología, topografía, climatología, vegetación, el ser humano y demás condiciones son la esencia para explicar la forma y comportamiento de los ríos, responsables en gran parte de la estructura y funcionamiento del paisaje actual, más si nos referimos a un país como Costa Rica, drenado por una densa red hidrográfica con una gran complejidad de formas aluviales.

Para entender los procesos que ocurren en los ríos, ya sean físicos, químicos, ecológicos o geomorfológicos se requiere cada vez más de metodologías que permitan capturar grandes volúmenes de datos a bajo costo, en poco tiempo. Los ríos son geofomas altamente dinámicas (Tricart, 1972). Pueden variar la morfología de su canal en cuestión de horas, por lo tanto, es necesario desarrollar metodologías que permitan levantar información de ambientes fluviales en poco tiempo y con bajo costo económico, esto resulta fundamental para múltiples sectores de la sociedad civil como el sector hidroeléctrico, construcción entre otros. El uso drones, vehículos aéreos no tripulados o **RPAS** por sus siglas en inglés **Remotely Piloted Air System** puede ser de gran ayuda para analizar la geomorfología de ambientes fluviales. El uso de RPAS cada vez se utiliza más en las geociencias y son un campo de la tecnología que evoluciona muy rápidamente en términos de la aeronave, sistemas de observación y software de procesamiento para el análisis de formas dinámicas del relieve como lo son ríos, deslizamientos entre otros (Langhammer & Vacková, 2018). El número de aplicaciones de fotogrametría a partir de RPAS es cada vez mayor, la investigación geomorfológica cada vez más utiliza aplicaciones fotogramétricas de alta

resolución, ya que la topografía es un elemento esencial en la geomorfología (Granados-Bolaños et al., 2021)

En esta investigación se pretende utilizar esta novedosa técnica para la detección de material aluvial y los cambios geomorfológicos en un río torrentoso, rectilíneo, de fuertes pendientes y bajo cobertura boscosa prístina. Para lograrlo se utilizará fotogrametría aérea y de alta resolución obtenida a partir de RPAS y en algunos casos utilizando una cámara sumergible para analizar los lechos fluviales. Los mapas y modelos de elevación y superficie **(DTM) (DSM) por sus siglas en inglés Digital Terrain Model y Digital Surface Model**, permitirán obtener gran cantidad de información de alta resolución cuantitativa. El ortomosaico fotogramétrico y el modelo de elevación digital son la base para realizar la interpretación geomorfológica de alta resolución y detectar los cambios morfológicos del río que ocurrieron durante el periodo de estudio por variaciones en la velocidad del agua como consecuencia de eventos de precipitación. Los cambios observados mediante técnicas de percepción remota y teledetección (RPAS) de las observaciones ejecutadas fueron analizadas en conjunto con un análisis estadístico de las variaciones de velocidad registradas por la estación fluviométrica in situ para determinar umbrales o lapsos en que el río transporta el material aluvial. El análisis conjunto de los productos fotogramétricos y la estadística hidrometeorológica busca explorar el comportamiento sedimentológico del río y los procesos morfodinámicos que ocurren en el ambiente fluvial.

Esta investigación busca a través de la fotogrametría, explorar la relación precipitación-velocidad con los periodos en que el río transporta material aluvial y modifica la estructura de su canal. Al final del periodo de estudio ocurrió una crecida extrema del río, con un periodo de retorno estimado de 50 años que modificó drásticamente la geomorfología fluvial del río. Dicho evento fue similar al descrito por Solano-Rivera & Granados-Bolaños (2017) ocurrido en el 2015 con periodo de retorno calculado de 50 años.

1.2 Delimitación Espacial

La cuenca del río San Lorencito está circunscrita dentro de la cuenca del río San Lorenzo, éste último desfoga en el río San Carlos que es parte de la macrocuenca del río San Juan (ver figura 1). El sitio de estudio corresponde a la cuenca del río San Lorencito, esta se ubica en el distrito Los Ángeles de San Ramón de Alajuela (ver Figura 2). La cuenca posee un área total de 3,21 km² y se encuentra en la Cordillera de Tilarán. Se caracteriza por poseer un

relieve de origen volcánico pleistocénico muy erosionado, es difícil distinguir formas volcánicas como conos o coladas. La totalidad de la cuenca se encuentra cubierta por bosque pluvial premontano (bp-P) con una vasta variedad de flora y fauna. En general, el promedio anual de precipitación es de 3461 mm, la temperatura media anual es de 21°C y la humedad relativa es de 98% (UCR, ACCVC, & Natural, 2008). La cuenca se encuentra adentro de la **Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes (RBAMB)** administrada por la Universidad de Costa Rica.

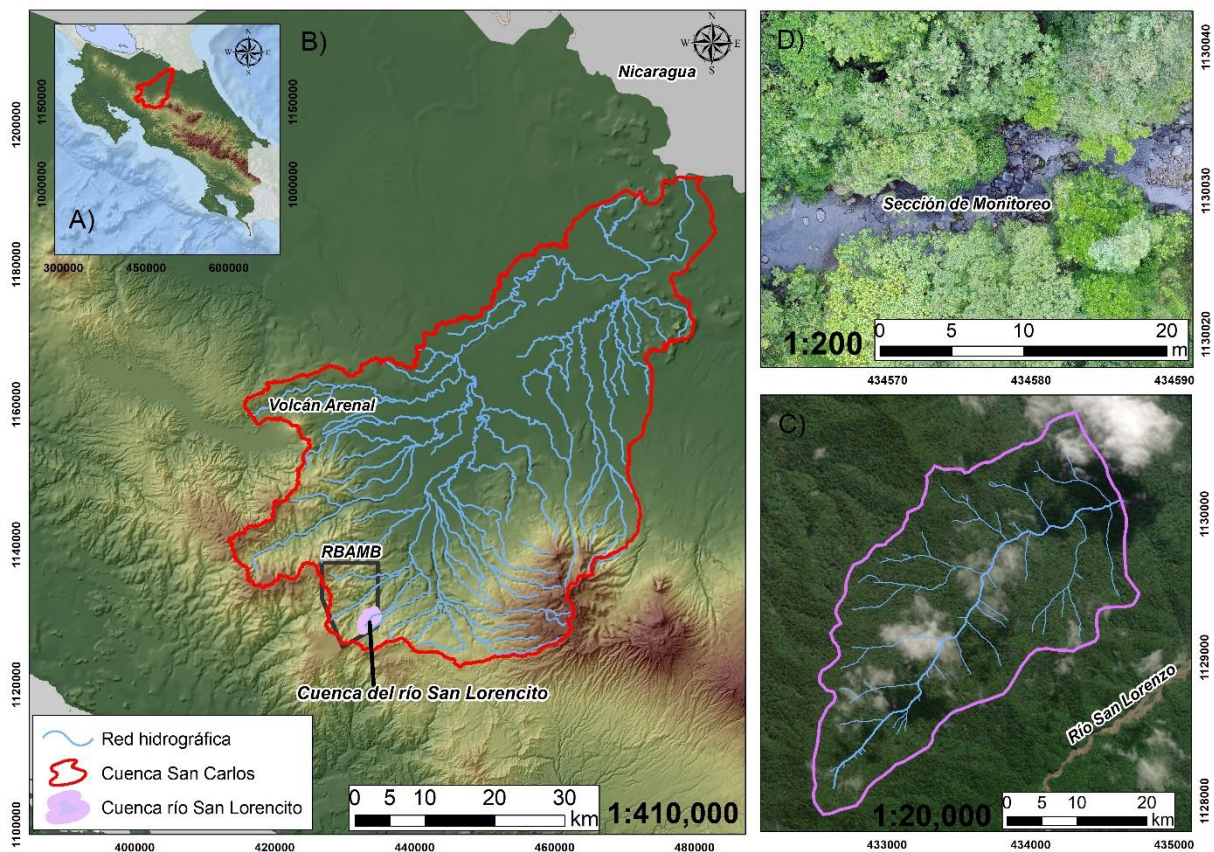


Figura 1. A) Ubicación de la cuenca del río San Carlos en Costa Rica. B) Red de drenaje de la cuenca del río San Carlos, localización de la RBAMB, localización de cuenca del río San Lorencito. C) Imagen Satélite de la cuenca del río San Lorencito, D) Sección de monitoreo de cambios morfodinámicos en la cuenca del río San Lorencito. Elaboración propia.

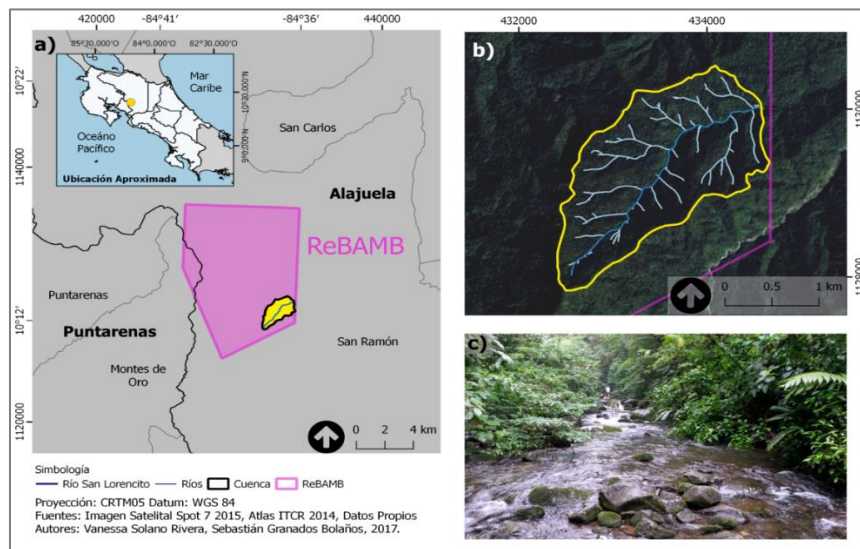


Figura 2. A) Ubicación de la cuenca con B). Detalle de la red hídrica y una imagen satelital que muestra la cobertura de la cuenca de interés. C) Fotografía viendo aguas arriba del río San Lorencito. (Solano-Rivera & Granados-Bolaños, 2017).

1.3 Delimitación Temporal

La investigación se desarrollará con datos obtenidos durante el periodo: 25 de agosto de 2017 al 5 de noviembre de 2018.

1.4 Problema de Investigación

No existe suficiente información acerca de los procesos morfodinámicos fluviales con técnicas de alta resolución espacial y temporal en Costa Rica, son escasas las investigaciones y publicaciones relacionadas con el tema, más aún si nos referimos a ambientes tan particulares como la RbAMB un ambiente prístino, húmedo, volcánico pleistocénico, geológicamente fallado y de difícil acceso. La problemática de esta investigación recae en la insuficiencia de información científica de calidad acerca del comportamiento y estructura de ríos bajo estas condiciones tan particulares en el mundo. Costa Rica por su Geografía tiene una gran cantidad de ríos y quebradas similares con estas características, nueva información

detallada y de alta resolución es necesaria para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico, la gestión del riesgo y el desarrollo social en general.

Desde una óptica científica espacial, la geomorfología fluvial debe analizarse con una perspectiva de escalas detalladas (menor a 1:5000), especialmente en cuencas pequeñas y prístinas en donde no es posible analizar la morfología de los canales y formas aluviales utilizando imágenes satélites o aéreas, por nubosidad, vegetación y disponibilidad de recursos de alta resolución espacial. La problemática del entendimiento geomorfológico de los ríos tropicales nos lleva a innovar con nuevas técnicas y metodologías que permitan generar datos de alta resolución temporal y espacial, los RPAS son una posible solución de bajo costo económico que podría responder a la falta de información de topográfica y geomorfológica en ambientes fluviales de Costa Rica y en general el mundo.

1.5 Justificación

Costa Rica tiene una compleja y densa red hidrográfica conformada por más de 2500 ríos y quebradas (Sistema Nacional de Información Territorial , 2018). La rica red hidrográfica del país ha permitido generar importantes divisas para el desarrollo socioeconómico del país como el robusto sistema de producción hidroeléctrico, las actividades turísticas, la agricultura a gran escala y el abastecimiento de casi la totalidad de la población con agua potable. La Geografía de Costa Rica está intrínsecamente relacionada con los procesos fluviales, dan origen a una gran complejidad de procesos biofísicos y sociales que caracterizan el espacio. Es necesario generar datos de alta resolución que permitan entender mejor el comportamiento morfodinámico, hidráulico e hidrológico de los ríos tropicales, ya que el desarrollo de la sociedad misma depende de estos ambientes fluviales.

Costa Rica es un país con un relieve y geomorfología derivado de la intensa erosión hídrica, erupciones volcánicas y la neotectónica (Denyer & Kussmaul, 2012). El complejo relieve del país da origen a una variada diversidad de formas aluviales erosivas y acumulativas, cuencas con morfologías muy variadas, secciones de ríos que van desde torrentes de montaña con cauces rectilíneos, fuertes pendientes, valles fluviales en “V”, pasando a ambientes fluviales con secciones entalladas en profundos cañones y gargantas con aluviones de grandes dimensiones hasta ríos de llanura con canales meándricos y sinuosos (Bergoeing, 2013). Para profundizar más en la evolución geomorfológica, la predicción de eventos y la

cuantificación de transporte de material es necesario experimentar en campo con nuevas técnicas que permitan dar nuevas ópticas y resoluciones de los procesos biofísicos que ocurren en los ambientes fluviales (Solano-Rivera et al, 2019). Los ríos tropicales son sistemas geomorfológicos con poca exploración en algunas del mundo (Sinha & Latrubesse, 2020). La alta resolución derivada de imágenes digitales RPAS permite analizar con más detalle el comportamiento y formas de los ambientes fluviales (Borreguero et al, 2019). Los ambientes fluviales de Costa Rica son dinámicos y en ocasiones presentan avenidas torrenciales o inundaciones, algunos ambientes fluviales están urbanizados y amenazados por la ocurrencia de inundaciones. Otros ambientes fluviales están degradados, contaminados o deforestados, algunos ambientes fluviales tienen ecosistemas endémicos como humedales (Campos-Durán & Quesada-Román, 2015). Las imágenes y productos fotogramétricos de alta resolución permiten observar fenómenos que no se podrían detectar o analizar con tanto detalle por medio de imágenes satélite o imágenes aéreas, como por ejemplo; la socavación de puentes, erosión de márgenes del río, eutrofización, contaminación, ingreso de material coluvial, erosión de laderas, reptación de laderas o procesos en masa, variaciones en la coloración del agua, sedimentación de embalses u obras civiles entre otros (Annis et al., 2020). Uno de los productos más importantes para el diseño de obras civiles y el manejo de secciones fluviales son los modelos de elevación o topografía. Los RPAS permiten generar modelos de terreno y superficie con resolución de hasta centímetros, estos modelos son la base para la planificación de cualquier obra civil, además de ser esenciales insumos para la simulación hidrológica e hidráulica de secciones fluviales (Chen et al., 2019). Los RPAS son una técnica de bajo costo que permite recolectar grandes volúmenes de información en poco tiempo y sus productos tienen múltiples aplicaciones en las geociencias, por ello se justifica una investigación utilizando esta técnica pues ya ha sido ampliamente documentado la utilidad de utilizar fotogrametría de bajo costo en ambientes fluviales (Westoby et al, 2012 & Quesada-Román et al., 2020 & Granados-Bolaños et al., 2021)

1.6 Objetivo general

Analizar la dinámica de transporte de material aluvial y procesos morfodinámicos fluviales en la cuenca del río San Lorencito utilizando fotogrametría aérea RPAS y sumergida de alta resolución espacial para cuantificar la dinámica de transporte de sedimentos y cambios morfológicos en el canal por avenidas aluviales.

1.7 Objetivos específicos

Interpretar la geomorfología fluvial de 3 secciones específicas del río San Lorencito utilizando fotogrametría aérea y sumergida de alta resolución espacial.

Analizar estadísticamente las variaciones en el caudal y velocidad del río ocasionados por eventos de precipitación durante el periodo de estudio utilizando sensores hidrometeorológicos de alta resolución temporal en el río San Lorencito.

Analizar los umbrales de movimiento de distintas partículas aluviales observadas en los productos fotogramétricos a partir de un análisis de cambios para establecer relaciones entre la precipitación-velocidad-transporte de sedimentos.

1.8 Hipótesis Nula

No existe una relación entre la precipitación y la velocidad del agua del río San Lorencito y los periodos de transporte de material aluvial.

1.9 Hipótesis alternativa

Existe una relación entre la precipitación y la velocidad del agua del río San Lorencito y los periodos de transporte de material aluvial.

1.10 Antecedentes

Las publicaciones con RPAS en Costa Rica aplicadas a geomorfología son escasas. Quesada-Román et al., (2020) utilizaron modelos de terreno derivados de levantamientos fotogramétricos RPAS para la calibración y modelación de inundaciones en combinación con análisis dendrocronológico de secciones fluviales para la reconstrucción de avenidas fluviales en términos de su profundidad, extensión y velocidad, se concluye que el uso de RPAS es una herramienta versátil y capaz de generar información topográfica de calidad para la calibración de simulaciones hidráulicas, adicionalmente su utilidad en la detección y análisis de la estructura de la vegetación ripiara. Granados-Bolaños et al., (2021) efectuaron una serie

de levantamientos fotogramétricos en ambientes volcánicos cuaternarios, demuestran la utilidad para el análisis de geoformas y procesos volcánicos en términos de; morfometría, morfología, morfogénesis, litología, estructuras externas, contactos de geoformas, sucesión vegetal en coladas de lava, modelamiento y calibración de modelos hidráulicos de flujos hiperconcentrados. Solano-Rivera et al., (2019) utilizaron un RPAS de igual modelo y marca al propuesto en esta investigación, en la misma cuenca para detectar un cambio severo en la morfología y estructura en general del cauce del río San Lorencito. Adicionalmente a estas publicaciones relacionadas con geomorfología no hay otros referentes en ambientes fluviales de Costa Rica utilizando RPAS. Vale destacar que la totalidad las publicaciones anteriores son de la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica.

No obstante, a pesar de la escasez de investigaciones en Costa Rica, en el resto del planeta diferentes ciencias han estado utilizando RPAS aplicado al análisis de la superficie terrestre y cada vez muestran más utilidad por su bajo costo y facilidad de recolección de datos (Anderson & Gaston, 2013). Los RPAS se han aplicado también en la cartografía geomorfológica de alta resolución (Hackney & Clayton, 2015). Las aplicaciones en el estudio y monitoreo de deslizamientos y movimientos en masa también han tenido un importante desarrollo en los últimos años (Lucieer, de Jong, & Turner, 2013). Estudios sobre erosión y sedimentación en diferentes ambientes también han sido desarrollados utilizando RPAS, algunos como los de Eltner et al, (2015) y Wheaton et., (2010) tal como lo mencionan Langhammer & Vacková, (2018).

Las aplicaciones de los drones al campo de la hidrología y la hidráulica, campos muy afines a la geomorfología fluvial, está más orientada a la recolección de información topográfica para el desarrollo de DTM, que son fundamentales para cualquier proceso de simulación hidrológica o hidráulica (Flener et al, 2013). Las aplicaciones de RPAS a la geomorfología fluvial también son conocidas, tal como lo proponen Casado et al., (2015) realizan una clasificación automatizada de formas aluviales utilizando RPAS.

Woodget et al., (2017) demuestran la utilidad de los RPAS para el monitoreo y observación de ambientes fluviales, demuestran la utilidad del método para el estudio de procesos morfodinámicos. Mazzeloni et al., (2020) evalúan el uso de RPAS para el levantamiento topográfico para la calibración y simulación de inundaciones, concluyen en la gran utilidad para levantar con detalle secciones fluviales tropicales. Hay una justificación científica para

profundizar en el análisis de los procesos fluviales que ocurren en los ambientes tropicales precisamente por al escasez de datos y desarrollo de metodologías aplicadas a la geomorfología tropical. El uso de RPAS cada vez más se está convirtiendo en una herramienta indispensable para los Geógrafos.

1.11 Marco Teórico

Este marco teórico conceptual pretende definir y revisar ciertos conceptos básicos para comprender los resultados de la investigación. Los temas se definirán en los siguientes apartados; (i) Fundamentos de geomorfología fluvial y morfología de canales, (ii) dinámica de transporte de sedimentos y (iii) fundamentos de fotogrametría RPAS aplicada.

1.11.1 Fundamentos de geomorfología fluvial y morfología de canales

La geomorfología estudia las formas del relieve y los procesos que actúan sobre ellos (Hugget, 2011). El estudio geomorfológico incluye la descripción de las formas (morfología), su origen (génesis), estructura, historia de desarrollo, dinámica actual, diagnóstico a futuro y su relación con la actividad humana (Lugo, 2011). La geomorfología fluvial estudia las diferentes formas del relieve modeladas por ríos y procesos fluviales, la interacción entre la fuerza hidráulica superficial (escorrentía) y el material que se opone al movimiento del agua, esto da como origen una serie de formas acumulativas y erosivas dependiendo del régimen hidrológico y comportamiento del flujo. La morfodinámica fluvial hace referencia a las variaciones morfológicas existentes en un sistema fluvial a lo largo del tiempo (Horacio, Ollero, & Pérez-Alberti, 2015). La geomorfología fluvial estudia la constitución (propiedades del material, porosidad, litología, densidad etc.), la configuración (tamaño, forma, morfología etc.) y flujos de masa (velocidad, erosión, acumulación etc.) de los sistemas fluviales (Rainato et al., 2020).

La forma de un río está directamente condicionada por el balance entre la fuerza hidráulica del río y el material del canal que se opone al flujo. Existe una gran diversidad factores ambientales (geología, pendiente, climatología, etc.) que interactúan con las fuerzas

hidráulicas dando como resultado una gran variedad de morfología de canales (Grams & Schmidt, 2005).

En esta investigación es fundamental comprender que existe una variedad de morfologías de canales con diversidad de procesos erosivos y deposicionales (Newson & Newson, 2000). En el caso de la cuenca de investigación estamos hablando de un ambiente de montaña, de cabecera, fuertes pendientes, con drenajes trezados y rectilíneos, con un régimen hidráulico supercrítico y turbulento, dando lugar a caídas hidráulicas y zonas de remanso tipo (step-pool) (Chin, 1999). Para efectos de esta investigación el término step (grada o descenso-caída hidráulica, rápido) y pool (piscina, zona de remanso, poza) se usarán con la terminología rápido-remanso. Los ríos de montaña frecuentemente están caracterizados por un tipo de canal rápido-remanso (step-pool) (Church & Zimmermann, 2007). Esta clase de canales está directamente relacionada con la pendiente y el régimen hidráulico que caracteriza el canal, los aluviones y el material transportado forman gradas deposicionales que se oponen al flujo por una estructuración entrelazada entre los aluviones. El agua al no tener competencia para transportar el material cae en función de la pendiente, la velocidad del agua, el diámetro y la disposición del material aluvial (ver figura 3).

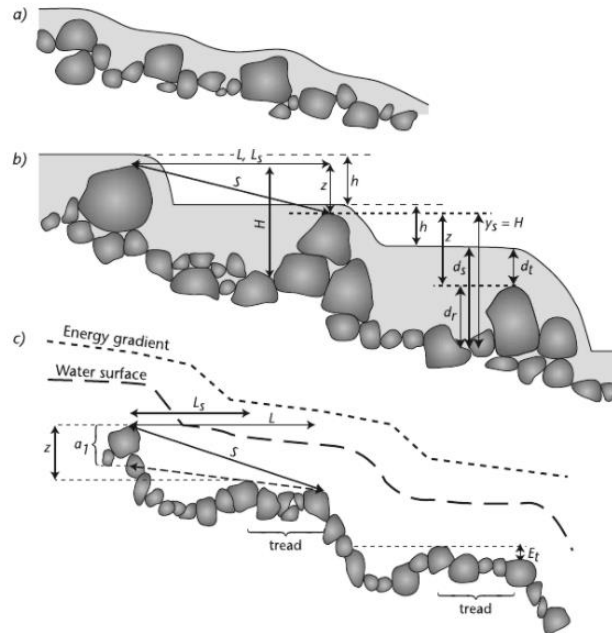


Figura 3: Modelo de forma y estabilidad de canales tipo rápido-remanso (step-pool) (Church & Zimmermann, 2007).

El cauce o lecho fluvial de un río es el área que se encuentra ocupado por la corriente o escorrentía superficial. En el área de estudio existen dos tipos de lechos fluviales; 1. Lecho móvil y 2. lecho fijo (Chatanantavet & Parker, 2008). Un lecho móvil es una superficie de material no consolidado (aluviones) susceptible de ser movilizado por un fluido, o un líquido (ver figura 4). Las partículas se ponen en movimiento cuando la fuerza del flujo es superior a la resistencia de las partículas al estado de reposo, lo que se relaciona con la velocidad y la turbulencia, así como con la posición de las partículas en el lecho, su tamaño, forma y densidad (Lugo, 2011).

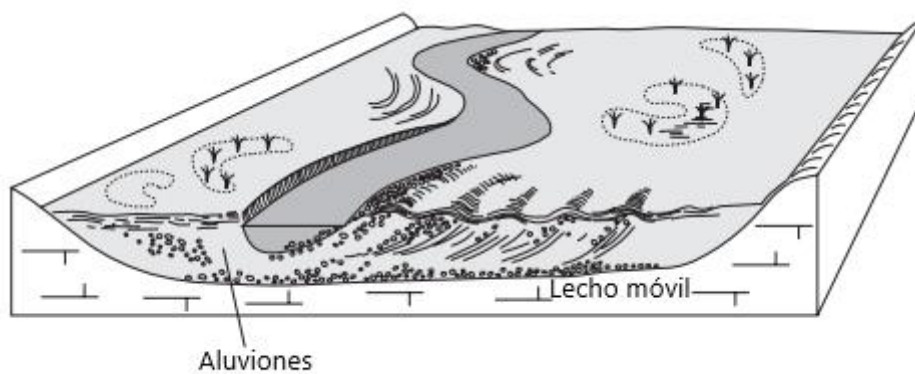


Figura 4: Sección de lecho móvil de un río. Adaptado de (Charlton, 2008).

Un lecho fijo está compuesto de material consolidado o roca, estos lechos están compuestos de afloramientos rocosos y usualmente están en secciones angostas del río con mayor pendiente (ver figura 5).

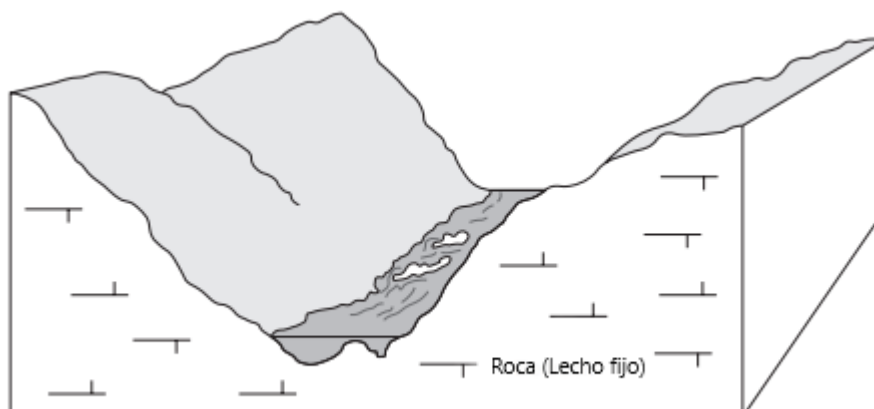


Figura 5: Sección de lecho fijo de un río. Adaptado de (Charlton, 2008).

Las secciones de lecho fijo frecuentemente están asociadas a zonas de mayor pendiente y velocidad del agua, por lo tanto, más capacidad erosiva y menos posibilidad de acumulación y deposición de sedimentos (Wohl & Merritt, 2001). En el río de estudio son poco frecuentes estas secciones y usualmente corresponden con caídas hidráulicas y cascadas que exponen el material basalto-andesítico. En algunas secciones de lecho de fijo también afloran brechas volcánicas.

1.11.2 Dinámica de transporte de sedimentos

Esta investigación se centra en la detección de cambios geomorfológicos en el río por avenidas fluviales, por lo tanto, es esencial definir a partir de su granulometría la clasificación de tipos de sedimentos o aluviones.

Los aluviones o depósitos aluviales son acumulaciones de material no consolidado estos son formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundación de los valles. La composición granulométrica y mineralógica, así como las características estructural-texturales varían ampliamente en función del régimen de los ríos, de la resistencia de las rocas a la erosión, de la cuenca hidrográfica y de las condiciones geomorfológicas generales. En los ríos de montaña son característicos los materiales gruesos con predominio de guijarros y bloques, con una composición mineralógica heterogénea, mala clasificación (en cuanto a tamaño) y ausencia de estratificación precisa (Lugo, 2011).

Los aluviones o material aluvial pueden tener diferentes tamaños de partículas que varían desde la arcilla ($>0.004\text{mm}$) hasta los bloques ($< 256\text{mm}$). Para efectos de esta investigación se utilizó una clasificación del United States Geological Survey o Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), (ver figura 6). En la primera y segunda columna de la figura X están indicados los tamaños de partículas en milímetros, en la cuarta columna (Size Terms) muestra los nombres de partículas adaptado de (Wentworth, 1929). Las últimas dos columnas (Threshold velocity for traction cm/sec) muestra los umbrales de velocidad del agua en cm/sec para la iniciación del movimiento de la determinada partícula, modificado de la curva de Hjulström (Hjulström, 1935). Por ejemplo, bajo condiciones de densidad normal del agua, para que una arena gruesa (Very coarse Sand, entre 1mm-2mm de tamaño) entre en

movimiento por el flujo hidráulico teóricamente se requiere una velocidad del agua entre 40 cm/sec y 70 cm/sec. Esta clasificación de tamaño de partículas fue usada para esta investigación.

Φ	PHI - mm CONVERSION $\phi = \log_2 (d \text{ in mm})$ $1 \mu\text{m} = 0.001\text{mm}$		SIZE TERMS (modified from Wentworth, 1929)	SIEVE SIZES		Intermediate diameters of natural grains equivalent to sieve size	Number of grains per mg		Settling Velocity (Quartz, 20°C)		Threshold Velocity for traction cm/sec		
	Fractional mm	Decimal inches		ASTM No. (U.S. Standard)	Tyler Mesh No.		Quartz spheres	Natural sand	Spheres (Gibbs, 1971)	Crushed (Rubby)	(Nevin, 1946)	(modified from Hjulstrom, 1939)	
									cm/sec	cm/sec		in flow of 1m depth	
-8	256	10.1"	BOULDERS										
-7	128	5.04"		COBBLES							200		
-6	64.0	2.52"	PEBBLES	2 1/2"									
-5	53.9	1.26"		very coarse	2.12"	2"							
-4	45.3			coarse	1 1/2"	1 1/2"							
-3	33.1	0.63"		medium	1 1/4"	1.05"							
-2	32.0			fine	3/4"	.742"							
-1	26.9	0.32"		very fine	5/8"	.525"							
0	22.6			fine	7/16"	.371"							
1	17.0	0.16"		very fine (granules)	5/16"	.265"							
2	16.0			very coarse	4	4							
3	13.4	0.08 inches		coarse	6	6							
4	11.3		medium	8	8								
5	9.52	1	fine	10	10	1.2	.72	.6					
6	8.00		very coarse	12	12								
7	6.73	1/2	coarse	14	14								
8	5.66		medium	16	16								
9	4.76	1/4	fine	18	18								
10	4.00		very fine	20	20								
11	3.36	1/8	very fine	25	24	.86	2.0	1.5					
12	2.83		coarse	30	28								
13	2.38	1/16	medium	35	32	.59	5.6	4.5					
14	2.00		fine	40	35								
15	1.63	1/32	very fine	45	42	.42	15	13					
16	1.41		coarse	50	48								
17	1.19	1/64	medium	60	60	.30	43	35					
18	1.00		fine	70	65								
19	.840	1/128	very fine	80	80	.215	120	91					
20	.707		coarse	100	100								
21	.545	1/256	medium	120	115	.155	350	240					
22	.420		fine	140	150								
23	.354	1/512	very fine	170	170	.115	1000	580					
24	.297		coarse	200	200								
25	.250	1/1024	medium	230	250	.080	2900	1700					
26	.210		fine	270	270								
27	.177		very fine	325	325								
28	.149		coarse	400	400								
29	.125		medium										
30	.105		fine										
31	.088		very fine										
32	.074		Clay/Silt boundary for mineral analysis										
33	.062												
34	.053												
35	.044												
36	.037												
37	.031												
38	.025												
39	.020												
40	.016												
41	.012												
42	.009												
43	.007												
44	.005												
45	.004												
46	.003												
47	.002												
48	.001												

Figura 6: Tabla de distribución de tamaños partículas según por el United States Geological Survey o Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), (Popee et al ,2000).

La curva Hjulström determina cuando un río erosiona, transporta o deposita un material dependiendo del tamaño de la partícula y la velocidad del flujo (Hjulström, 1935) (ver figura 7). El modelo fue planteado por el geógrafo físico Filip Hjulström, considerado uno de los pioneros de la geomorfología fluvial.

La curva del Hjulström muestra las relaciones entre la velocidad del agua y el tamaño de partícula. Por ejemplo, un tamaño de partícula de 1mm (arena gruesa) iniciará su tracción o transporte alrededor entre los 10cm/s y los 90cm/s, superado ese umbral según la curva, el material empieza a degradarse por acción mecánica del agua y sufre erosión. Según la metodología práctica, un tamaño de partícula de alrededor de 0.01 mm empieza a transportarse o inicia su tracción aproximadamente a los 0,2 cm/s es decir a los 0.0072 km/h, una vez inicia su tracción no hay una velocidad que cause decantación, puesto que este tamaño de partícula estamos hablando de arcillas y una vez que entra en movimiento permanece en suspensión. Pero si vemos una partícula de 100mm, esta empieza su velocidad de tracción alrededor de los 50 y 100 cm/s.

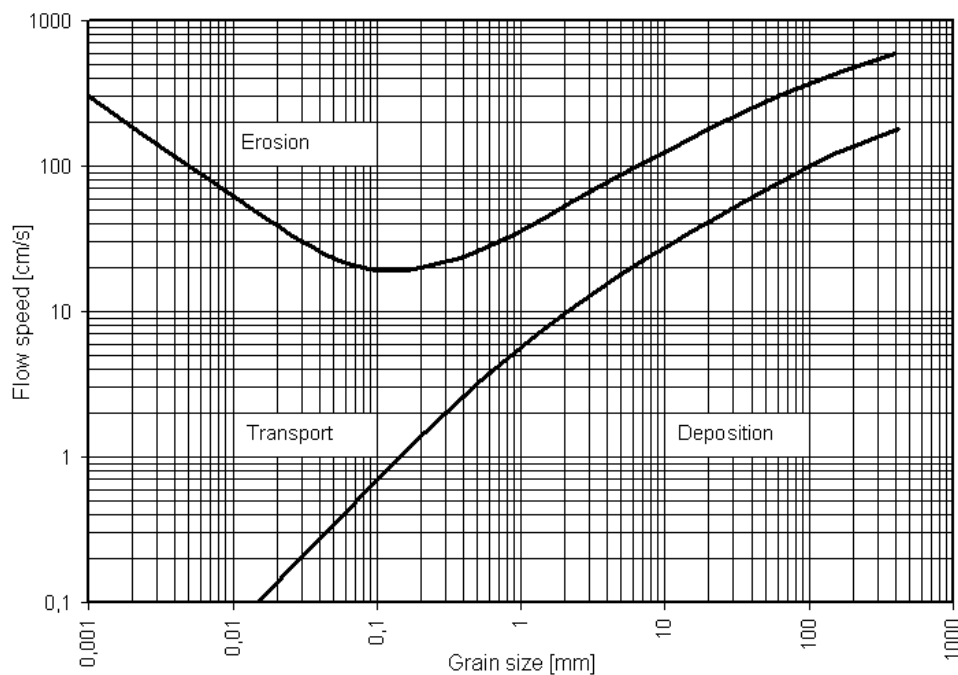


Figura 7: Curva de Hjulström. (Hjulström, 1935).

Para efectos de esta investigación los tamaños de partícula se definirán en función de la capacidad de la cámara del RPAS que fue mencionado anteriormente. Como lo muestra la figura 6 y 7 hay una gran variabilidad de tamaños de partículas de los sedimentos. En efecto por la cámara que transporta la aeronave, no es posible diferenciar tamaños de partículas entre arenas, grava y guijarros. Por lo cual se definen 2 categorías para el análisis fotogramétrico (1) **sedimentos finos >256mm** y (2) **bloques <256mm**.

1.11.3 Fundamentos de fotogrametría RPAS aplicada

La fotogrametría es la técnica que tiene como objetivo estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías. Es, en esencia, la ciencia que utiliza la fotografía para hacer medidas y sus aplicaciones extensivas a numerosas áreas de conocimiento (Quirós, 2014). Básicamente la fotogrametría es la técnica aplicada por medio del cual a partir de fotografías del terreno o un objeto, se consigue deducir su planta, altimetría y demás características para formar productos topográficos (Zapata-Ocampom, 2003). Es una forma de deducir a partir de un conjunto de imágenes, en este caso digitales aéreas, las dimensiones, formas y elevaciones de una superficie particular (Eisenbeiss, 2009).

La fotogrametría que fue aplicada en esta investigación proviene del método computacional Structure from Motion algorithm (SfM) o Estructura a partir de movimiento (Matthews, 2008). El método utiliza una serie de imágenes que se traslapan espacialmente formando pares estereográficos para producir nubes de puntos de amarre entre las imágenes para posteriormente generar nubes de puntos densificadas de la superficie levantada con las imágenes (ver figura 8).

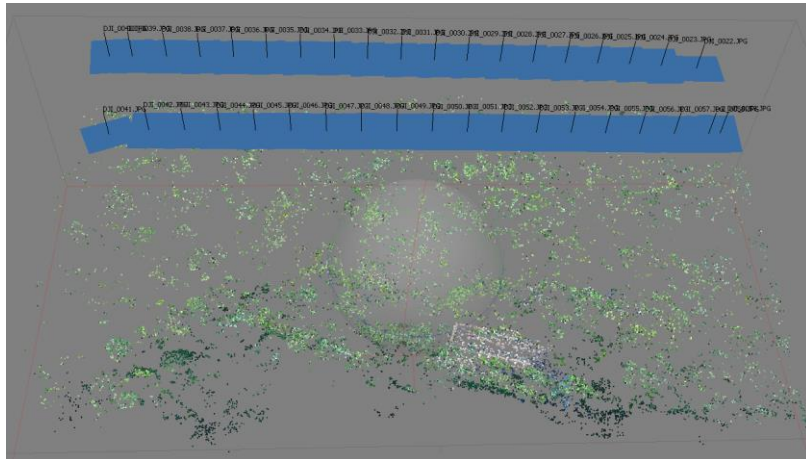


Figura 8: Pares de fotografías aéreas y puntos de amarre en Agisoft sobre una sección del río San Lorencito. Elaboración propia.

Softwares recientes como Agisoft Metashape o Pix4D han logrado automatizar los procesos de elaboración de productos fotogramétricos, revolucionando los flujos de trabajo tradicionales para la obtención de topografía y modelos de terreno, los mismos programas realizan las calibraciones de cámara con la introducción de datos simples por parte del usuario, la orientación externa e interna de las imágenes digitales también se pueden ejecutar de forma automatizada. Los procesos de aerotriangulación y restitución fotogramétrica también se ejecutan de forma automatizada. La mayor parte de trabajo manual está en la clasificación de la nube de puntos densificada, no obstante, hay múltiples algoritmos de clasificación automatizada de puntos de control (Zhu et al., 2017). La clasificación de la nube de puntos es fundamental para discriminar puntos de vegetación, estructuras y demás objetos que no sean asociados al terreno y el material aluvial. La interpolación entre la nube de puntos es lo que va a derivar ya sea el modelo de superficie o modelo de terreno.

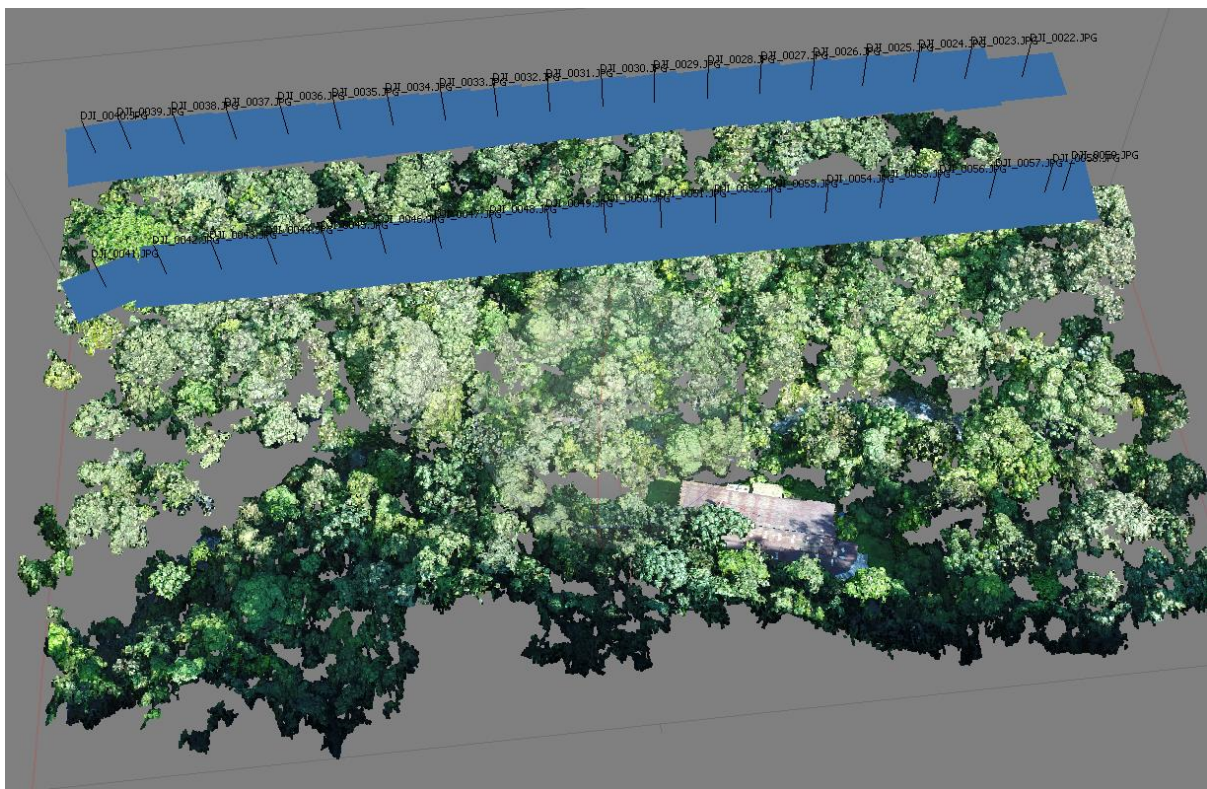


Figura 9: Nube de puntos densificada sobre una sección del río San Lorencito. Elaboración propia.

Los modelos de terreno y el ortomosaico fotogramétrico resultante de la alineación de las fotografías y asignación de valores de elevación por píxel son producto de la nube de puntos densificada correctamente clasificada (ver figura 10).

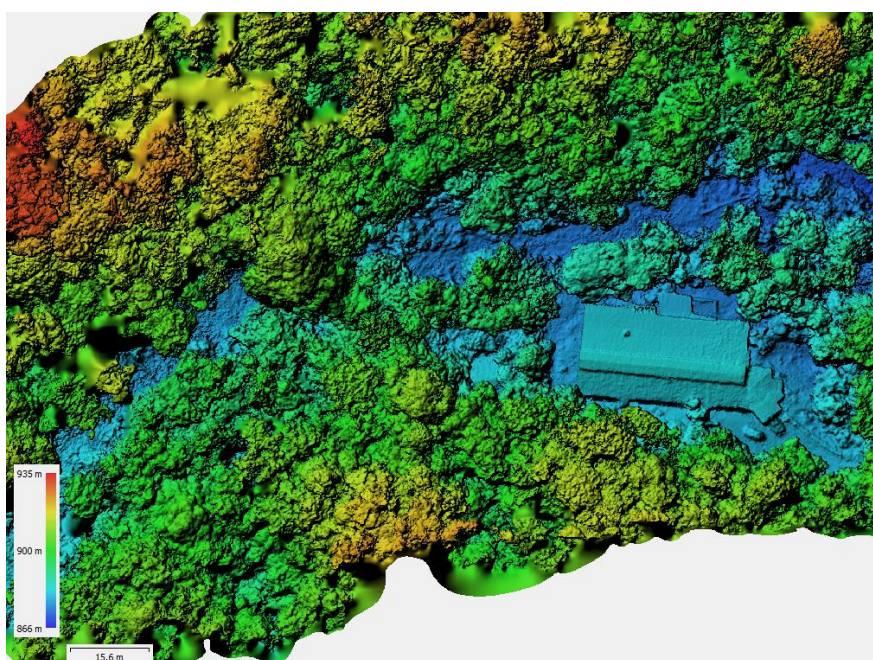


Figura 10: Modelo de superficie de una sección del río San Lorencito: Elaboración propia

El ortomosaico fotogramétrico es un conjunto de fotografías alineadas y georreferenciadas automáticamente a partir de los procesos mencionados anteriormente. De igual manera los valores de elevación serán derivados ya sea del modelo de superficie o terreno según lo asigne el usuario en el respectivo software, por lo tanto, se debe tener precaución en este paso para no omitir valores de elevación de la vegetación si fuera deseado, por dar un ejemplo (Becker et al., 2017). El ortomosaico fotogramétrico en verdadero color (RGB) es esencial para la detección del material aluvial en el río (ver figura 11).



Figura 11: Ejemplo de un ortomosaico de baja altitud (30m) en una sección del río San Lorencito. Elaboración propia.

1.12 Metodología

La metodología está presentada según cada objetivo específico y está fundamentada con los contenidos del marco teórico. **Para efectos de esta investigación, todas las coordenadas están en sistema CRTM05.**

1.12.1 Objetivo específico 1. Interpretar la geomorfología fluvial de 3 secciones específicas del río San Lorencito utilizando fotogrametría aérea y sumergida de alta resolución espacial.

Se realizaron 6 vuelos con vehículos aéreos no tripulados (RPAS), marca DJI modelo Phantom 4 Pro sobre 3 secciones del río San Lorencito a diferentes altitudes variando desde los 30m hasta los 120m. Las rutas de vuelo, porcentaje de traslape entre imágenes, azimut de trayectoria del vuelo, velocidad de la aeronave y parámetros de la cámara son específicas para cada vuelo. Las imágenes digitales obtenidas de los vuelos fotogramétricos fueron utilizadas para generar 4 productos principales:

- Orthomosaico fotogramétrico
- Modelo de Elevación de Terreno (DTM¹)
- Modelo de Elevación de Superficies (DSM²)
- Modelo de Nube de Puntos Densificada

Los productos fotogramétricos fueron elaborados en el software Agisoft Photoscan Profesional Edition, Pix4Dmapper y ArcMap 10.8. Las rutas de los vuelos (vuelos automáticos) fueron programadas mediante aplicación móvil DroneDeploy Mobile App y DJI Go4. También se tomaron imágenes oblicuas y planas con rutas manuales (vuelo manual).

Los ortomosaicos fueron utilizados para la detección mediante técnicas de clasificación supervisada y no supervisada para el análisis de material aluvial y coluvial en términos de su morfología, morfometría, distribución, volumen, área y aproximación en la identificación litológica. Se realizó una fotointerpretación de los ortomosaicos para la elaboración de mapas geomorfológicos fluviales a escala 1:100 de diferentes secciones del río San Lorencito, además se utilizó los DTM's y DSM's para la interpretación de la geomorfología.

La morfología de los lechos fluviales del río San Lorencito fue analizada con ortomosaicos fotogramétricos elaborados a partir de imágenes digitales sumergidas. Las imágenes fueron tomadas con una cámara sumergible GoPro Silver 4, el ortomosaico y nube de puntos densificada fue elaborado utilizando Agisoft Photoscan Profesional Edition.

¹ Por sus siglas en inglés Digital Terrain Model

² Por sus siglas en inglés Digital Surface Model

Se analizó 14 perfiles de terrazas aluviales y márgenes del río para elaborar modelos conceptuales utilizando una tableta de dibujo digital Wacom Intuos. Estas fueron levantadas con una cámara digital de un celular Huawei P10 Pro para la interpretación.

Se aplicó diferentes algoritmos de detección automatizada de bordes y formas en archivos ráster utilizando los softwares Grass 7.4.0 y SAGA, esto para la detección y análisis automatizado de material aluvial. A partir del análisis se determinó características de los aluviones como: Tamaño, forma, angularidad, color, litología, volumen entre otros. Posteriormente el material fue digitalizado manualmente utilizando ArcMap 10.6 para la cuantificación de las características.

1.12.2 Objetivo específico 2. Analizar estadísticamente las variaciones en el caudal y velocidad del río ocasionados por eventos de precipitación durante el periodo de estudio utilizando sensores hidrometeorológicos de alta resolución temporal en el río San Lorencito.

Se obtuvieron datos de precipitación con una resolución de 30 minutos durante el periodo de estudio a partir de una estación meteorológica Davis Vantage Pro-2 del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, la estación se ubica aproximadamente a 500 metros al noreste de la cuenca del río San Lorencito.

Se colocó un sensor de nivel de agua marca Global Water logger modelo GL500-7-2, las mediciones fueron luego utilizadas para estimar el caudal del río, la resolución temporal de los datos de caudal son 5 minutos.

Se definió una sección de aforo y durante todas las giras se realizaron aforos en diferentes momentos para documentar la variabilidad temporal del caudal, así como la respuesta del río ante eventos de precipitación.

Los datos recolectados de caudal y precipitación fueron utilizados para elaborar una base de datos temporalmente continua. La base de datos fue utilizada para seleccionar eventos de precipitación que ocasionaron crecidas o aumento en la velocidad del río y por ende la capacidad de transporte de material aluvial del mismo. Los eventos representativos se graficaron utilizando SigmaPlot 14.0.

La velocidad del agua de cada evento seleccionado fue estimada con el fin de aplicar la curva de Hjulström a dichos eventos; la curva permite establecer umbrales (cm/s) de erosión, transporte o deposición del material aluvial según su tamaño de partícula (mm) (Hugget, 2011). Se elaboró una función matemática para estimar los umbrales de transporte o deposición.

Se establecieron 23 variables agrupadas en 4 categorías para caracterizar cada evento estadísticamente utilizando Excel Megastat y R Studio. Los parámetros fueron definidos a partir de la metodología modificada de (Solano-Rivera & Granados-Bolaños, 2017) aplicada al análisis de variaciones en la turbidez en la misma cuenca.

Humedad antecedente: Tiempo seco previo -Tseco (h), Humedad antecedente 3 días - HumAnte3d (mm), Humedad antecedente 7 días – HumAnte7d (mm);

Precipitación: Magnitud -M (mm), Duración -D (h), Intensidad Máxima -Imax (mm/h), Valor máximo (mm/0.5h) Val_Max

Velocidad del flujo: Velocidad inicial -Vi (m/s), Velocidad mínima -Vmin (m/s), Velocidad Máxima -Vmax (m/s), crecimiento máximo-creMax (m/s), Tiempo desde el inicio hasta el pico máximo Trise (h), Tiempo desde el pico hasta el final -Tfmax (h), Tiempo entre los picos de Precipitación y Velocidad del flujo -P_Vlag (h)

Umbrales de transporte de material según la curva de Hjulström : Tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de arenas -TP_Tarena(h), Tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de grava y guijarros -TP_Tgrava_gui(h), Tiempo de inicio de precipitación del inicio de transporte de bloques TP_Tbloq(h), Duración total de transporte de arenas y grava TT_Tarena (h), Duración total de transporte de grava_guijarros TT_Tgrava_gui(h), Duración total de transporte de bloques TT_Tbloq(h), Partícula de mayor tamaño transportada según la curva de Hjulström TamMayor_partEst (mm), Partícula de mayor tamaño transportada observada entre observaciones fotogramétricas Tam_partObs (mm), área con cambios detectada entre observaciones fotogramétricas area_cam(m²).

Se utilizó el índice de correlación de Spearman para explorar las relaciones entre las variables y obtener información estadísticamente significativa del comportamiento del río durante el periodo de estudio.

Se aplicó un análisis de histéresis entre los cálculos derivados de la curva de Hjulström y la precipitación. Esto para explorar estadísticamente la relación entre las características de los eventos de precipitación y los periodos en que el río transporta material y modifica sus condiciones geomorfológicas.

1.12.3 Objetivo Específico 3. Analizar los umbrales de movimiento de distintas partículas aluviales observadas en los productos fotogramétricos a partir de un análisis de cambios para establecer relaciones entre la precipitación-velocidad-transporte de sedimentos.

Durante la época de más precipitación en el sitio de estudio (agosto a noviembre) se sobrevoló con un UAV una sección del río San Lorencito con el fin de detectar cambios en la disponibilidad de material aluvial emergido. Se realizaron 6 observaciones fotogramétricas sobre la misma sección del río entre agosto y noviembre de 2017. Los ortomosaicos fueron comparados manualmente para analizar cambios en la disponibilidad de material en el río, de igual manera los ortomosaicos fueron comparados de forma automatizada utilizando el algoritmo de análisis ráster de cambios y diferentes algoritmos (Change detección-Maximum Likelihood Classification) del software SAGA y una clasificación supervisada elaborada en ArcMap 10.6. Se aplicaron algoritmos de análisis de imágenes, clasificaciones supervisadas y no supervisadas para detectar cambios en la sección del río.

El material detectado fue digitalizado manualmente en ArcMap 10.6 para posteriormente estimar áreas, morfología y distribución de los depósitos de material aluvial.

Para estimar cambios en la disponibilidad de material sumergido en el canal del río, se utilizó una cámara GoPro 4 Silver para tomar fotografías digitales sumergidas en la sección de aforo definida anteriormente. De igual manera que las observaciones fotogramétricas, se cuenta con 6 observaciones, de los cuales se seleccionarán los de mejor calidad; de material sumergido a lo largo del periodo de observación agosto a noviembre 2017.

Los resultados de las observaciones fotogramétricas y la estimación de transporte de material fueron graficados en Sigma Plot 14.0 para posterior análisis.

Los resultados finales de la fotogrametría, el análisis estadístico de las variaciones de caudal y precipitación y la detección de cambios morfológicos en las secciones del río se utilizaron para llegar a una estimación del transporte de material por evento, utilizando estadística aplicada.

2. Resultados: Caracterización geológica y geomorfológica de la cuenca

2.1. Formación Monteverde, un vulcanismo antiguo con intensa perturbación hidrotermal

Para entender la geomorfología fluvial del río San Lorencito en primer lugar debemos ubicarnos y entender la formación geológica por donde fluye el curso fluvial actualmente. El Grupo Aguacate (Denyer & Arias, 1991) es un antiguo arco volcánico de una longitud aproximada de 120 km que se extiende entre Tilarán y Puriscal. Las rocas que afloran son en su mayoría lavas basálticas y andesíticas, depósitos de flujos piroclásticos, brechas, tobas y en algunas partes se pueden encontrar intrusiones de diques basálticos (Denyer & Arias, 1991). El Grupo Aguacate hace referencia el arco volcánico post-cretácico y precuaternal de Costa Rica. Las rocas de este antiguo arco volcánico están profundamente alteradas hidrotermalmente con 3 principales mecanismos de alteración; (1) alteración propilítica directa en relación con las vetas de pirita, (2) alteración argílica de grado avanzado y (3) una incipiente sericitización con cuarzo y pirita (Morales, 1984). La misma alteración hidrotermal se puede encontrar en las rocas que afloran en la cuenca del río San Lorencito. Entonces debemos partir de un hecho de que las rocas que encontramos en esta región están profundamente meteorizadas químicamente por la acción de la humedad, temperatura, precipitación, vegetación y radiación solar. Son rocas en algunos casos tan profundamente alteradas que la composición mineralógica ha variado considerablemente al punto de no poder distinguir minerales y partículas de esta.

Dentro del Grupo Aguacate (grupo para hacer referencia a todas las rocas volcánicas post-cretácico y precuaternal de Costa Rica) está localizado la formación geológica Monteverde que es precisamente donde está localizada la cuenca de estudio (ver figura 12). Las rocas de

la **Formación Monteverde (Fm.)** son secuencias de afloramientos de lavas andesíticas con intercalaciones de brechas, tobas, lahares y flujos piroclásticos que se pueden encontrar en las partes altas de la cordillera de Tilarán (Denyer & Kussmaul, 2012). Las rocas están compuestas por lavas frescas andesíticas, hasta andesitas traquíicas, compuestas por fenocristales de plagioclasa, augita, hipersteno, magnetita y ocasionalmente hornblenda, biotita u olivino; es decir, tiene la misma composición mineralógica como las lavas de los estratovolcanes jóvenes de las cordilleras volcánicas (Kussmaul, 2000). Alvarado (1994) realizó 12 dataciones radiométricas dando como resultado un rango de edad de las rocas entre 2.2 y 1 Ma. Algunos autores mencionan que estas formaciones de lavas tienen un origen fisural (Cháves & Sáenz, 1974). Mientras que otros autores más bien sostienen que estas lavas provienen de antiguos volcanes y edificios claramente definidos (Schutz, 1987).

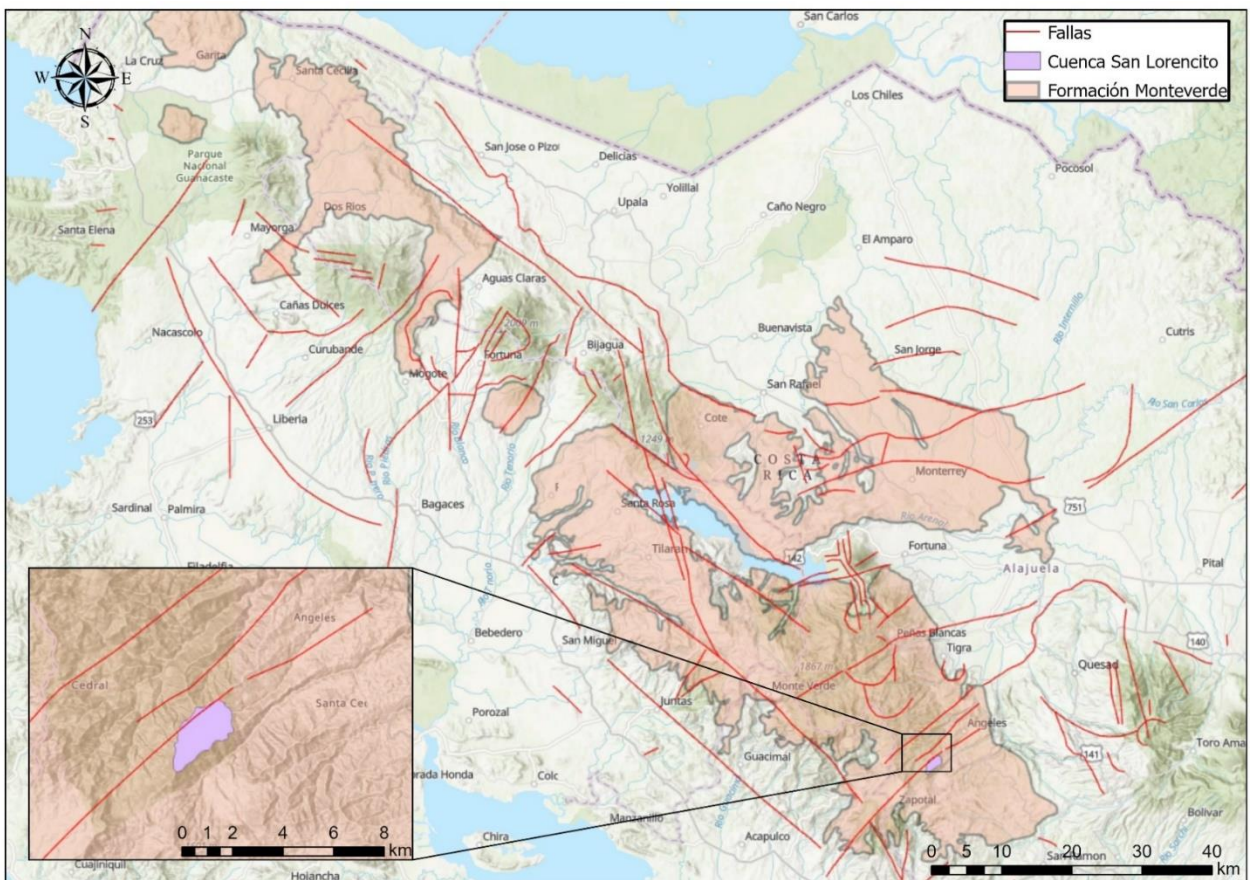


Figura 12. Distribución espacial de la Formación Monteverde y la ubicación de la cuenca del río San Lorencito dentro de ella. Elaboración propia, datos (Denyer & Alvarado, 2007).

Es común encontrar en el río San Lorencito afloramientos de brechas volcánicas con una avanzada alteración hidrotermal (ver figura 13). Estas rocas tienen poca dureza y las crecidas del río constantemente fracturan la roca incorporando sedimentos al cauce.



Figura 13. Brecha meteorizada con diaclasamiento expansivo en las márgenes del río San Lorencito, en la foto se aprecia como la erosión fluvial ha socavado secciones proximales al cauce. (Solano-Rivera & Granados-Bolaños, 2017).

Es importante tener en cuenta que las rocas de la Fm. están profundamente alteradas por procesos de meteorización química. Son susceptibles a la erosión hídrica ya sea por precipitación o procesos fluviales. Es común encontrar en los tributarios del río San Lorencito rocas en avanzado estado de alteración argilítica, se aprecian como rocas de color rojizo a amarillento que generan importante turbidez en los tributarios al ser incorporados al agua, en algunas partes afloran arcillas caoliníticas de color amarillento.



Figura 14. Andesitas con alteración argilítica en un tributario del río San Lorencito, nótese como el machete corta fácilmente las rocas, estas generan importante turbidez al ser manipuladas. Elaboración propia.

Es común encontrar afloramientos de andesitas y brechas con evidencia de meteorización esferoidal, rocas con forma de “cebolla o capas “que muestran profunda alteración hidrotermal. Conforme las capas exteriores se alteran hidrotermalmente los minerales próximos a la superficie se hidratan y sufren cambios químicos en su composición, el agua aumenta la estructura y ejerce un efecto de expansión hacia el exterior que genera el desprendimiento de capas, que ingresan al río por incorporación coluvial causado

deslizamientos y desprendimientos. La erosión fluvial también remueve facies de la roca y la expone a la intemperie por lo cual aumenta la alteración.



Figura 15. Afloramiento de brecha con meteorización esférica en una sección de lecho fijo del río San Lorencito, la erosión fluvial ha expuesto las capas de la roca y se observa la presión intersticial (hinchamiento). Elaboración propia.

Es común encontrar en la cuenca, tanto en laderas, piedemontes y cauces, rocas con profunda alteración hidrotermal que han afectado severamente la composición de las rocas, lo cual las hace susceptibles a la erosión fluvial y los procesos hidrotermales del entorno. La RBAMB tiene las condiciones óptimas para la degradación de este tipo de materiales, la

constante humedad y alta precipitación anual ha degradado las rocas, muchas de ellas afloran en secciones fluviales y han sido expuestas por erosión fluvial. Las rocas de la cuenca están profundamente meteorizadas químicamente, esto facilita la ocurrencia de deslizamientos, desprendimientos, erosión fluvial e incorporación de sedimentos.

2.2 Neotectonismo local y fallamiento de la cuenca del río San Lorencito

El río San Lorencito se encuentra en la vertiente noreste o vertiente de San Carlos de la Cordillera de Tilarán, la base de dicha vertiente está compuesta por un formidable relleno, formado por lahares y depósitos de pie de monte que construyeron abanicos aluviales coalescentes. Los ríos que recorren esta vertiente tienen una gran capacidad de transporte de material y son responsables del importante relleno del sector deprimido. Las crisis climáticas sufridas en el Cuaternario se reflejan sobre esta parte del territorio (Bergoeing, 2007; Solano-Rivera & Granados-Bolaños, 2017)

Entre los ríos Jaimical y San Lorenzo (el río San Lorencito se encuentra entre los cursos anteriores), se encuentran abanicos aluviales, probablemente deformados por la neotectónica cuyos valores de pendientes son superiores a los 20°. Están muy entallados por los ríos anteriormente citados (Vargas, 1978). Los abanicos aluviales disectados están formados por lavas torrenciales, cuya matriz está compuesta por arcillas rojas compactas que encierran bloques rodados y más o menos desgastados de tamaños diversos que van de 20 cm a 1 metro de diámetro. Las formas acumulativas fluviales de material rocoso tienen un patrón caótico e imbricado, además es esencialmente volcánico y muy alterado en superficie (Bergoeing, 2007; Solano-Rivera & Granados-Bolaños, 2017).

Las pendientes de esta unidad sólo pueden explicarse por la neotectónica. Por otro lado, los ríos corren paralelamente entre ellos (ver figura 16), siguiendo una dirección noreste. Como todos son afluentes del San Lorenzo, este río los recorta en ángulo recto, ya que su talweg se inscribe en una alineación de falla (Bergoeing, 2007; Solano-Rivera & Granados-Bolaños, 2017).

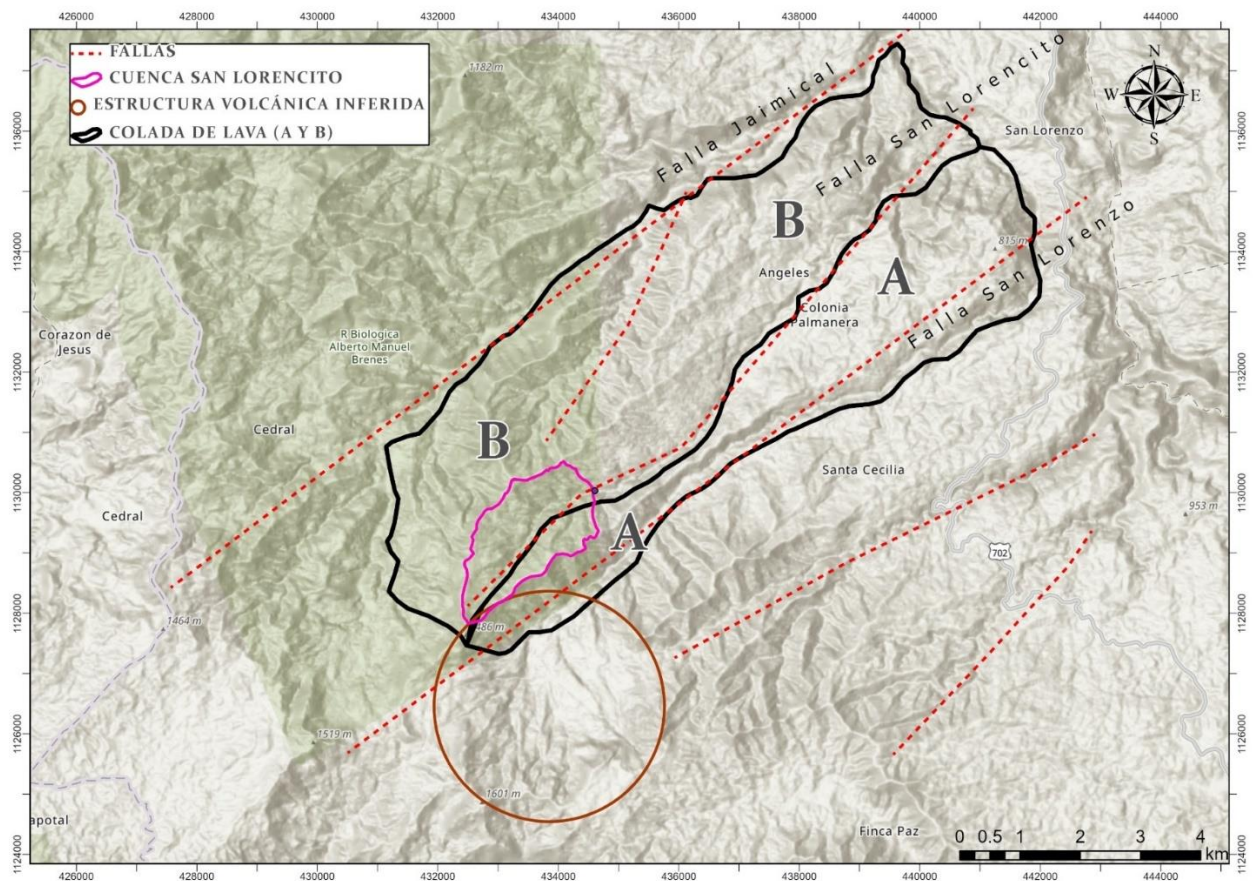


Figura 16. Contexto neotectónico local de la cuenca del río San Lorenzo, nótese las coladas de lava inferidas A y B y el control tectónico que ejercen las fallas sobre los sistemas de drenaje. Elaboración propia.

Solano y Granados (2017) mencionan que la geomorfología de la cuenca del río San Lorenzo es típica de un curso torrencial o un torrente de montaña. La orientación de dicho curso fluvial está controlada por una serie de fallas paralelas en donde su talweg se entalla en dicha fractura. En el lecho del río San Lorenzo es posible encontrar gran cantidad de aluviones volcánicos con variaciones de tamaño en un rango de 0.2 a 1 m. También es posible encontrar en áreas de fuertes pendientes lecho fijo compuesto principalmente de brecha y rocas basalto-andesíticas con un alto grado de alteración hidrotermal y diaclasamiento. En algunos sectores hay terrazas fluviales muy consolidadas con indicios de una incipiente pedogénesis y formaciones boscosas en su superficie. Dichas terrazas aluviales, están a los márgenes del río, están sujetas a constantes procesos de crecidas que erosionan o depositan

material en su superficie. Estas formaciones aluviales también tienen evidencia de contribución coluvial desde las laderas por procesos de remoción en masa.

Las laderas de la cuenca están compuestas por material volcánico diaclasado y con profunda meteorización química. Hay cicatrices de coronas de deslizamientos ya muy erosionadas que han dado lugar a microcuencas de tributarios que desembocan en el río San Lorencito. Dichos tributarios en la mayoría de los casos han formado abanicos aluviales en su área de confluencia con el río principal (Solano & Granados, 2017).

El río San Lorencito está controlado por una falla tectónica local. Bien es cierto que (Denyer et al., 2003) en el *Atlas tectónico de Costa Rica* solamente identifican la falla Jaimical, hay clara evidencia geomorfológica que sustentan la existencia de un sistema de fallas paralelas transcurrentes. Tal como lo menciona Bergoeing (2007), entre los ríos Jaimical y la parte baja del San Lorenzo, encontramos conos de deyección (abanicos aluviales), probablemente deformados por la neotectónica cuyos valores de pendientes no son superiores a los 20°. Están muy entallados por los ríos anteriormente citados (Vargas, 1978).

Entonces resumiendo, la cuenca del río San Lorencito está profundamente afectada por procesos endógenos (neotectonismo local) y procesos exógenos (meteorización). Esto se manifiesta en su geología con rocas volcánicas profundamente alteradas y una geomorfología caracterizada por fuertes pendientes, cicatrices de deslizamientos, afluentes incisivos entallados en las laderas y abanicos aluviales y depósitos coluviales-fluviales. Ya teniendo en cuenta las condiciones regionales de la cuenca podemos afinar la resolución de análisis tal y como lo propone esta investigación, con una óptica de alta resolución.

3. Resultados: Geomorfología fluvial de alta resolución RPAS del río San Lorencito

Entendido el contexto regional, ahora explicamos con alta resolución espacial la geomorfología fluvial del río San Lorencito.

Se obtuvo fotogrametría de alta resolución RPAS de 3 secciones del río San Lorencito (1,2 y 3). Estas secciones fueron analizadas geomorfológicamente para la identificación de formas aluviales y procesos morfodinámicos. La cartografía geomorfológica de las secciones se

elaboró con una escala de 1:750, 1:500 y 1:600 respectivamente (1,2,3). La información de cada vuelo fotogramétrico está tabulada en la tabla 1.

Sitio	Cantidad de imágenes	Altitud (m)	Áreas (ha)	Tiempo de vuelo (min)	Densidad de puntos (puntos/m ²)	Resolución ortomosaico (cm/px)	Resolución DSM/DTM (cm pixel)
1	37	70	2.5	04:44	162.83	2.64	10.6
2	8	120	2.1	02:31	91.87	3.34	13.4
3	26	100	1.8	03:59	291.61	2.03	8.1

Tabla 1. Parámetros de vuelo para la elaboración de la cartografía geomorfológica. La tabla muestra el respectivo sitio, cantidad de imágenes para procesamiento, altitud del vuelo, área levantada, densidad de la nube de puntos por área y la resolución píxel de los productos (ortomosaico, DSM y DTM). Elaboración propia.

Durante el periodo de estudio se realizaron varios vuelos experimentales en modo piloto automático y modo piloto manual para evaluar la eficacia del RPAS en este ambiente tan retador para despegues y aterrizajes de la aeronave. Más de 17 vuelos fotogramétricos fueron ejecutados combinando diferentes variables y parámetros de vuelo como la velocidad, traslape frontal-lateral, iluminación natural y condiciones del tiempo atmosférico. Los resultados de esta investigación muestran que despegar y aterrizar con la seguridad adecuada para el piloto y la aeronave puede ser retador en ambientes fluviales montañosos con cobertura boscosa. Se deben buscar sitios despejados, con claros de bosque que permitan el ascenso y descenso seguro de la aeronave. La distancia de la vegetación al punto de despegue y aterrizaje de la aeronave puede interferir con la cantidad de luminosidad que recibe la aeronave y por ende afectar los sensores de detección de obstáculos de la aeronave, estos sensores los utiliza para evadir obstáculos y evitar una colisión con un objeto estático (Barry et al., 2018). La recepción de satélites GNSS (Global Navigation Satellite System o Sistemas Globales de Navegación Satelital) también puede verse afectada por las condiciones boscosas, topografía y condiciones atmosféricas como la nubosidad (Peppia et al., 2019). A pesar de las dificultades logísticas para ejecutar los vuelos en condiciones óptimas para el procesamiento fotogramétrico. Se elaboró 3 mapas geomorfológicos fluviales de alta resolución que dan nuevas perspectivas científicas acerca del comportamiento y estructura de ríos tropicales en condiciones de montaña (ver figura 17).

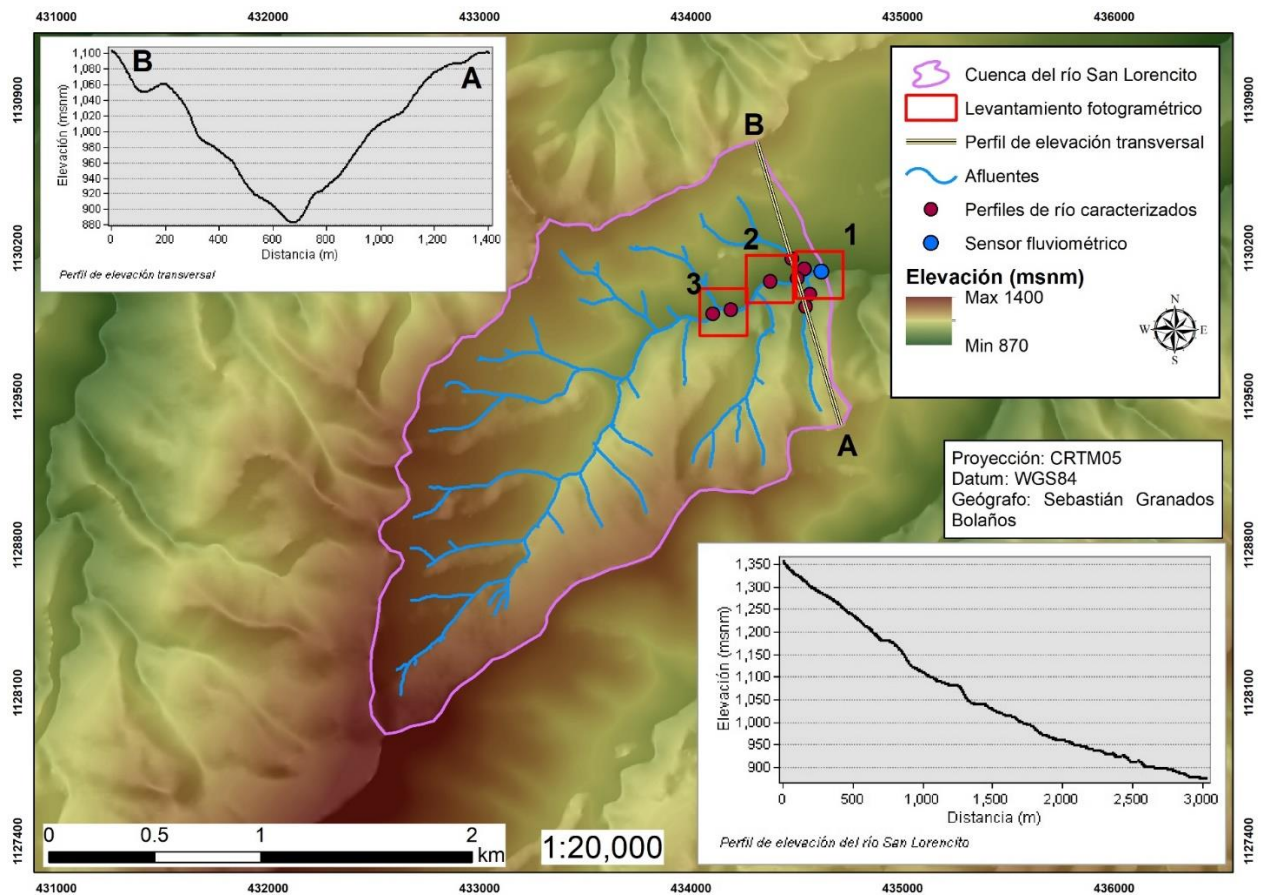


Figura 17. Levantamientos fotogramétricos para la cartografía geomorfológica y secciones transversales del río San Lorencito. La figura también muestra dos perfiles de elevación, uno del río principal y otro transversal que muestra la diferencia de pendientes entre ambas laderas. Las tres secciones sobrevoladas para fotogrametría están numeradas (1,2 y 3).

Elaboración propia.

Cada mapa geomorfológico tiene como objetivo mostrar la morfología, morfometría y organización del sistema fluvial. Cada figura tiene su propia simbología y diseño gráfico adaptado a las particularidades de cada sitio. Los mapas pretenden mostrar con detalle la geomorfología fluvial del río San Lorencito a través de la zonificación de formas aluviales.

Siete formas fluviales y coluviales predominan en el río San Lorencito.

- (1) Aluviones o depósitos aluviales: Depósitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundación de los valles (Lugo, 2011).



Figura 18. Depósitos de aluviones en el río San Lorencito. Elaboración propia.

- (2) Terrazas aluviales: Antiguas planicies de inundación que ha sido elevada con respecto al cauce de un valle fluvial, por movimientos tectónicos o por un descenso brusco del nivel base de erosión. Puede ser acumulativa, erosiva o mixta. En el primer caso el rellano consiste en aluvión y el lecho rocoso no aflora; en el segundo, el lecho rocoso subyace a una capa de aluvión, y con el tercero no hay aluvión o es escaso, encima del lecho rocoso (Lugo, 2011).



Figura 19. El profesor Guillermo Brenes Quesada (2015) sobre una sección de una terraza aluvial del río San Lorencito. Nótese la caótica distribución de los aluviones, heterométricos y heteromórficos. Elaboración propia.

- (3) Abanicos aluviales: Forma de acumulación con aspecto de medio cono recostado, inclinado, con el ápice hacia arriba. Su perfil longitudinal es cóncavo, mientras que el transversal es convexo. Se origina en la desembocadura de una corriente montañosa, en una superficie plana o de poca inclinación. El cambio brusco de pendiente provoca que la corriente deposite su carga hacia el frente, expandiéndose (Lugo, 2011).



Figura 20. Abanico aluvial de un tributario del río San Lorencito. Elaboración propia.

- (4) Islas fluviales: superficie no inundada en el cauce de un río, que ocurre durante crecidas extraordinarias. Su régimen es semejante al de la planicie alta de inundación. Se forma por una acumulación en el fondo que aumenta para rebasar el nivel del agua. Es característica de sistemas anastomosados y trenzados (Lugo, 2011).



Figura 21. Isla fluvial en el río San Lorencito. Elaboración propia.

- (5) Canales activos y abandonados: En caso de un canal activo, es la porción inferior de un valle fluvial ocupada por la corriente. Se caracteriza por la anchura, la profundidad y la superficie del agua, factores que varían de manera continua. Por otro lado, un canal abandonado es parte aislada de un río, generalmente en forma de arco, que se produce al cortarse el extremo de un meandro o canal activo; consiste en una hondonada seca. Se encuentran principalmente en las llanuras de inundación, algunas veces en la primera terraza, raras veces en otras más elevadas, ya que gradualmente se rellenan de sedimentos y enfangan como resultado de desplazamientos de la capa superficial de agua (Lugo, 2011).



Figura 22. Canal activo en el río San Lorencito. En el margen izquierdo se observa una sección de lecho fijo compuesta por brechas volcánicas, en el lado derecho un depósito aluvial. Elaboración propia.

- (6) Depósitos coluviales (remoción en masa): Se forman en las laderas por una acción conjunta de movimientos gravitacionales de los productos del intemperismo y lavado de los mismos. Son, sobre todo, gravas, limos con inclusiones de bloques de diferentes tamaños. Se encuentran ampliamente difundidos en las laderas de elevaciones montañosas de pendiente media, en regiones de clima húmedo (Lugo, 2011).



Figura 23. Depósito coluvial sobre aluviones en el río San Lorencito. Elaboración propia

- (7) Laderas denudacionales: Porción inclinada de la superficie terrestre que delimita formas positivas y negativas. En la forma de la ladera influye el estadio de desarrollo del relieve, la estructura de las capas, las condiciones climáticas, la vegetación, exposición de las laderas al sol y al viento dominante (Lugo, 2011).



Figura 24. Ladera denudacional y depósitos coluviales donde está asentada la estación de investigación RBAMB. Elaboración propia.

La primera sección aluvial analizada es posiblemente la más conocida por los visitantes de la RBAMB. Esta sección contiene la infraestructura principal de la reserva biológica, la estación de investigación y donde están colocados los señores hidrométricos utilizados para esta investigación. La figura 25 muestra una sección fluvial de aproximadamente 280m de distancia. El río tiene un drenaje semi-rectilíneo con escasa sinuosidad. El descenso altitudinal de la sección es de 16.1m en un recorrido de 280m resultado con una pendiente aproximada de 3.27° .

A lo largo de la sección hay descensos y subidas hidráulicas ocasionadas por la acumulación de aluviones que genera una serie de rápidos y remansos (steep-pool) (Figura 3.). Se contabilizaron al menos 27 caídas hidráulicas resultado en rápidos. La intercalación entre estas variaciones hidráulicas ocurre aproximadamente cada 6m-7m. La identificación de las caídas hidráulicas se puede identificar fácilmente con el DSM a través de las variaciones

altitudinales y el ortomosaico a través del oxígeno disuelto en el agua que genera una coloración blanca y turbulenta. En las zonas de más turbulencia se pueden encontrar los aluviones de mayor tamaño, la fotogrametría permitió establecer un promedio aproximado de diámetro de los aluviones entre 1m y 2m, con un máximo de 4.7m. Los aluviones están distribuidos caóticamente con una organización imbricada, heterogénea, heterométrica y heteromórfica. Los aluviones están compuestos principalmente de rocas angulares y subredondeadas basalto-andesíticas.

Al río principal confluyen dos tributarios al norte y al sur que forman dos abanicos aluviales con un área aproximadamente de 357m² y 125m² respectivamente. Estos abanicos aluviales están compuestos de aluviones basalto-andesíticos que provienen de las laderas de la cuenca, los mismos tienen una importante cantidad de vegetación. Los abanicos tienen poco desarrollo de suelos y más bien presentan arenas y sedimentos en su estrato edáfico superficial, a pesar del poco desarrollo de suelo se pueden encontrar árboles de más de 20 metros de altura.

Dentro del canal hay una isla fluvial ubicada al este de la sección fotogramétrica, esta isla tiene una morfología ovalada y un área aproximada de 184m². En esta isla fluvial se pueden encontrar árboles y vegetación en sucesión. Anteriormente Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2016) documentaron la desaparición de una de estas islas fluviales por una avenida aluvial. En la isla había árboles que por su ancho y altura se estimaron en más de 50 años de antigüedad. La isla fluvial genera una bifurcación del flujo hidráulico, generalmente favoreciendo con más caudal un lado de la isla más que el otro. Lo que genera acumulación y erosión diferencial en ambas secciones del río.

A lo largo del recorrido del río también hay terrazas aluviales con espesores que varían entre los 2m a 6m de profundidad. La morfología y espesores de estas terrazas es altamente variable y muestran depósitos imbricados que evidencian la dirección y comportamiento del flujo hidráulico. En las secciones distales del canal principal se pueden encontrar depósitos coluviales provenientes de la ladera. Estos depósitos están compuestos de material basalto-andesítico angulares, es común encontrar suelos con tamaños de partícula que varían desde los limos hasta las arenas (Solano-Rivera y Granados-Bolaños, 2017).

En la sección también se pueden encontrar zonas donde el río está socavando las terrazas aluviales generado un desgaste progresivo de las mismas y una constante incorporación de material al río por acción fluvial y gravitacional por la caída de rocas y desestabilización en su base. La figura 25 muestra claramente en su perfil de elevación una muestra 3 sutiles aumentos altitudinales que coinciden con los abanicos de los tributarios y la isla fluvial.

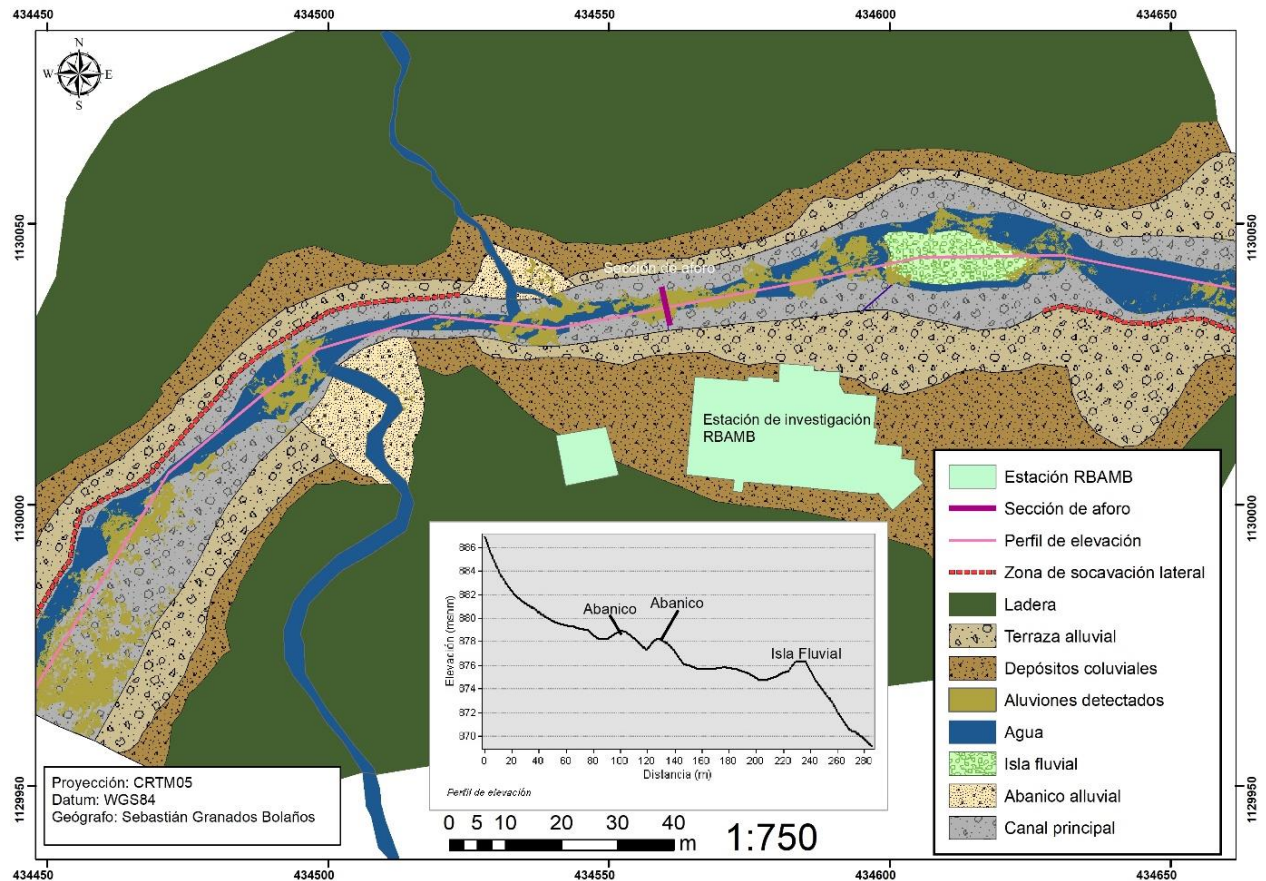


Figura 25. Levantamiento fotogramétrico 1 y geomorfología fluvial de alta resolución de la sección. El mapa muestra una sección semi-rectilínea poco sinuosa, turbulenta y con gran cantidad de aluviones organizados de una manera imbricada, heterogénea, heterométrica y heteromórfica. Elaboración propia.

Por otro lado, aguas arriba de la sección anterior, la segunda sección fotogramétrica levantada es considerablemente diferente a la anterior. La figura 26 muestra una sección fluvial semi-rectilínea considerablemente más sinuosa comparada a la sección anterior. Esta sección tuvo el inconveniente de tener más densidad de vegetación lo que dificultó el despegue y aterrizaje de la aeronave, por ello el área levantada es menor en comparación a

la primera, sin embargo, el análisis de los productos fotogramétricos mostró resultados interesantes.

La longitud analizada tiene una distancia aproximada de 183m con una variación altitudinal de 6m resultando en una pendiente de 1.87° . El ancho promedio del río varía entre los 6m y 7m con un máximo de 8.1m. Los aluviones al igual que la sección anterior mantienen las mismas características morfológicas, morfométricas y litológicas. Al norte de la sección fluvial hay un canal abandonado, canal antes del evento del 2015 fluía agua y pasaba la mayoría del caudal del río (Solano-Rivera et al, 2019). Luego de la avenida torrencial el canal quedó sepultado por aluviones provenientes del río principal y un tributario ubicado al norte de la sección fluvial. Dicho canal abandonado rodea parcialmente una isla fluvial semi ovalada de 571 m^2 . Tiene vegetación arbórea con alturas entre los 3m y 7m. La génesis de esta isla fluvial parece estar relacionada con el ingreso de aluviones provenientes desde el tributario.

Al Este de la isla fluvial hay una paleo terraza elevada (Figura 27). La terraza tiene un espesor 2.70m y está compuesto mayoritariamente de aluviones. Sobre los aluviones se puede encontrar una fina de capa de grava fluvial. Un hallazgo particularmente interesante es la presencia de una capa de ceniza gruesa (arena gruesa) de unos 30cm. Dicho hallazgo es particular porque el vulcanismo en la formación Monteverde está extinto desde el Pleistoceno, lo que podría significar que esta capa de ceniza pudo haber sido transportada eólicamente desde otro volcán como el volcán Arenal ya que la zona está permanentemente influenciada por los vientos alisios. Una datación radiométrica con algún método como C_{14} podría dar información interesante de la erupción que generó esa deposición de ceniza. Dicha datación también podría dar información de las condiciones fluviales en que ocurrió dicho evento.

Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017) no reportan perfiles fluviales con cenizas. Este perfil es el único que se ha encontrado con estas características, el perfil muestra evidencia de la evolución geomorfológica del río. Evidencia el intenso proceso de erosión fluvial en el lecho, el río ha ido profundizando de una manera incisiva el canal, dataciones de depósitos aluviales pueden dar información relevante acerca de la evolución geomorfológica de estos canales.

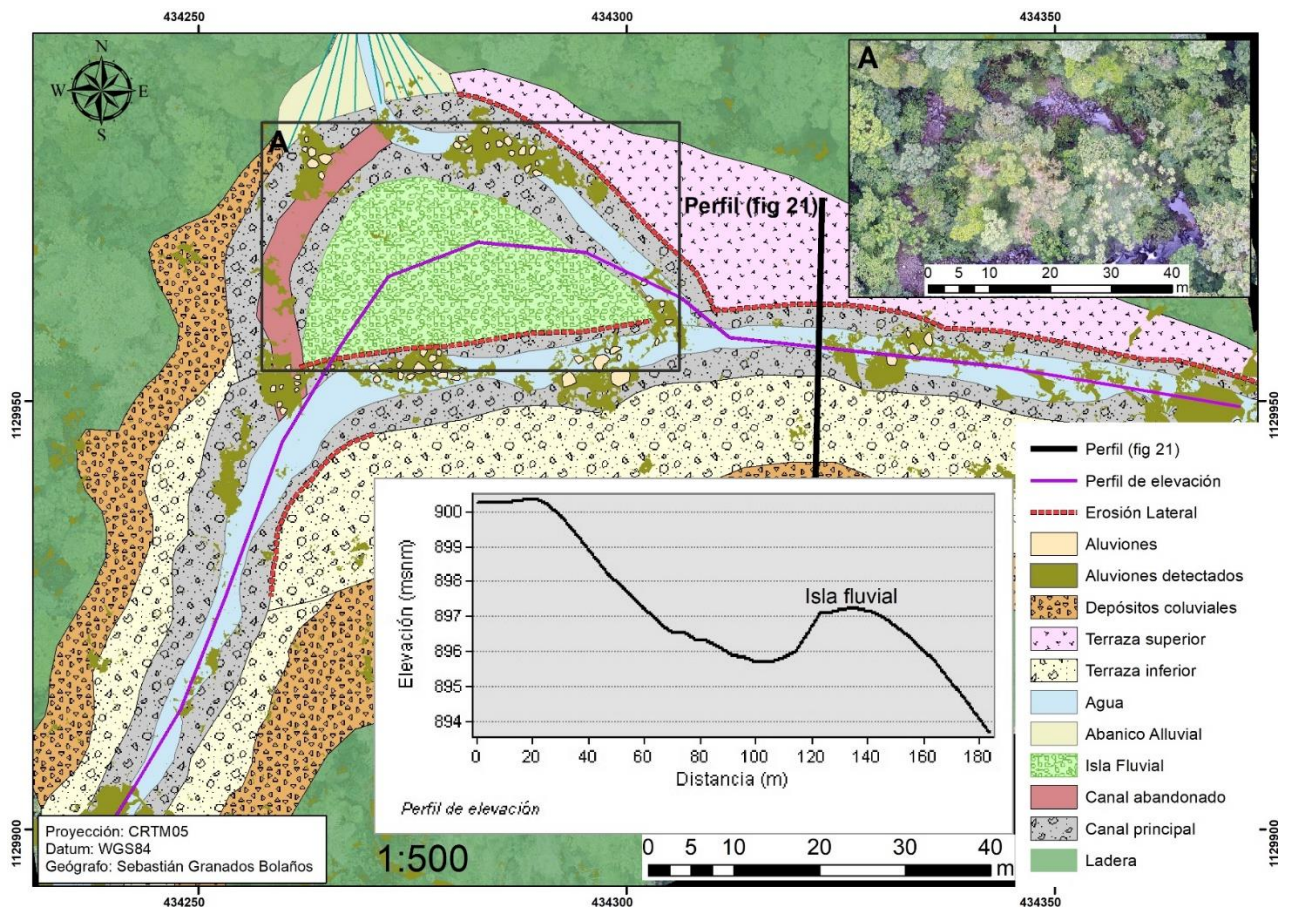


Figura 26. Levantamiento fotogramétrico 2 y geomorfología fluvial de alta resolución de la sección. El mapa muestra una sección semi-rectilínea poco sinuosa, turbulenta y con gran cantidad de aluviones organizados de una manera imbricada, heterogénea, heterométrica y heteromórfica. Adicionalmente en la sección hay una terraza aluvial elevada respecto a las del margen sur del río, dicha terraza está superpuesta sobre un afloramiento de brechas volcánicas profundamente alteradas hidrotermalmente. Elaboración propia.

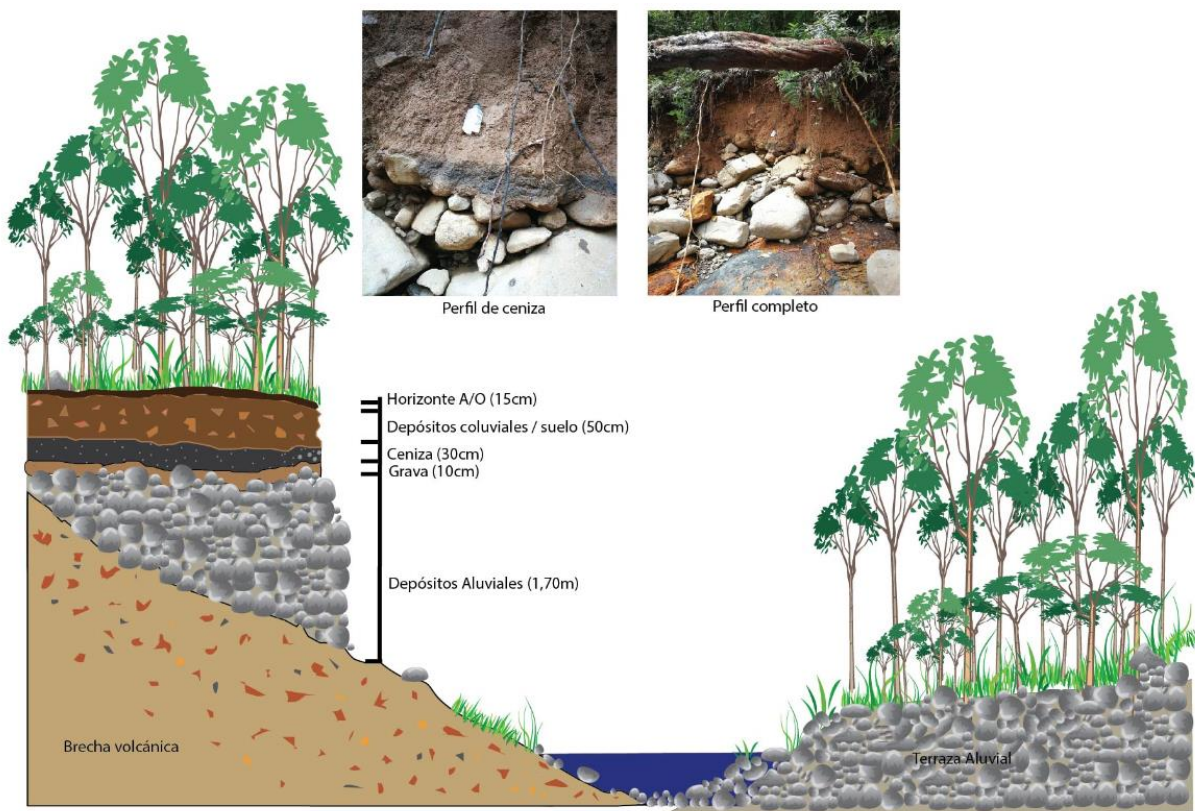


Figura 27. Terraza fluvial superior con un perfil de ceniza transportada eólicamente posiblemente proveniente de una erupción de algún volcán de la CCVC o Arenal, posiblemente del volcán Arenal. Elaboración propia.

La tercera y última sección fluvial (Figura 28) tiene una longitud aproximada de 214m con un descenso altitudinal de 18m, resultando en una pendiente media de 4.8° , resultando en la sección de más pendiente en esta investigación.

Esta sección se caracteriza por tener las terrazas aluviales más extensas con una sumatoria total de 4450 m^2 . Dos islas fluviales bifurcan el río en dos canales de similar geometría, la primera isla fluvial localizada al oeste del levantamiento tiene una morfología ovalada con un área de 212 m^2 . La vegetación de la isla fluvial está compuesta por arbustos y árboles con una altura máxima de 9m.

En las cercanías de la isla fluvial hay una importante acumulación de aluviones de gran tamaño con un máximo de 4.1m. Estos aluviones inusualmente más grandes fueron transportados por el último evento extremo ocurrido en noviembre de 2018 explicado más

adelante. Al Norte del levantamiento fotogramétrico hay otra isla fluvial con morfología ovalada, tiene un área de aproximadamente 355m^2 . La vegetación de la isla fluvial alcanza un máximo de 17 metros, siendo la isla fluvial con vegetación de más altura y densidad foliar. Esta isla fluvial parece tener un importante aporte de material proveniente del tributario localizado al norte del levantamiento fotogramétrico. Al Sur de la isla fluvial descrita anteriormente hay un tributario proveniente de la ladera, sin embargo, este flujo no presenta una importante acumulación de material en su piedemonte.

Entonces hay una diferencia importante entre formas deposicionales en los piedemontes de las laderas, al Norte encontramos un abanico de gran tamaño (518m^2) mientras que al Sur uno relativamente pequeño para el patrón observado en otras secciones fluviales (39m^2). En esta sección fluvial también podemos encontrar diferentes procesos de remoción en masa que han dado origen a desprendimientos y deslizamientos. Dada la densidad de la vegetación de esta sección, fue complejo identificar mediante el RPAS coronas de deslizamientos y desprendimientos, no obstante, al inspeccionar el sitio visualmente se pueden encontrar las evidencias de desprendimientos y movimiento de material proveniente de las laderas. Esta sección aparenta tener más inestabilidad de laderas respecto a los otros vuelos fotogramétricos, lo cual es lógico debido a que es una zona con pendientes más fuertes respecto a los otros sitios, esto podría ayudar a explicar la abundante disponibilidad de material aluvial y coluvial en el sitio, esto se discutirá más adelante.

El perfil de elevación en la figura 28 muestra con mucha claridad las acumulaciones de material en las islas fluviales. Estas islas actúan como obstáculos que bifurcan el flujo hidráulico. Al igual que las demás secciones levantadas el río tiene un drenaje semi-rectilíneo con gran cantidad de caídas hidráulicas. Esta sección presentó particularmente la mayor cantidad de rápidos y remansos, superando 55 contabilizaciones. Debido a la densidad de la vegetación hubo limitantes en observar con detalle las condiciones de la turbulencia en el río. En términos generales esta sección presenta más pendiente, más acumulación de material, significando en terrazas más extensas y más espesor en depósitos coluviales y aluviales.

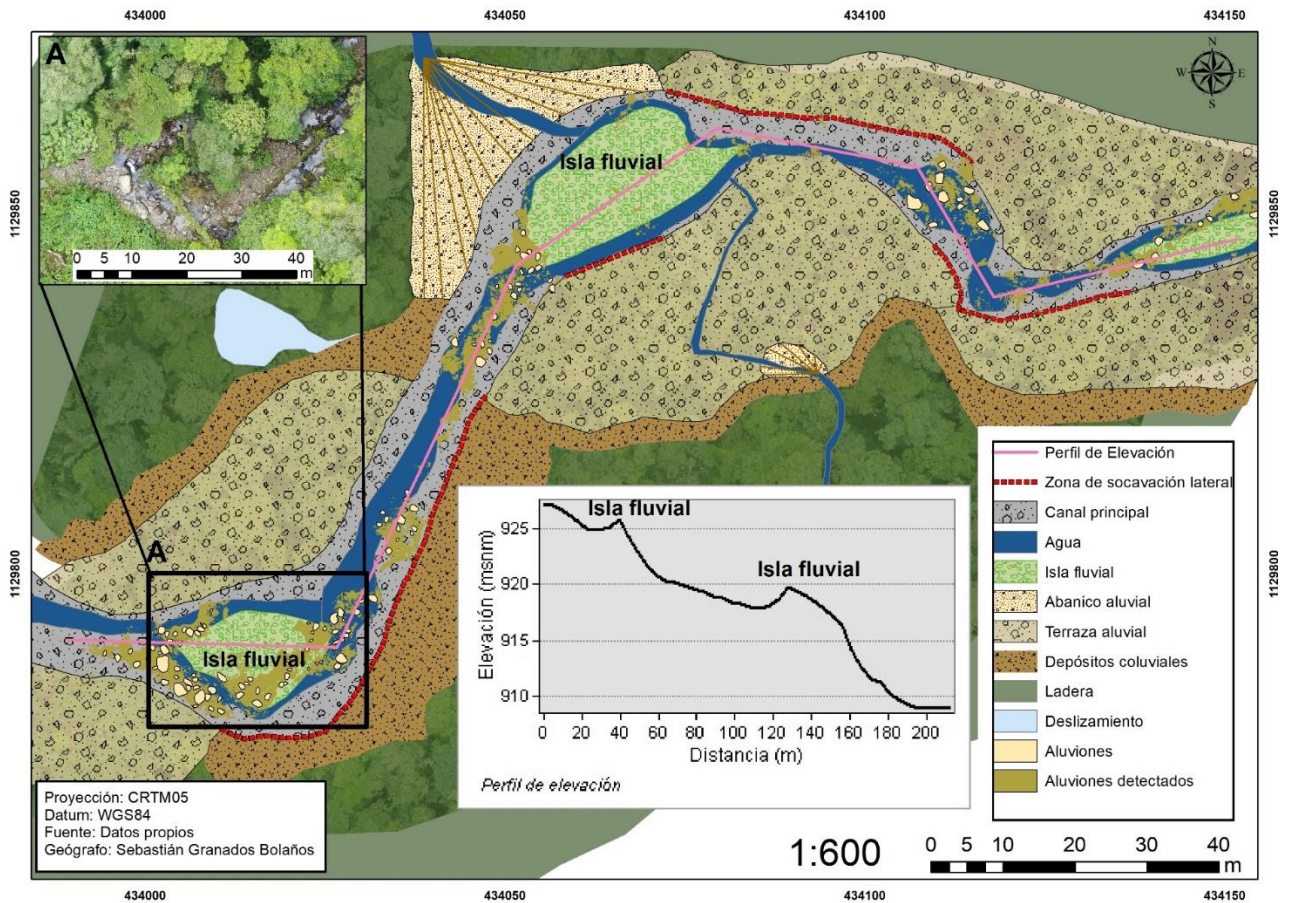


Figura 28. Levantamiento fotogramétrico 3 y geomorfología fluvial de la sección. La sección presenta abundante acumulación de material aluvial y coluvial, además de tener las pendientes más fuertes de las secciones levantadas. Elaboración propia.

3.1 Fotogrametría y geomorfología sumergida

En esta investigación se desarrolló un método para generar fotogrametría del lecho del río y analizar las características del lecho (Figura 29). En primer lugar, esto se hizo para detectar cambios en el lecho (cambios sumergidos) que el RPAS no puede ver, ya que el mismo por su sensor (cámara digital) no es capaz de generar puntos debajo del agua, la detección de cambios se discutirá más adelante.

En este apartado discutiremos la geomorfología de una sección del lecho mediante la fotogrametría sumergida. Para la toma de imágenes debajo del agua se utilizó una cámara GoPro4 Silver, una cámara a prueba de agua frecuentemente utilizada por deportistas y buzos. Esta cámara tiene capacidad de tomar fotografías en 4k debajo del agua.

A través de un sistema de coordenadas locales se ubicaron las fotografías en cada parte de la sección transversal del río. Posteriormente con puntos GPS de alta precisión se procedió a georreferenciar las fotografías y sobreponerlas sobre la fotogrametría aérea. La figura 29 muestra la fotogrametría aérea y sumergida de la sección de aforo utilizada para esta investigación.

Dicha sección fue monitoreada de manera aérea y sumergida durante el periodo de estudio. Los cambios en el lecho fluvial a través del tiempo se discuten más adelante.

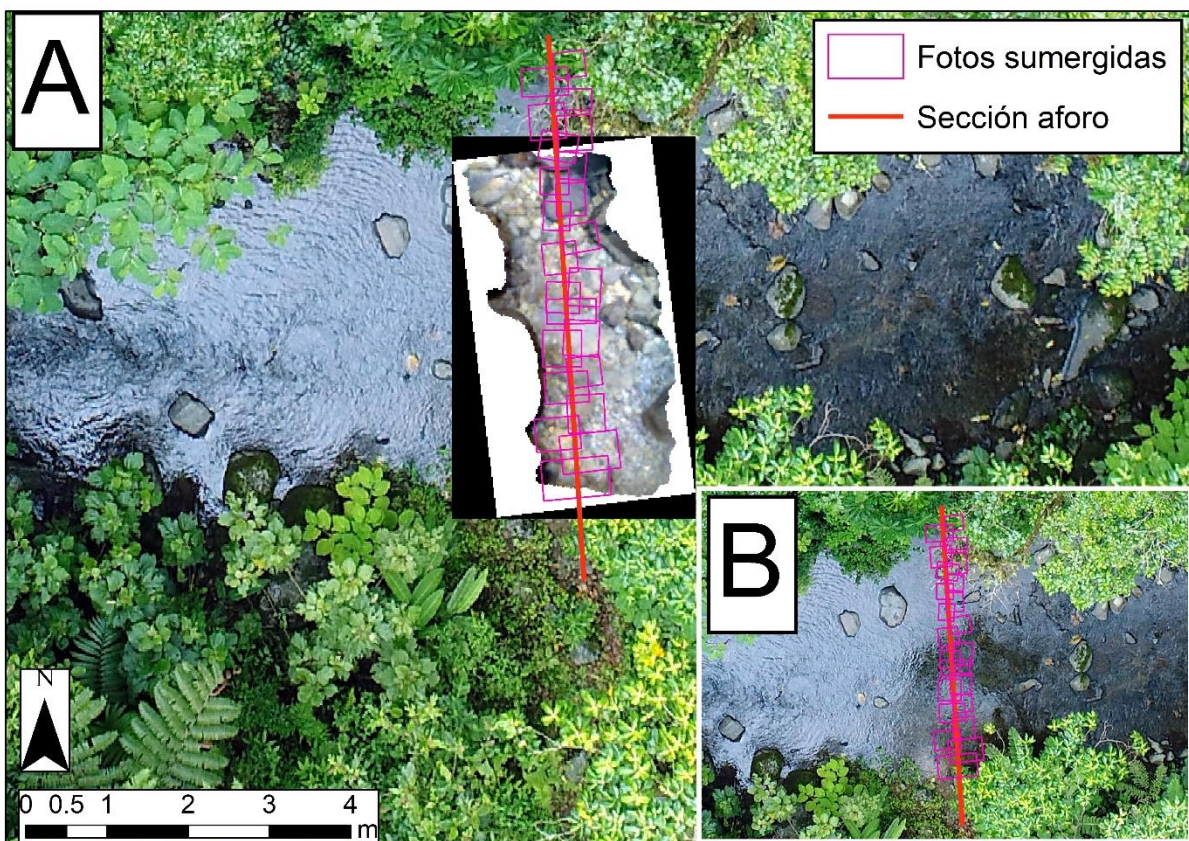


Figura 29. Sección fluvial levantada con fotogrametría sumergida. (A) Sección de aforo y ortomosaico fotogramétrico del lecho del río. (B) Fotografía aérea de la sección de aforo y las fotografías tomadas. Elaboración propia.

La figura 29 muestra la sección de aforo y una ubicación aproximada de las fotografías tomadas con la cámara sumergible, para la sección presentada en este apartado se utilizaron 27 fotografías tomadas cada 20cm en el río. Las fotografías al igual que en la fotogrametría aérea fueron tomadas con un traslape frontal y lateral de al menos 40%. Las fotografías luego de ser georreferenciadas localmente fueron procesadas en Agisoft Photoscan, al igual que la fotogrametría aérea.



Figura 30. Ortomosaico fotogramétrico de una sección del lecho del río San Lorencito. A partir de 27 imágenes digitales sumergidas se logró elaborar un ortomosaico fotogramétrico

sumergido. La técnica requirió varios ensayos a lo largo del periodo de observación para lograr un producto aceptable del fondo del río. Elaboración propia.

A partir de las fotografías sumergidas es posible elaborar modelos 3D del lecho. Para ello se debe hacer una malla de polígonos triangular (mesh) texturizada con los píxeles RGB derivados de las fotografías. La elaboración de la malla de polígonos triangular es calculada a partir de la nube de puntos densificada. Los píxeles de colores RGB se derivan del ortomosaico fotogramétrico. Al combinar ambos productos se obtiene un modelo 3D del fondo, el mismo permite observar la organización de los aluviones en el fondo y dependiendo de la resolución de las imágenes (pueden ser afectadas por la turbulencia, turbidez, profundidad etc.) se pueden observar características detalladas en las rocas como, morfología, morfometría, grado de meteorización, organización, etc.

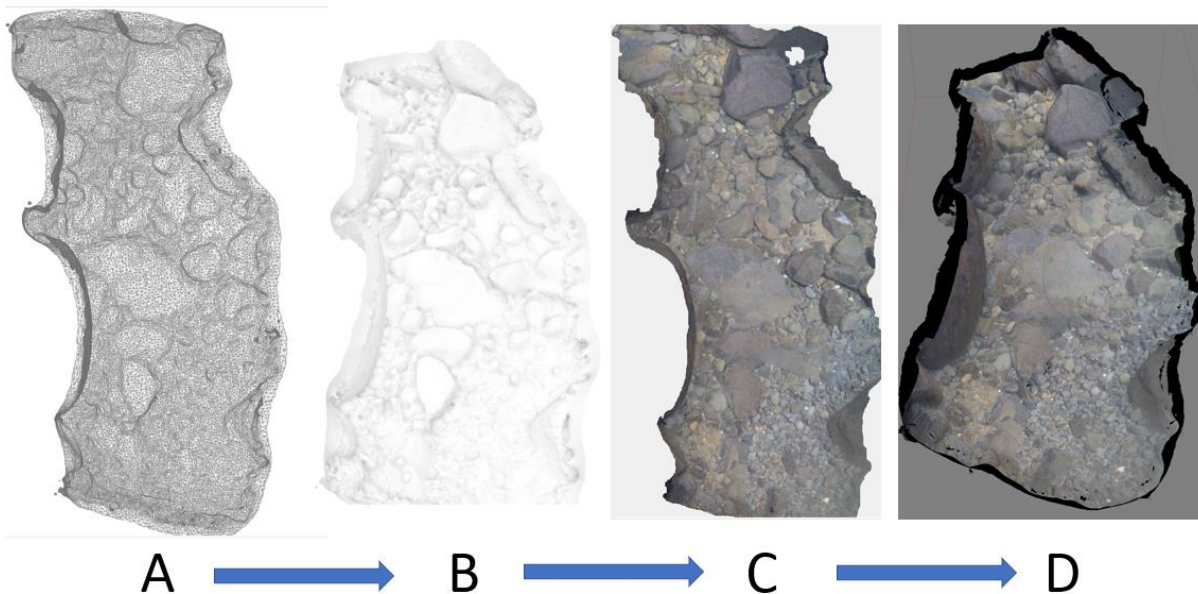


Figura 31. Secuencia para elaborar un modelo 3D de una sección fluvial sumergida. (A) Malla de polígonos triangular. (B) Modelo de sombras derivado de la malla de polígonos. (C) Ortomosaico fotogramétrico. (D) Modelo 3D texturizado. Elaboración propia.

El modelamiento 3D del lecho permitió observar con gran detalle la geomorfología a una escala micro del lecho fluvial. La figura 32 muestra detalles importantes del lecho fluvial para el momento que fue captado, evidentemente los lechos fluviales son formas geomorfológicas altamente dinámicas, más en estas condiciones. La fotogrametría permitió ver distribución de

tamaños de partículas, impactos recientes en los aluviones, la organización de del material, grados de meteorización y morfometría detallada.

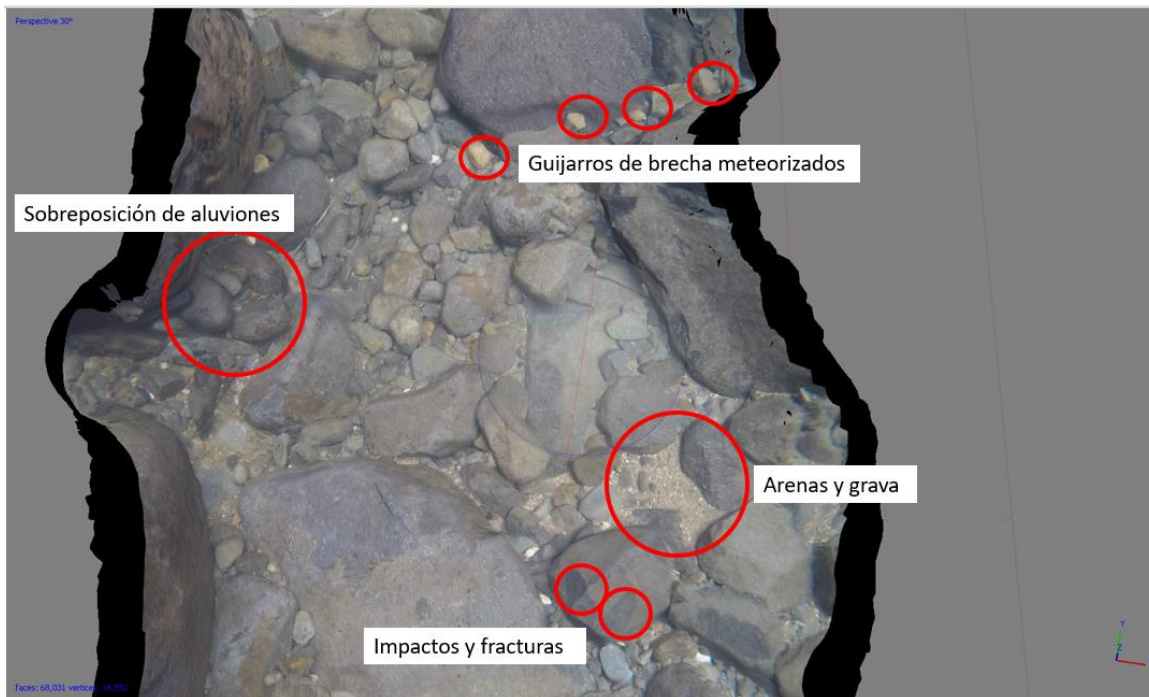


Figura 32. Modelo 3D de una sección fluvial sumergida del río San Lorencito. La figura muestra detalles acerca de la composición del lecho fluvial. Al Norte una serie de guijarros con la misma composición litológica (una brecha muy meteorizada). Al Este un aluvión de gran tamaño sobrepuesto y (1m diámetro) fijando aluviones de menor tamaño (0.10-0.30) subyacentes. Al Sur arenas y gravas y un aluvión con evidencia de impacto reciente que fragmentó el mismo. Elaboración propia.



Figura 33. Utilidad del modelo 3D sumergido para la identificación de tamaños de partículas. La figura muestra dos depósitos con partículas de diferente tamaño. Elaboración propia.

3.2 Interpretaciones geomorfológicas

Dependiendo de la escala de análisis podemos definir la morfología del drenaje en (A) rectilíneo si usáramos una escala por ejemplo de 1:50000 o 1:25000 (meso), y (B) un drenaje trezado si afinamos la escala a 1:500 o 1:1000 (micro) (Montgomery y Buffington, 1997). En esta investigación abordamos los procesos fluviales desde una escala micro, detallando lo más posible las características morfométricas y morfológicas de las formas aluviales y analizando con alta resolución la temporalidad de los fenómenos hidroclimáticos. Teniendo claro que la geomorfología se analizó con una lupa de alta resolución, surgen algunas temáticas de discusión que son potencialmente investigaciones futuras, no sólo en esta cuenca, sino en la geomorfología fluvial tropical en general, sobre todo bajo estas condiciones de un vulcanismo ya extinto y degradado, cubierto por denso bosque primario.

3.3 La relación de las islas fluviales y tributarios provenientes de la ladera

Las islas fluviales son acumulaciones de aluviones rodeadas por el canal activo del río, total o parcialmente, tienen cierta estabilidad y pueden tener incluso decenas o cientos de años

desde su génesis (Osterkamp, 1998; Wittenberg et al., 2015). Según Wyrick (2005) las islas fluviales pueden ser formadas por diferentes procesos fluviales.

La avulsión es el proceso por el cual un río cambia de posición en la llanura de inundación, por la acumulación de sedimentos en una zona y la remoción en otra, durante una crecida. Otro proceso puede estar relacionado con la erosión lateral de canales de causa una migración progresiva del flujo hidráulico cambiando la distribución de la energía.

Otra causa puede estar relacionada con avenidas torrenciales extremas que transportan importante cantidad de material durante un tiempo prolongado, al disminuir la competencia del río para mover el material, el mismo queda dispuesto en el canal forzando el flujo a tomar otra dirección al no poder moverlo. La remoción en masa también puede formar islas fluviales, la incorporación de material producto de un deslizamiento o desprendimiento puede quedar dispuesto en el canal, forzando el flujo a migrar lateralmente.

En sí, hay múltiples razones que explican la génesis de las islas fluviales, en este caso del río San Lorencito, la mayoría de las islas fluviales se encuentran en las partes distales de los abanicos aluviales formados por los tributarios que descienden de las laderas. Hay una clara relación espacial respecto a la localización de los abanicos aluviales y las islas fluviales. Estos tributarios al ser canales de fuertes pendientes ($>15^\circ$) tienen condiciones ideales para mover material rápidamente en crecidas, sumado a la inestabilidad de pendientes que tiene la cuenca, son ríos que transportan constantemente material aluvial.

De aquí surge la interrogante sí (1) ¿Estas islas fluviales están compuestas por material provenientes de la ladera y tiene una relación con abanicos aluviales cercanos?, (2) ¿Las islas se forman por material transportado aguas arriba durante crecidas? O, (3) ¿Una combinación de procesos? Bien es cierto los resultados de investigación muestran una relación espacial entre los tributarios y las islas fluviales, sin embargo, hace falta más investigación en cómo se forman estas acumulaciones que perturban el flujo hidráulico, causando migraciones laterales del canal.

Respecto a la estabilidad de estas islas, también es un dilema, algunas de ellas pueden desaparecer en cuestión de horas por avenidas torrenciales y otras pueden surgir luego del evento, Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2018). Algunas de esas islas tenían árboles de

más de 30 metros de altura antes del evento de 2015, funcionarios de la RBAMB estimaron que algunos de ellos pudieron haber tenido más de 80 años de vida, lo cual da un importante dato respecto a la estabilidad de estas.

Con dendrocronología se podría ampliar el entendimiento respecto a la relación vegetación-crecidas en estas formas deposicionales (Quesada-Román et al., 2020). Hay una clara relación ecológica-geomorfológica entre la vegetación y estas islas. Las raíces de los árboles se entrelazan con los aluviales “abrazando” las rocas y generando una especie de entrelazado que fortalece la isla fluvial contra la erosión fluvial. Durante los eventos de 2015 y 2018 la caída de árboles en terrazas e islas dejaron al descubierto como algunos de estos árboles sujetan con bastante consistencia los aluviales, modificando la morfología del sistema radicular y adaptándose a los espacios que hay entre las rocas (Figura 34).

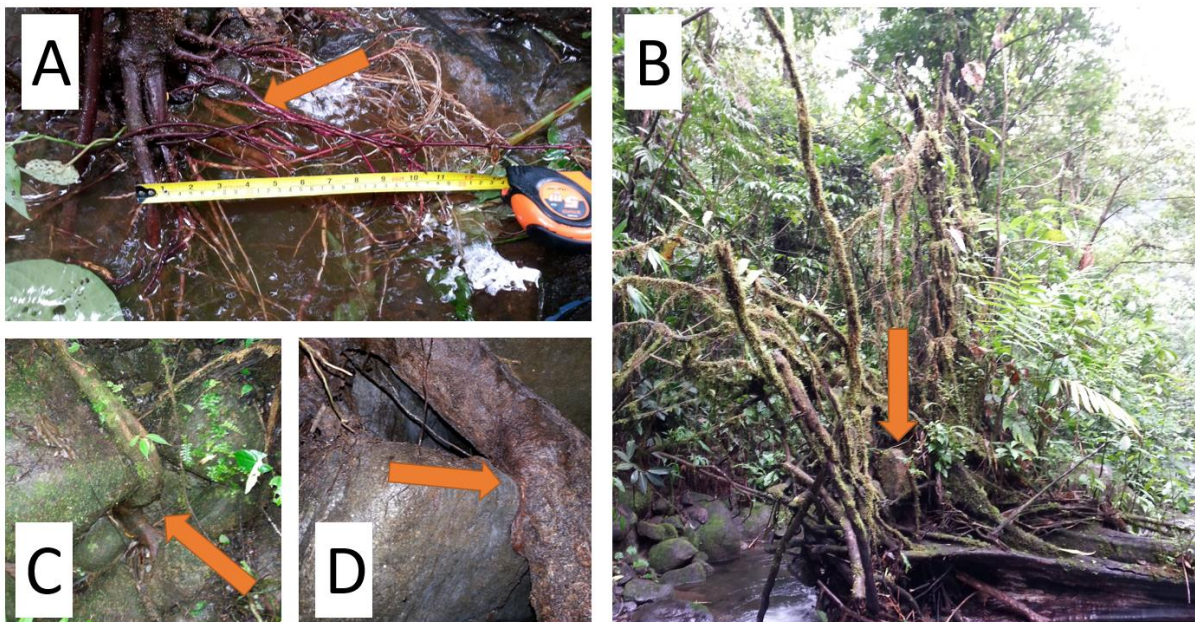


Figura 34. Raíces entrelazando aluviones en islas fluviales del río San Lorencito. (A) Sistema radicular de un árbol joven empezando a desarrollarse entre las rocas. (B) Árbol caído posterior al evento del 2015 con aluviones firmemente entrelazados con las raíces. (C) Adaptación de las raíces a los aluviones. (D) Las raíces se adaptan a la morfología de las rocas. Elaboración propia.

3.4 Las terrazas aluviales del río San Lorencito y la evolución geomorfológica del río.

El río San Lorencito es un torrente de montaña, es un río de fuertes pendientes, turbulento y con lecho móvil en la mayor parte de su trayecto. El modelado de los lechos es el resultado de la interacción de un conjunto de procesos morfogenéticos y un material sobre el que actúan. Si el agua del río circula sobre afloramientos de rocas fuertemente cohesionadas (lecho fijo) su capacidad erosiva y de transporte se verá limitada y la evolución geomorfológica se hará más lenta, por el contrario, si el agua fluye sobre depósitos sueltos (lecho móvil) las acciones erosivas, de transporte y acumulación serán mayores en comparación a las secciones le lecho fijo (Muñoz-Jiménez, 1992).

En el caso del río San Lorencito la reorganización de la geometría del canal y la disposición del material aluvial varía y cambia drásticamente con la ocurrencia de avenidas torrenciales como las ocurridas en 2015 y 2018. La geomorfología fluvial del río San Lorencito puede variar drásticamente de un periodo lluvioso a otro, tal como se explica más adelante en esta investigación, los cambios geomorfológicos en el río San Lorencito se explican por crecidas súbitas que modifican el canal en cuestión de horas. La combinación de factores endógenos como el neotectonismo local y la profunda y fuerte meteorización química y física de la cuenca en combinación con una climatología muy lluviosa afectada tanto por sistemas permanentes de entrada de humedad del caribe y afectado estacionalmente por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) proveniente del pacífico da las condiciones perfectas para que una cuenca tan pequeña (3.2 km²) pueda sufrir cambios tan drásticos en cuestión de horas y movilizar importante cantidad de material.

Si bien aún no llegamos a discutir los cambios en el río, debemos partir desde este capítulo que la geomorfología del río San Lorencito se explica por eventos extremos que afectan no sólo el área fluvial sino también las laderas

3.5 Combinando fotogrametría aérea y sumergida para un mejor entendimiento de ríos

El uso de técnicas fotogramétricas para analizar ambientes fluviales resultó particularmente útil en este ambiente, las fotografías aéreas e imágenes satelitales no permitirían obtener tal detalle del río. A partir de los resultados anteriores, la fotogrametría RPAS y sumergida, la combinación de ambos productos propone un nuevo método de bajo costo, rápido de aplicar

y procesar, preciso y confiable para monitorear ríos de montaña con condiciones de agua poco turbias (la turbidez es una limitante de la fotogrametría sumergida). Sí bien el objetivo de esta investigación no era específicamente desarrollar un método para las partes sumergidas, resultó ser un hallazgo interesante para la geomorfología fluvial y de paso muy poco explorado y prácticamente nulo en la región (Latrubesse et al., 2005).

Ya dejando claro las condiciones geomorfológicas del río San Lorencito procederemos analizar en el capítulo 2 los procesos hidroclimáticos que ocurren sobre esta geomorfología particular, para luego en combinación con los resultados de ambos capítulos (1 y 2) profundizar en los cambios que ocurrieron a lo largo del tiempo en el río.

4. Resultados: Las variaciones en la velocidad del agua y la ocurrencia de crecidas del río por eventos de precipitación en el San Lorencito

En este capítulo se analiza detalladamente los datos hidroclimáticos recolectados durante el periodo de estudio. Se enfatizará como los eventos de precipitación causan crecidas en caudal y consecuentemente en la velocidad del agua que afecta la competencia del río para transportar material de distintos tamaños de partículas.

4.1 Caracterización estadística del periodo de estudio

El periodo de estudio corresponde a la época lluviosa del año 2017 y un evento extremo ocurrido en octubre de 2018. Durante la época lluviosa del 2017 ocurrieron 23 eventos de precipitación que causaron un aumento en la velocidad del río. El evento número 24 corresponde al evento extremo que marca el fin de la toma de observaciones fotogramétricas en el río. Para todos los eventos se calculó lo siguiente:

- Humedad antecedente: Tiempo seco previo -Tseco (h), Humedad antecedente 3 días -HumAnte3d (mm), Humedad antecedente 7 días – HumAnte7d (mm);
- Precipitación: Magnitud -M (mm), Duración -D (h), Intensidad Máxima -Imax (mm/h), Valor máximo (mm/0.5h) Val_Max

- Velocidad del flujo: Velocidad inicial $-V_i$ (m/s), Velocidad mínima $-V_{min}$ (m/s), Velocidad Máxima $-V_{max}$ (m/s), crecimiento máximo-creMax (m/s), Tiempo desde el inicio hasta el pico máximo T_{rise} (h), Tiempo desde el pico hasta el final $-T_{fmax}$ (h), Tiempo entre los picos de Precipitación y Velocidad del flujo $-P_Vlag$ (h)
- Umbrales de transporte de material según la curva de Hjulström : Tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de arenas $-TP_Tarena(h)$, Tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de grava y guijarros $-TP_Tgrava_gui(h)$, Tiempo de inicio de precipitación del inicio de transporte de bloques $TP_Tbloq(h)$, Duración total de transporte de arenas y grava TT_Tarena (h), Duración total de transporte de grava_guijarros $TT_Tgrava_gui(h)$, Duración total de transporte de bloques $TT_Tbloq(h)$, Partícula de mayor tamaño transportada según la curva de Hjulström $TamMayor_partEst$ (mm).

La siguiente tabla muestra datos de la humedad antecedente, precipitación y velocidad de los eventos:

Fecha	Evento	Humedad Antecedente		Precipitación			Velocidad		
		Tseco(h)	HumAnte3d(mm)	M(mm)	Inten_max(mm/0.5h)	D(h)	Vmin(m/s)	Vmax(m/s)	P_Vlag(h)
8/14/2017	OBS 1	Observación fotogramétrica 1							
8/14/2017	1	8.50	28.6	50.8	23.37	3	0.66	3.46	0.5
8/18/2017	2	24.50	61.3	21.33	6.1	6.5	0.24	0.46	6
8/20/2017	3	2.00	30.7	21.34	9.65	4	0.24	1.78	1
8/23/2017	4	11.00	35.27	26.41	19.05	2	0.25	1.17	1.5
8/25/2017	OBS 2	Observación fotogramétrica 2							
8/25/2017	5	3.00	40.08	35.81	13.72	4.5	0.22	0.61	2.5
8/27/2017	6	2.50	13.72	38.1	25.91	3.5	0.22	1.36	0
8/28/2017	7	13.00	78.48	19.81	12.7	5	0.29	0.47	1.5
8/30/2017	8	17.50	61.9	40.39	21.34	4	0.32	1.16	3.5
8/31/2017	9	6.00	51.79	23.6	14.22	3	0.29	0.80	0.5
9/3/2017	10	3.00	52.28	42.41	14.73	4.5	0.76	1.54	6.5
9/14/2017	11	14.50	4.6	53.35	34.29	4.5	0.13	1.90	0
9/21/2017	OBS 3	Observación fotogramétrica 3							
9/21/2017	12	10.00	44.44	32.77	20.83	4.5	0.77	0.96	0
9/22/2017	13	3.00	72.38	42.66	11.94	7	0.19	1.08	12
9/23/2017	14	14.00	100.57	16.25	12.19	2	0.48	0.83	1
9/27/2017	15	17.00	49.76	22.1	12.19	4	0.34	0.63	1
9/30/2017	OBS 4	Observación fotogramétrica 4							
10/4/2017	16	1.00	52.26	97.51	6.35	38	0.24	1.49	17.5
10/13/2017	17	67.00	7.37	35.57	15.49	2.5	0.21	1.02	3.5
10/20/2017	18	36.50	2.01	75.93	24.13	9	0.71	0.93	2
10/22/2017	OBS 5	Observación fotogramétrica 5							
10/27/2017	19	2.00	5.33	37.08	13.72	5.5	0.31	1.33	2.5
11/3/2017	20	0.50	27.07	15.2	4.06	8	0.30	1.01	7.5
11/4/2017	21	2.50	27.07	11.15	4.57	6	0.52	0.82	1.5
11/5/2017	22	2.50	36.45	30.98	10.92	7	0.37	1.16	2.5
11/22/2017	23	10.00	17.95	24.63	11.68	3.5	0.13	0.89	0.5
10/26/2018	24	10.00	17.95	173.19	43.43	13	0.20	12.97	3
11/5/2018	OBS 6	Observación fotogramétrica 6							

Tabla 2. Datos de humedad antecedente, precipitación y velocidad de los eventos. Se ejecutaron 6 observaciones fotogramétricas de la sección observada durante del periodo de estudio. El evento extremo de 2018 está marcado en rojo. Elaboración propia.

La siguiente tabla muestra el promedio, desviación estándar, máximo, mínimo y la sumatoria de datos de las variables anteriores.

Variable	Humedad Antecedente		Precipitación			Velocidad		
	Tseco(h)	HumAnte3d(mm)	M(mm)	Inten_max(mm/0.5h)	D(h)	Vmin(m/s)	Vmax(m/s)	P_Vlag(h)
Promedio	11.73	38.31	41.18	16.11	6.42	0.35	1.66	3.25
Desv.Estandar	14.56	25.39	34.21	9.30	7.15	0.19	2.49	4.16
Max	67.00	100.57	173.19	43.43	38.00	0.77	12.97	17.50
Min	0.50	2.01	11.15	4.06	2.00	0.13	0.46	0.00
Suma	281.50	--	988.37	--	154.00	--	--	--

Tabla 3. Promedio, desviación estándar, máximo, mínimo y la sumatoria de la humedad antecedente, precipitación y velocidad del agua. Elaboración propia.

En total durante el periodo de estudio hubo una precipitación de 988mm incluyendo la del evento extremo, sin dicho evento la precipitación durante el año 2017 fue de 815mm. Los datos de precipitación muestran un año muy seco en comparación a otros años donde el promedio de precipitación anual ha rondado los 3000-4000mm. La velocidad máxima promedio de las crecidas registradas fue de 12.97 m/s incluyendo el evento extremo, sin dicho evento resulta en 3.46 m/s. Vale destacar que el evento extremo tuvo una velocidad máxima estimada de 12.97 m/s y fue precisamente este evento donde ocurrieron los cambios más notables en la geomorfología fluvial del río. A partir de los datos mostrados en las tablas 2 y 3 se calcularon los umbrales de transporte del material aluvial. Esto se hizo programando una ecuación y calibrando un instrumento que permita relacionar de manera matemática la curva del Hjulström con los datos registrados. En términos generales la curva de Hjulström es una regresión lineal que relaciona los procesos de erosión, transporte y deposición de un determinado tamaño de partícula en función de la velocidad del agua. La figura 35 muestra la curva de iniciación de transporte del tamaño de partículas.

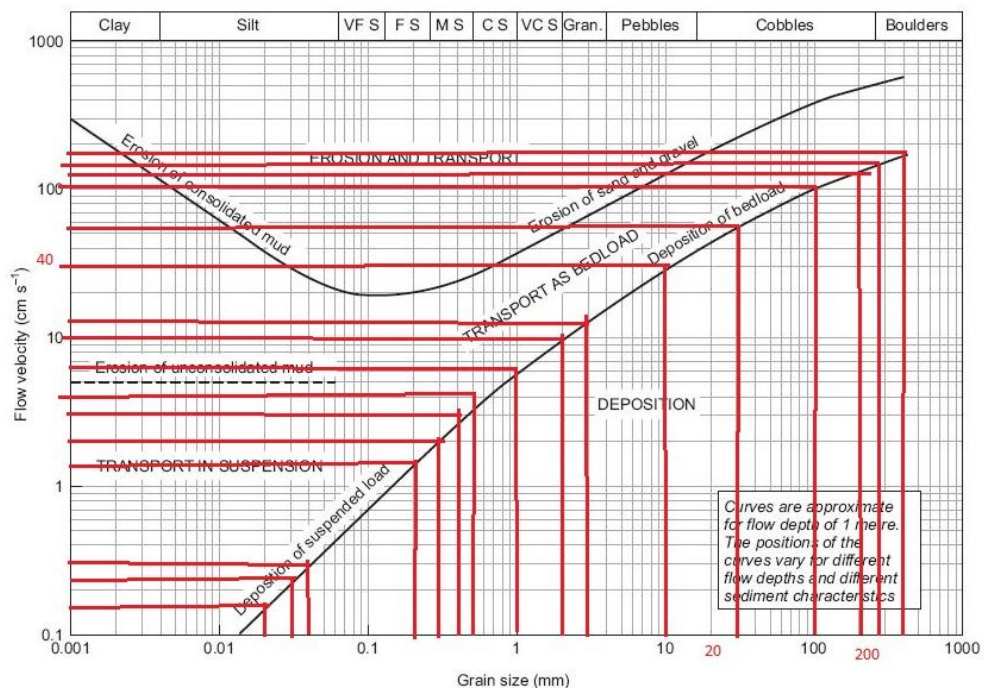


Figura 35. Iniciación del transporte de las partículas en función de la velocidad del agua, las líneas rojas fueron colocadas para ilustrar cuando un tamaño de partícula (grain size) inicia su transporte, por ejemplo, un tamaño de partícula de 1mm inicia su movimiento alrededor de una velocidad de los 10-20 centímetros/segundo lo que equivale a 0.1-0.2

metros/segundo. Es importante recordar que la curva de Hjulström fue diseñada con unidades de centímetros, para esta investigación fue adaptada a metros/segundo. Adaptado de Hjulström (1935).

Entonces, si usamos las líneas rojas de la figura 35, podemos ver que empieza a resultar en una relación lineal entre los tamaños de las partículas transportadas y la velocidad del agua. Calibrando los datos de la curva de Hjulström en una ecuación resulta en la siguiente tendencia para definir hipotéticamente el tamaño partícula transportado durante un cierto momento de las crecidas del río San Lorencito.

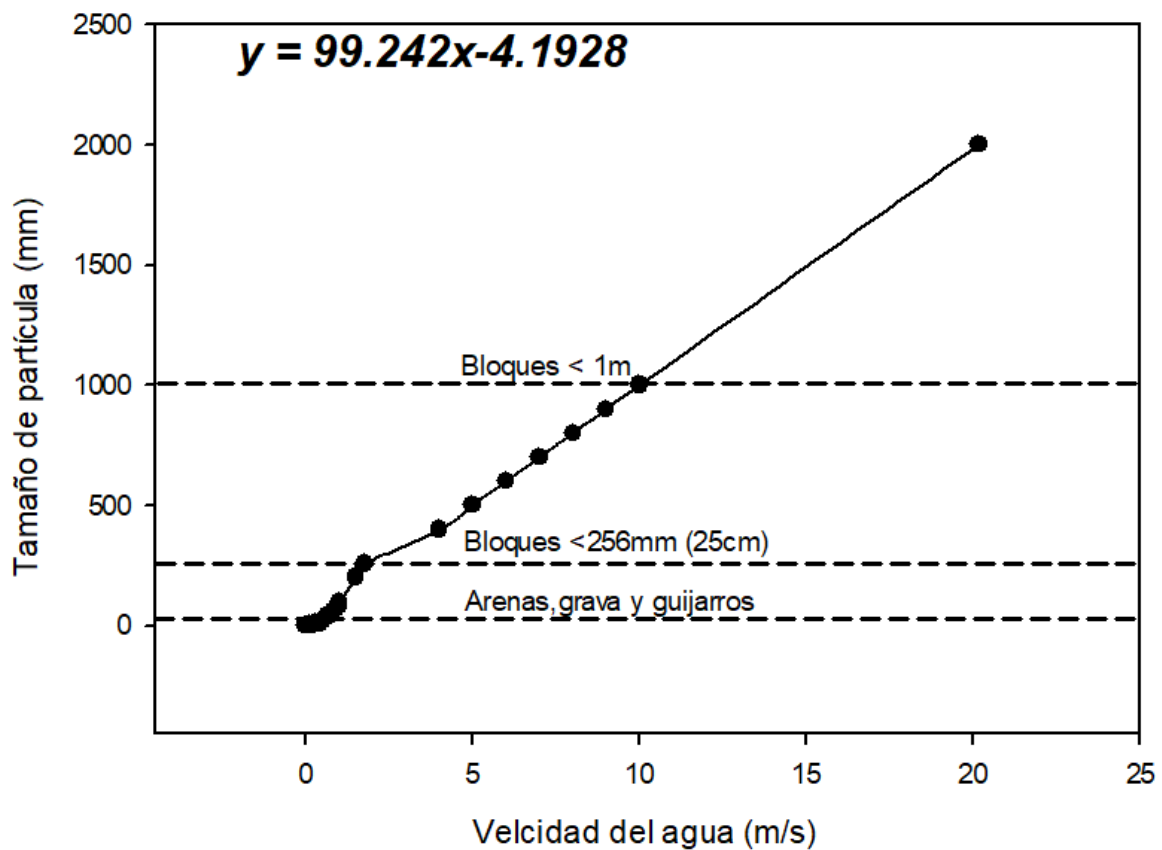


Figura 36. Calibración de la curva de Hjulström para estimar los tamaños de partícula transportados durante el periodo de estudio. La regresión lineal está definida por $y=99.242x-4.1928$, donde y es el tamaño de partícula resultante y x la velocidad del agua.

La siguiente figura muestra las variaciones en la precipitación, la velocidad del agua del río, las observaciones fotogramétricas (OBS) y los umbrales para el transporte de partículas calculado anteriormente en función de la velocidad del agua. Elaboración propia.

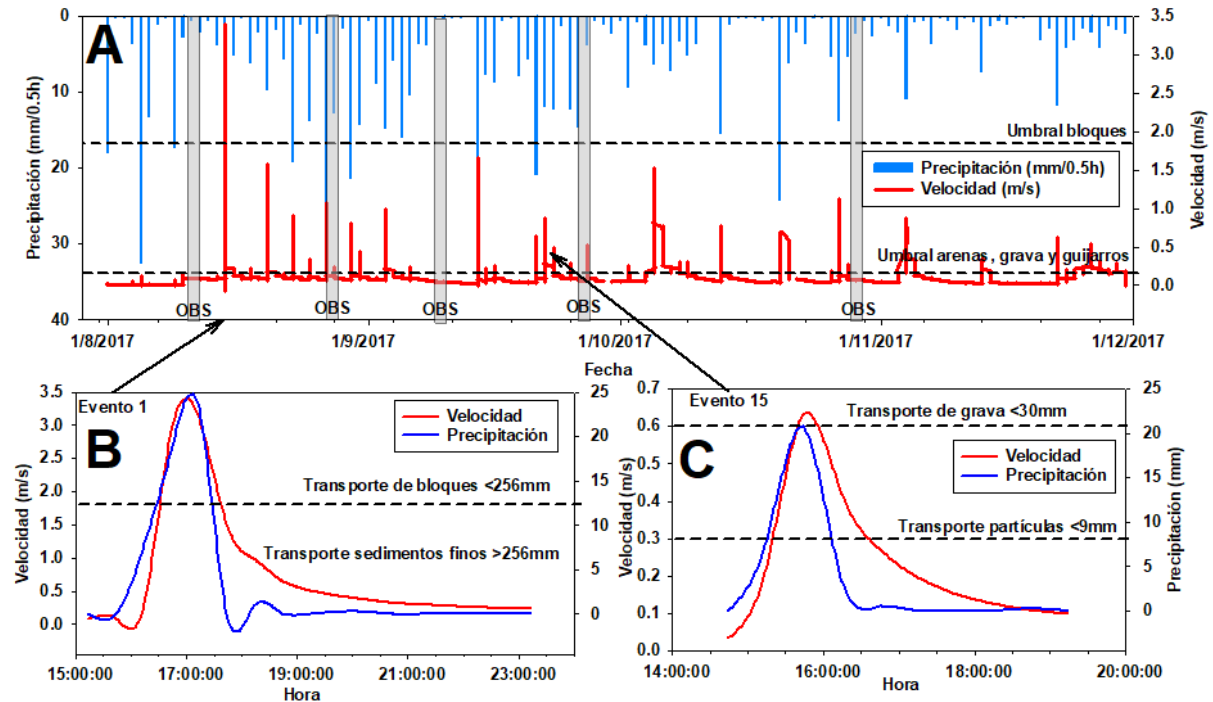


Figura 37. Variaciones en la precipitación y velocidad del río durante el periodo de estudio. El gráfico muestra (A) una serie de tiempo durante el periodo lluvioso 2017, (B) el evento de mayor intensidad registrado durante el 2017 y (C) un evento donde se transportaron únicamente partículas finas imperceptibles al sensor del RPAS. Nótese que los gráficos tienen escalas diferentes. Elaboración propia.

Durante el periodo de estudio 2017 los 23 eventos que ocurrieron con una precipitación acumulada de 815mm resultaron en el cálculo de 208 horas, es decir 8.6 continuos de transporte de material inferior a 256mm (25cm). El transporte de material fino (>256mm) ocurrió en todos los eventos registrados y en promedio ocurre en menos de 30m desde que inicia el evento de precipitación. El transporte de bloques (<256mm) solamente ocurrió una vez durante la época lluviosa del 2017 durante aproximadamente 30 minutos y posteriormente sucedió el evento extremo de 2018. El único evento que registro velocidades capaces de superar el umbral de transporte de bloques ocurrió el 14/8/2017 y tuvo una precipitación acumulada de 50.8mm en un lapso de 3h. Con una velocidad máxima de 3.46m/s que se

traduce hipotéticamente en una corriente capaz de transportar material con un tamaño de partícula hasta 339mm (33cm).

La figura 37 (A) muestra como solamente una vez ocurrió una crecida capaz de superar el umbral de bloques (evento1). El restante de los eventos hipotéticamente solamente transportó material fino, esto se discutirá en el capítulo 3 acerca de las observaciones fotogramétricas.

La figura 37 (C) muestra con más detalle un evento de una baja magnitud en comparación con el evento 1 y 24(evento extremo), dicho evento no está incluido en el gráfico porque se analizará por aparte de la línea de tiempo, ya que es tal la magnitud de la variabilidad respecto al resto de la serie de datos que dificulta sacar conclusiones hidrométricas.

La siguiente tabla muestra los datos de los umbrales de transporte de partículas durante el periodo del 2017 y el evento extremo:

Fecha	Evento	Umbrales de transporte						
		TP_Tarena(min)	TP_Tgrava_gui(min)	TP_Tbloq(h)	TamMayor_partEst(mm)	TT_Tarena(h)	TT_Tgrava_gui(h)	TT_Tbloque(h)
8/14/2017	OBS 1	Observación fotogramétrica 1						
8/14/2017	1	>30m	>30m	1	339	5.5	3	0.5
8/18/2017	2	>30m	>30m		42	11	11	
8/20/2017	3	>30m	>30m		172	6	6	
8/23/2017	4	>30m	>30m		112	4	4	
8/25/2017	OBS 2	Observación fotogramétrica 2						
8/25/2017	5	>30m	>30m		56	7.5	7.5	
8/27/2017	6	>30m	>30m		131	8	8	
8/28/2017	7	>30m	>30m		42	5	5	
8/30/2017	8	>30m	>30m		111	6	6	
8/31/2017	9	>30m	>30m		75	11	11	
9/3/2017	10	>30m	>30m		148	9.5	9.5	
9/14/2017	11	>30m	>30m		185	5	5	
9/21/2017	OBS 3	Observación fotogramétrica 3						
9/21/2017	12	>30m	>30m		91	5.5	5.5	
9/22/2017	13	>30m	>30m		103	11	11	
9/23/2017	14	>30m	>30m		78	3	3	
9/27/2017	15	>30m	>30m		58	6	6	
9/30/2017	OBS 4	Observación fotogramétrica 4						
10/4/2017	16	>30m	>30m		144	46.5	46.5	
10/13/2017	17	>30m	>30m		97	5	5	
10/20/2017	18	>30m	>30m		89	9	9	
10/22/2017	OBS 5	Observación fotogramétrica 5						
10/27/2017	19	>30m	>30m		128	5.5	5.5	
11/3/2017	20	>30m	>30m		96	10	10	
11/4/2017	21	>30m	>30m		77	7.5	7.5	
11/5/2017	22	>30m	>30m		111	16.5	16.5	
11/22/2017	23	>30m	>30m		84	6.5	6.5	
10/26/2018	24	>30m	>30m	2.5	1283	51.5	51.5	7
11/5/2018	OBS 6	Observación fotogramétrica 6						

Tabla 4. Umbrales de transporte de partículas durante el 2017 y el evento extremo. La figura muestra: Tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de arenas -TP_Tarena(h),

tiempo de inicio de precipitación al inicio de transporte de grava y guijarros - TP_Tgrava_gui(h), tiempo de inicio de precipitación del inicio de transporte de bloques TP_Tbloq(h), partícula de mayor tamaño transportada según la curva de Hjulström TamMayor_partEst (mm), duración total de transporte de arenas y grava TT_Tarena (h), duración total de transporte de grava_guijarros TT_Tgrava_gui(h), duración total de transporte de bloques TT_Tbloq(h). Elaboración propia.

Antes de abordar el tema de los umbrales de transporte es importante recordar que la resolución temporal de los datos de precipitación y velocidad es de 30 minutos. Por ello los TP_T (tiempos de inicio de precipitación al inicio de transporte) tienen en su totalidad >30min. Dura menos de 30minutos para que inicie el transporte de arenas, grava e incluso guijarros.

En esta investigación no se profundiza el transporte de partículas no detectables por el RPAS. El sensor de la aeronave tiene la capacidad de identificar acumulaciones de partículas de arena o grava, sin embargo, la resolución píxel en este ambiente en particular, no es capaz de diferenciar partículas menores de los 25cm. Las sombras de la vegetación que afectan la iluminación, la altitud de vuelo, la humedad atmosférica, el viento y la precipitación pueden afectar de manera severa la capacidad de la cámara del RPAS para captar con eficacia información de la sección fluvial.

A pesar de las dificultades para analizar bancos de arenas y gravas por limitaciones en la resolución del sensor y condiciones atmosféricas-ambientales, el RPAS fue capaz de detectar cambios en bancos de arenas, grava y guijarros, que para efectos de los resultados de esta investigación nos referiremos a ellos como **sedimentos finos >256mm**, mientras que las partículas **<256mm bloques**.

Aclarado lo anterior, recalcamos; El transporte de sedimentos finos ocurre en todos los eventos registrados y su tiempo inicio respecto a la precipitación ocurre en menos de 30m.

El dron es capaz de detectar acumulaciones de sedimentos finos, pero no diferenciar las partículas, por ello en el análisis se agruparon. Solamente ocurrió 1 evento que generó transporte de bloques durante el 2017 y posteriormente en octubre de 2018 ocurrió el evento extremo que marca el fin del periodo de observaciones. Por lo tanto, ocurrieron 2 eventos de

precipitación que generaron transporte bloques. La siguiente tabla muestra estadística descriptiva acerca del transporte de material en el río.

Variable	TP_Tarena(min)	TP_Tgrava_gui(min)	TP_Tbloq(h)	TamMayor_partEst(mm)	TT_Tarena(h)	TT_Tgrava_gui(h)	TT_Tbloque(h)
Promedio	>30m	>30m	1.75	160.49	10.92	10.81	3.75
Desv.Estandar	0.00	0.00	1.06	246.81	12.12	12.18	4.60
Max	>30m	>30m	2.50	1283.39	51.50	51.50	7.00
Min	>30m	>30m	1.00	42.00	3.00	3.00	0.50
Suma	--	--	--	--	262.00	259.50	7.50

Tabla 5. Estadística descriptiva de los umbrales de transporte de partículas incluyendo el evento extremo del 2018. Elaboración propia.

La partícula de mayor tamaño potencialmente transportada según la calibración de la curva de Hjulström fue de 1283 mm (1.28m), la menor 42mm (4cm) y con promedio de 160.4 mm (16cm). El tiempo total de transporte de arena fue de 262 horas mientras que grava y guijarros fue ligeramente menor con 259h, es decir en algunos eventos de precipitación solamente se transportaron arenas. En promedio después de una crecida por eventos de precipitación el río dura 10h transportando material fino. El evento de mayor duración fue el extremo con 51.5 horas de transporte continuo de sedimentos finos.

El evento con menos tiempo de transporte de sedimentos finos fue de 3h. Respecto al tiempo total de transporte de bloques, que solamente ocurrió 2 veces durante el periodo de estudio, el primero (14/8/2017) tuvo una duración >30min y duró aproximadamente 1 hora desde que inició la lluvia hasta llegar a ese umbral <256mm. El evento extremo alcanzó velocidades superiores al umbral de transporte de bloques durante al menos 7h y el tiempo que duró el río en llegar a ese umbral desde que inició la precipitación fue de 2.5h.

4.2 Relacionando la precipitación con el transporte de sedimentos

Para explorar las relaciones entre la precipitación y la dinámica de transporte de sedimentos se utilizó un índice de histéresis. La histéresis es un fenómeno estadístico no-lineal y con comportamiento similar a un bucle entre variables. En sistemas geomórficos se define como un fenómeno donde una o más valores de una variable dependiente están asociados a una variable independiente (Zuecco et al., 2016).

La histéresis puede ser de utilidad para interpretar series de tiempo con variables hidrológicas, cuando nos referimos a la relación entre una variable independiente (precipitación) y transporte de sedimentos (tamaño de partículas). Tal como lo menciona Mano et al., (2009) y Zuecco et al., (2016), la histéresis permite hacer interpretaciones hidrológicas acerca de la dinámica de transporte material, usualmente un comportamiento histerético **a favor de las manecillas del reloj** (clockwise) podría estar relacionado con eventos repentinos que causan movimiento rápido de sedimentos proximales al sitio de medición, entonces la curva de histéresis muestra como el pico de concentración de sedimentos llega más rápido que el pico de caudal, pero de igual manera el pico de concentración de sedimentos disminuye más rápido que el caudal, esto podría estar relacionado con las fuentes de los sedimentos.

Refiriéndonos a lo anterior, podría ser el caso (entre muchos más) que una cantidad de sedimentos está disponible en el canal, y al llegar las primeras lluvias de la época lluviosa, genera un movimiento rápido y repentino en la concentración de sedimentos. Si no hubiera histéresis el pico de sedimentos y el pico de caudal prácticamente siguen la misma línea de tiempo, dando como resultado otra morfología y área en la curva.

Por otro lado, si el comportamiento histerético es **en contra de las manecillas del reloj** (anticlockwise), podría indicar que el pico de caudal llega primero que el pico de sedimentos, esto podría llevarnos a interpretar que no había disponibilidad suficiente de sedimentos en canal, y más bien el pico de sedimentos llega posterior al de caudal por erosión lateral, erosión laminar y otros procesos que más bien incorporan sedimentos nuevos y frescos desde zonas de ladera, esto por dar un ejemplo de interpretación.

Dado que para esta investigación el cálculo del transporte de sedimentos es una derivada de la velocidad, hay una relación lineal, por lo cual aplicar histéresis entre velocidad y transporte de sedimentos no resulta prudente para este caso. Por ello la decisión experimental y exploratoria de ver el comportamiento histerético entre la lluvia y el transporte de material. La siguiente tabla muestra el comportamiento histerético de todos los eventos registrados, incluyendo el evento extremo.

Fecha	Evento	Hyst class	Hyst index
8/14/2017	OBS 1		
8/14/2017	1	**	**
8/18/2017	2	4	-0.301
8/20/2017	3	3	-0.074
8/23/2017	4	4	-0.384
8/25/2017	OBS 2		
8/25/2017	5	4	-0.583
8/27/2017	6	4	-0.293
8/28/2017	7	4	-0.386
8/30/2017	8	3	-0.171
8/31/2017	9	2	0.153
9/3/2017	10	**	**
9/14/2017	11	**	**
9/21/2017	OBS 3		
9/21/2017	12	4	-0.096
9/22/2017	13	3	-0.214
9/23/2017	14	4	-0.020
9/27/2017	15	**	**
9/30/2017	OBS 4		
10/4/2017	16	4	-0.379
10/13/2017	17	4	-0.270
10/20/2017	18	**	**
10/22/2017	OBS 5		
10/27/2017	19	**	**
11/3/2017	20	3	-0.177
11/4/2017	21	**	**
11/5/2017	22	4	-0.278
11/22/2017	23	3	-0.241
10/26/2018	24	4	-0.380
11/5/2018	OBS 6		

Tabla 6. Clasificación de la morfología de la curva histéresis (hyst class) y valor del índice de histéresis de la curva (hyst index). La clase va a indicar la forma de la curva y esta nos indica cual pico llega primero y también los parámetros de descenso y ascenso de la variable dependiente. El índice a través del signo nos define el sentido en función de las manecillas del reloj, positivo va a significar a favor y negativo en contra. Elaboración propia.

17 de los eventos presentaron histéresis (70%), mientras que 7 eventos no presentaron algún tipo de relación de histéresis (30%). 11 eventos presentaron clase 4 (45%), 5 eventos clase 3 (20%) y un evento clase 2 (4%). 23 eventos tienen un comportamiento en contra de las manecillas del reloj (95%) mientras solamente 1 (5%) a favor de las manecillas del reloj. En términos generales los eventos presentaron un comportamiento de rezago o *lag* respecto al pico de precipitación y el pico del tamaño máximo de tamaño de partícula transportado. Lo eventos que presentaron histéresis tienen un desfase temporal entre ambos picos, primero ocurre el pico de precipitación (variable dependiente) y luego ocurre el pico de tamaño de partículas (variable dependiente). El caso contrario donde primero ocurre el pico de tamaño de partículas y luego precipitación solamente ocurrió una vez (evento 9). La siguiente figura muestra el comportamiento de 2 eventos con histéresis clase 3 y 4 respectivamente.

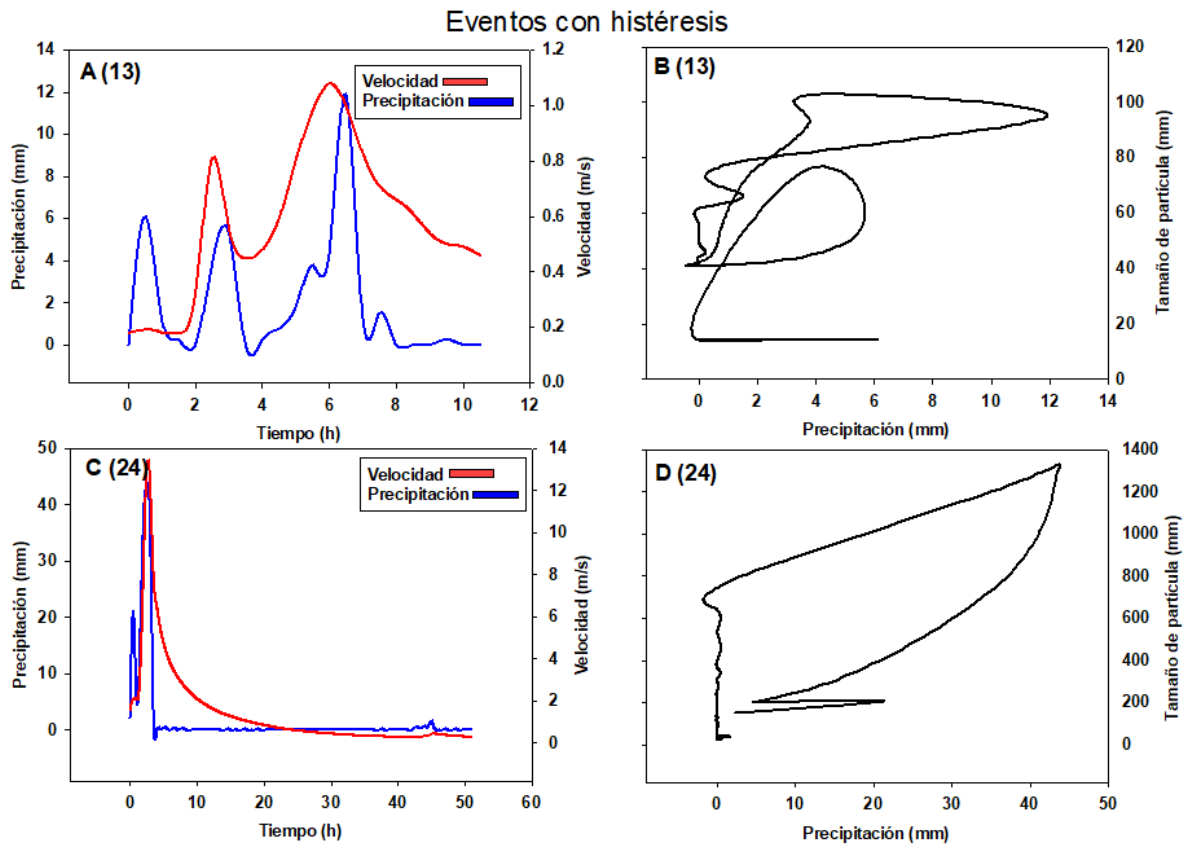


Figura 38. Dos eventos (13 y 24) con histéresis clase 3 y 4. A (13) Relación precipitación-velocidad del evento 13. B (13) curva de histéresis del evento 13. C (24) Relación precipitación-velocidad del evento 24. D (24) curva de histéresis del evento 24. Elaboración propia.

Nótese como en la figura 38 el evento A (13) muestra un desfase entre los picos de precipitación y velocidad, en total 3 pueden identificarse cercano a las horas 2.5 y 6.5. Inicialmente el evento 13 inicia con una precipitación que posteriormente se traduce en un primer aumento de velocidad. Posteriormente ocurre un segundo pico de lluvia que se manifiesta en el mayor pico de velocidad. El tercer pico de lluvia no genera respuesta en el río. El analizar la curva de histéresis vemos como conforme aumenta la precipitación hay un desfase en los aumentos del tamaño de partículas. En este evento A (13) vemos como el pico del tamaño de máximo de partículas tiene un desfase temporal de aproximadamente 30 minutos.

El segundo evento (24), en la figura 38 (C y D), muestra el comportamiento del evento extremo de 2018, por la escala del evento pareciera que ambos picos tienen una coincidencia, sin embargo, hay un desfase de aproximadamente 1 hora entre picos, adicionalmente que la

precipitación cesa abruptamente y la velocidad del río disminuye con un desfase importante de más de 20 horas para volver al nivel base. Es decir que, a pesar del cese de la precipitación, el río continuó transportando bloques de hasta 1.5m de diámetro según las estimaciones.

Continuando con el mismo evento, si seguimos la curva la precipitación inicio y asciende hasta llegar a los 20mm, cesa durante aproximadamente 1 hora y posteriormente continúa ascendiendo hasta llegar a su pico máximo, el pico máximo de transporte llega aproximadamente 30 minutos después. Solano-Rivera et al., (2019) aplicaron el índice de histéresis en un evento extremo ocurrido en 2015, este resultó con una clase 1 en su primera fase y posteriormente clase 3 en su segunda fase. Según Zuecco et al., (2016) las clases 1,2,3 y 4 implican un crecimiento de la variable dependiente conforme aumenta la independiente, la siguiente figura lo ilustra:

Table I. The eight main hysteresis classes for independent variables that increase from the initial state, reach a peak and then decrease, with the corresponding minimum (ΔA_{\min}) and maximum (ΔA_{\max}) values of the difference between the integrals $\Delta A_{[i,j]}$ (Equation 5) and their sum, h









Hysteresis class	Loop	Dependent variable	ΔA_{\min}	ΔA_{\max}	h
I		Increases from the initial state	>0	>0	>0
II		Increases from the initial state	≤ 0	>0	≥ 0
III		Increases from the initial state	<0	≥ 0	<0
IV		Increases from the initial state	<0	<0	<0
V		Decreases from the initial state	>0	>0	>0
VI		Decreases from the initial state	≤ 0	>0	≥ 0
VII		Decreases from the initial state	<0	≥ 0	<0
VIII		Decreases from the initial state	<0	<0	<0

Figura 39: Clasificaciones de las 8 principales clases de las curvas de histéresis. Todos los casos de esta investigación rondan entre 1-4, significando un crecimiento de la variable dependiente conforme aumenta la independiente. (Zuecco et al., 2016).

La siguiente figura muestra 2 eventos que no presentaron histéresis (1 y 15).

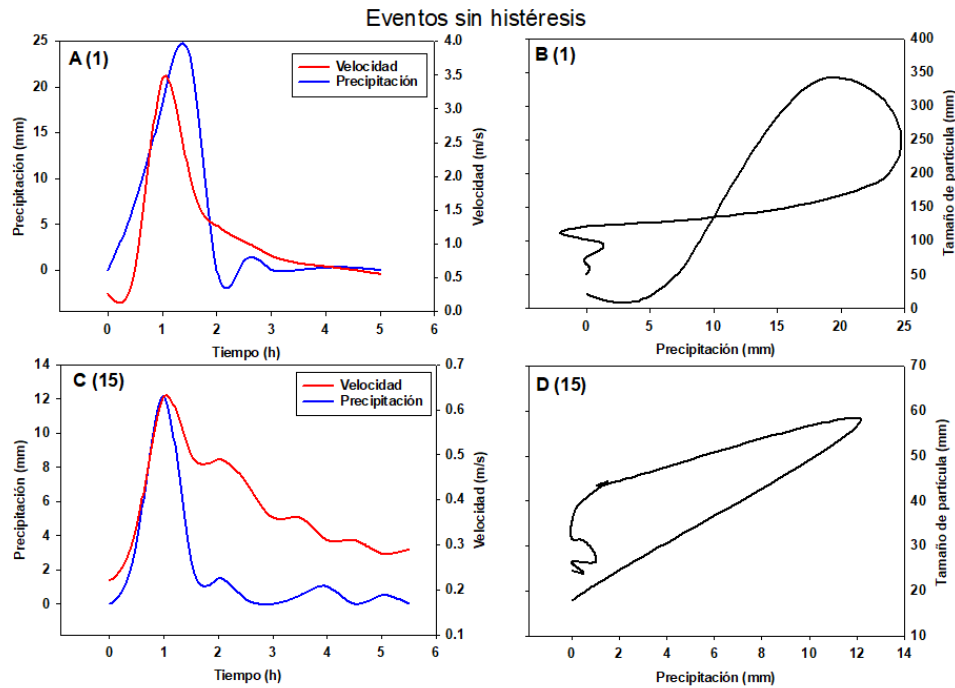


Figura 40. 2 eventos sin histéresis. Nótese como hay una correspondencia casi armónica e idéntica entre las curvas de velocidad y precipitación de ambos eventos (A Y C).

Elaboración propia.

En algunos eventos el cálculo de histéresis no resultó efectivo, significando que no hay suficiente variación entre los ejes para asignar alguna clase, por lo tanto, se consideran eventos donde el tamaño de partículas va en función lineal de la precipitación. Esto podría estar relacionado al origen y los mecanismos de generación de sedimentos, sedimentos disponibles en canal, deslizamientos e incorporación coluvial anterior a la lluvia entre otras razones. Por alguna razón los sedimentos van linealmente con la precipitación, esto ocurrió en 7 eventos (30%). La razón de porque ocurre esto requiere más investigación estadística y más series de datos para hacer análisis multiparamétricos.

Para explorar más afondo la estadística de las diferentes variables calculadas, se procedió a hacer una matriz de correlación de Spearman.

4.3 Correlacionando variables múltiples

El coeficiente de correlación de Spearman es una medida de correlación no paramétrica que permite analizar la asociación o interdependencia entre variables aleatorias. El signo del resultado del coeficiente indica la dirección entre la asociación entre la variable dependiente y la independiente. Sí, la variable dependiente (Y) tiende a aumentar conforme aumenta la variable independiente (X) el coeficiente tiene signo positivo. Sí, la variable dependiente (Y) tiende a disminuir conforme aumenta la variable independiente (X) el coeficiente tiene signo negativo (Corder y Foreman, 2014). Un resultado de 0 en la correlación indica que no hay tendencia de la variable dependiente (Y) de aumentar o disminuir conforme aumenta la variable independiente (X), por otra parte, un resultado de 1 significa que ambas variables están monótonamente correlacionadas. Valores más cercanos a -1 o a 1 indican una correlación más fuerte. Valores más cercanos a 0 indican menor correlación. La siguiente tabla muestra una matriz de correlación de Spearman de todas las variables.

	Tseco(h)	HumAnte3d(mm)	M(mm)	Inten_max(mm/0.5h)	D(h)	Vmin(m/s)	Vmax(m/s)	P_Vlag(h)	TP_Tbloq(h)	TamMayor_partEst(mm)	TT_Tgrava_gui(h)	TT_Tbloque(h)
Tseco(h)	1.000											
HumAnte3d(mm)	.064	1.000										
M(mm)	.057	-0.279	1.000									
Inten_max(mm/0.5h)	.428	-0.347	.649	1.000								
D(h)	-0.304	-0.055	.266	-0.262	1.000							
Vmin(m/s)	.005	.198	-0.188	-0.011	-0.005	1.000						
Vmax(m/s)	-0.302	-0.367	.650	.438	.046	-0.128	1.000					
P_Vlag(h)	-0.143	.273	.166	-0.366	.568	-0.078	.023	1.000				
TP_Tbloq(h)	.399	.295	.585	.585	.423	.378	.615	.363	1.000			
TamMayor_partEst(mm)	-0.300	-0.368	.651	.435	.048	-0.128	1.000	.027	.615	1.000		
TT_Tgrava_gui(h)	-0.365	.075	.211	-0.277	.693	-0.159	-0.000	.516	.403	.007	1.000	
TT_Tbloque(h)	.399	.295	.585	.585	.423	.378	.615	.363	1.000	.615	.403	1.000

Tabla 7. Matriz de correlación de Spearman de las variables de los eventos. Los números señalados con color rojo tienen una tendencia negativa, las casillas señaladas en amarillo tienen una significancia estadística por encima del 95% ($p < 0.1$). Elaboración propia.

De entrada, podemos observar algunas correlaciones estadísticamente significativas que podrían ser consideradas como obvias. Por ejemplo, la intensidad máxima de lluvia (Inten_max) relacionada con la magnitud de la lluvia (M) resultó en $r = 0.64$, un resultado esperable, puesto que si tenemos una mayor intensidad de lluvia esperaríamos una mayor magnitud de lluvia (acumulación total). De igual manera la velocidad máxima del agua (Vmax) está fuertemente correlacionada con la magnitud $r = 0.65$, evidentemente esperaríamos que, si llueve más sobre la cuenca, el río va a aumentar su velocidad. Una relación interesante está relacionada con el transporte de bloques (TP_Tbloq), hay una fuerte correlación positiva

entre el transporte de bloques y las variables de magnitud (M) $r = 0.58$, intensidad máxima de lluvia (Inten_max) $r = 0.58$ y la duración del evento (D) $r = 0.42$.

Lo anterior demuestra estadísticamente que las características de la precipitación influyen en el transporte de bloques, esto significa que el río modifica su geomorfología fluvial durante eventos de precipitación con ciertas características, significando que en este caso, podrían ser definidas como intensas, prolongadas y de gran magnitud. El tamaño de mayor partícula transportado según la curva de Hjulström (TamMayor_partEst) resultó tener una correlación importante con la magnitud de la lluvia (M) $r = 0.65$, la intensidad de la lluvia $r = 0.43$, pero curiosamente no con la duración del evento de precipitación (D) $r = 0.048$. Esto significa que la intensidad, es decir la cantidad de lluvia entre tiempo tiene más relevancia que la duración del evento, puesto que podría llover durante mucho tiempo, pero no alcanzar la intensidad necesaria para iniciar el transporte de material.

Cómo es de esperar el tamaño de mayor partícula transportado (TamMayor_partEst) y la velocidad máxima, están totalmente correlacionados $r = 1$, esto como se ha explicado anteriormente, el cálculo de la curva de Hjulström se deriva de la velocidad del río. En términos generales la matriz reafirma los resultados de los cálculos de histéresis; hay una compleja relación entre las características de la precipitación y el movimiento de partículas.

4.4 La lluvia, el motor de los cambios geomorfológicos en el río

La afirmación que la precipitación es la principal causa de porque se modifica la geomorfología fluvial del río San Lorencito suena obvia e incluso podría considerarse como un corolario en río tropicales, a pesar de que esto no es del todo cierto, más si involucramos procesos endógenos como el vulcanismo, la tectónica y por supuesto la actividad humana, pero esto es otra discusión.

La intención de los resultados anteriores es caracterizar y brindar datos estadísticamente significativos para interpretar las observaciones fotogramétricas que se hicieron durante el periodo de estudio.

Durante dicho periodo se utilizó los productos fotogramétricos minuciosamente para detectar cambios en el río San Lorencito. A partir de los datos hidrometeorológicos analizados se puede

proponer y concluir que hay 3 tipos de comportamientos que ocurren en el río; (1) Eventos frecuentes de baja intensidad y magnitud y (2) Eventos poco frecuentes y alta intensidad y (3) Eventos extremos.

Respecto al primer comportamiento el 91% de los eventos entran en esta categoría. Dichos eventos no tuvieron la competencia o capacidad hidráulica de generar cambios severos en la geomorfología fluvial, esto no significa en ninguna circunstancia que no hubo transporte de sedimentos o cambios morfológicos en lecho o el río en general. Estos cambios pueden ser considerados sutiles y en algunas veces indetectables por el RPAS, por lo anterior, durante esta investigación se desarrolló un método de fotogrametría sumergida para compensar ese vacío de datos del RPAS al no poder detectar tamaños de partículas de sedimentos finos. Estos eventos frecuentes de baja intensidad también son el resultado de un año atípicamente seco para la cuenca, en términos generales el río no tuvo crecidas importantes a excepción del evento 1 y el extremo (24). Estos eventos de baja intensidad, podría caracterizar la “normalidad” del río, son eventos de precipitación que no alcanzan cierto umbral para modificar el río.

Por otra parte, los eventos poco frecuentes y de alta intensidad pueden generar cambios en el río, esta clase de evento solamente sucedió una vez durante el periodo de estudio. Y finalmente, los eventos extremos. Estos tienen una capacidad de modificar severamente la geomorfología fluvial en cuestión de horas, cambiar totalmente la geometría del canal y transportar grandes cantidades de material según las estimaciones.

5. Resultados: Detección y análisis de cambios geomorfológicos en el río utilizando fotogrametría RPAS de alta resolución

Los resultados anteriores brindan la información básica para entender los procesos morfodinámicos que ocurren en el río San Lorencito, inicialmente describimos la geomorfología y las condiciones biofísicas de la cuenca del río San Lorencito, posteriormente analizamos los datos hidrometeorológicos y estimamos el transporte de material hipotético según la curva de Hjulström.

En este apartado corroboraremos dichas estimaciones de transporte de material con las observaciones realizadas con la fotogrametría. Compararemos si lo estimado por la curva de Hjulström puede integrarse con la fotogrametría. Con el fin de validar las estimaciones, utilizaremos los productos derivados de la fotogrametría para detectar cambios detallados en el río, tanto en la parte emergida como la sumergida.

5.1 Detección de cambios durante el periodo lluvioso de 2017

La detección de cambios en el río ocasionados por eventos de precipitación se fundamentó en la fotogrametría RPAS y sumergida. Tal y como lo exploramos en los resultados anteriores, el río durante el periodo del 2017 tuvo poca actividad en términos de las variaciones en su velocidad, fue un año considerablemente seco. Según el análisis estadístico solamente 2 eventos generaron cambios importantes que pudieron ser detectados por el RPAS (1 y 24).

No obstante, las limitaciones del RPAS para detectar cambios de partículas finas, una alternativa desarrollada en esta investigación permitió ver más allá de las imágenes aéreas. Las fotografías sumergidas dentro del canal permitieron dar otra perspectiva de lo que está ocurriendo en el río respecto al transporte de sedimentos y procesos morfodinámicos.

El monitoreo sistemático del lecho del río con una cámara sumergible permitió observar cambios de alta resolución, e incluso abre oportunidades para desarrollar un método científico para estudiar la geomorfología fluvial de ríos con características similares. Sin duda alguna las fotografías sumergidas en esta investigación abren un debate acerca de métodos para la cuantificación de procesos morfodinámicos fluviales, refiriéndonos a sustitución de carga de fondo, erosión lateral, fracturación de bloques, desgaste de aluviones, procesos de sucesión vegetal bajo el agua entre otros.

La sección donde se realizó el monitoreo y observación de alta resolución de los procesos morfodinámicos fluviales y detección de cambios está representada con un polígono de color lila en la figura 47.

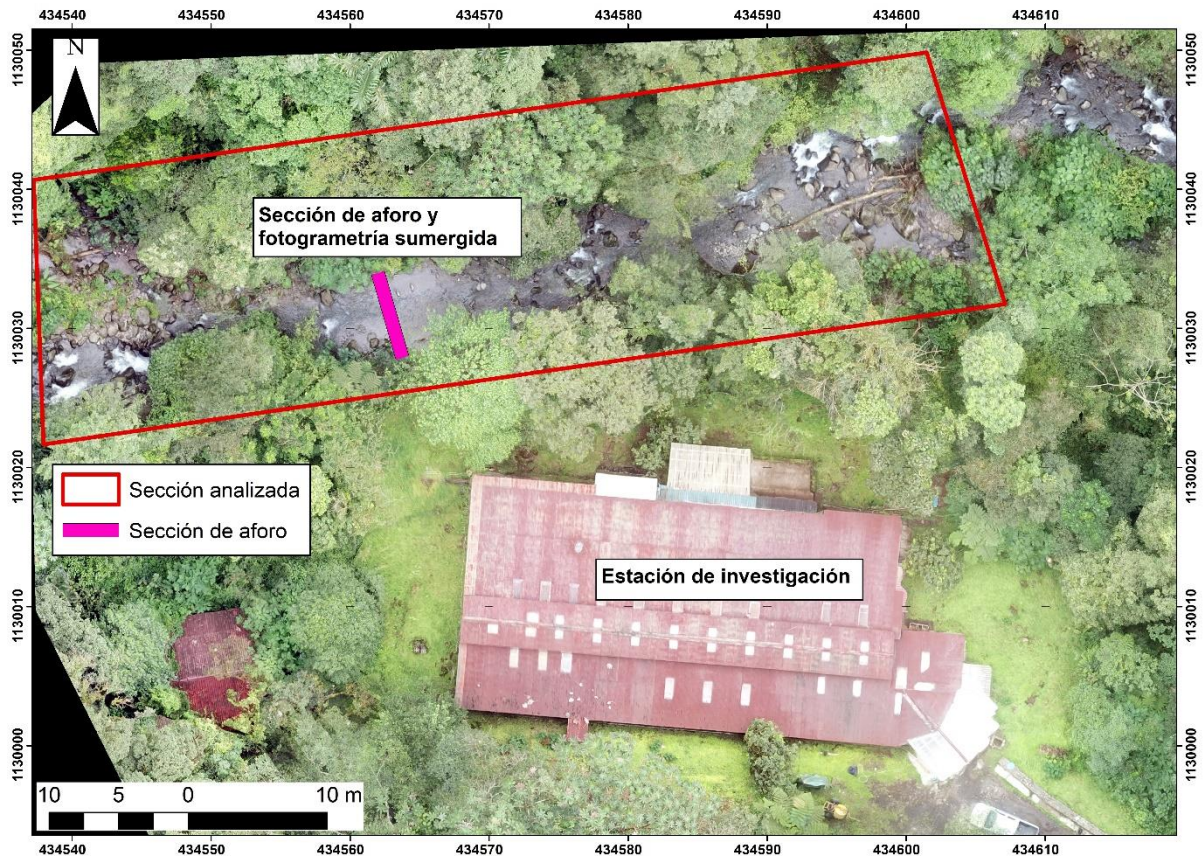


Figura 41. Sección fluvial analizada para la detección de cambios durante la época lluviosa del 2017. El rectángulo rojo enmarca el área analizada para cambios con RPAS y la franja de color lila enmarca la sección de aforo y el análisis fotogramétrico sumergido. Elaboración propia.

La sección analizada durante el 2017 para fotogrametría RPAS tiene un área de 1258 m². El área sumergida analizada tiene un área aproximada de 5.9 m². Inicialmente analizaremos los datos de la fotogrametría RPAS del 2017. En este apartado de resultados introducimos una variable nueva, la turbulencia.

La turbulencia vista desde la fotogrametría RPAS puede ser vista como secciones del río donde hay rápidos o caídas-saltos hidráulicos que causan oxigenación del agua, por lo tanto, adquieren en la imagen un color blancuzco. Los cambios en la turbulencia fueron analizados para identificar cambios sumergidos y emergidos.

Observación	Bloques (m2)	Sedimentos finos (m2)	Turbulencia (m2)	Diferencia bloques (m2)	Diferencia sedimentos finos (m2)	Diferencia turbulencia (m2)	Lluvia (mm)	Vmax(m/s)
1	44.42	37.11	5.53	**	**	**	**	**
2	51.65	55.76	15.54	7.23	18.65	10.01	119.8	3.46
3	49.97	54.01	13.71	-1.68	-1.75	-1.83	253.4	1.9
4	48.31	59.88	15.77	-1.66	5.87	2.06	113.7	1.08
5	49.81	60.43	15.89	1.5	0.55	0.12	209.1	1.33

Tabla 8. Áreas y cambios detectados entre observaciones fotogramétricas RPAS.

Las observaciones 1 al 5 corresponden vuelos fotogramétricos ejecutados durante la estación lluviosa del 2017, la observación número 6 se efectuó posterior al evento extremo del 2018.

La figura 42 muestra como la detección de bloques y sedimentos finos se mantuvo relativamente constante durante el periodo analizando. El mayor cambio ocurrió entre la observación 1 (inicial-base) y la observación 2. Con un aumento detectado de 7.23 m² en bloques y 18.65 m² en sedimentos finos. De igual manera la turbulencia aumentó 10.01 m².

El evento 1 según la estadística analizada en los resultados anteriores fue el de mayor magnitud e intensidad, tanto en precipitación como en velocidad del río. Los datos de la observación fotogramétrica 1 presentados en la figura 42 reafirman los datos estimados en el capítulo anterior.

Al relacionar los datos estadísticos con los datos observados podemos afirmar que hay una coincidencia entre la fotogrametría RPAS y el análisis hidrometeorológico de los resultados anteriores. De igual manera como se verá más adelante los cambios detectados en el lecho sumergido del río también reafirman que el evento 1 fue relevante en cambios geomorfológicos. La lluvia acumulada entre la observación 1 y 2 fue de 119mm, el río alcanzando una velocidad máxima de 3.56m/s.

Es interesante el hecho que entre la observación 2 y la observación 3 la precipitación fue mayor (253mm) y a pesar de esto solamente se alcanzó una velocidad máxima de 1.9 m/s. A pesar de que entre la observación 2-3 se encuentra intensidades mayores de precipitación en comparación con la observación 1-2 la velocidad fue mayor en este lapso. La explicación a esto puede estar relacionado a localismos con los mecanismos de precipitación. La estación meteorológica utilizada para esta investigación se encuentra a menos de un km del punto de

medición hidrométrica, podría ser el caso que llovió intensamente sobre la estación meteorológica, pero no en la cuenca alta para generar una crecida relevante. Ciertamente hay algo particular entre ambas observaciones, una hipótesis puede ser lo mencionado anteriormente respecto a los localismos de la precipitación, esto fue descrito anteriormente por Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017).

Posteriormente a la observación 2, las áreas detectables de bloques disminuyen, no porque hayan sido transportados, erosionados o movidos de alguna manera, sino porque aumentó el flujo base del río.

Conforme aumentó la precipitación el río subió su nivel base, cubriendo los bloques expuestos, evitando que puedan ser detectados por el RPAS. Esto nos lleva a un resultado importante; la incapacidad de detectar un aluvión previamente identificado puede estar relacionado con un aumento del nivel base del río, el agua al cubrir el aluvión no permite que el RPAS obtenga datos de este. Lo anterior significa que el aluvión no ha sido transportado sino está siendo objeto de una mayor velocidad del río.

Los datos de la figura 42 muestran un comportamiento del río relativamente “calmo y estable” donde hay pequeñas modificaciones en bancos de sedimentos y bloques.

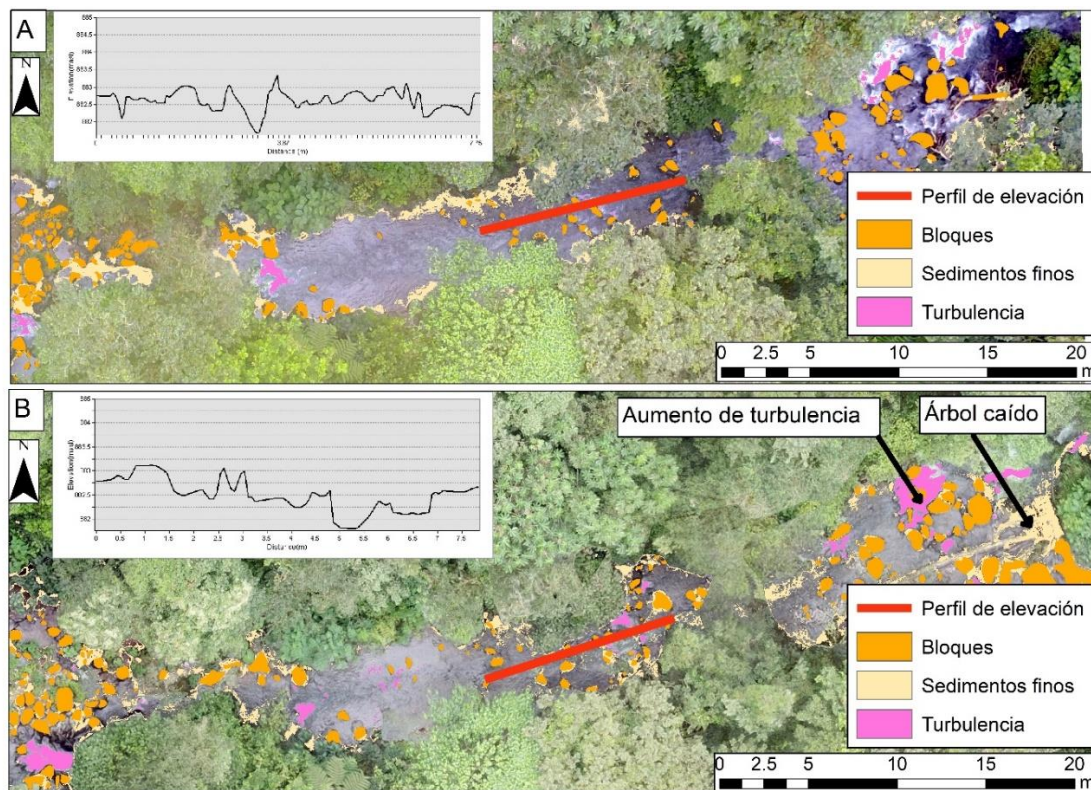


Figura 42. Cambios detectados por la fotogrametría RPAS entre la observación 1 (A) y 2 (B). Nótese como el perfil de elevación señalado con una línea de color rojo muestra variaciones en las elevaciones del río, producto del transporte de bloques. Elaboración propia.

De entrada, al observar la figura 42 podemos observar un cambio en el perfil de elevación colocado al lado izquierdo superior de la figura. Al analizar las demás observaciones, no se pudo encontrar alguna variación tan drástica como la mostrada en esta figura. Las variaciones fueron entre los 40cm y un máximo de 63cm producto del transporte de bloques.

Otro aspecto relevante de las observaciones de la figura 42 es la caída de un árbol en el sector Este. Esta caída fue un factor importante a la hora de cuantificar la cantidad de sedimentos finos detectados, la caída de este árbol expuso una cantidad importante de sedimentos finos. Dicho árbol estaba localizado en una isla fluvial descrita en los resultados anteriores, vale mencionar que dicha isla desapareció por completo en el evento extremo.

El RPAS tuvo la capacidad de detectar cambios sutiles en la distribución del material aluvial, también la caída de un árbol. La fotogrametría también detectó cambios en las zonas turbulentas, algunas aumentando, otras disminuyendo y otras desapareciendo. El aumento

de la turbulencia podría estar indicando una mayor concentración de bloques y material que se opone al flujo, causando regímenes hipercríticos hidráulicos que se manifiestan en rápidos y zonas turbulentas. La turbulencia es un indicio de los procesos morfodinámicos, pero no una evidencia, esto porque el RPAS no es capaz de detectar debajo del agua, y la fotogrametría sumergida no funciona en sitios donde la turbulencia opaca y enturbia el agua.

Tal y como lo hemos discutido, el periodo seco del 2017 no tuvo mayores cambios detectados por el RPAS, no obstante, la fotogrametría sumergida muestra totalmente otra dinámica y cambia totalmente la percepción geomorfológica del río. Los cambios sumergidos son tan drásticos que es difícil empatarlos con la fotogrametría RPAS.

5.2 Explorando cambios del lecho fluvial con fotogrametría sumergida

El uso de imágenes sumergidas fue utilizado para explorar más a fondo los cambios que sufre el río durante eventos de precipitación, ya que como hemos mencionado anteriormente el RPAS tiene limitaciones para detectar partículas de sedimentos finos desde el aire. Esto por la resolución de la cámara, iluminación y demás condiciones ambientales. Por ello se utilizó una pequeña cámara sumergible GoPro 4 Silver.

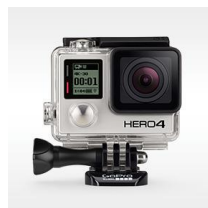


Figura 43. Cámara sumergible GoPro 4 Silver. GoPro.com (2020).

La fotogrametría sumergida ha sido ampliamente utilizada para el mantenimiento de operaciones petroleras, cables submarinos e ingeniería en ambientes de agua dulce y marinos (Pollio, 1968; Moore, 1976; Sarakinou, 2016; Čejka, 2019). La fotogrametría sumergida también ha sido ampliamente utilizada para estudiar ambientes coralinos y lechos marinos (Figueira et al., 2015; Rossi et al., 2019). El uso de fotogrametría para analizar lechos fluviales se ha concentrado en latitudes templadas, en los trópicos hay un vacío importante en el uso de la fotogrametría sumergida para análisis de ríos (Lane, 2000; Westaway et al., 2001; Kalacska et al., 2018).

Los resultados presentados en este apartado son la primera aproximación respecto al uso de fotogrametría de bajo costo aplicado a ríos tropicales, en ambientes volcánicos y bajo cobertura prístina. A continuación, la figura 43 muestra los cambios de una sección sumergida del río San Lorencito.

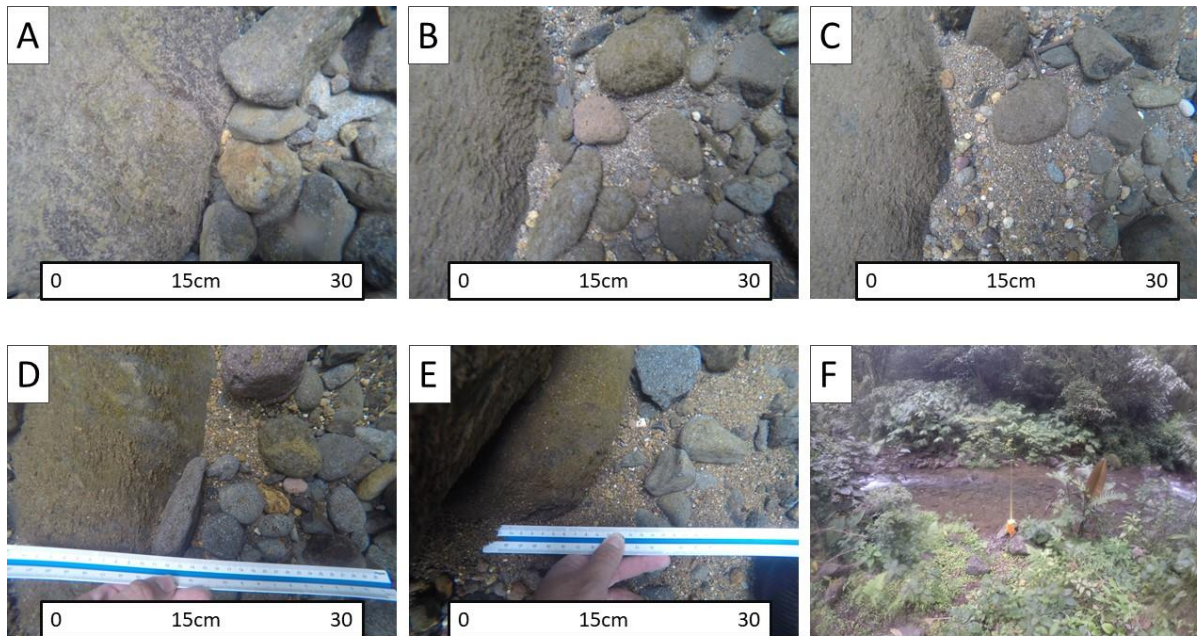


Figura 44. Cambios sumergidos en una sección lateral del río San Lorencito. (A) Observación 1, (B) Observación 2, (C) Observación 3, (D) Observación 4, (E) Observación 5 y F una fotografía de la sección fluvial-aforo. Elaboración propia.

La sección sumergida anterior corresponde a una sección lateral, es decir cerca del margen del río. A la izquierda de cada observación podemos observar un bloque de más de 60cm de diámetro. Dicha roca se mantuvo estática durante todo el periodo de estudio y sirvió como un parámetro de referencia para las observaciones de esta sección lateral.

Antes de iniciar con los cambios entre cada observación, es importante resaltar que dicha roca usada como parámetro de referencia experimentó un cambio interesante en una especie de ¿musgo/alga? o alguna planta adherida a la roca, este fenómeno se pudo observar en otras rocas de tamaño similar o menor. Esto evidencia el gran potencial de la fotogrametría sumergida para estudios de ecología acuática.

La primera observación (A) de la figura 44 muestra un contacto entre el bloque de referencia ubicado a la izquierda y guijarros con un tamaño aproximado entre los 2cm y 20cm. Los guijarros son en su totalidad rocas basalto-andesíticas angulares.

La segunda observación (B) evidencia un cambio total en la composición de la sección del lecho. La totalidad de las rocas detectadas en la primera observación ya no están. En algunas partes los guijarros fueron sustituidos por sedimentos finos y grava. Hay una diferencia total entre la observación 1 y 2 en dicha sección del lecho. La cantidad de precipitación acumulada entre ambas observaciones fue de 119mm y la velocidad máxima fue de 3.46 m/s. Los cambios fotogramétricos RPAS expuestos en la figura 42 muestran cambios relativamente sutiles respecto a los cambios de las observaciones sumergidas.

Lo anterior nos muestra una dicotomía a la hora de entender los cambios del río, por un lado, cambios sutiles a veces imperceptibles desde la óptica aérea y terrestre. Pero por otro lado las observaciones sumergidas nos muestran una dinámica sumamente compleja e intensa de lo que ocurre realmente en el río. En términos porcentuales podríamos decir que entre las observaciones aéreas 1 y 2 hubo una variación menor al 2% de la geomorfología fluvial, pero si cambiamos la escala a un área del lecho sumergido, podríamos decir que el 99% de la geomorfología fluvial cambió.

Entre la observación 2 (B) y la 3 (C) hubo cambios parciales en la sección. Algunas partículas mantuvieron su posición y otras desaparecieron. Algo interesante es el aumento de sedimentos finos que rellenaron los espacios entre las partículas de guijarros. Entre ambas observaciones hubo un aumento sustancial de los sedimentos finos, pareciera que algunos guijarros con un tamaño entre los 10-20 cm no fueron transportados, sino más bien cubiertos por una capa de sedimentos finos. La figura 45 muestra con detalle las variaciones.

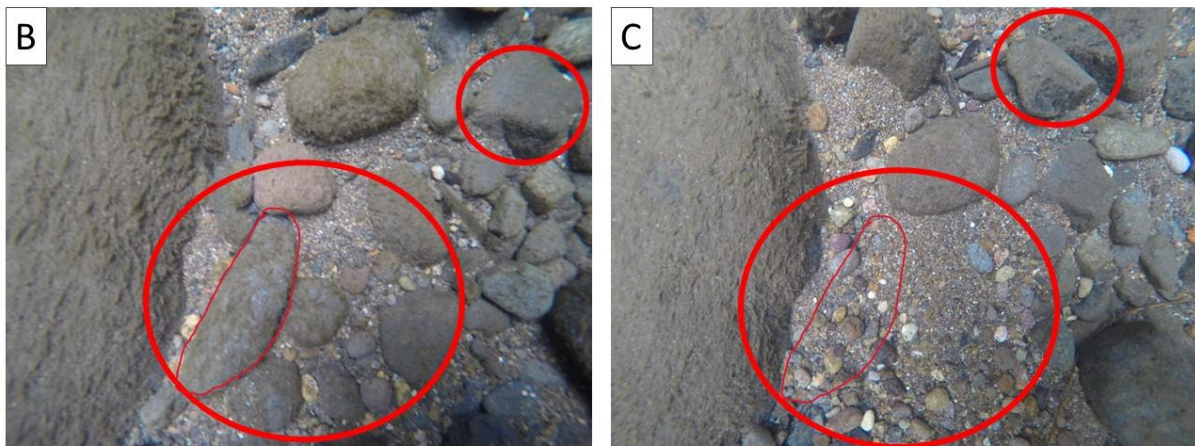


Figura 45. Cambios en una sección del lecho fluvial entre las observaciones 2 y 3. Los círculos de menos tamaño ubicados en la parte superior-derecha de la figura muestran un guijarro de aproximadamente 8cm que mantuvo su posición entre observaciones. Los círculos de mayor tamaño ubicados en la parte inferior-izquierda muestran una acumulación de sedimentos finos rellenoando espacios entre los guijarros, adentro del mismo círculo hay un guijarro de unos 9cm que fue cubierto por sedimentos finos entre B-C. Elaboración propia.

La figura 45 muestra la complejidad acerca de la dinámica de transporte de sedimentos por arrastre y suspensión. Algunas partículas mantuvieron su lugar y otras fueron cubiertas por sedimentos finos y otras transportadas. La observación 3 (C) también mostró partículas con diferentes colores blancuzcos, morados y amarillentos. Estas partículas son guijarros profundamente alterados hidrotermalmente, la fotogrametría sumergida además de detectar cambios en la estructura del lecho, tamaños de partículas y morfologías, permitió identificar potencialmente diferencias litológicas entre los sedimentos. Una cámara multispectral sumergible calibrada para ambientes acuáticos podría explorar este asunto. La precipitación acumulada entre observaciones fue de 253mm y una velocidad máxima de 1.9 m/s.

Entre la observación 3 (C) y 4 (D) hubo cambios parciales. El guijarro marcado en la figura 45-46 vuelve a ser detectado en la observación 4 (D), los sedimentos finos cubriendo el mismo

fueron transportados dejando de nuevo detectable el guijarro marcado, esto ocurrió en un lapso de 9 días.

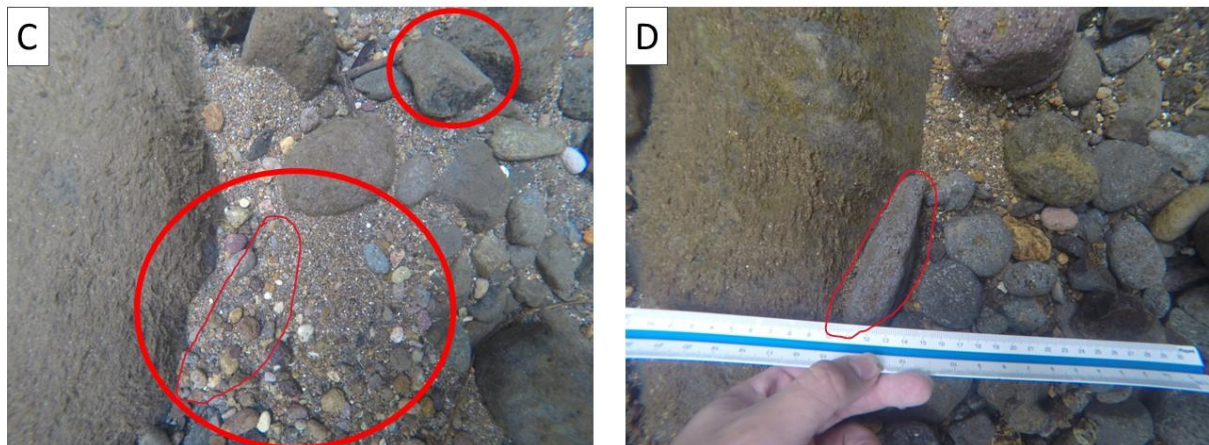


Figura 46. Variaciones entre las observaciones 3 (C) y 4 (D). En el círculo superior derecho en (C) hay un guijarro marcado observado en (B) Figura 53, este mismo fue transportado (D). El círculo inferior izquierdo muestra un guijarro marcado en (B) que fue cubierto por sedimentos finos, este mismo queda descubierto de sedimentos en (D) y parece haber sido movido un poco hacia la izquierda. Elaboración propia.

Entre la observación 4(D) y 5(E) cambia totalmente la composición del lecho (Figura 44). Los guijarros que habían sido marcados en otras observaciones ya no se pueden detectar en (E), esta última observación muestra algunos guijarros dispersos y una matriz de sedimentos finos debajo de los guijarros.

En términos generales podríamos decir que hay una cierta estabilidad de la sección mostrada anteriormente, esto porque la roca tomada de referencia mantuvo su posición durante todo el periodo de estudio, dicha roca fue transportada durante el evento del 2018. Y podríamos referirnos a esa estabilidad de la sección porque algunas partículas mantuvieron su posición durante varias semanas, como lo veremos a continuación, algunas secciones del río no tienen esa estabilidad, y cambian totalmente su composición entre observaciones.

Las secciones anteriores fueron monitoreadas en un sitio cercano al margen del río de poca profundidad y velocidad del agua. La siguiente figura muestra los cambios en el talweg del río, la parte de mayor profundidad y velocidad.

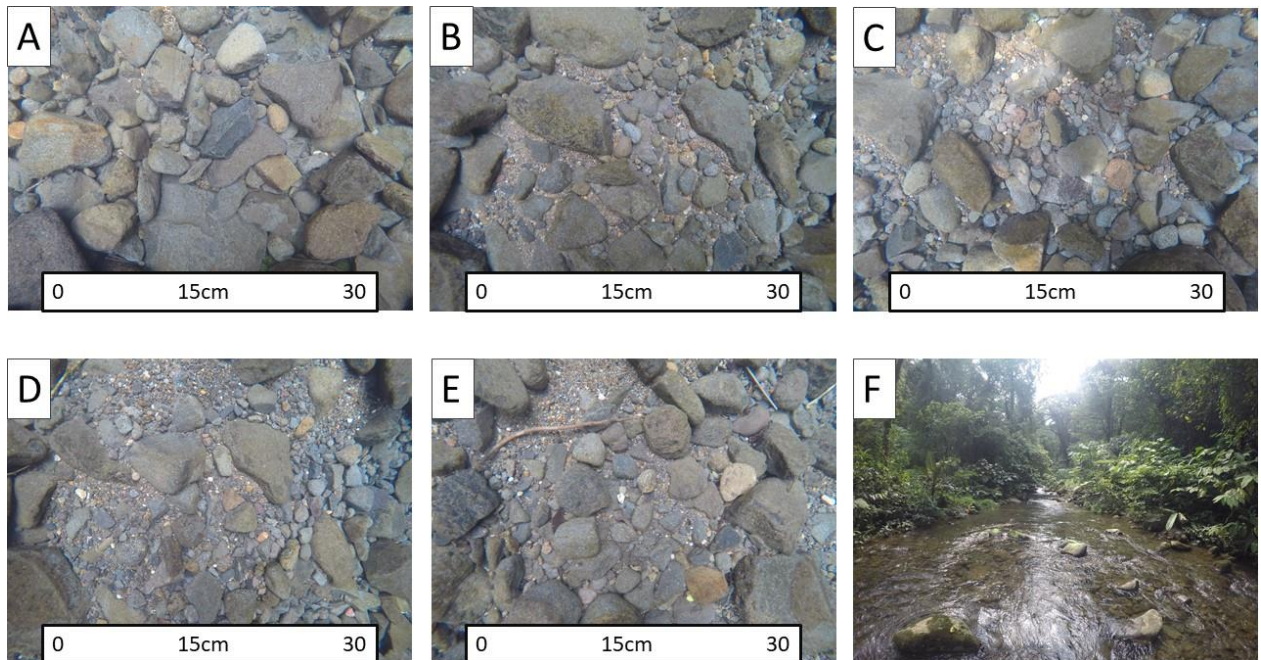


Figura 47. Cambios sumergidos en el talweg del río durante el periodo lluvioso 2017. (A) Observación 1, (B) Observación 2, (C) Observación 3, (D) Observación 4, (E) Observación 5 y F una fotografía de la sección fluvial-aforo. Elaboración propia.

El talweg del río cambió totalmente durante todas las observaciones, no hay una sola partícula que mantuviera su posición entre observaciones, esto posiblemente por qué; (1) Fue transportada por el río o (2) Fue cubierta por sedimentos.

Hay una reorganización total del lecho entre observaciones, al ser el talweg la sección de más velocidad, estos cambios totales son esperables. En todas las observaciones hay transporte de bloques de más de 257mm, partícula definida como bloque en esta investigación. Esto nos trae una disyuntiva interesante; La información calculada en el capítulo 2 y relacionada con el RPAS nos da un panorama de estabilidad, pocos cambios y una aparente sensación de pocas o nulos cambios.

Pero la información sumergida muestra totalmente otro panorama, una inestabilidad importante, ocurren cambios en todas las observaciones. La fotogrametría sumergida nos muestra otra realidad de los procesos morfodinámicos, en este caso la sustitución de carga o transporte por arrastre y suspensión.

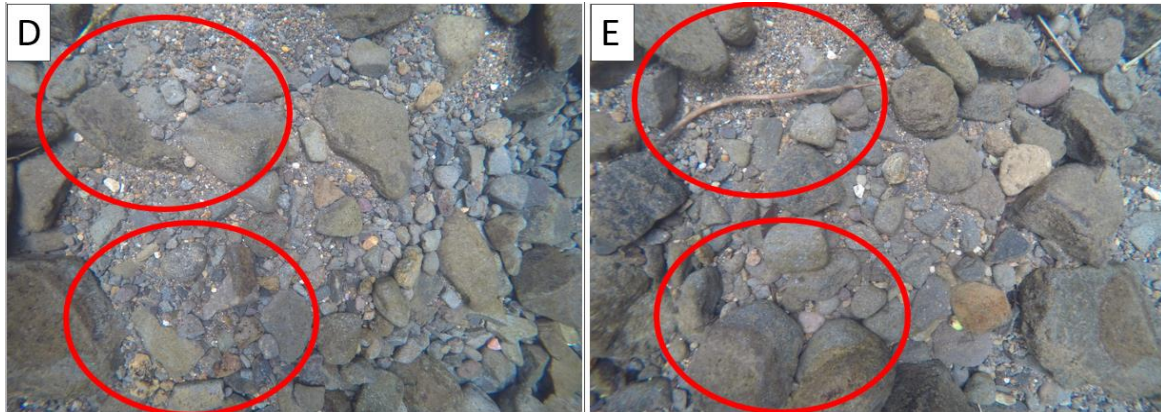


Figura 48. Cambios en el talweg entre la observación 4(D) y 5(E). Nótese como los cambios son absolutos. Elaboración propia.

La figura 48 muestra que no hay un patrón, o alguna partícula de referencia en las imágenes del talweg, entre todas las observaciones el cambio fue absoluto. Si relacionamos las observaciones laterales y del talweg con la precipitación observada y la velocidad calculada podemos notar diferencias notables. Por ejemplo, entre la observación 1(A) y 2(B) en la sección lateral, siempre se mantuvo de referencia un bloque localizado a la izquierda, además de algunas partículas que mantuvieron su posición. Mientras que entre las observaciones 3(C) Y 4(D) en el talweg todas las rocas fueron transportadas o cubiertas son sedimentos finos o bloques. En las zonas laterales se pudo tener un seguimiento de ciertas partículas aluviales, pero en la zona de talweg no se pudo identificar partículas en común entre observaciones. La siguiente figura muestra las diferencias entre la dinámica lateral y del talweg.

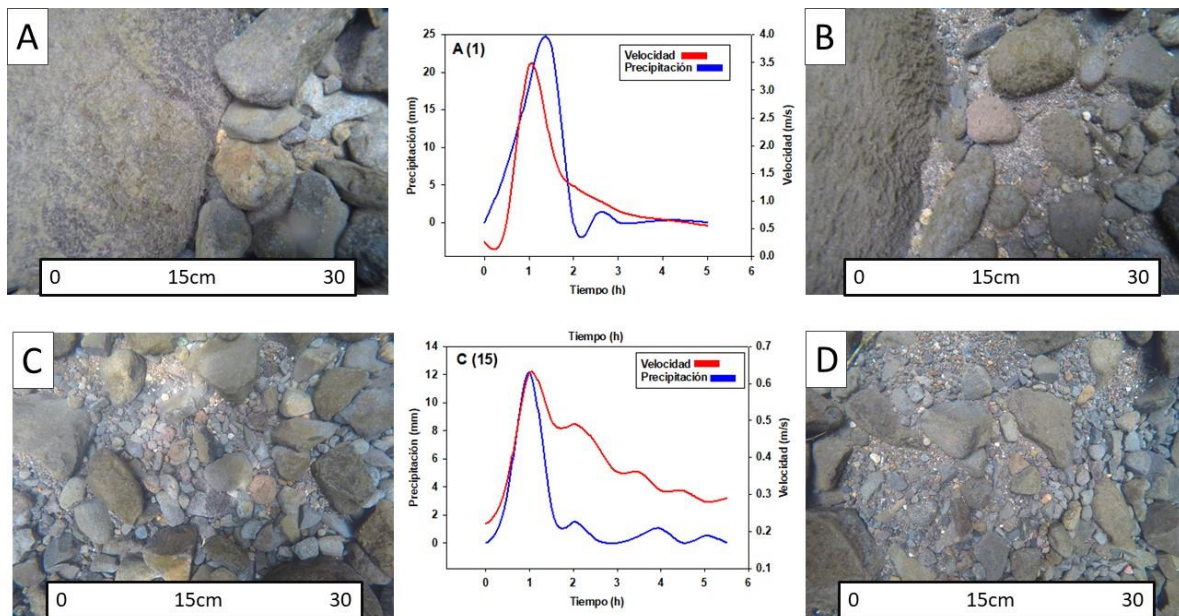


Figura 49. Relacionando precipitación y velocidad con cambios en la sección lateral (A-B) y la sección del talweg (C-D). Los eventos graficados corresponden al evento 1y 15

5.3 La ocurrencia de un evento extremo

En octubre de 2018 ocurrió un evento de precipitación de 173 mm en 13 horas, ocasionando velocidades del agua de hasta 12.91 m/s. Las siguientes 2 figuras muestran una comparación de antes y el después. Este fue el evento de mayor magnitud e intensidad registrado, y cambio por completo la geomorfología fluvial del río.

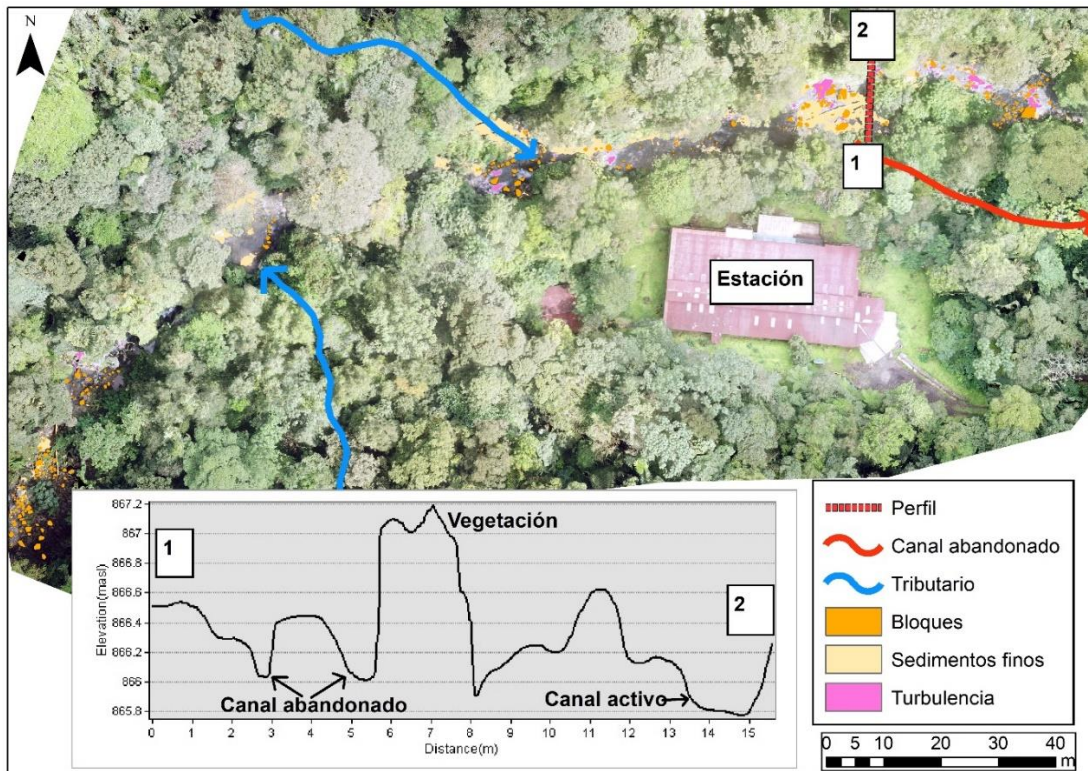


Figura 50. Observación RPAS 5 antes del evento extremo. Elaboración propia.

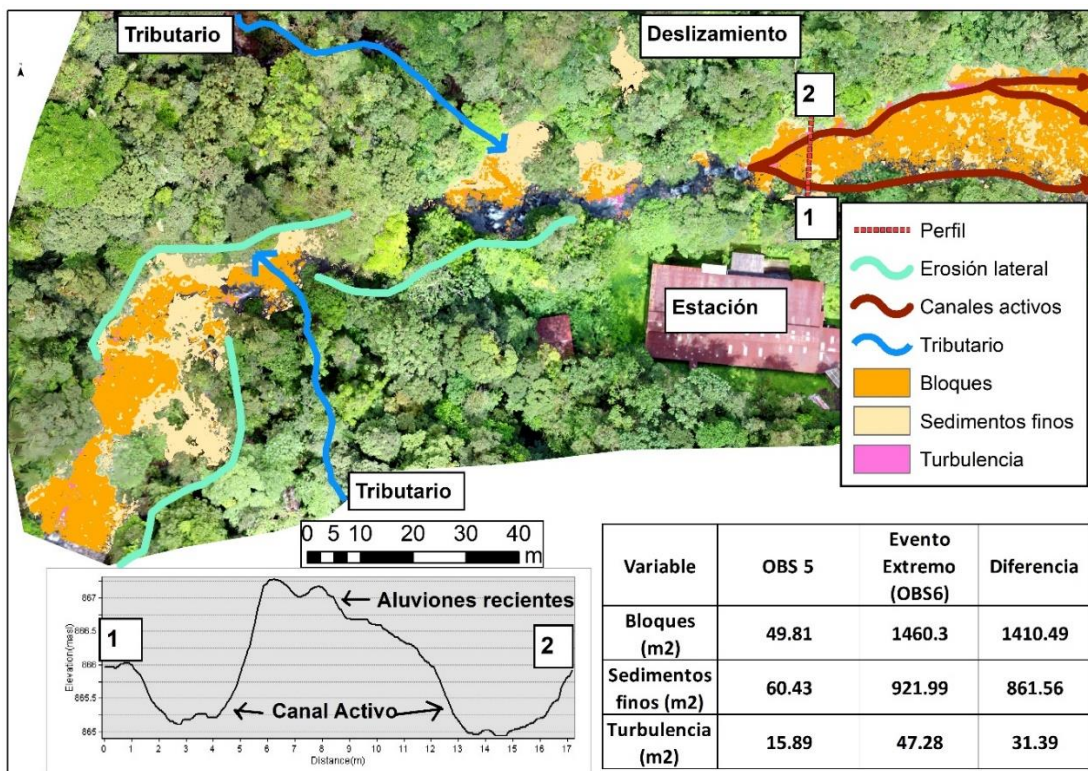


Figura 51. Observación RPAS 6 posterior al evento extremo. Elaboración propia.

Las figuras 50 y 51 muestran los drásticos efectos que tuvo este evento de precipitación en la geomorfología fluvial, para el análisis de cambios ocurrido por el evento extremo se utilizó una sección de 6963 m², se amplió considerablemente el área por las dimensiones del evento.

En la figura 51 se puede analizar las condiciones previas (Observación 5) al evento extremo, en esta observación el RPAS pudo detectar 49.8 m² de bloques, 60.43 m² y 15.8 m² de zonas turbulentas. La misma figura muestra también un perfil de elevación transversal de una sección del río (1) a (2). Este perfil muestra en su parte inicial un canal fluvial abandonado, en este canal posiblemente fluía agua antes del evento del 2015 descrito por Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017).

En la misma figura, si observamos el perfil de topográfico, podemos ver un aumento de elevación ocasionado por la vegetación, en este caso un árbol de unos 2.2m. Dicho árbol tuvo que haber crecido posterior al 2015 puesto que dicha sección coincidente con una isla fluvial había sido severamente erosionada por el evento del 2015. Lastimosamente, a el árbol nunca se le cuantificaron sus características ni se identificó su especie, pero claramente en este caso, se ilustra como la fotogrametría RPAS da información valiosa para la ecología acuática.

Continuando con el perfil de elevación, nos encontramos con un depósito de aluviones de unos 3m de espesor para luego llegar al canal activo donde fluía el agua anterior al evento extremo. Es decir, antes del evento extremo el agua fluía por la parte Norte de dicha sección del río, en la parte sur había un canal abandonado de unos 2m de profundidad máxima.

En la figura 50 también se pueden observar dos tributarios, uno al Norte y uno al Sur, ambos tributarios forman un abanico aluvial al descender de la ladera (Figura 25). En estos dos abanicos aluviales, Solano-Rivera y Granados-Bolaños documentaron grandes modificaciones durante el evento del 2015, fueron sitios donde bajó una gran cantidad de material de las laderas, aumentando el espesor del abanico en sí y causando una importante deflexión en el río, es decir causando una migración lateral del río.

Las migraciones del canal en el río San Lorencito son comunes después de eventos extremos (Solano-Rivera y Granados-Bolaños, 2017). Las figuras 50-51 muestran secciones donde el río inundó la terraza aluvial y erosionó severamente la misma, a pesar de ello gran cantidad de árboles soportaron la crecida y mantuvieron su posición, estas zonas fueron marcadas en

celeste como erosión lateral en la figura. Los árboles fueron golpeados por aluviones y mostraron marcas de la crecida, potencialmente algunos de ellos podrían servir para reconstrucciones dendrológicas de la inundación (Quesada-Román et al., 2020).

Durante eventos extremos una gran cantidad de árboles son derribados tanto en el río, en márgenes y e islas fluviales, pero también en las laderas por deslizamientos. Esto significa un aumento en el área detectable por el dron, al caer los árboles se abren espacios en el bosque para observar el suelo. En la sección fluvial el río ensancha la parte descubierta por vegetación, aumentando el área que el RPAS puede detectar. Por ello las diferencias entre los aluviones detectados, entre la figura 50 y 51.

La siguiente figura muestra el comportamiento hidrométrico del evento extremo

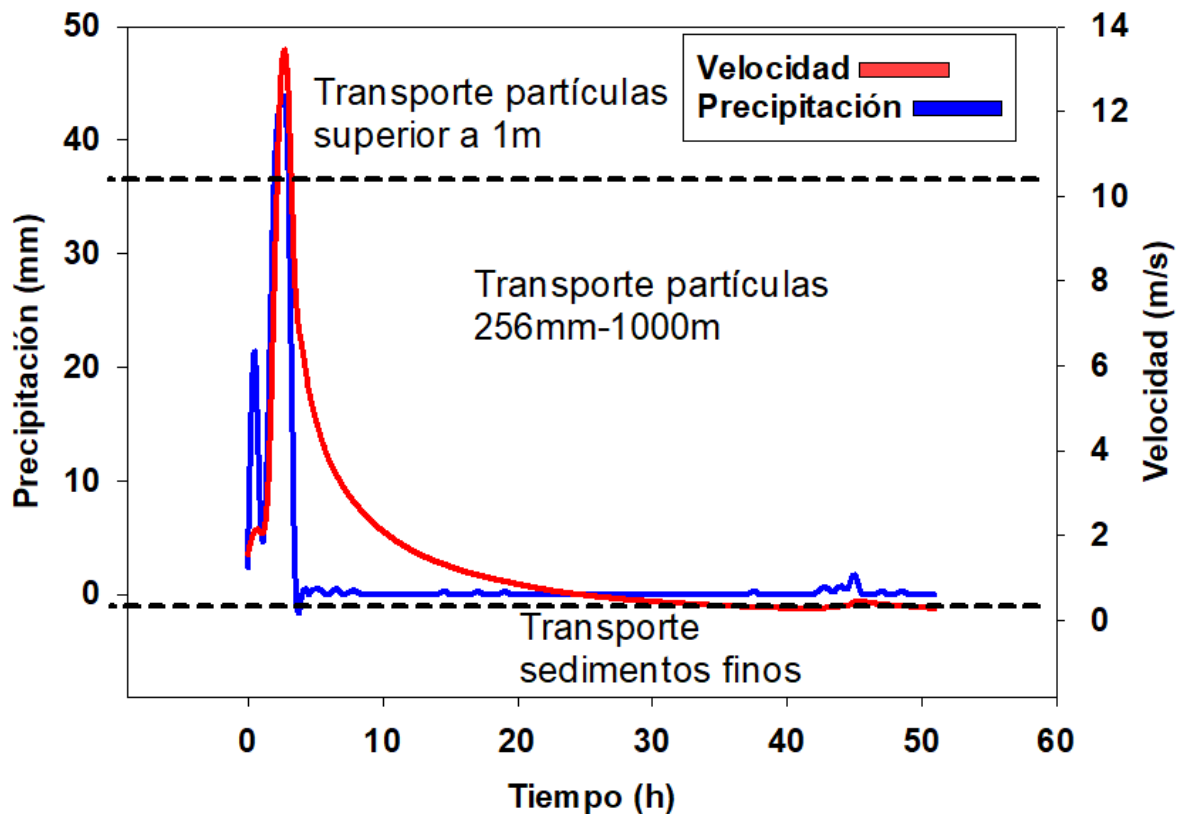


Figura 52. Comportamiento hidrométrico del evento extremo. El evento extremo alcanza el umbral de transporte de bloques en 2.5h y bloques mayores a 1m en 3.5h. Elaboración propia.

El evento extremo rápidamente empieza a transportar bloques y aluviones de gran tamaño, esto por la intensidad y magnitud de la precipitación. Algo notable es que la humedad antecedente de este evento fue poca, 17mm en los últimos 3 días. Entonces la saturación previa de los suelos y un nivel freático alto quizá no fue el factor relevante para explicar el evento, sino más bien la tormenta en sí, una celda convectiva posiblemente asociada a la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017) documentaron el evento extremo en agosto de 2015, en este caso el evento del 2018 ocurrió en octubre, aun cuando la ZCIT está sobre el país. Los mismos explican que la cuenca del río San Lorencito está permanentemente influenciada por la entrada de los vientos alisios, que generan eventos de precipitación durante todo el año, pero también está influenciada por la llegada de la ZCIT que genera lluvias convectivas sobre la cordillera de Tilarán y toda la formación geológica Monteverde en general.

En este caso creemos que fue la misma situación, una tormenta local convectiva que se estacionó sobre la cuenca y generó una importante cantidad de precipitación en muy poco tiempo. Una vez cesada la precipitación el río continuó transportando bloques durante al menos 25h. El transporte de material de más de 1m solamente duró 1h. Esto nos lleva a una conclusión interesante. Si vemos la tabla 5 acerca de la estadística descriptiva del transporte de material, durante el 2017 hubo 262h de transporte de arenas, 259.5h de grava y guijarros, 7.5h de bloques. Anteriormente mencionamos que hubo cambios sutiles y realmente poca reorganización del material aluvial emergido (porque refiriéndonos a los sumergido vimos otra dinámica).

Entonces, podríamos establecer que en el lapso de una hora hubo más cambios geomorfológicos en el río que en toda la época lluviosa del 2017. Este fenómeno se documentó en el 2015 por Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017).

La geomorfología fluvial del río San Lorencito se explica por los eventos extremos, al ser una cuenca de 3.2 km² el río en condiciones ordinarias no tiene la capacidad para transportar material de gran tamaño frecuentemente durante una época lluviosa o un año hidrológico. Resulta interesante que la mayoría de los aluviones del río son tienen tamaños entre los 50cm y 1m, tal y como lo vimos en los resultados anteriores. Estos aluviones solamente pueden

transportarse durante eventos extremos que ocurran en la cuenca, dado que simplemente no hay suficiente energía hidráulica para transportarlos en condiciones “normales”.

Esto nos lleva a cuestionarnos si realmente estamos hablando de eventos extremos en estos torrentes de montaña de la vertiente caribe. El periodo de recurrencia del evento del 2015 fue estimado en 50 años, este está cercano a ese rango. Sin embargo, ambos eventos ocurrieron en un lapso de 3 años, ¿esto nos lleva a cuestionarnos si desde un punto de vista geomórfico son eventos extremos?



Figura 53. Sección fluvial del río San Lorencito posterior al evento extremo (3 días). Nótese la gran cantidad de los árboles caídos acumulados, y un árbol que logro soportar la crecida y mantener su lugar. Elaboración propia.

5.4 Los procesos morfodinámicos del río San Lorencito

La siguiente figura muestra una síntesis de los procesos morfodinámicos del río San Lorencito.

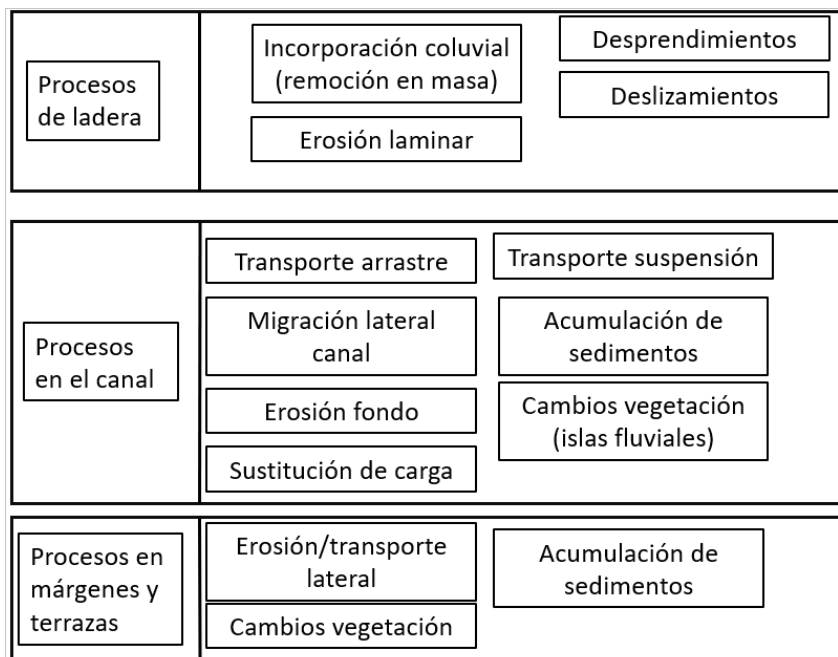


Figura 54. Procesos morfodinámicos del río San Lorencito. Elaboración propia.

Los procesos se pueden abordar desde 3 ambientes, la ladera, el canal y las áreas adyacentes al canal.

Las laderas son una fuente importante de sedimentos, gran cantidad de sedimentos que se encuentran en el río provienen de la ladera, principalmente por remoción en masa. Los deslizamientos y desprendimientos incorporan grandes cantidades de suelo, arena, y rocas al canal, algunos deslizamientos/desprendimientos pueden caer directamente en el canal, esto es frecuente observarlos en algunas secciones estrechas donde las laderas tienen fuertes pendientes, llegando incluso a los 90°.

En algunas ocasiones estos deslizamientos o desprendimientos pueden caer en tributarios y acumularse en los abanicos aluviales que se forman en la confluencia de los tributarios con el río. Los procesos de remoción en masa además de ser una fuente importante de material son también procesos morfodinámicos que pueden alterar el río en poco tiempo. Por ejemplo, un deslizamiento puede causar un desvío del río, cambiando las dinámicas de acumulación y erosión.

La erosión laminar por otro lado incorpora grandes cantidades de material fino (suelo, arenas, grava). Solano-Rivera y Granados-Bolaños (2017) demostraron que, a pesar de la cobertura

de bosque primario, hay altas tasas de erosión sobre los suelos de origen volcánicos de fuerte pendiente. También demostraron que hay una fuerte conectividad entre la ladera y el río, encontrando similitudes en términos de la morfología, oxidación, tamaño y mineralogía de las arenas encontradas en los suelos y los sedimentos finos del río y los tributarios. Los procesos de ladera incorporan material fresco que nunca ha sido transportado fluvialmente.

Adentro del canal, donde fluye el agua superficialmente, geomorfológicamente es posiblemente el ambiente más dinámico de la cuenca. Anteriormente explicamos que el río durante la época lluviosa del 2017 no tuvo mayores cambios en las áreas analizadas con el RPAS, pero la fotogrametría sumergida dio completamente otro panorama de lo que está ocurriendo en el río.

En canal, tanto en las observaciones RPAS como las sumergidas se pudo observar el transporte de material aluvial tanto suspendido (sedimentos finos) como por arrastre de fondo (bloques y sedimentos finos). Esto en las observaciones RPAS se puede ver como pequeños cambios en los bancos de sedimentos, terrazas y material aluvial en general. En las observaciones sumergidas podemos ver como algunas partículas quedan sepultadas por sedimentos finos o bloques luego de una crecida. Estos cambios en las observaciones sumergidas son evidencia de los procesos de transporte por arrastre y suspensión. El transporte de material también genera impactos y golpes entre las mismas partículas, generando fracturas y desprendimientos de las rocas, erosionando los aluviones y redondeando el material.

Las migraciones del canal luego de un evento extremo en un río con morfología trezada son comunes. El río puede cambiar su canal en pocas horas, sepultando el canal anterior con aluviones y formando un nuevo canal en el otro extremo. Las figuras 58 y 59 muestran evidencia de esto. Al cambiar la energía hidráulica cambian los patrones de erosión y acumulación. Las islas fluviales tienen un papel importante en los patrones de erosión y acumulación del río, estas desvían el río y en ocasiones los bifurcan. Las islas fluviales pueden desaparecer completamente, o aparecer en sitios donde no las había luego de un evento extremo.

Las islas fluviales pueden ser generadas también por el aporte de material de tributarios provenientes de la ladera. Estas islas fluviales pueden llegar a consolidarse y durar años en

el río antes que un evento ponga en tránsito de nuevo el material. La evidencia de esto está en árboles con edades estimadas superiores a los 50 años (Solano-Rivera y Granados-Bolaños, 2017). La vegetación juega un papel importante en la geomorfología fluvial del río San Lorencito. El sistema radicular de muchas especies del río contribuye a consolidar las islas fluviales, funcionan como un tejido que amarra las rocas con el árbol, ayudando fortalecer la isla fluvial ante las crecidas. Como se mencionó en el capítulo 1, hace falta más investigación acerca de las relaciones ecológicas entre los aluviones y los árboles.

Respecto a las márgenes del río podemos ver principalmente dos procesos de una manera simplificada. La erosión/transporte y la acumulación de material. Al ocurrir una crecida, el río puede poner en tránsito el material disponible en las márgenes del río, es decir poner a mover nuevamente el material que quedó de la última crecida. Una terraza aluvial está conformada por material transportado por el río, esta terraza puede desaparecer en cuestión de horas, iniciando nuevamente el transporte de dichas de las partículas. Por otro lado, una crecida podría más bien aportar material y aumentar su espesor ayudando a consolidar el depósito aluvial. Ambos procesos fueron observados posterior al evento extremo.

Una crecida puede causar la caída de gran cantidad de árboles en las márgenes del río, esto es importante para el monitoreo geomorfológico de ríos con RPAS porque aumenta el área que puede detectar la aeronave, esto precisamente es una limitación del RPAS, la incapacidad de ver debajo de la vegetación. Ahora, si la crecida provoca la caída de muchos árboles, esto significa en primer lugar aun aumento del material transportado por el río en forma de madera, pero también significa que el depósito o terraza donde estaba el árbol se debilita y queda más vulnerable a la erosión fluvial. Los cambios en la vegetación están intrínsecamente ligados con las crecidas del río.

5.5 Retomando las hipótesis planteadas en esta investigación

Las hipótesis planteadas en esta investigación son las siguientes.

- Nula (1) No existe una relación entre la precipitación y la velocidad del agua del río San Lorencito y los periodos de transporte de material aluvial.

- Alternativa (2) Existe una relación entre la precipitación y la velocidad del agua del río San Lorencito y los periodos de transporte de material aluvial.

Podemos afirmar que hay una intrínseca relación entre la precipitación-velocidad del agua y el transporte del material aluvial, esto desencadena cambios geomorfológicos con diferentes escalas espacio temporales. La hipótesis alternativa (2) se cumple fielmente y esta investigación lo demuestra con datos estadísticamente significativos.

Cada vez que llueve hay una reacción en el río, esta reacción inicia el transporte de sedimentos de diferentes tamaños en función de la magnitud, duración e intensidad de la lluvia. En algunas ocasiones estos cambios solamente pueden ser detectados debajo del agua, en otras ocasiones ciertos eventos de precipitación pueden generar cambios totales de la geomorfología fluvial. La lluvia es el causante de los aumentos de velocidad en el río que causan el movimiento de material aluvial. Hay una clara concatenación de causas fundamentadas en datos científicos rigurosos para afirmar que se cumple la hipótesis alternativa, descartando por defecto la nula (1)

6. Conclusiones

- El río San Lorencito tiene una geomorfología fluvial explicada por la ocurrencia de eventos extremos que causan una reorganización severa del material fluvial, la cuenca al ser tan pequeña no tiene el caudal necesario para mover anualmente rocas de más de 1m. La mayoría de las rocas disponibles en el ambiente fluvial tiene tamaños superiores a los 50cm y solamente durante ciertos eventos de precipitación se transportan dichas partículas
- Hay diferencias sustanciales entre los cambios detectados por el RPAS y la fotogrametría sumergida. Ambas técnicas muestran dinámicas espacios temporales, frecuencias y escalas distintas. Los cambios detectados por el RPAS mostraron cambios sutiles, mientras que los cambios sumergidos fueron drásticos durante el periodo de estudio.
- Las condiciones geológicas y geomorfológicas de la cuenca del río San Lorencito explican como un río tan pequeño puede aportar grandes cantidades de material en

poco tiempo, la neotectónica, la meteorización, las fuertes pendientes y la edad del material son factores claves a la hora de entender los procesos morfodinámicos del río.

- Al analizar con escalas detalladas con el RPAS, podemos afirmar que el río San Lorencito tiene un drenaje tranzado en algunas secciones y rectilíneo en otras. La mayoría de investigación caracteriza el río San Lorencito como rectilíneo, pero al observar la fotogrametría podemos ver que tiene secciones curvas, con múltiples canales y con islas fluviales a lo largo de su recorrido.
- Las islas fluviales y los abanicos aluviales causan deflexión en el río, pueden contribuir a la migración lateral del canal y alterar los procesos de acumulación y erosión en el río. Las islas fluviales del río San Lorencito requieren más investigación, especialmente en la relación de las raíces y los aluviones.
- El periodo lluvioso del 2017, como se mencionó en repetidas ocasiones fue relativamente seco en comparación al promedio de precipitación anual, a pesar de ello, hubo cambios severos, frecuentes y notables en las observaciones sumergidas. La fotogrametría sumergida permitió ver con gran detalle lo que está ocurriendo realmente en el río. El desarrollo de esta nueva metodología en ríos tropicales bajo condiciones similares puede dar nuevos panoramas acerca de la sedimentología de río de montaña.
- El río San Lorencito, a pesar de tener bosque primario en la totalidad de su pequeña cuenca, transporta gran cantidad de material aluvial. Este río es una pequeña muestra de los ríos de la vertiente caribe que descienden de estructuras volcánicas, hay una relación en el comportamiento geomorfológico de estos ríos y la formación de las llanuras aluviales del caribe y norte de Costa Rica. En este caso estamos viendo la degradación y meteorización intensa de una antigua estructura volcánica con clima tropical muy húmedo.
- Los perfiles estratigráficos de terrazas y depósitos aluviales mostraron una complejidad de procesos entrelazando procesos fluviales, de ladera, pedogénesis y en una ocasión muy particular transporte de material volcánico de forma eólica

(depósitos de ceniza). Este depósito de ceniza muy posiblemente está relacionado con alguna erupción del volcán arenal. Dataciones con termoluminiscencia podrían aportar información relevante para la interpretación geomorfológica de los eventos.

- El río cambió en términos de horas totalmente su geomorfología por evento de precipitación intenso. Los cambios fueron severos y superan todos los cambios detectados durante el 2017, es decir en unas pocas horas ocurrieron más cambios que en cientos de horas analizadas del 2017.
- La fotogrametría RPAS es una técnica valiosa para el estudio de ríos tropicales y ambientes fluviales en general, permite ver con detalle los cambios y geomorfología de secciones fluviales con alta resolución, la mayor limitante de la técnica está relacionada con el sensor que transporta (cámara digital), esta no es capaz de ver debajo de la vegetación, por lo cual tiene serias limitaciones en el trópico. La vegetación no solamente impide la detección del material aluvial y el suelo, sino también que representa un riesgo severo para la aeronave en términos de su despegue, aterrizaje y ruta de vuelo

7. Recomendaciones

Varias recomendaciones se derivan de esta investigación.

En primera instancia es necesario fortalecer la inversión por parte de la Universidad de Costa Rica en la RBAMB, la falta de financiamiento está afectando gravemente el funcionamiento de una estación con gran potencial para la investigación de los trópicos en general, la cantidad de publicaciones, datos, servicios ecosistémicos y especies descubiertas son una evidencia contundente de la importancia de la RBAMB, durante esta investigación también se pudo observar las dificultades que atraviesa la reserva biológica.

Respecto a como realizar vuelos automatizados RPAS en la RBAMB y ambientes similares. En primer lugar, se debe identificar claros de bosque que permitan un despegue y aterrizaje seguro, esto puede llegar a ser muy retador en ambientes similares, la vegetación llega a ser un obstáculo muy relevante para la ejecución de vuelos automatizados. En segundo lugar, es

prudente volar de aguas arriba (mayor altitud) hacia aguas abajo (menor altitud), ya que la vegetación en estos ambientes tiene irregularidades altimétricas importantes. Entonces, es más seguro siempre volar de mayor altitud hacia menor altitud.

Es necesario explorar las relaciones geomorfológicas-ecológicas de la vegetación en los canales, la relación del sistema radicular de los árboles y los depósitos aluviales merece una mejor profundización.

Respecto al fotogrametría sumergida. Es necesario ampliar los alcances y limitaciones del uso de cámaras sumergibles de bajo costo en ríos tropicales, podría tener aplicaciones en relevantes en la ecología acuática y sedimentología de los ríos de montaña.

8. Referencias

Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 138-146.

Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., ... & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for Small-Scale Flood Hazard Mapping. *Water*, 12(6), 1717.

Barry, A. J., Florence, P. R., & Tedrake, R. (2018). High-speed autonomous obstacle avoidance with pushbroom stereo. *Journal of Field Robotics*, 35(1), 52-68.

Becker, C., Häni, N., Rosinskaya, E., d'Angelo, E., & Strecha, C. (2017). Classification of aerial photogrammetric 3D point clouds. arXiv preprint arXiv:1705.08374.

Bergoeing, J. P. (2013). *Paisajes fluviales de Costa Rica= River landscapes of Costa Rica* (No. 551.483 B499p). EUNED.

Borreguero, D., Velasco, O., & Valente, J. (2019). Experimental design of a mobile landing platform to assist aerial surveys in fluvial environments. *Applied Sciences*, 9(1), 38.

Casado, M., Gonzalez, R., Kriechbaumer, T., & Veal, A. (2015). Automated identification of river hydromorphological features using UAV high resolution aerial imagery. *Sensors* (15) (11), 27969-27989.

Čejka, J., Bruno, F., Skarlatos, D., & Liarokapis, F. (2019). Detecting square markers in underwater environments. *Remote Sensing*, 11(4), 459.

Charlton, R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. New York: Taylor and Francis, Routledge.

Chatanantavet, P., & Parker, G. (2008). Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions. *Water Resources Research*, 44(12).

Chaves, R., & Sáenz, R. (1974). Geología de la Cordillera de Tilarán. Informe técnico, boletín, (53).

Chen, S., Laefer, D. F., Mangina, E., Zolanvari, S. I., & Byrne, J. (2019). UAV bridge inspection through evaluated 3D reconstructions. *Journal of Bridge Engineering*, 24(4), 05019001.

Corder, G. W., & Foreman, D. I. (2014). *Nonparametric statistics: A step-by-step approach*. John Wiley & Sons.

Denyer, P., & Alvarado, G. E. (2007). Mapa geológico de Costa Rica. Escala, 1:400000.

Denyer, P., & Kussmaul, S. (2012). Geología de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Ch, P. D., & Arias, O. (1991). Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*.

Durán, D. C., & Román, A. Q. (2017). Impacto de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica, periodo 2000-2015. *Geo Uerj*, (30), 440-465.

Eisenbeiß, H. (2009). UAV photogrammetry (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

- Eltner, A., Baumgart, P., Maas, H.-G., & Faust, D. (2015). Multitemporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 741-755.
- Figueira, W., Ferrari, R., Weatherby, E., Porter, A., Hawes, S., & Byrne, M. (2015). Accuracy and precision of habitat structural complexity metrics derived from underwater photogrammetry. *Remote Sensing*, 7(12), 16883-16900.
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A. K., Kukko, A., & Alho, P. (2013). Seamless mapping of river channels at high resolution using mobile LIDAR and UAV-Photography. *Remote Sensing* (5), 6382-6407.
- Gillot, P. Y., Chiesa, S., & Alvarado, G. E. (1994). Chronostratigraphy of upper Miocene-Quaternary volcanism in northern Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*.
- Granados-Bolaños, S., Quesada-Román, A., & Alvarado, G. E. (2021). Low-cost UAV applications in dynamic tropical volcanic landforms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 410, 107143.
- Grams, P. E., & Schmidt, J. C. (2005). Equilibrium or indeterminate? Where sediment budgets fail: Sediment mass balance and adjustment of channel form, Green River downstream from Flaming Gorge Dam, Utah, and Colorado. *Geomorphology*, 71(1-2), 156-181.
- Hackney, S. K., & Clayton, A. (2015). Unmanned Aerial Vehicles (UAV's) and thier aplication in Geomorphic mapping. *British Society for Geomorphology*. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/d8de/214f4acec509683e2b12aecece264a286c24.pdf>
- Hernández, A. (2010). Formaciones superficiales y procesos morfodinámicos en la cuenca del río Nosara. *Revista Reflexiones* 89 (2), 39-49.
- Hjulström, F. (1935). The Morphological Activity of Rivers as Illustrated by River Fyris. *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala*, v. 25., 442-452.

Horacio, J., Ollero, A., & Pérez-Alberti, A. (2015). Clasificación Morfodinámica en Geomorfología Fluvial y su Aplicación a la Restuaración de Ríos.

Hugget, J. R. (2011). Fluvial Environments. En *Fundamentals of Geomorphology* (págs. 187-247). New York: Taylor and Francis Group.

Kalacska, M., Lucanus, O., Sousa, L., Vieira, T., & Arroyo-Mora, J. P. (2018). Freshwater fish habitat complexity mapping using above and underwater structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 10(12), 1912.

Kussmaul, S. (2000). Estratigrafía de las rocas ígneas. En P. Denyer, & S. Kussmaul, *Geología de Costa Rica* (págs. 63-87). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Lane, S. N. (2000). The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 16(96), 937-961.

Langhammer, J., & Vacková, T. (2018). Detection and Mapping of the Geomorphic Effects of Flooding Using UAV Photogrammetry. *Pure and Applied Geophysics* (175), 3223-3245.

Latrubesse, E. M., Stevaux, J. C., & Sinha, R. (2005). Tropical rivers. *Geomorphology*, 70(3-4), 187-206.

Leopold, L. B., Wolman, M., & Miller, J. (1995). Water and Sediment in Channels. En *Fluvial Processes in Geomorphology* (págs. 150-197). New York: W. H Freeman and Company.

Lucieer, A., de Jong, S. M., & Turner, D. (2013). Mapping landslide displacements using structure from motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography* (38), 97-166.

Lugo, J. (2011). *Diccionario Geomorfológico*. Serie Textos Universitarios, Geografía para el siglo XXI: Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México.

Mano, V., Nemery, J., Belleudy, P., & Poirel, A. (2009). Assessment of suspended sediment transport in four alpine watersheds (France): influence of the climatic regime. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(5), 777-792.

Matthews, N., 2008. Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation. Denver, Colorado: Technical Note, 428 Bureau of Land Management.

Mazzoleni, M., Paron, P., Reali, A., Juizo, D., Manane, J., & Brandimarte, L. (2020). Testing UAV-derived topography for hydraulic modelling in a tropical environment. *Natural Hazards: Muñoz Jiménez, J. (1992). Geomorfología general. Síntesis, Madrid.*

Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, 103(1), 139-163.

Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596-611.

Morales, J. L. (1984). Efectos de alteración hidrotermal y meteorización en vulcanitas del Grupo Aguacate, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*.

Newson, M. D., & Newson, C. L. (2000). Geomorphology, ecology, and river channel habitat: mesoscale approaches to basin-scale challenges. *Progress in Physical Geography*, 24(2), 195-217.

Osterkamp, W. R. (1998). Processes of fluvial island formation, with examples from Plum Creek, Colorado and Snake River, Idaho. *Wetlands*, 18(4), 530-545.

Peppas, M. V., Hall, J., Goodyear, J., & Mills, J. P. (2019). PHOTOGAMMETRIC ASSESSMENT AND COMPARISON OF DJI PHANTOM 4 PRO AND PHANTOM 4 RTK SMALL UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*.

Pollio, J. (1968). Applications of underwater photogrammetry. *NAVAL OCEANOGRAPHIC OFFICE NSTL STATION MS*.

Popee, L., Eliason, A., Fredericks, J., Rendigs, R., Blackwood, D., & Polloni, C. (2000). *U.S. GEOLOGICAL SURVEY OPEN-FILE REPORT 00-358*. Recuperado el 27 de Setiembre de 2018, de

Quesada-Roman, A. (2017). Geomorfología Fluvial e Inundaciones en la Cuenca Alta del Río General, Costa Rica. *Anuario do Instituto de Geociencias 40(2)*, 278-88.

Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C., & Stoffel, M. (2020). Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. *Geomorphology*, 107133.

Quirós Rosado, E. M. (2014). Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Universidad de Extremadura, España.

Rainato, R., Mao, L., & Picco, L. (2020). The effects of low-magnitude flow conditions on bedload mobility in a steep mountain stream. *Geomorphology*, 107345.

Rosgen, D. L. (1994). A classification of natural rivers. *Wildland Hydrology, CATENA N °22*, 169-199.

Rossi, P., Castagnetti, C., Capra, A., Brooks, A. J., & Mancini, F. (2019). Detecting change in coral reef 3D structure using underwater photogrammetry: critical issues and performance metrics. *Applied Geomatics*, 1-15.

Sarakinou, I., Papadimitriou, K., Georgoula, O., & Patias, P. (2016). Underwater 3D modeling (No. IKEECONF-2016-300). Aristotle University of Thessaloniki.

Schutz K., 1987: Marco vulcanológico de los yacimientos auríferos de la Cordillera de Tilarán y Grupo Aguacate. USGS

Sistema Nacional de Información Territorial . (17 de Diciembre de 2019). *Hidrografía a escala 1:5000 de Costa Rica*. Obtenido de <http://www.snitcr.go.cr/Visor/index?k=Y2FwYTo6SUdOXzU6OmhpZHJvZ3JhZmlhXzUwMDA=>

Solano, V., & Granados, 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. *Trabajo Final de Graduación para optar por el título de Licenciatura en Geografía de la Universidad de Costa Rica*, 1-89.

Solano-Rivera, V., Geris, J., Granados-Bolaños, S., Brenes-Cambronero, L., Artavia-Rodríguez, G., Sánchez-Murillo, R., & Birkel, C. (2019). Exploring extreme rainfall impacts on flow and turbidity dynamics in a steep, pristine, and tropical volcanic catchment. *Catena*, 182, 104118.

Sinha, R., & Latrubesse, E. M. (2020). Geomorphology of fluvial systems: Focus on tropical rivers. *Geomorphology*, 363, 107223.

Tricart, J. (1972). *The Landforms of the Humid Tropics, Forests and Savannas*. Strasbourg: Centre de Géographie Appliquée.

UCR, ACCVC, & Natural, O. (2008). *Plan General de Manejo de la ReBAMB*. Recuperado el 17 de Diciembre de 2018, de Biblioteca Conmemorativa Orton: http://biblioteca.catie.ac.cr:5050/repositorioforestal/bitstream/123456789/6562/1/Plan_General_de_Manejo_RB%20Alberto%20Manuel%20Brenes.pdf

Vargas, G. (1978). Diagnóstico y recomendaciones para el manejo y ordenamiento de los recursos naturales en la cuenca del río San Lorenzo, Alajuela, Costa Rica. Tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad de Costa Rica.

Westaway, R. M., Lane, S. N., & Hicks, D. M. (2001). Remote sensing of clear-water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(11), 1271-1282.

Wentworth, C. (1929). Method of computing mechanical composition of sediments. *Geological Society of America Bulletin*, v. 40, 771-790.

Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* (179), 300-314.

Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budget. *Earth Surface Processes and Landforms*, 136-156.

Wintenberger, C. L., Rodrigues, S., Bréhéret, J. G., & Villar, M. (2015). Fluvial islands: First stage of development from nonmigrating (forced) bars and woody-vegetation interactions. *Geomorphology*, 246, 305-320.

Woodget, A., Austrums, R., Maddock, I., & Habit, E. (2017). Drones and digital photogrammetry: from classifications to continuums for monitoring river habitat and hydrogeomorphology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, <https://doi.org/10.1002/wat2.1222>.

Wohl, E. E., & Merritt, D. M. (2001). Bedrock channel morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 113(9), 1205-1212.

Wyrick, J. R. (2005). On the formation of fluvial islands. Graduate thesis, University of Oregon State.

Church, M., & Zimmermann, A. (2007). Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research*, 43(3).

Zapata Ocampo, O. D. J. (2003). Fundamentos de fotogrametría para imágenes de contacto y digitales. Universidad de la Rioja, España.

Zhu, Q., Li, Y., Hu, H., & Wu, B. (2017). Robust point cloud classification based on multi-level semantic relationships for urban scenes. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 129, 86-102.

Zuecco, G., Penna, D., Borga, M., & Van Meerveld, H. J. (2016). A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale. *Hydrological Processes*, 30(9), 1449-1466.