

**DENDROGEOMORFOLOGÍA APLICADA A LA EVALUACIÓN DE AVENIDAS
TORRENCIALES EN LA QUEBRADA JUAN GARCÍA, AFLUENTE DEL RÍO
CAUCA, ANDES DEL NORTE, COLOMBIA.**

Presentado por:

Santiago Yepes Bonilla – Universidad EAFIT, Medellín

David Alejandro Urueña Ramírez – UNAL, Medellín

Trabajo presentado como requisito para optar al título de Geólogo

Directores

María Isabel Marín Cerón, Ph.D.

Sergio Andrés Restrepo Moreno, Ph.D.

Santiago Noriega Londoño, candidato Ph.D.

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la Tierra

Medellín, Colombia

2021

©

Contenido

Resumen

Contenido	2
Lista de figuras	3
1. Introducción	6
2. Localización	10
3. Materiales y Métodos	14
3.1. Conformación de base de datos:	14
3.2. Análisis Morfométrico, geomorfológico y estratigráfico de la Cuenca de la QJG	16
3.2.1. Morfometría de la cuenca de la QJG y la Quebrada Juan Barriga (QJB)	16
3.2.2. Cartografía geomorfológica del Área de Estudio	17
3.2.3 Análisis y levantamiento estratigráfico de los depósitos en el área de estudio.....	18
3.3. Técnicas dendrogeomorfológicas	18
3.3.1. Potencial dendrocronológico en la zona de estudio	20
3.3.2. Identificación de Indicadores Dendrogeomorfológicos (FDE)	23
3.3.3. Estimación de paleoniveles de corriente por medio de alturas de cicatrices de impacto en troncos	23
3.4. Análisis hidrológico y modelamiento paleohidráulico de AT	26
3.4.1. Análisis hidrológico	26
3.4.2. Modelamiento Paleohidráulico en IBER.....	27
3.4.3. Análisis y estimación de caudales.....	29
4. Resultados	29
4.1. Conformación de Base de Datos	29
4.1.1. Estado del arte de la dendrogeomorfología en el trópico y en Colombia	29
4.1.2. Recopilación histórica de eventos hidrometeorológicos reportados en la Cuenca de la QJG	33
4.1.3. Estimación de caudales y aforos en la Cuenca de la QJG	37
4.2. Análisis morfométrico geomorfológico y estratigráfico de la cuenca QJG	37
4.2.1. Morfometría	37
4.2.2. Análisis Geomorfológico	41
4.2.3. Levantamiento de columnas estratigráficas	41
4.3. Inventario dendrogeomorfológico	44
4.4. Análisis hidrológico y modelamiento hidráulico	49
4.4.1. Análisis hidrológico	49
4.4.2. Modelamiento y análisis hidráulico	52

5. Discusión	55
5.1. Alcance de la aplicación de la dendrogeomorfología para el análisis de AT.	55
5.2. Relación de registro de eventos históricos con el análisis hidrometeorológico.	56
5.3. Nueva metodología con aplicaciones dendrocronológicas	58
6. Conclusiones	61
Anexos.....	62

Lista de figuras

Figura 1: Localización de la cuenca de la QJG.....	11
Figura 2: Metodología del proyecto.....	15
Figura 3: Medición en campo de espesor de depósito aluviotorrencial en la QJB.	19
Figura 4: Distribución de los 344 estudios en el trópico.	21
Figura 5: Principales tipos de evidencias dendrogeomorfológicas.....	23
Figura 6: Indicadores de paleonivel dendrogeomorfológicos.....	24
Figura 7: Imágenes de la medición de las alturas de los golpes y el muestreo sistemático de cuñas y testigos.....	25
Figura 8: Estudios dendrocronológicos en Colombia.....	34
Figura 9: Parámetros Morfométricos.	39
Figura 10: Curva hipsométrica e Histograma de Frecuencias	40
Figura 11: Mapas geomorfológicos	41
Figura 12: Columnas estratigráficas	42
Figura 13: Clasificación de los principales indicios o indicadores dendrogeomorfológicos.....	44
Figura 14: indicadores dendrogeomorfológicos de árbol o arbusto completo.....	45
Figura 15: Indicadores dendrogeomorfológicos de troncos.....	45
Figura 16: Indicadores dendrogeomorfológicos de ramas.	46
Figura 17: Indicadores dendrogeomorfológicos de raíces.	46
Figura 18: Potencial dendrocronológico con la presencia de anillos y posibles golpes cicatrices registradas.....	47
Figura 19: Precipitación media mensual de la estación La Placita	49
Figura 20: Gráfico de precipitación media anual.....	50
Figura 21: Fluctuación de la precipitación media mensual separadas por periodos ENSO	51
Figura 22: Comparación de ECM para distintos caudales.....	52

Figura 23: Caudales modelados contra ECM	52
Figura 24: Comparativa de caudal con menor ECM con las alturas de los PSI medidos.....	53
Figura 25: Desviaciones absolutas (en m) de PSI observadas en troncos de árboles y modeladas con Iber.....	53
Figura 26: Ejemplo de reconstrucción dendrocronológica de eventos	55
Figura 27: Gráfico de precipitación media mensual y su relación con el caudal medio.	56
Figura 28: Ocurrencia de eventos de AT y otros eventos como movimientos en masa	57
Figura 29: Meses con ocurrencia de avenidas torrenciales y su relación con el régimen pluviométrico diario	58
Figura 30: Diagramas de caja con el ECM calculado entre el caudal máximo medido con los PSI y el modelado como función de la posición geomorfológica de los árboles (Canal y Terrazas)...	59

Lista de Tablas

Tabla 1 Especies de árboles seleccionadas utilizadas en este estudio para estudios dendrogeomorfológicos.....	27
Tabla 2 Parámetros utilizados para el modelamiento en IBER.....	33
Tabla 3 Estudios Dendrogeomórfologicos en el Trópico.....	35
Tabla 4: Cronología de eventos torrenciales ocurridos en la cuenca de la QJG entre 1931 y 2019..	37
Tabla 5: Medición de caudales En la QJG y la QJB.....	40
Tabla 6: Tabla de datos con las características de las cicatrices utilizadas como indicadores de paleonivel (PSI).....	51
Tabla 7 Precipitación mensual media, mínima y máxima según los datos obtenidos de la estación "La Placita".....	52

Lista de Anexos

Anexo 1 Parámetros morfométricos analizados en la cuenca del QJG y QJB	62
---	----

We have many faults, but they are all normal

Mike Harris

Para agradecer a las personas que han incidido en mi vida, tendría que escribir un libro de mayor dimensión que este proyecto de grado, sin embargo, la resultante sería que todas ellas me han inducido a ser la persona que hoy soy; sin importar su manera de influir, cada una aportó a moldear un sujeto interesado por la ciencia, con un distintivo esencial, ese distintivo que todos debemos tener para exaltar nuestro crecimiento, más que un sujeto aislado, es el sujeto social.

Santiago Yepes Bonilla.

Se supone que los protagonistas de estas líneas de agradecimiento deben ser aquellas personas que te han ayudado a ser la persona que eres, y créanme que estoy inmensamente agradecido ya que han aportado a que me construya como un ser crítico y pensante. Sin embargo, hay algo que no puedo dejar de pensar en este preciso instante y es que mientras escribo estas palabras, la juventud está en las calles exigiendo mejores oportunidades de tener una vida digna y reciben como respuesta: balas. Me siento orgulloso al saber que tuve la posibilidad de estudiar en una Universidad Pública y es por esto que agradezco desde el corazón, el hecho de seguir dedicando mis capacidades durante cada segundo que me queda de vida, para que esos jóvenes que están siendo reprimidos en las calles, tengan la misma oportunidad que yo tuve. Viva el Paro Nacional.

David Alejandro Urueña Ramírez

Especial agradecimiento a las personas con las que convivimos en nuestro diario vivir que han estado pendientes de nuestro desarrollo y responsabilidades, durante nuestras extenuantes jornadas de campo, nuestras familias que siempre nos han apoyado a llevar a buen término esta maravillosa Carrera. Agradecemos a los profesores María Isabel Marín y Sergio Restrepo, por su acompañamiento y revisión de este proyecto y especialmente a Santiago Noriega, quien nos orientó en todo el desarrollo del proyecto, compartió su conocimiento y nos brindó acompañamiento oportuno durante el desarrollo de la presente investigación, además que nos abrió las puertas para trabajar en conjunto con ambas universidades.

Santiago Yepes Bonilla; David Alejandro Urueña Ramírez

DENDROGEOMORFOLOGÍA APLICADA A LA EVALUACIÓN DE AVENIDAS TORRENCIALES EN LA QUEBRADA JUAN GARCÍA, AFLUENTE DEL RÍO CAUCA, ANDES DEL NORTE COLOMBIA

Resumen: La estimación de caudales máximos de las cuencas intramontanas suele hacerse por métodos convencionales cuyos resultados son poco confiables debido a la falta de datos sistemáticos o por errores de medición de las estaciones de aforo o la ausencia de estas. En este trabajo se evalúa la efectividad del análisis de avenidas torrenciales por medio de indicadores de paleonivel (PSI) evidenciados en indicadores dendrogeomorfológicos (FDE) como las cicatrices en el tronco de los árboles por el impacto de carga sólida. Para ello se recolectaron 109 datos de árboles con cicatrices en tres tramos de la cuenca de la Quebrada Juan García, probando su potencial como PSI. Además, se obtuvieron modelos de elevación de superficie de 0.33m de resolución para realizar un modelo hidráulico con el fin de obtener caudales máximos para calcular los errores cuadráticos medios entre los PSI y los modelos simulados. El resultado del caudal obtenido fue de 123.5m³/s. Además, se presenta un inventario de evidencias dendrogeomorfológicas, indicando las especies y la factibilidad de realizar un análisis dendrocronológico para una mejor comprensión temporal de las Avenidas torrenciales ocurridas en la cuenca de la Quebrada Juan García, afluente del Río Cauca en el Municipio de Liborina, Antioquia.

Palabras clave: Avenidas torrenciales; Dendrogeomorfología; indicadores de paleonivel; caudal máximo; Cordillera Central; Antioquia; Río Cauca; Liborina; Trópico; geomorfología tropical.

Abstract: Estimation of peak discharge of the intramontane basins is usually undertaken by conventional methods with somewhat unreliable results due to the lack of systematic data, measurement errors of the gauging stations, and/or the absence of the latter. In this study, the effectiveness of torrential flood analysis is evaluated by means of paleostage indicators (PSI) evidenced in flood dendroevidence (FDE) such as scars on tree trunks due to the impact of solid load. For this, data from a 109 scars trees were collected in three sections of the Quebrada Juan García basin, testing their potential as PSI. In addition, surface elevation models with a spatial resolution of 0.33m were obtained to develop hydraulic models and obtain maximum flow rates, which allow to calculate the mean square errors between the PSI and the simulated models. The result of the flow obtained was 123.5 m³/s. In addition, an inventory of dendrogeomorphological evidence is presented, indicating the suitability of several species for carrying out a dendrochronological analysis that would permit a better temporal understanding of the torrential floods that occurred in the Quebrada Juan García basin, major tributary of the Cauca River, in the Municipality of Liborina, Antioquia.

Key words: Debris flow; Dendrogeomorphology; Paleostage indicators; Peak discharge; Central Andean cordillera; Liborina; Antioquia; Cauca River; Liborina; Tropics; tropical geomorphology.

1. Introducción

La definición más clásica que se tiene de las avenidas torrenciales (AT) proviene del término “flujo de escombros” los cuales fenómenos que inician como una inundación en torrentes de montaña, con una importante carga de sedimentos de fondo y en suspensión, y que, de acuerdo con el incremento en el volumen de sedimentos, cambia a una masa viscosa de agua, sedimentos y madera mezclados Stiny, 1910. Además, Hungr et al., 2005 propone utilizar el término flujo de escombros para cubrir un rango amplio de flujos, que incluyen los fenómenos iniciales de origen gravitacional en las laderas de la cuenca, que aportan una gran cantidad de sedimentos a los cauces de montaña, y que se transforman a flujos rápidos a lo largo de cauces confinados de fuerte pendiente, que terminan depositándose como abanicos. En una recopilación bibliográfica para definir el concepto de AT, se describen como fenómenos súbitos, generados por lluvias concentradas intensas o lluvias antecedentes, enjambres de movimientos en masa, sismos, rotura de presas naturales o artificiales, o aporte de grandes volúmenes de agua por deshielo (Aristizábal et al., 2020). Las AT son eventos morfoclimáticos recurrentes en el trópico y de gran impacto en cuencas intramontanas que presentan abundantes bloques en el cauce y morfología del drenaje de gran longitud, con cambios bruscos de pendiente y fundamentalmente presentan matriz arenosa en sus depósitos (Caballero-Acosta, 2012).

En zonas montañosas tropicales, la dinámica de las cuencas hidrográficas se ve fuertemente influenciada por el comportamiento de la zona de convergencia intertropical, convirtiéndolas

en cuencas susceptibles a fenómenos torrenciales, mientras que las poblaciones que las habitan presentan alta vulnerabilidad ante los peligros asociados a eventos de AT asociados al cambio climático (Quesada-Román et al., 2020). Según el Servicio Geológico Colombiano (2017), factores morfométricos y climáticos de una cuenca hidrográfica, como el área total, la forma, la pendiente, el relieve relativo, la distribución de lluvia, la distribución y tamaño de sedimentos en los cauces, el grado de fracturamiento del basamento, el tipo de cobertura vegetal, entre otros, condicionan la probabilidad de ocurrencia de AT. Solo en la región Andina de Colombia se han reportado más de 800 eventos de torrencialidad entre 1920 y 2018, con un total de víctimas fatales superior a 1800 y un total de afectados de más de 550.000 personas, así como numerosos daños a infraestructura de transporte y habitacional (Aristizábal et al., 2020).

Sin embargo, cuando se carece de información específica para las cuencas (e.g., precipitación, descarga, etc.), por la falta de datos pluviométricos y de caudal con series de al menos 30 años, o cuando las estaciones de medición de caudales no registran correctamente los datos durante eventos extremos, ya sea por daños en los correntómetros, o porque la descarga excede el nivel registrable, la comprensión de la ocurrencia espacial y temporal de los procesos torrenciales se vuelve muy imprecisa (Yanosky & Jarrett, 2002).

En los casos en los que la información es escasa, se acude a diferentes técnicas complementarias, una de ellas es la dendrogeomorfología (Benito & Díez-Herrero, 2015; Díez Herrero, 2015). La dendrogeomorfología permite la reconstrucción de la actividad geomorfológica de una zona fluvial, a partir de la información preservada en los anillos de

crecimiento de los árboles que aún permanecen en el cauce (Alestalo, 1971). Esta metodología se ha empleado durante las últimas décadas para interpretar procesos geomorfológicos ocurridos en ambientes aluviales, con el fin de analizar los cambios y las alteraciones en el relieve, la génesis de los eventos, la distribución espacial y la evolución temporal del relieve terrestre, además de otros (Ballesteros-Canovas et al., 2010; Andres Díez-Herrero et al., 2007; Quesada-Román et al., 2020; Šilhán, 2021; Stoffel & Bollschweiler, 2008).

De manera complementaria, la dendrocronología es la ciencia que estudia los cambios y modificaciones de las células que conforman los anillos de crecimiento de las plantas leñosas, en función de las condiciones ambientales del sitio donde se encuentra la planta (Giraldo Jiménez, 2011). Para Kaennel y Schweingruber (1996), las modificaciones que se presentan en los anillos de crecimiento pueden ser interpretadas y datadas mediante la obtención de información ambiental como la medición del ancho de los anillos, la densidad intraanular de la madera, la densidad de poros, el contenido de isótopos (^{14}C , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$), entre otras técnicas. Es importante indicar que el registro de procesos geomorfológicos en arboles puede preservarse con mayor facilidad cuando está asociado a un daño mecánico que se registra en la anatomía de la madera.

Numerosos estudios dendrogeomorfológicos se han realizado en el mundo, como lo plantea Ballesteros-Canovas et al. (2010), quien realizó una recopilación de todos los estudios sobre el tema. Sin embargo, la mayoría de estos se han concentrado en zonas templadas y en entornos montañosos de Europa y América del Norte. Los estudios de este tipo en ambientes

tropicales se encuentran en una etapa exploratoria, indicando la presencia de anillos en especies tropicales susceptibles de ser utilizados para el trabajo en dendrocronología (Brienen et al., 2016). Lo anterior pone de presente la necesidad de realizar estudios que utilicen los anillos de los árboles en regiones tropicales, y particularmente en la región del Norte de los Andes, con el fin de mejorar los enfoques y métodos comúnmente utilizados para este tipo de investigaciones, y así mejorar nuestra comprensión de los procesos geomorfológicos como las AT y los peligros y riesgos naturales asociados a estas (M. Stoffel & Bollschweiler, 2008).

En el trópico, la dendrocronología ha sido aplicada con éxito en disciplinas como ecología, climatología, geomorfología, isótopos estables, actividad solar y cambio climático (Giraldo Jiménez, 2011). En Colombia, aún no hay estudios consolidados para el monitoreo y análisis de AT a partir de técnicas dendrogeomorfológicas, sin embargo, algunos avances se han realizado al integrar la dendrocronología en estudios paleohidrológicos y paleoclimáticos como ha sido varias técnicas de datación para la reconstrucción de pulsos de inundación y para la interpretación de variables climáticas locales, especialmente la precipitación y diferentes índices del ENSO (e.g., Jiménez & del Valle Arango, 2011; Rivera Builes, 2013).

El estudio de las AT por medio de procedimientos dendrogeomorfológicos, requiere integrar distintas técnicas y métodos relacionados con la dendrocronología, incluyendo entre otros la aplicación de la botánica, la ecología, la fisiología, anatomía e histología vegetal, con los estudios de dinámica fluvial basados en la hidrología, la hidráulica, la geomorfología, la estratigrafía, entre otros. Todo lo anterior obliga a una integración del trabajo de campo y de laboratorio para la obtención de datos y su posterior tratamiento e interpretación (Díez-Herrero et al., 2007).

Este estudio tiene como **objetivo general**, integrar técnicas geomorfológicas, dendrocronológicas e hidrológicas (paleohidrológicas y modernas), para caracterizar los eventos torrenciales presentados de las últimas décadas en la cuenca la Quebrada Juan García (QJG), ubicada en el Municipio de Liborina, Antioquia. Esta cuenca se encuentra fuertemente influenciada por la tectónica local, por lo que presenta una amenazas por inundación, represamientos, socavación de puentes, desbordamientos, movimientos en masa relacionados a su vez a eventos sísmicos.

Los resultados obtenidos sugieren que la cuenca de la QJG posee un comportamiento torrencial en el largo plazo, evidenciado por la morfología de la cuenca y el registro estratigráfico en los canales y terrazas. El comportamiento torrencial está regulado por la morfología de la cuenca, el grado de fracturamiento de la roca, el clima y la tectónica local. En el corto plazo, los registros históricos e instrumentales indican la ocurrencia de **AT** sin una relación directa con los registros de precipitación, sin embargo, fue posible estimar un caudal máximo de 123,52 m³/s, a partir de indicadores de paleonivel registrados en especies forestales ripiaras para los eventos torrenciales de los años 1972, 1996, 2009 y 2014, obtenidos a partir de los datos de DesInventar (<https://db.desinventar.org/>).

2. Localización

La QJG se ubica en la subregión del Occidente Medio del departamento de Antioquia, específicamente en las estribaciones del flanco occidental de la Cordillera Central, en el Municipio de Liborina (Figura 1), en cuya cabecera municipal habitan aproximadamente 2.296 personas (DANE, 2018). La cuenca de la QJG posee una distribución de elevaciones

entre un máximo de 3200 m en la superficie de erosión (L.A. Arias, 1996; Page, 1986) en inmediaciones de San José de La Montaña y el Páramo de Santa Inés, y un mínimo cercano a los 450 m en su desembocadura en el Río Cauca, este último una de las principales redes fluviales intramontanas en los Andes del Norte. Los polígonos seleccionados para el presente trabajo se distribuyen desde los 450 hasta los 780 msnm (Figura 1), donde la temperatura generalmente varía de 21 °C a 30 °C. Localmente la zona presenta una precipitación promedio de 2114 mm/año con máximos y mínimos de 3345 y 1131 mm/año, respectivamente, indicando que la zona de estudio se ubica en la transición entre el Bosque Húmedo Tropical y el Bosque Seco Tropical (Holdridge et al., 1971).

La geología regional de la zona está comprendida por bloques lito-estructurales como los representados por los “terrenos” de Tahamí, Calima, Nutabe e Ituango enmarcados en la zona de falla Cauca Romeral (*sensu* Restrepo & Toussaint, 2020) o por los bloques definidos por Cediel et al (2003) como el Bloque Panamá chocó, el Bloque Norandino y la placa suramericana. El cañón del Río Cauca se encuentra controlado tectónicamente por la zona de deformación del Sistema de Fallas de Cauca Romeral y otros sistemas de fallas en el flanco occidental de la cordillera central, lo que genera una transición compleja entre las superficies elevadas de bajo relieve en el Altiplano Antioqueño y el cañón profundamente incisado del Río Cauca (Arias, 1996; Bustos et al., 2013; Page, 1986; Noriega-Londoño et al., 2020; Noriega-Londoño et al., en preparación).

Más localmente, y desde el punto de vista estructural, la zona de estudio está controlada por el Sistema de Falla de Sabanalarga, el cual consta de dos ramales principales denominados Sabanalarga Este y Oeste, y regionalmente ambos se extienden por más de 90 km, desde la

localidad de Liborina en el sur hasta el valle alto del río San Agustín en el departamento de Córdoba (Gallego Montoya, 2018). Según algunos autores (e.g., Villegas Gutiérrez, 1980), este sistema de falla está activo con una tasa de deslizamiento inferior a 0,3 mm / año. Por otra parte, se identifican varios grupos de lineamientos clasificados según su dirección, entre los cuales se encuentra uno con tendencia general hacia el $N30^{\circ} - 45^{\circ} E$, coincidiendo con el Sistema de Falla Espíritu Santo y sus conjugados (Luis Alberto Arias & James, 1981; Gallego Montoya, 2018).

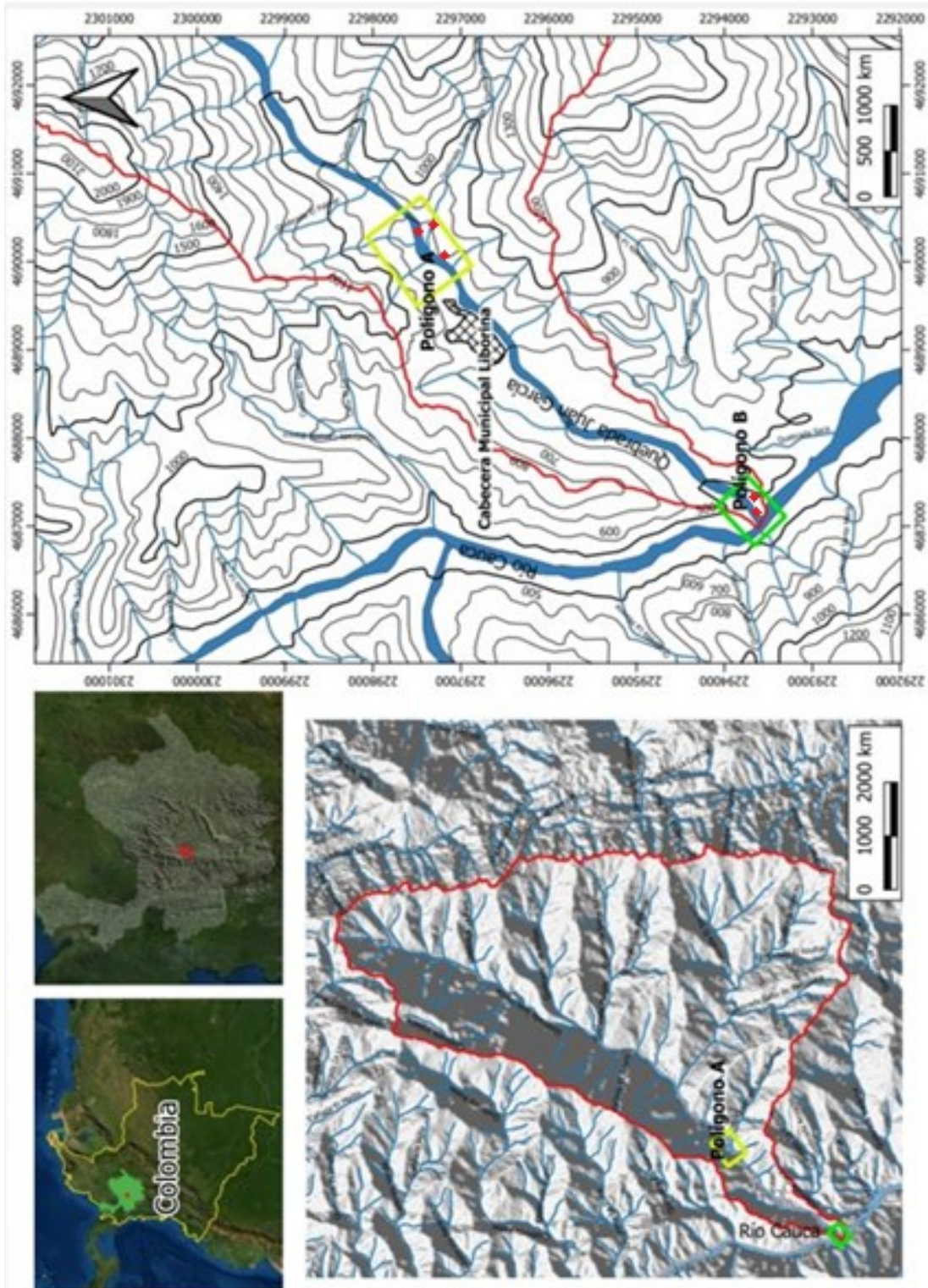


Figura 1: Localización de la cuenca de la QJG en inmediaciones de su desembocadura en el Río Cauca. Los polígonos seleccionados para el estudio detallado de la torrencialidad en la Cuenca son el Polígono A en amarillo y el B en verde, Los puntos rojos corresponden a los lugares donde se tomó el caudal.

Localmente, las litologías dominantes corresponden a rocas plutónicas, del Cretácico Superior, principalmente cuarzdioritas-tonalitas, como unidades que intruyen secuencias metamórficas pelíticas de bajo grado en facies esquistos representadas por esquistos cuarzosos-con moscovita-grafito o esquistos cuarzos con tremollita-epidota-clorita, rocas asociadas al Complejo Cajamarca (Correa et al., 2018). La principal unidad ígnea se denomina Cuarzdiorita de Sabanalarga y se encuentra separada del Gabro de Santa Fe por la Falla Sabanalarga o la Falla Cauca Oeste del sistema de fallas Cauca-Romeral (Zapata-Villada et al., 2021; García Ramos et al., en preparación 2021). Al interior de este sistema se identificó una franja de mesomilonitas, asociadas a secuencias vulcano-sedimentarias marinas. Algunos segmentos de estas fajas se encuentran cubiertos por secuencias sedimentarias basculadas y deformadas, compuestas por lutitas, areniscas y carbones, posiblemente asociadas a la Formación Amagá (Zapata-Villada et al., 2021).

Los depósitos aluviotorrenciales de la QJG presentan bloques heterogéneos en tamaño, que van desde subredondeados a subangulares, , predominantemente frescos y algunos maduros, compuestos principalmente de tonalitas (Correa et al., 2018), los cuales varían de tamaño desde de 0,5 m hasta alrededor de 5 metros, no presentan imbricación o estratificación horizontal ni gradación normal de bloques y se presentan embebidos en una matriz arenosa (según observaciones en campo, ver secciones posteriores). Por sus características, se ha sugerido que estos depósitos fueron generados por avenidas torrenciales en la categoría inundación de escombros (Aristizábal et al., 2020).

Desde el punto de vista geomorfológico, la zona de estudio, está dominada por geoformas de ambiente estructural como la unidad de ladera estructural, que presenta un relieve abrupto a escarpado, con valores de pendientes mayores a 30°, drenaje sub-paralelo a paralelo y abundantes depósitos de vertiente (Servicio Geológico Colombiano & EAFIT, 2014). Las geoformas de ambiente fluvial observadas en campo corresponden a la unidad de plano o llanura de inundación, la cual se presenta en la desembocadura de la QJG al Cauca como una Franja del terreno con morfología plana o de inclinación muy suave en el mismo sentido de la corriente, conformada por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, dispuestos sobre depósitos aluviales más antiguos registrados por Page (1986) y Villegas Gutiérrez (1980), con edades que datan eventos desde hace 400 años hasta el Pleistoceno Superior a ca. 22 ka . Así mismo, son comunes pequeños remanentes de terrazas aluviales antiguas, “colgadas”, tanto a lo largo de la red de tributarios de la QJG como en esta última. Dichas geoformas son muy comunes y muestran el alto ritmo de incisión y encajonamiento de estos sistemas fluviales en un contexto morfotectónico de altas tasas de levantamiento y exhumación .

3. Materiales y Métodos

La metodología aplicada para este proyecto se sintetiza gráficamente en la Figura 2 y se divide en cuatro objetivos específicos:

- 1) Conformar una base de datos que permita la caracterización de AT en el trópico, y particularmente en la QJG, usando múltiples técnicas.
- 2) Realizar análisis morfométrico, geomorfológico y estratigráfico en relación con la actividad torrencial de la QJG.

- 3) Aplicar técnicas dendrogeomorfológicas en tramos del canal principal de la QJG.
- 4) Realizar un análisis hidrológico acompañado de un modelo hidráulico para estimar el caudal máximo usando información dendrogeomorfológica.

3.1. Conformación de base de datos:

Una base de datos facilita la identificación y descripción de los objetos espaciales propios de ella misma, mediante atributos, localización y topología (Gutiérrez, 2006). La creación de una Base de datos es de suma importancia ya que permite optimizar y centralizar toda la información geocientífica y geográfica de la zona de estudio y facilita una mejor comprensión de los diferentes aspectos que se integran dentro del presente proyecto.

En este estudio se emplearon dos modelos de elevación digital del terreno para realizar análisis geomorfológicos y evaluar modelos hidráulicos. En el primer caso se utilizó un modelo de elevación digital de toda la cuenca de la QJG, con una resolución espacial de 12.5 m, obtenido del catálogo Alaska Satellite Facility (ASF) (<https://asf.alaska.edu>) y el sensor ALOS-PALSAR. Para el segundo caso se obtuvo una ortofoto y un modelo de superficie detallado para cada uno de los polígonos previamente seleccionados. Esta información geográfica se obtuvo usando un vehículo no tripulado, DJI-Phantom 4 Pro, con un sensor CMOS de 1" de diámetro, para posteriormente construir un modelo de superficie con una resolución espacial de 0.33 metros mediante el software Agisoft Photoscan v.1.5.2.

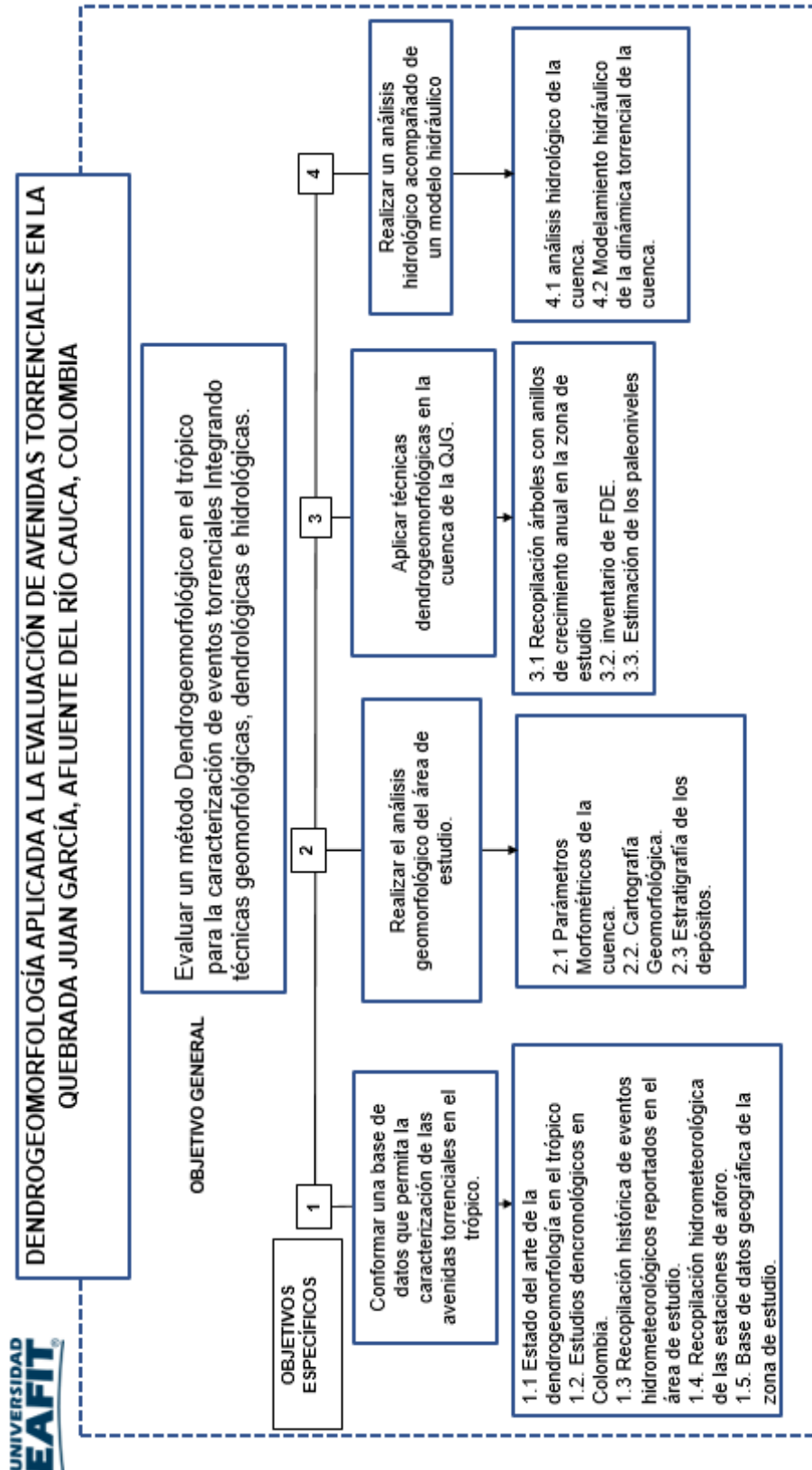


Figura 2: Metodología del proyecto con cuatro objetivos específicos y sus respectivos resultados

Este modelo de superficie se obtuvo con el objetivo de caracterizar la geometría de los canales donde se presentan evidencias dendrogeomorfológicas de eventos torrenciales mediante modelamiento hidráulico. Todos los datos geográficos se almacenaron y procesaron usando el software ArcGIS versión 10.7.1, con el cual se construyó una base de datos centralizada.

3.2. Análisis Morfométrico, geomorfológico y estratigráfico de la Cuenca de la QJG

Se realizó un análisis geomorfológico que permitiera caracterizar las cuencas y confirmar sus características torrenciales. Para esto, se definieron dos polígonos, el primero sobre la cabecera municipal del municipio de Liborina, el cual abarca la cuenca de la Quebrada Juan Barriga (QJB), una de las más torrenciales de la zona, y otro en la desembocadura de la QJG en el río Cauca. Además de estos criterios, se realizó una visita de campo a la zona con el fin de que los polígonos tuvieran representación dendrogeomorfológica.

3.2.1. Morfometría de la cuenca de la QJG y QJB

Para caracterizar el comportamiento morfométrico de las cuencas de la QJG y la QJB, y su relación con la ocurrencia de eventos AT, se calcularon múltiples indicadores morfométricos (Arango et al., 2021, y Anexo 1, este trabajo), incluyendo parámetros asociados a la forma del relieve, a la red de drenaje y a la forma de la cuenca. Además, se tomaron los tres parámetros morfométricos torrenciales más importantes según la Guía Metodológica de Amenaza por Avenidas Torrenciales del Servicio Geológico Colombiano & Pontificia Universidad Javeriana (2019), los cuales son la relación de bifurcación (Strahler, 1964), el

coeficiente de torrencialidad (Mendez et al., 2015; Romero Díaz & López Bermúdez, 1987) y el índice de melton (Bertrand et al., 2013; Melton, 1957). Otros parámetros fueron incluidos como la distribución de pendiente y áreas (Schwanghart & Scherler, 2014), la curva hipsométrica (Ibáñez Asensio et al., 2011), el perfil longitudinal del río y la distribución de quiebres de pendiente (Wilford et al., 2004). Todos los parámetros morfométricos se realizaron teniendo en cuenta que las características de las cuencas relacionadas con el relieve y la textura del drenaje, y son los más relevantes para llevar a cabo estudios de la susceptibilidad torrencial (Arango et al., 2021).

Para la delimitación y extracción de la cuenca de la QJG se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) de 12,5 m de resolución espacial obtenido previamente. Se usó el software ArcGIS v. 10.7.1, para calcular los diferentes parámetros morfométricos y para extraer la red de drenaje. La extracción de los diagramas Pendiente-Área y el perfil longitudinal con los quiebres de pendiente se usaron los softwares Topotoolbox v.2.2 (Schwanghart & Scherler, 2014), y Matlab.

3.2.2. Cartografía geomorfológica del Área de Estudio. Para la elaboración de la cartografía geomorfológica, se seleccionaron dos polígonos, el polígono sobre la confluencia de los cauces de la QJG y la QJB y el polígono B cerca de la desembocadura de la QJG en el Río Cauca (Figura 1). Estos polígonos se eligieron teniendo en cuenta el análisis morfométrico, en especial el Índice de Melton.

Para corroborar la selección de los polígonos se realizó una salida de campo donde se tuvo en cuenta el potencial Dendrogeomorfológico y además de que estuvieran despejados de cobertura vegetal en el canal, lejos de puentes y carreteras que pudieran alterar el modelamiento y por último que estuvieran comprendidos en un tramo relativamente recto (Quesada-Román et al., 2020).

En cada uno de los polígonos se realizó un levantamiento cartográfico de la geomorfología fluvial a escalas variables entre 1:6000 y 1:3500 para el polígono A y el polígono B respectivamente. En estos mapas se identifican y delimitan seis geoformas principales: Canal torrencial, barras laterales, barras centrales, terrazas, zonas de pendientes baja (5° - 20°) y zonas de pendiente alta (20° - 75°). Estas geoformas fueron definidas bajo los parámetros establecidos por Smith et al. (2011). Para la división de las geoformas fluviales, se utilizaron las ortofotos tomadas por el dron anteriormente mencionado, también se utilizó el DEM de 12,5 m para clasificar las diferentes pendientes y poder delimitarlas con mayor precisión mediante el software Arcgis v. 10.7.1.

3.2.3 Análisis y levantamiento estratigráfico de los depósitos en el área de estudio. En cuanto al análisis estratigráfico, se trabajó en los dos polígonos definidos. Se seleccionaron los afloramientos más representativos de los alrededores del canal, correspondientes a depósitos cuaternarios, para los cuales se describieron las siguientes características: espesor de las capas, tamaño de grano, homogeneidad, estructuras estratigráficas, relación de clastos respecto a la matriz y además se tuvo en cuenta su posición geográfica para encontrar

registros aluviotorrenciales que nos permitan probar la recurrencia de dichos eventos en la Cuenca de la QJG (Figura 3).

3.3. Técnicas dendrogeomorfológicas

Las plantas leñosas ubicadas en canales y terrazas aluviales se utilizan como indicadores de paleoniveles de corriente sobre la base del concepto de "proceso-evento-respuesta", en el que una inundación o AT específica representa el "proceso" y la perturbación resultante de los árboles se considera un "evento" en la serie de anillos de árboles (Shroder, 1978; Wilhelm et al., 2019), lo anterior a pesar de que los "eventos" expresados como cicatrices en el tronco, pueden ser perecederos y desaparecer en un periodo corto de tiempo (Borga et al., 2008, 2014).

En los días y semanas posteriores a una inundación, las marcas de inundación que quedan en el campo se pueden usar para estimar la extensión y la magnitud de una AT (Quesada-Román et al., 2020). Por consiguiente, este estudio se basa en la estimación de paleoniveles de corriente por medio de alturas de las cicatrices de impacto en los troncos, las cuales se han constituido como un indicador confiable para un análisis espacial (Ballesteros Cánovas et al., 2011; Ballesteros et al., 2011; Gottesfeld, 1996), además que posteriormente, permiten fechar con precisión el(los) evento(s) ocurrido(s) en la cuenca.



Figura 3: Medición en campo de espesor de depósito aluviotorrencial en la QJB.

3.3.1. Potencial dendrocronológico en la zona de estudio. Se exploraron las aplicaciones potenciales de la dendrocronología en zonas tropicales Figura 4 (Brienen et al., 2016; Pearl et al., 2020; Quesada-Román et al., 2020) y se realizó una recopilación de estudios en el contexto de las cuencas intramontanas colombianas para identificar cuáles son las especies de árboles más adecuadas (dado que no todas las especies de árboles en el trópico generan anillos de crecimiento de buena calidad (REFERENCIAS), y las metodologías empleadas en estudios previos. Posteriormente, teniendo un listado de las especies con potencial dendrocronológico, se buscaron cuáles de estas especies estaban presentes en la zona de estudio (Tabla 1), con la ayuda del inventario forestal del Cauca presentado por Espinal (1985) y el catálogo de plantas y líquenes de Colombia (<http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/>).

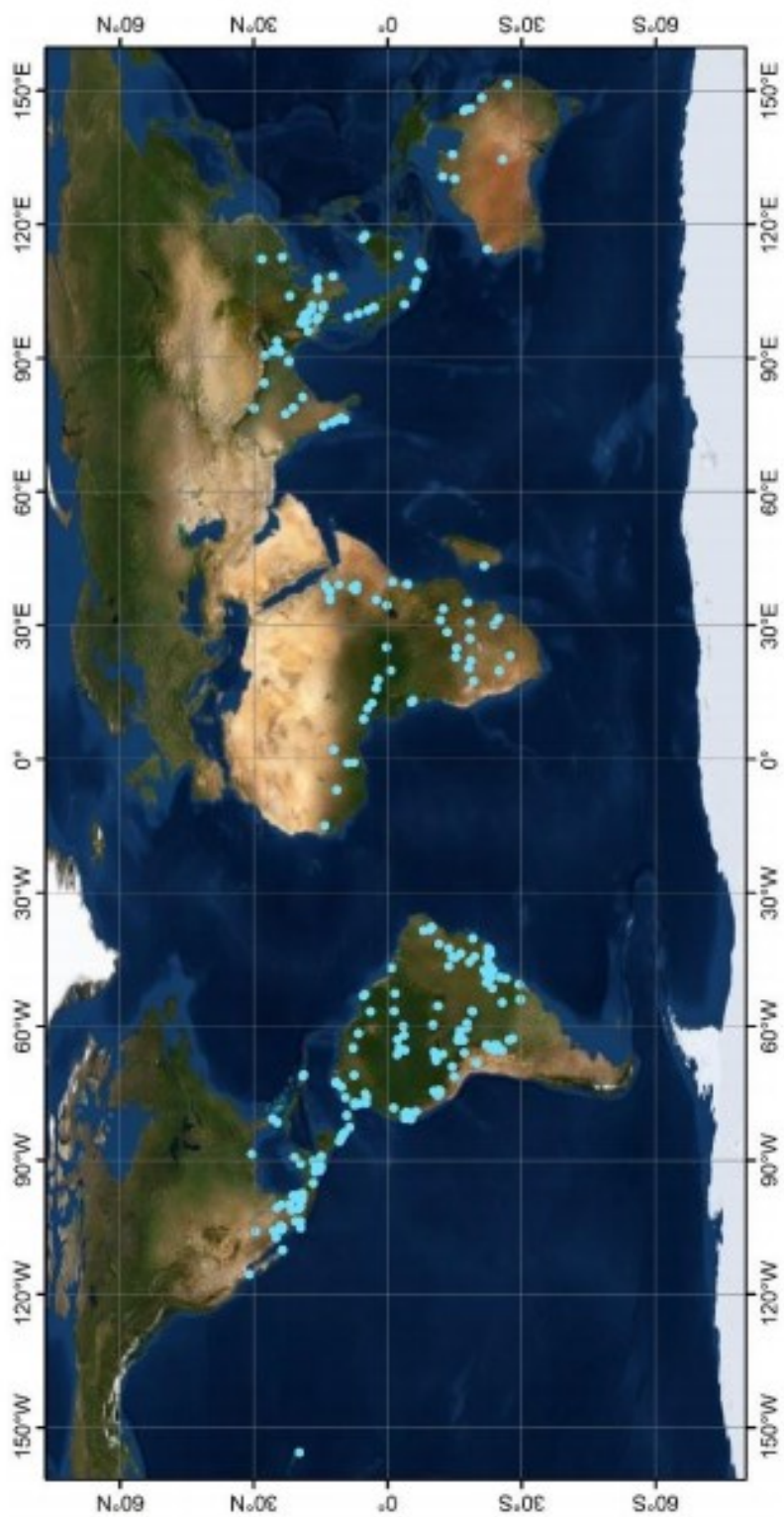


Figura 4: distribución de los 344 estudios, marcados con puntos azules, localizados en zonas entre los 30°N y 30°S de latitud (Quesada-Román, 2020).

Tabla 1 Especies de árboles seleccionadas utilizadas en este estudio para estudios dendrogeomorfológicos.

Especies de árboles	Nombre común	Reportes en el cañón del Río Cauca	Referencias de aplicaciones en dendrocronología
<i>Bursera simaruba</i>	Indio desnudo/Almácigo	Daly, 1993; Espinal T., 1985; Rangel et al., 2005	Briceño Jiménez, 2017 (Colombia) ; López-Ayala et al., 2006 (México); Worbes et al., 2013 (Costa Rica)
<i>Albizia guachapele</i>	Cedro Amarillo	Barneby & Grimes, 1996; CORANTIOQUIA, 2006; Espinal T., 1985	Briceño Jiménez et al., 2010 (Colombia)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Piñón de oreja	Barneby & Grimes, 1996; Espinal T., 1985	Pineda-Herrera et al., 2019 (México); Worbes et al., 2013 (Costa Rica)
<i>Samanea saman</i>	Samán	Barneby & Grimes, 1996; Espinal T., 1985	Pumijumnong, 2012 (Tailandia)

3.3.2. Identificación de Indicadores Dendrogeomorfológicos (FDE). A partir de los polígonos seleccionados previamente en el levantamiento geomorfológico, se realizó un análisis detallado en campo de los árboles que presentaran evidencias dendrogeomorfológicas o “*flood dendrogeomorphological evidences*” (FDE, por sus siglas en inglés). Los FDE constituyen elementos preservados en los troncos de los árboles que permitan reconstruir la magnitud y/o frecuencia de eventos geomorfológicos como las AT. La clasificación de los árboles con FDE se basó en la metodología propuesta por Díez-Herrero et al. (2007) (Figura 5), y se realizó un inventario de los diferentes FDE encontrados en los árboles, tras una primera salida de reconocimiento en campo.

3.3.3. Estimación de paleoniveles de corriente por medio de alturas de cicatrices de impacto en troncos. Posterior a la elaboración del inventario de FDE se procedió a recolectar la información de todos los árboles con FDE₇ (Impacto de carga sólida), los cuales se convierten en indicadores de paleoniveles de corriente o “*paleostage indicators*” (PSI, por sus siglas en inglés) (Figura 6) (Ballesteros Cánovas et al., 2011; Hupp & Bornette, 2003; Sigafos, 1964). Para ello se midió la altura máxima de la cicatriz en el tronco, la especie de árbol para identificar y levantar la información con potencial dendrogeomorfológico y la posición con un GPS Garmin GSMAP 2sc, siguiendo la metodología propuesta por Ballesteros Cánovas et al. (2011). Además, se ubicaron los árboles que estuvieran situados en la zona de influencia geomorfológica de la quebrada, e.g., barras centrales y laterales, canal, y terrazas (Quesada-Román et al., 2020).

Por otro lado, algunos de los árboles seleccionados con FDE₇ fueron muestreados mediante un barrenado de árboles del tipo Haglöf 3-Roscas de 18”, para obtener los testigos, además de

cuñas de árboles obtenidas con una motosierra y raíces expuestas, con el fin de realizar un posterior análisis temporal según indica Díez Herrero, (2015). Del polígono A se tomaron cinco testigos, una cuña y tres raíces y del polígono B, tres testigos, una raíz y una cuña (Figura 7).

3.4. Análisis hidrológico y modelamiento paleohidráulico de AT

Con el fin de obtener la dinámica del clima en la zona, se realizó un análisis hidrometeorológico por medio de los datos de la estación pluviométrica “La Placita” (26220140) del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (<http://www.ideam.gov.co/capas-geo>), ubicada dentro de la cuenca en las coordenadas (6°43.253', -75°45.483' ; 1540 msnm).

3.4.1. Análisis hidrológico. La estación La Placita presenta datos de precipitación diarios y mensuales desde noviembre de 1970 hasta septiembre de 2017. Se construyeron series de tiempo anuales con las que se estimaron los valores de precipitación medios y se identificaron las fechas de los picos de precipitación con el fin de identificar su relación con los eventos de torrencialidad registrados en la cuenca. Además, se construyeron series de tiempo mensuales teniendo en cuenta la influencia del ENSO reportados en las bases de datos del “Climate Prediction Center” (CPC) (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

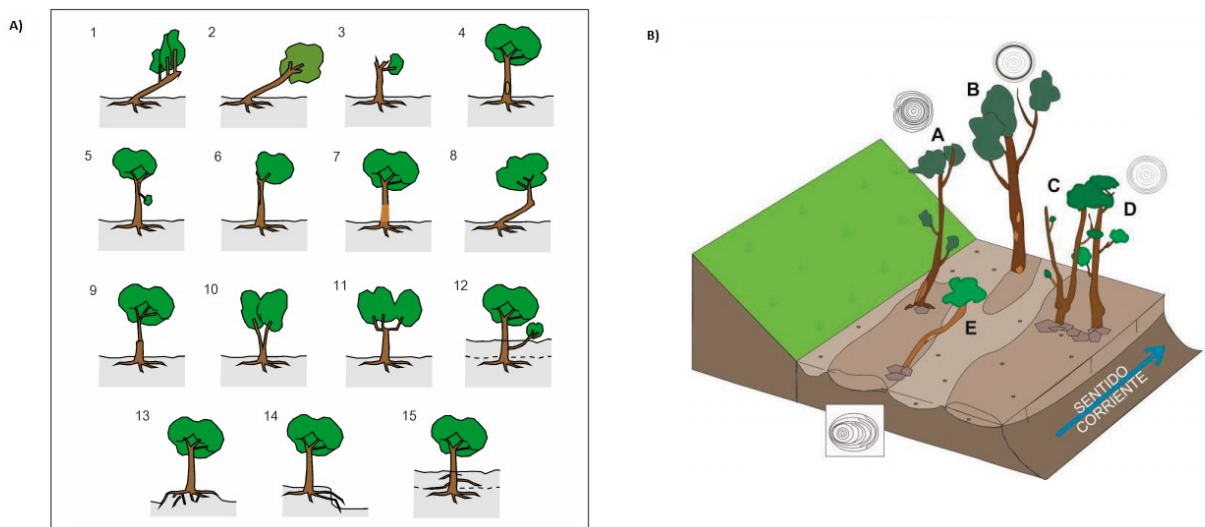


Figura 5: A) Principales tipos de evidencias dendrogeomorfológicas a escala de árbol completo, por la incidencia de las avenidas e inundaciones en el crecimiento del tronco, raíces o ramas de la vegetación arbórea, representando un árbol: 1, inclinado y con rebrotes verticales; 2, inclinado; 3, decapitado; 4, con herida en la corteza del tronco (descortezado); 5, con arranque de ramas; 6, con pérdida parcial de la copa; 7, con bruñido de la corteza del tronco; 8, con un codo brusco en el tronco; 9, con un estrechamiento brusco del tronco; 10, con un tronco bifurcado; 11, con ramas en candelabro; 12, con enterramiento de ramas; 13, con descalzado del cepellón en pedestal; 14, con raíces expuestas por descalce; y 15, con raíces adventicias tras enterramiento. (Andrés Díez-Herrero et al., 2007). B) . Ejemplo de Indicadores dendrogeomorfológicos macroscópicos en árboles afectados por avenidas torrenciales y las respuestas asociadas que se observan en las secuencias de anillos de crecimiento. A y B: heridas con formación de callo o que originan anomalías en los anillos de crecimiento; C y D: pérdida de la guía principal y sustitución por una/s rama/s secundaria/s; E: troncos inclinados (García-Oteyza et al., 2015).

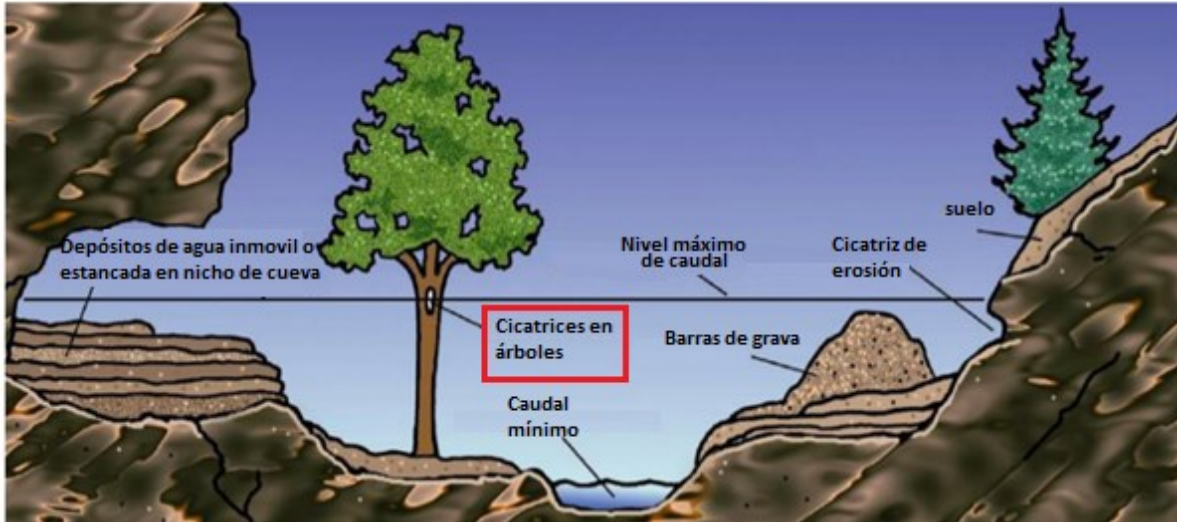


Figura 6: Indicadores de paleonivel. Se resalta que los FDE7 (Cicatriz por impacto de carga sólida), son usados como PSI (modificado de Jarrett & England, 2002).



Figura 7: Imágenes de la medición de las alturas de los golpes y el muestreo sistemático de cuñas y testigos.

Por otro lado, se realizaron aforos de la corriente principal en tres puntos (ver Figura 1), teniendo en cuenta la ocurrencia y localización de árboles que tuvieran FDE y que además sirvieran como PSI. La velocidad de la corriente se midió en cada punto usando un correntómetro *Scientific instruments*®, Inc. Modelo: 10002 serie: 01551, facilitado por el laboratorio de Hidráulica y Mecánica de Fluidos de la Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia. Las secciones transversales se estimaron midiendo el ancho de la corriente y la profundidad en varios puntos. Estos valores se obtuvieron en el mes de septiembre de 2020, correspondientes a un periodo de lluvia, indicando un valor aproximado de la magnitud de la descarga de la QJG en temporada invernal.

3.4.3. Modelamiento y análisis hidráulico. Para el modelamiento hidráulico se utilizó la aproximación *step-backwater* (V. T. Chow, 1959; Davidian, 1984). Este método estima la parametrización y las condiciones de frontera de distintos escenarios de inundación a través de un método iterativo de caudales, donde se simulan varios escenarios de caudal para modelar la altura máxima del agua alcanzada y luego compararlo con la altura medida de los PSI (Webb & Jarrett, 2013).

3.4.2. Modelamiento Paleohidráulico en IBER. Para conocer la altura de la columna de agua y su distribución espacial según diferentes caudales se utilizó el software Iber v. 2.6 (www.iberaula.es). Con este procedimiento se construye un modelo hidráulico en 2D solucionando las ecuaciones 2D de Saint Venant (Bladé et al., 2014) según los parámetros de la Tabla 2, esto permite simular flujos turbulentos e inestables como las presentes en sistemas fluviales tropicales. El resultado del modelamiento obtenido muestra valores de

profundidad (o altura de la columna de agua), número de Froude, que se relaciona con la capacidad de carga y transporte del canal y las velocidades de flujo que indican áreas de mayor impacto de los procesos erosivos y/o daños asociados a los eventos torrenciales máximos.

3.4.3. Análisis y estimación de caudales. Para la estimación de caudales, se seleccionó un segmento de 500 m a lo largo del cauce a la QJG en el polígono A. En este tramo se presentan 30 de los 109 árboles con PSI medidos en campo.

A partir de las simulaciones obtenidas en IBER, se procede a calcular el Error Cuadrático Medio (ECM) de las profundidades modeladas en los canales respecto a las alturas relativas de los PSI. El ECM más bajo es el escenario que mejor describe el comportamiento máximo del caudal responsable de la generación de los PSI, además permite estimar los caudales pico para la cuenca de la QJG.

4. Resultados

4.1. Conformación de Base de Datos. Toda la recopilación de la información se centralizó en una base de datos para tener una mejor comprensión en los análisis del estudio y así poder ahorrar tiempo y costos en las salidas de campo.

Tabla 2 Parámetros utilizados para el modelamiento en IBER.

Parámetros	Observaciones	Valores usados	Referencia
Topografía	Modelo de elevación de superficie, corregido en el canal principal. Se debe especificar por donde entra y por donde sale el agua.	DTM 0,33m	Bodoque et al., 2020; A. Díez-Herrero et al., 2013; Quesada-Román et al., 2020
Caudal	Step-Backwater. Se ingresa un caudal iterativo en m ³ /s aumentando cada vez este valor hasta que el resultado muestre los PSIs sumergidos.	(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 150, 160, 180, 200, 250, 300, 350, 400) m ³ /s	Quesada-Román et al., 2020; Webb & Jarrett, 2013
Coefficiente de Manning	A partir de un mapa de usos del suelo construido en campo se asignan valores de Rugosidad de Manning.	Main Channel: 0,075 Forest: 0,16 Sparse Vegetation: 0,08	Arcement & Schneider, 1989; Barnes, 1967; Chow, 1959

4.1.1. Estado del arte de la dendrogeomorfología en el trópico y en Colombia. Los estudios de dendrocronología en el trópico se reportan desde finales del siglo XIX cuando el alemán Dietrich Brandis observó el crecimiento de la Teca (*Tectona grandis*) y registró la presencia de anillos de crecimiento como determinadores de ciclos de corta (Giraldo Jiménez, 2011), o sea el tiempo transcurrido entre dos aprovechamientos sucesivos de una misma área. Sin embargo, los estudios dendrocronológicos en la zona ecuatorial de América empezaron cuando Martin Worbes (1999), realizó el análisis dendrocronológico de 37 especies de árboles en un bosque semicaducifolio de la Reserva Forestal de Caparo, Venezuela. Las mediciones mostraron que el ritmo de crecimiento anual estaba relacionado con los patrones de precipitación, más que con factores como la temperatura (Rozendaal & Zuidema, 2011; Martin Worbes, 2002).

El creciente interés en aplicaciones dendrológicas y dendrogeomorfológicas en zonas tropicales, es evidente en los últimos años, por ejemplo mientras que en 2016 Brien et al. indican un total de 130 estudios, hasta el 2020 (Quesada-Román) registra más de 340 estudios. Esto ha permitido comprobar que en el trópico más de 230 especies arbóreas desarrollan anillos anuales de crecimiento (Brien et al., 2016).

Sin embargo, las aplicaciones dendrogeomorfológicas han sido relativamente poco empleadas, pues se reportan tan solo seis trabajos en dicha región (Tabla 3).

Tabla 3 Estudios Dendrogeomorfológicos en el Trópico

País	Estudio	Autor
Zambia	Técnicas dendrocronológicas en barras de desplazamiento vegetadas	(Gilvear et al., 2000)
Perú	Técnicas dendrogeomorfológicas para el análisis de la pendiente en movimientos en masa	(Winchester et al., 2007)
El Salvador	Datación de eventos sísmicos	(A. Díez-Herrero et al., 2013; Ruiz-Villanueva et al., 2010)
Brasil	Datación de procesos geomorfológicos con raíces expuestas	(Bovi et al., 2018)
Brasil	Dinámica de los procesos erosivos	(Bovi et al., 2019)
Costa Rica	Reconstrucción de inundaciones ocurridas en el Río General como efecto del huracán Nate	(Quesada-Román et al., 2020)

Específicamente, en Colombia se reportan alrededor de 15 estudios dendrocronológicos desde el año 2007. Sin embargo, los estudios dendrogeomorfológicos no se han llevado a cabo en el país (Figura 8).

4.1.2. Recopilación histórica de eventos hidrometeorológicos reportados en la Cuenca de la QJG. La recopilación histórica de los eventos generados en la Cuenca de la QJG se resume en la Tabla 4, donde se presenta una lista de 15 eventos que causaron daños a la población, ya sea por avenidas torrenciales o por intensos períodos de lluvia que aumentaron el nivel del cauce de la QJG y sus afluentes. Adicionalmente, en algunos registros escritos que narran lo sucedido durante la conquista y la colonia se relata la constante actividad torrencial de este cauce:

“El raudal principal de Liborina es el llamado Juan García, Nutabe en tiempos de la Conquista y en parte de los de la colonia...El curso de este torrente es rápido, y sus avenidas terribles, pues en ocasiones ha llegado a vencer la corriente del Cauca, hasta arrojar a la banda opuesta de este poderoso río, maderos y piedras de consideración” (Uribe Ángel, 1885).

4.1.3. Estimación de caudales y aforos en la Cuenca de la QJG. Con la medición de caudales en diferentes puntos de la cuenca (Figura 1), se obtuvo para la QJB un caudal promedio de $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$ y para la QJG caudales de $2,90 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Tabla 5 se observa el cálculo de este valor, teniendo en cuenta que fueron medidos a principios del mes de septiembre cuando está comenzando la temporada de lluvias.

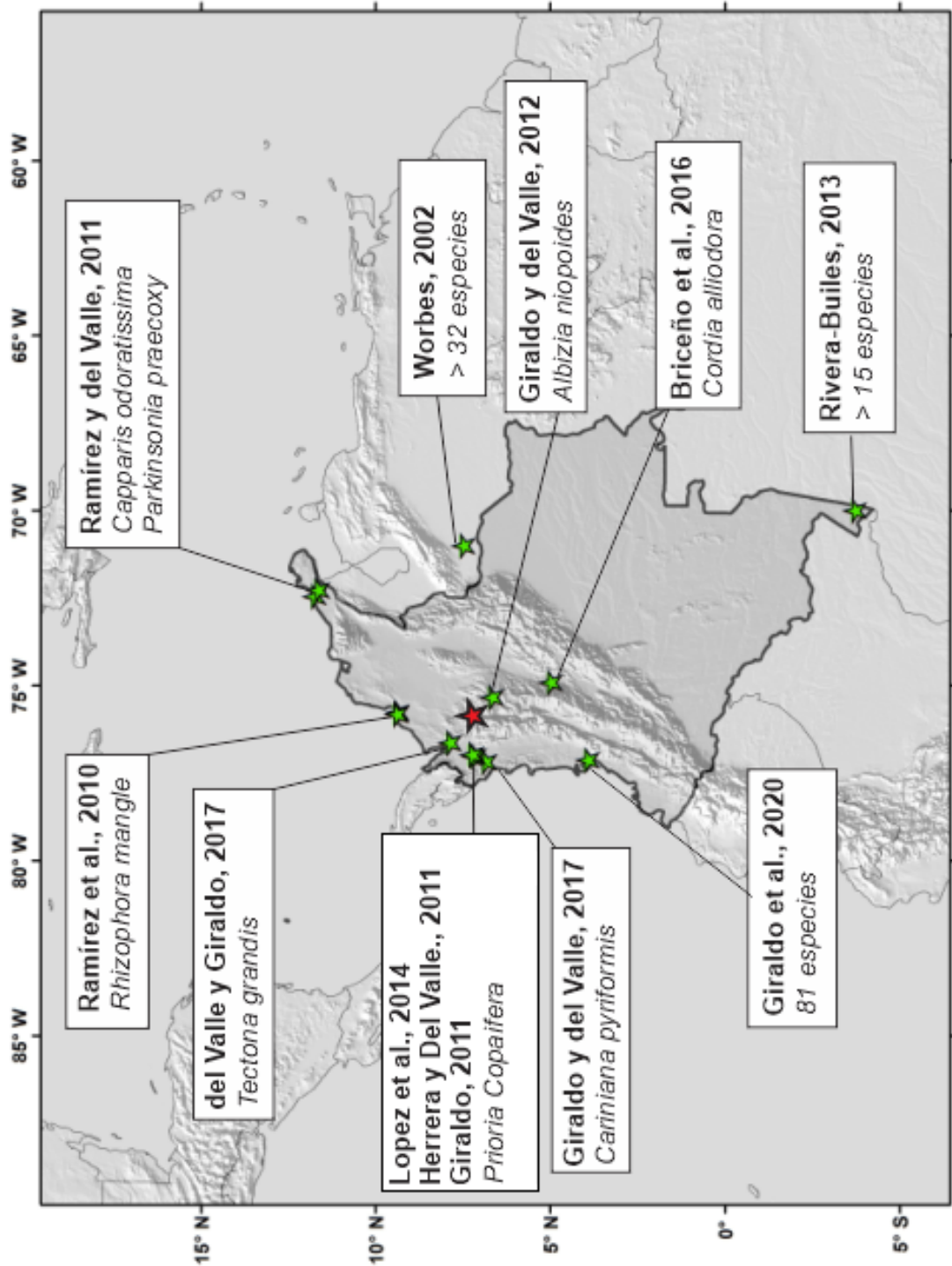


Figura 8: Estudios dendrocronológicos en Colombia (14 estudios y más de 130 especies), los cuales están representados por las estrellas verdes, y el presente estudio, marcado con una estrella roja, que hace referencia a la primera aplicación de dendrogeomorfología en Colombia.

Tabla 4: Cronología de eventos torrenciales ocurridos en la cuenca de la QJG entre 1931 y 2019, donde se evidencia la alta torrencialidad de la quebrada y sus afluentes.

Fecha del Evento	Tipo de evento	Lugar	Fuente	Observaciones
07 de Dic. 1931	Avenida Torrencial	La playita. Qbda. Juan García	El Colombiano	N/A
30 de Sept. 1942	Avenida Torrencial	Liborina	El Colombiano	N/A
13 de Oct. 1953	Avenida Torrencial	Liborina	El Colombiano	N/A
07 de Jul. 1972	Avenida Torrencial	Liborina	El Colombiano	N/A
01 de Jul. 1981	Lluvias fuertes	Liborina - Sabanalarga	EL TIEMPO	Cierre de vía
30 de May. 1996	Inundación	Liborina	DAPARD	N/A
01 de Jul. 1997	Lluvias fuertes	Liborina	Corantioquia	43 viviendas afectadas
17 de Jun. 2000	Avenida Torrencial	Cto. San Diego	Corantioquia	4 fallecidos, perdida de acueductos, afectadas 519 personas. evacuadas 9 familias.
05 de May. 2009	Inundación	El Carmen de la Venta	Corantioquia	N/A
07 de May. 2009	Avenida Torrencial	El Carmen de la Venta		
10 de Jun. 2009	Lluvias Fuertes	Urbana y Rural	Corantioquia	3 fallecidos, destrozos materiales en zona urbana, socavación del puente de Sacahilos
16 de Mar. 2014	Fuertes lluvias	Curití; Guamal; Buenos Aires	UNGRD	25 viviendas afectadas
06 de Oct. 2014	Avenida Torrencial	Quebrada la Pava y Las Abejas	UNGRD	N/A
25 Nov. 2015	Fuertes lluvias	El Playón; San Diego y Carmen de la Venta	UNGRD	fuertes lluvias, vías cerradas
13 de May. 2019	Avenida Torrencial	Urbana y Rural	Tele Antioquia	Animales arrastrados

4.2. Análisis morfométrico geomorfológico y estratigráfico de la cuenca QJG

Se obtuvo una caracterización morfométrica de la cuenca a que incluye los parámetros del análisis de la forma y el relieve de la cuenca. Adicionalmente se obtuvo un análisis geomorfológico con la clasificación de las geoformas fluviales y un análisis estratigráfico de los afloramientos representativos de la QJG.

4.2.1. Morfometría. Los parámetros morfométricos de la QJG y la QJB se muestran en la Figura 9. Dichos parámetros confirman que las cuencas, a pesar de tener posibilidades medias de generar eventos torrenciales, pueden ser de gran magnitud, pues los parámetros más relevantes para medir la torrencialidad, tales como la relación de bifurcación, el coeficiente de torrencialidad y el índice de Melton (Servicio Geológico Colombiano & Pontificia Universidad Javeriana, 2019), sustentan la alta probabilidad de ocurrencia de AT en ambas cuencas (Figura 9B). También, resultados del análisis de área vs. pendiente (Figura 9C), muestra que las cuencas se encuentran dominadas por avenidas torrenciales, mientras que la curva hipsométrica y el histograma de frecuencias altitudinales muestran que ambas cuencas presentan un predominio de rangos altitudinales medios. (Figura 10).

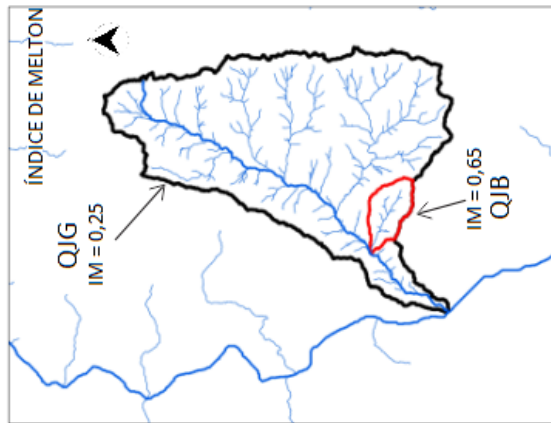
4.2.2. Análisis Geomorfológico. La división geomorfológica de los polígonos seleccionados consta de 4 geoformas fluviales donde se encuentran los árboles con PSI y dos clasificaciones de pendientes de las laderas que encausan la quebrada (Figura 11). En total se asociaron 24 árboles con cicatrices en las terrazas y 6 árboles a los canales, en los cuales se incluyeron algunos árboles de las barras.

Tabla 5: Medición de caudales En la QJG y la QJB.

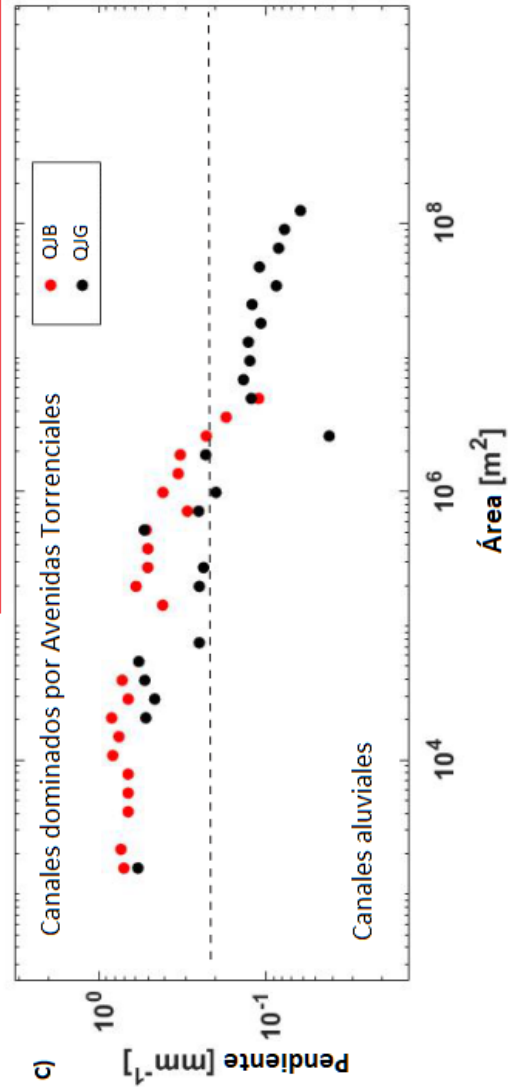
ID	Código	Velocidad	V _{prom}	Ancho	Profundidad	Q(Caudal) [m ³ /s]	Observaciones
1	C01	1,330	1,503	4,00	0,500	3,016	Caudal en la parte inferior de la zona de estudio
		1,490		5,00	0,500		
		1,690		3,50	0,450		
2	C02	0,857	0,857	1,20	0,050	0,051	Caudal Juan Barriga
3	C03	1,390	1,695	1,00	0,030	0,030	Caudal Juan Barriga
		2,000		0,60	0,030		
4	C04	1,330	1,330	1,20	0,070	0,112	Caudal Juan Barriga
5	C05	0,785	0,785	1,00	0,050	0,039	Caudal Juan Barriga
6	C06	1,210	1,220	5,00	0,364	2,071	Juan García antes de Juan Barriga
		1,230		4,90	0,322		
7	C07	2,490	2,490	4,00	0,362	3,606	Juan García después de Juan Barriga

Parámetro	QJG	QJB
Área (Km ²)	126,5	5,49
Longitud del cauce principal (Km)	24,27	4,7
Desnivel altitudinal (Km)	2,84	1,53
Factor Forma	0,3	0,31
Coefficiente de Compacidad	1,55	1,78
Coefficiente de circularidad	0,41	0,31
Relación de elongación	0,59	0,64
H _{max} (msnm)	3291	2322,4
H _{min} (msnm)	455	793,56
H _{med} (msnm)	2089	1489,8
Densidad de drenaje	0,63	3,64
Índice de melton	0,25	0,65
Relación de bifurcación	0,193	2,71
Coefficiente de torrencialidad	0,58	6,92

B)



A)



C)

Figura 9: A) Mapa de la QJG donde se representan los índices de Melton y se resalta la subcuenca QJB. B) tabla de los parámetros morfométricos más relevantes de las cuencas de la QJG y la QJB y se resaltan en rojo los parámetros que más cuantifican la torrencialidad. C) Gráfico de área vs pendiente, en el que se representan la QJG y la QJB como cuencas con dominio de avenidas torrenciales.

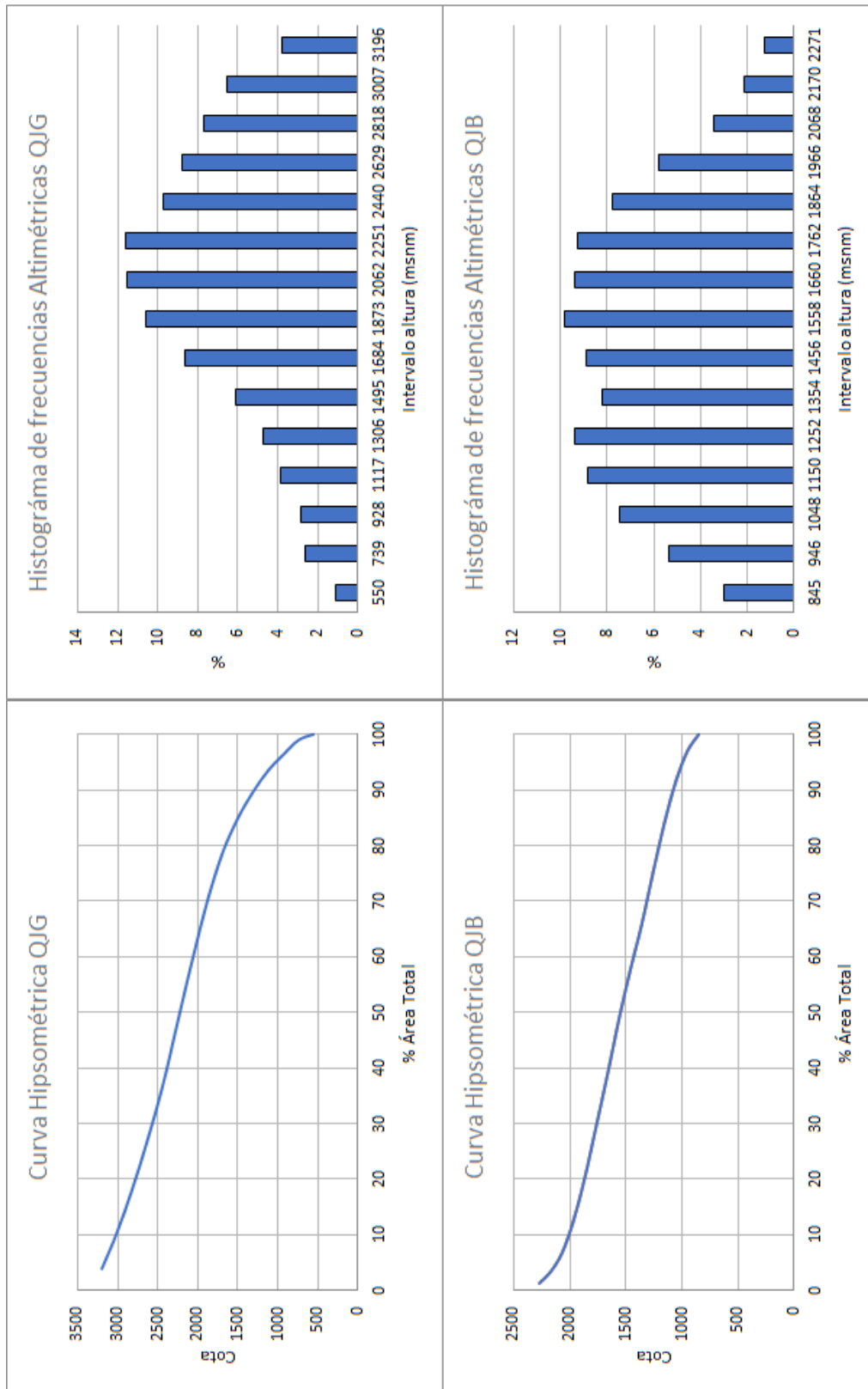


Figura 10: Curva hipsométrica e Histograma de Frecuencias.

4.2.3. Levantamiento de columnas estratigráficas. Se realizaron 7 levantamientos de columnas estratigráficas dispuestas en los alrededores de los cauces de la QJG y la QJB (ver Figura 11) y se encontró en algunos casos depósitos aluviotorrenciales dispuestos sobre depósitos aluviales del Holoceno (García, 2011; Page, 1986; Villegas Gutiérrez, 1980), lo cual indica que la cuenca de la QJG presenta una actividad constante de avenidas torrenciales y depósitos aluviales, que se pueden extender en el tiempo geológico hasta el Pleistoceno tardío (edades de ^{14}C de hasta 22 ky, ver Page (1986)) que modifican la dinámica de la quebrada generando en cada evento nuevos depósitos aluviotorrenciales. En la Figura 12 se muestran las columnas más representativas de la cuenca, las cuales evidencian los depósitos más recientes.

4.3. Inventario dendrogeomorfológico. Según la clasificación de los indicadores dendrogeomorfológicos de Andres Díez-Herrero et al. (2007), (Figura 5 A, Figura 13), se realizó un inventario de los árboles de la zona de estudio con su respectivo indicador dendrogeomorfológico. El inventario se divide en: Árbol o arbusto completo (Figura 14); tronco (Figura 15); Ramas (Figura 16) y Raíces (Figura 17). Además, se presenta un inventario del potencial dendrocronológico con cortes de árboles que presentan anillos (Figura 18).

En total se levantaron 108 datos de árboles con FDE₇, de los cuales 84 presentaban anillos de crecimiento anual, correspondientes a individuos de *Albizia guachapele* y *Enterolobium cyclocarpum* (Tabla 6). Las demás especies, no presentan potencial dendrocronológico, sin embargo, se midieron para realizar el análisis espacial y establecer caudales pico posteriormente.

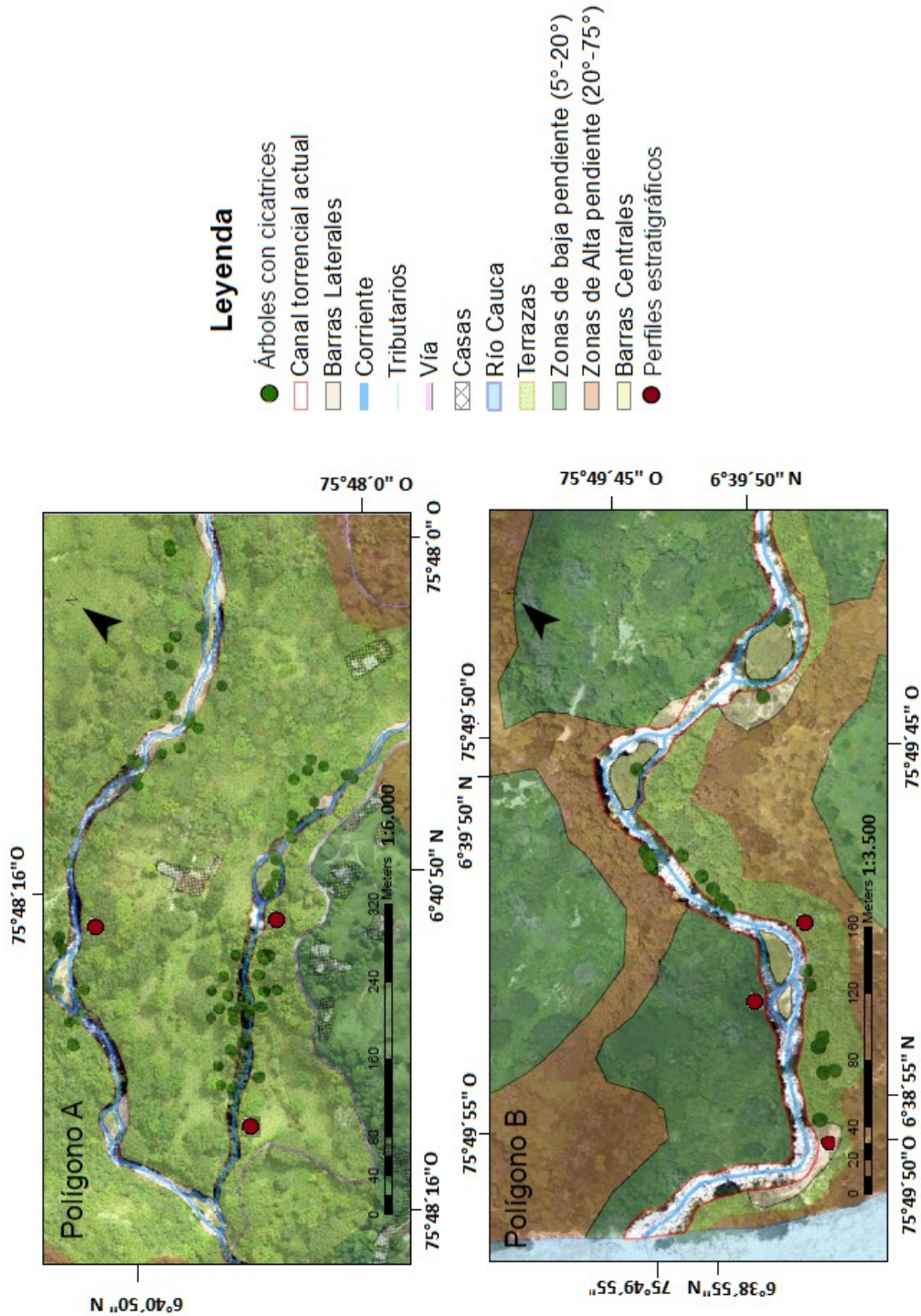


Figura 11: Mapas geomorfológicos de los polígonos correspondientes a A) desembocadura de la QJB en la QJG y B) desembocadura de la QJG en el Río Cauca, los cuales se dividen en cuatro geoformas y dos clasificaciones de pendientes. Los puntos verdes corresponden a los lugares donde se levantaron las columnas estratigráficas. (elaboración propia)

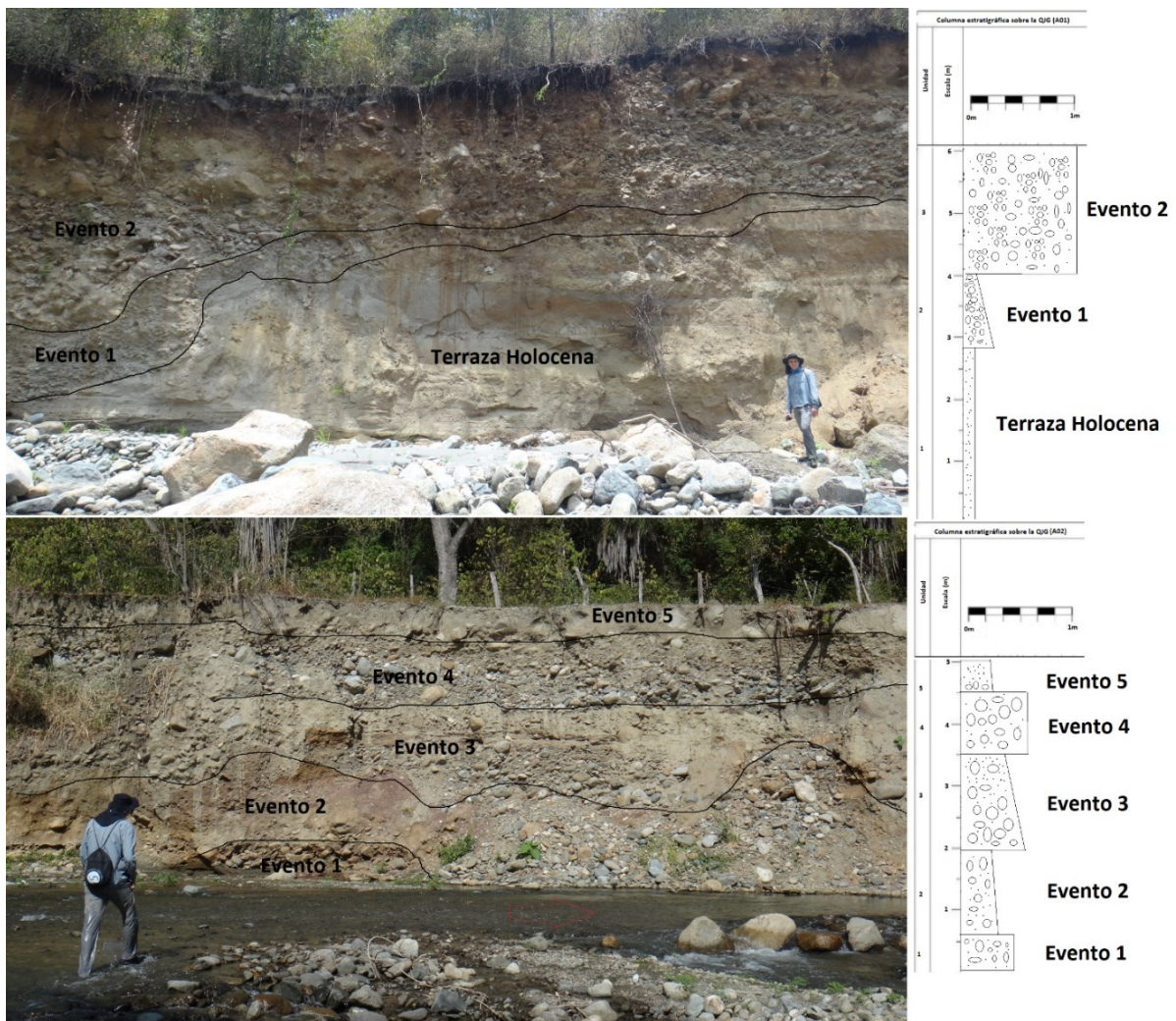


Figura 12: Columna estratigráfica sobre la QJG, con registro de depósitos aluviotorrenciales recientes, dispuestos sobre un material fino con edades del holoceno tardío reportadas por (Gallego Montoya, 2018; García, 2011; Villegas Gutiérrez, 1980), lo cual indica que la cuenca de la QJG presenta una actividad constante de avenidas torrenciales y depósitos aluviales con edades de 14C de hasta 22 ky, Page,1986.

ESCALA ESPACIAL	ELEMENTO ESTUDIADO		TIPO DE INDICIO O INDICADOR	Nº						
km hm	<i>Comunidades y formaciones vegetales</i>		Patrones en la distribución de especies	ID 1						
			Patrones en la distribución de las coberturas	ID 2						
			Patrones en la distribución de las edades	ID 3						
dm	Macroscópica	Individuo (árbol o arbusto)	Árbol o arbusto completo	Crecimientos en candelabro a partir de árboles inclinados	ID 4					
				Inclinaciones y pies volcados	ID 5					
			Decapitados (pérdida de copas)	ID 6						
m		Parte del árbol o arbusto	Tronco	Heridas o descortezados (descorchados) con callo	Impacto de carga sólida	ID 7				
					Arranque de ramas	ID 8				
				Rozamiento por caída de otros troncos	ID 9					
				Erosiones	ID 10					
				Estrechamientos bruscos	ID 11					
				Codos y ángulos	ID 12					
				Bifurcaciones	ID 13					
	Rebrotos desde troncos enterrados			ID 14						
dm				Ramas	Rebrotos desde troncos enterrados	ID 15				
					Codos y ángulos	ID 16				
cm		Raíces	Raíces expuestas	Descortezadas y con erosiones	ID 17					
				Flotantes sin contacto con el substrato	ID 18					
			Nuevas raíces desde tronco enterrado	ID 19						
mm	Mesoscópica	<i>Testigos, cuñas y rodajas</i>	Anillos	Crecimientos excéntricos (madera de reacción)	ID 20					
				Falsos anillos de crecimiento	ID 21					
				Discontinuidades, erosiones y cicatrices internas	ID 22					
		Tejidos	Cambios en parámetros (anchura, % madera temprana y tardía...)	ID 23						
			Ratio del tejido lignificado-parenquimatoso	ID 24						
µm	Microscópica	<i>Lámina delgada</i>	Células	Cambios en los parámetros celulares	Tamaño y morfometría del lumen celular	ID 26				
					Grosor de la pared celular	ID 27				
				Aparición y/o abundancia de tipos especiales de células	Conductos resiníferos traumáticos (TDRs)	ID 28				
					Fibrotraqueidas	ID 29				
					Estructuras traumáticas en la pared celular	ID 30				
				Å	Atómico	<i>Pared Celular</i>	Celulosa	Fraccionamiento isotópico	Ratio ¹⁸ O/ ¹⁶ O	ID 31

Figura 13: Clasificación de los principales indicios o indicadores dendrogeomorfológicos (IDs) o FDE, como se indica en este trabajo, útiles en el estudio de las avenidas torrenciales, en función de escala del elemento estudiado (Andrés Díez-Herrero et al., 2007).



Figura 14: indicadores dendrogeomorfológicos de árbol o arbusto completo. FDE 4 (Crecimientos en candelabro a partir de árboles inclinados); FDE 5 (Inclinaciones y pies volcados); FDE 6 (Decapitados, pérdida de copas).

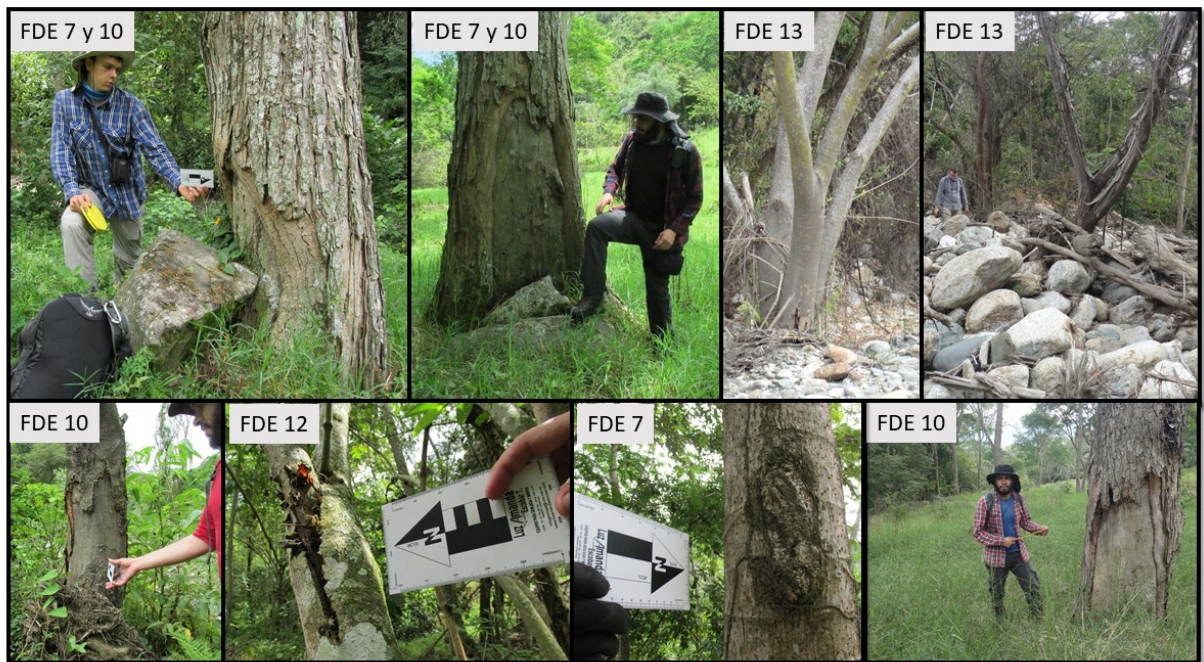


Figura 15: Indicadores dendrogeomorfológicos de troncos. Heridas o descortezados: (descorchados) con callo: FDE 7 (Impacto de carga sólida); FDE 10 (Erosiones); FDE 12 (Codos y ángulos); FDE 13 (Bifurcaciones).



Figura 16: Indicadores dendrogeomorfológicos de ramas. FDE 15 (Rebrotes desde troncos enterrados).

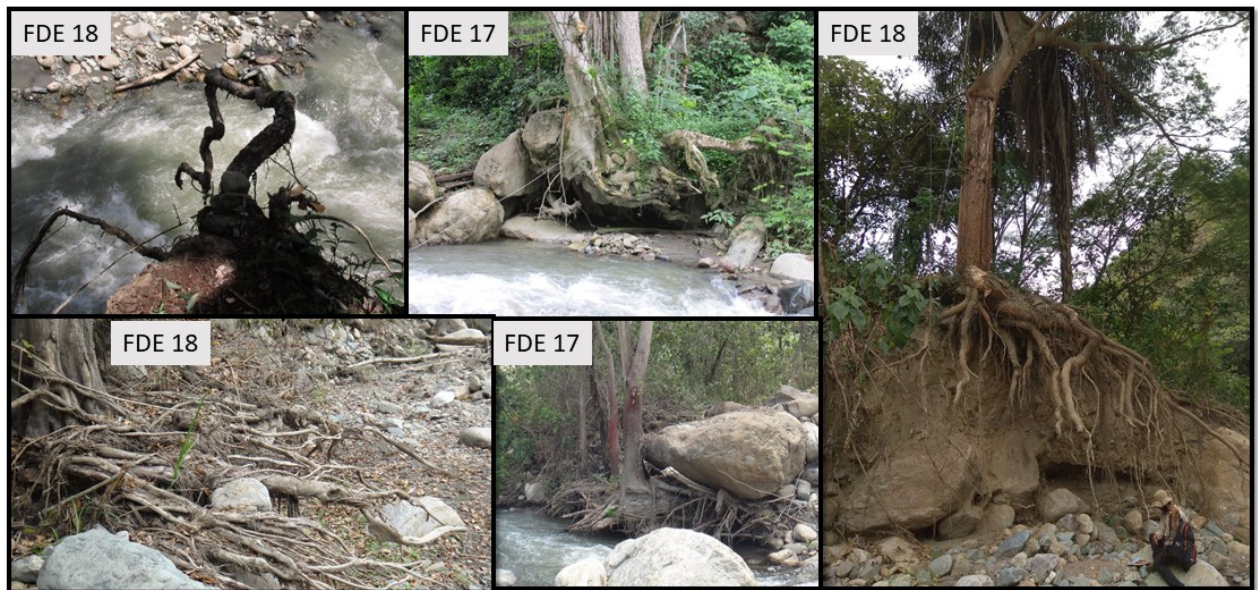


Figura 17: Indicadores dendrogeomorfológicos de raíces. Raíces expuestas: FDE 17 (Descortezadas y con erosiones); FDE 18 (Flotantes sin contacto con el sustrato).



Figura 18: Potencial dendrocronológico con la presencia de anillos y posibles golpes cicatrices registradas.

Tabla 6: Tabla de datos con las características de las cicatrices utilizadas como indicadores de paleonivel (PSI) para cada uno de los tramos de estudio, y su cantidad teniendo en cuenta su posición geomorfológica y la especie.

Polígono	FDE 7	Altura de la cicatriz en (m)	MSE	posición del árbol		Especie	
				Canal	Terraza	<i>Albizia guachapele</i>	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>
A QJG	30	1,55	0,74	6	26	44	0
A QJB	47	1,36	0,67	16	31	15	11
B	27	1,78	0,84	7	20	5	9
Total	104	4,69	2,25	29	77	64	20
					106		84

4.4. Análisis hidrológico y modelamiento hidráulico

Se realizó un análisis hidrológico a partir de la información suministrada por el IDEAM donde se obtuvo resultados de precipitación media máxima y mínima (Tabla 7) para un periodo entre 1970 y 2017. Además, a partir de los DEM de alta resolución obtenidos anteriormente, se realizó un modelamiento hidráulico con el cual se obtuvo un caudal máximo.

4.4.1. Análisis hidrológico. Se realizó una gráfica de precipitación media mensual de la QJG (Figura 19), donde se evidencia un comportamiento bimodal, con dos épocas de lluvia en los meses abril-mayo y septiembre-octubre, y un máximo histórico para el mes de mayo.

En el análisis anual, el régimen pluviométrico es muy variado, pues el máximo histórico fue de 3345 mm en el año de 1971 y el mínimo fue de 1131 mm en el año de 1976, con una media de 2114 mm/año (Figura 20). Según Corantioquia (2004), el promedio anual de precipitación en la zona de la Regional “Hevéxicos”, que correspondiente jurisdiccionalmente a la subregión del Occidente Antioqueño, región donde se ubica la QJG, es de 1056,29 mm/año, lo cual indica que la cuenca tiene una pluviosidad relativamente alta con respecto a la subregión.

La precipitación mensual media registrada en la estación de La Placita, separada por periodos de Niño, Niña y periodos normales, muestra un régimen similar en el primer semestre del año, sin embargo, la diferencia se marca en el segundo semestre, ya que la precipitación en años Niña, aumenta considerablemente en periodos de sequía (Figura 21).

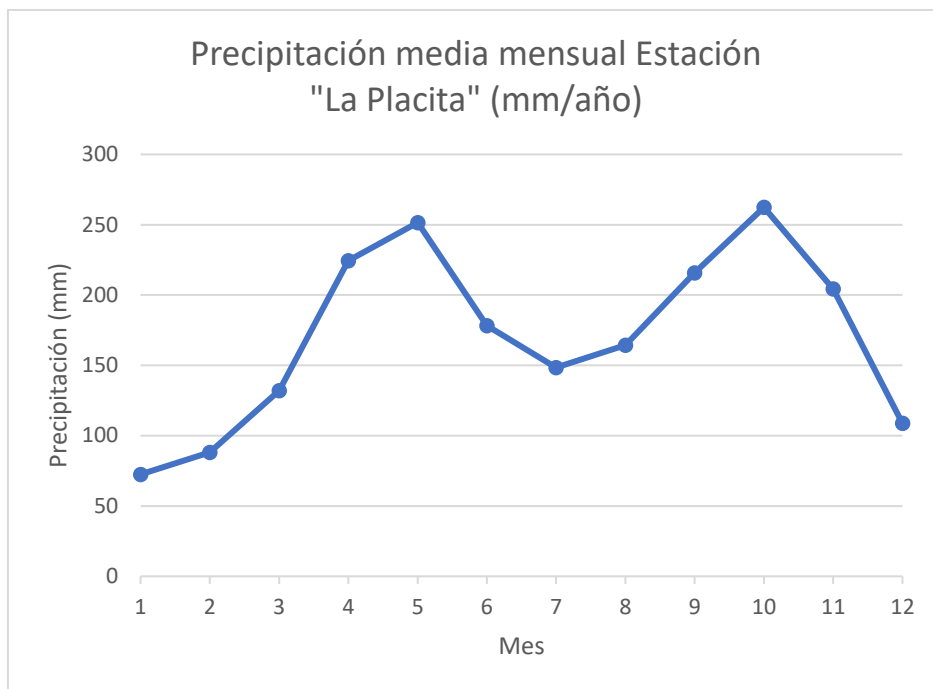


Figura 19: precipitación media mensual de la estación la Placita, la cual presenta un régimen bimodal con picos de lluvia en los meses abril-mayo y septiembre-octubre

Tabla 7 Precipitación mensual media, mínima y máxima según los datos obtenidos de la estación "La Placita".

PP (mm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media	72,48	88,04	132	224,4	251,6	178,2	148,4	164,4	215,7	262,3	204,4	108,9
Max.	281	256	378	428	668	466	403	405.5	376	415	434	274
Min.	0	0	7	40	90	40	0	0	50	115	55	20

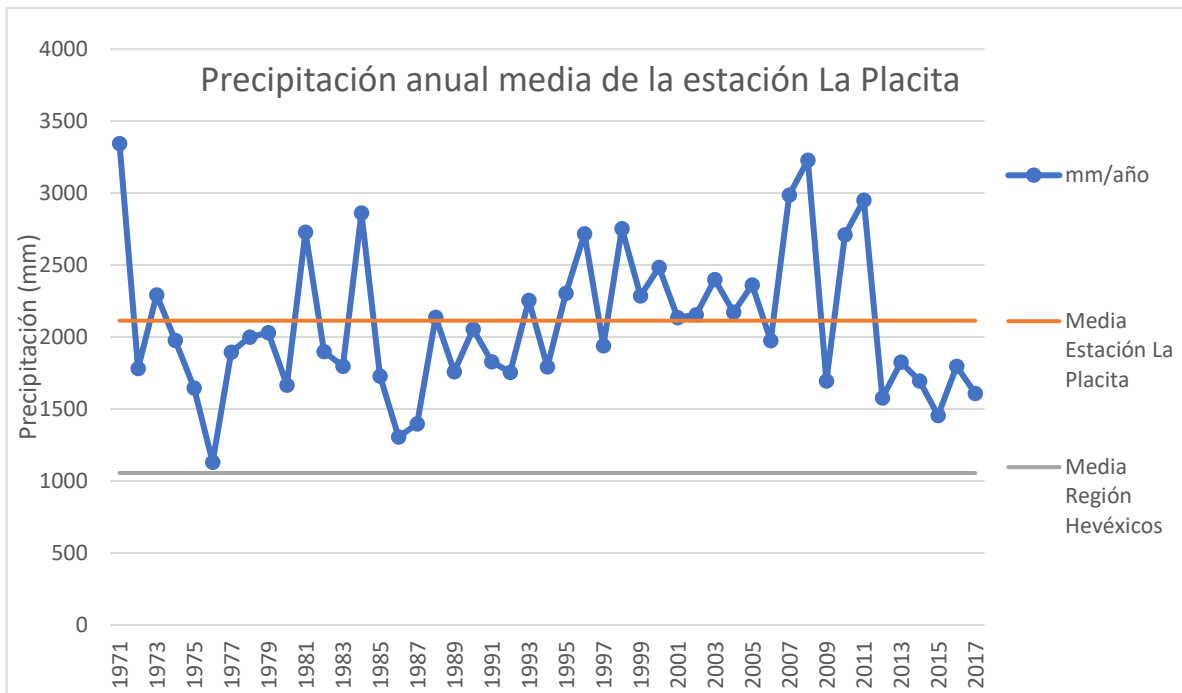


Figura 20: Gráfico de precipitación media anual, donde se compara con el régimen pluviométrico de subregión del Occidente Antioqueño (Hevéxicos).

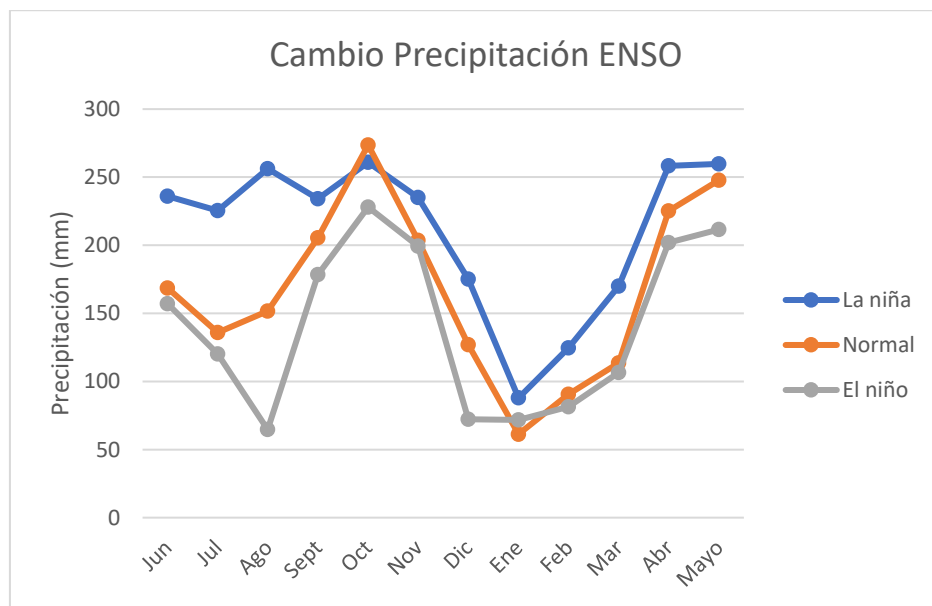


Figura 21: Fluctuación de la precipitación media mensual separadas por periodos de Niño, Niña y Normal, en los que se evidencia una diferencia marcada en Periodos Niña con respecto al promedio general de la precipitación media mensual en el segundo semestre del año.

4.4.2. Modelamiento y análisis hidráulico

El menor ECM calculado entre los PSI medidos y los caudales modelados, corresponde a un valor de $1,23 \pm 0,23$ mostrado en la Figura 22 y pertenece a la ecuación de ajuste del modelo presentado en la Figura 23 donde el caudal estimado es de $123,5 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 24 se observa la relación existente entre las medidas de los caudales en campo vs. los caudales simulados al caudal mencionado, estos valores tienen una media de $1,555 \pm 0,744$ para 6 árboles y $1,09 \pm 1,39$ para 24 árboles.

El modelo hidráulico apunta a las diferentes condiciones hidráulicas que se presentaron en un tramo del polígono A en la QJG (Figura 25), en el cual se presenta una descarga máxima de $123.5 \text{ m}^3/\text{s}$ con una profundidad de agua promedio de 2.28 m, una velocidad promedio de 2.38 m/s, un número de Froude promedio de 0.58 y desviaciones absolutas entre las alturas de flujo modeladas y la altura de la cicatriz que van desde -3,20 a 2,40 m.

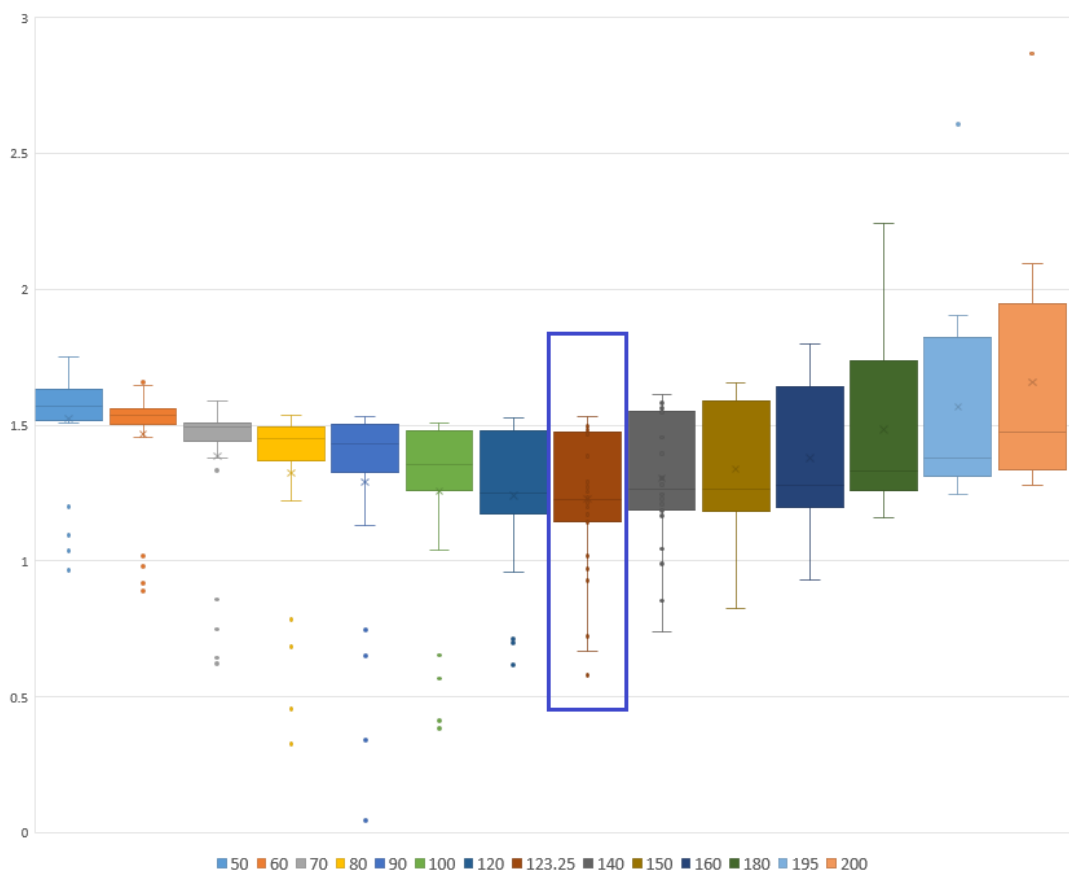


Figura 22: Comparación de ECM para distintos caudales

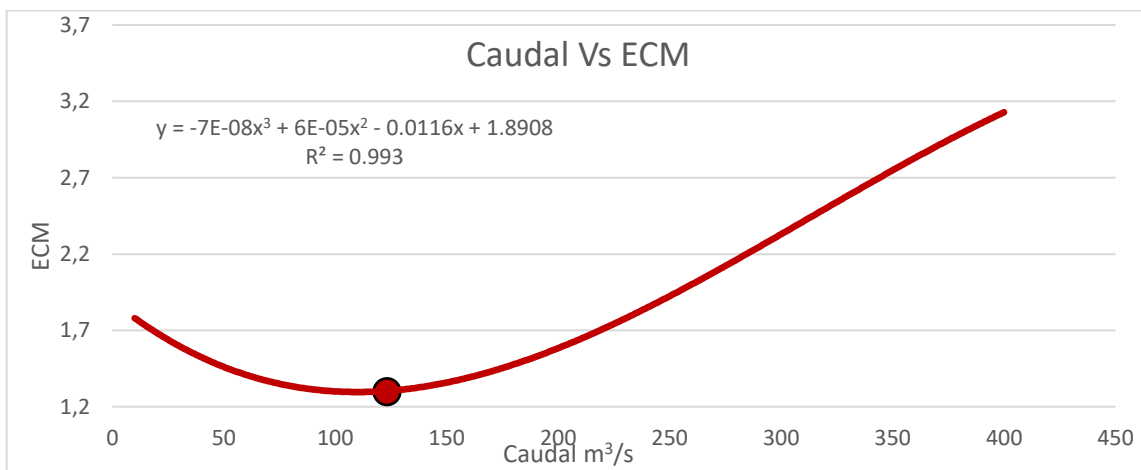


Figura 23: Caudales modelados contra ECM, graficados en una función cúbica, donde se muestra el menor ECM 123.5 el cual corresponde a el caudal máximo seleccionado.

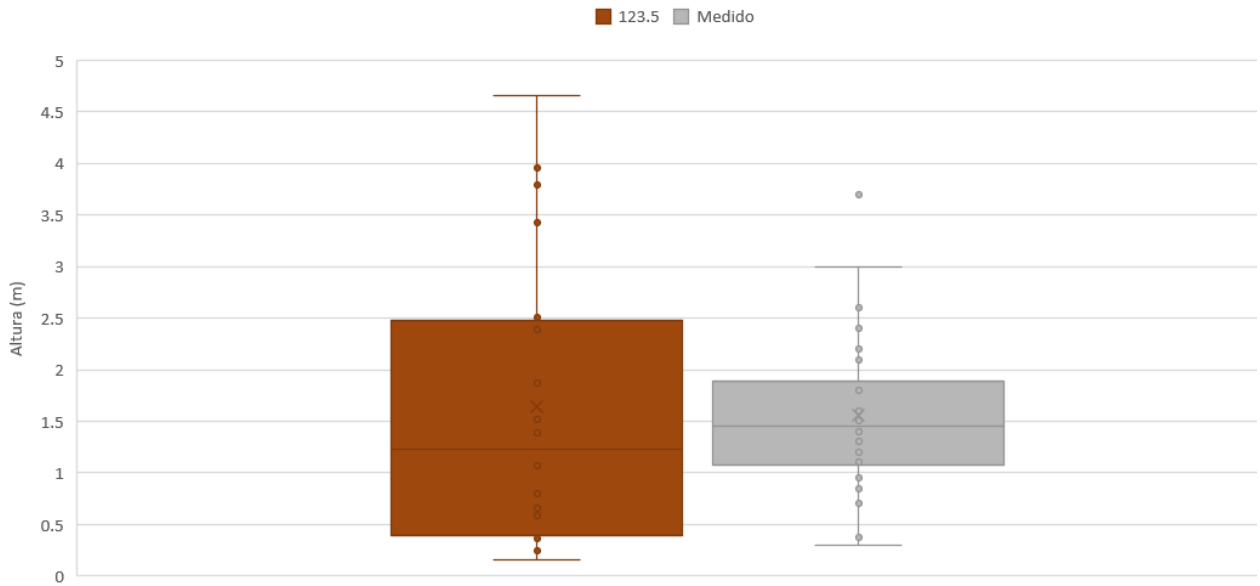


Figura 24: comparativa de caudal con menor ECM con las alturas de los PSI medidos, indicando gran similitud.

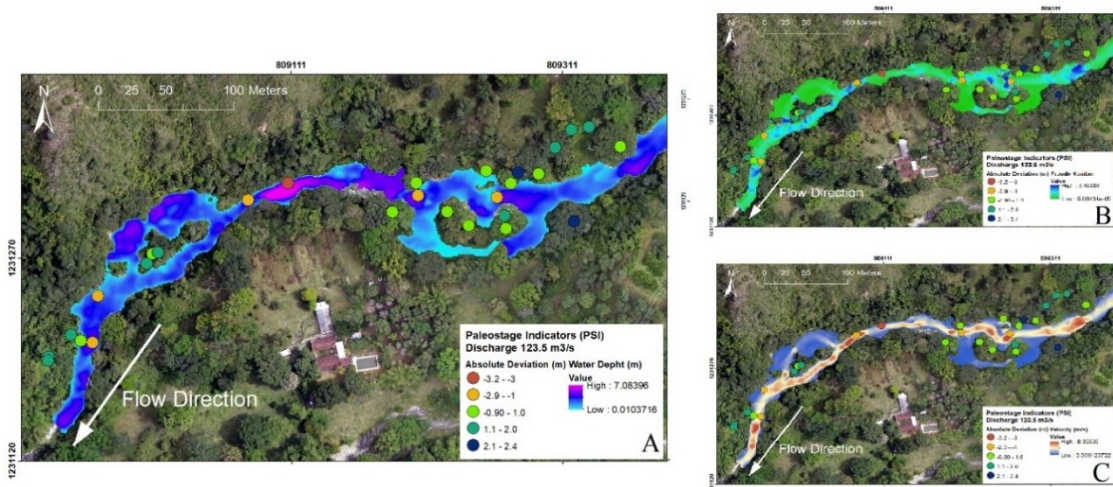


Figura 25: Desviaciones absolutas (en m) de PSI observadas en troncos de árboles y modeladas con Iber, así como su relación con la profundidad del agua (A), el número de Froude (B) y la velocidad del flujo (C), en un tramo del polígono A.

5. Discusión

5.1. Alcance de la aplicación de la dendrogeomorfología para el análisis de AT.

En Colombia, los estudios dendrocronológicos se han centrado en aplicaciones sobre ecología y climatología (Giraldo Jiménez, 2011). Sin embargo, las aplicaciones en geomorfología han sido nulas, lo que convierte a este estudio en el primero del país en dicha aproximación. Además, en las zonas del trópico húmedo, se presentan algunos estudios de aplicaciones en geomorfología como se mencionó anteriormente, pero tan sólo un estudio en Costa Rica ha aplicado cicatrices por impacto de carga sólida como PSI (Quesada-Román et al., 2020), por consiguiente, el presente estudio es el segundo en los trópicos y en América latina en dicha aplicación. Por esta razón los resultados presentados en ambos estudios dan evidencia del potencial dendrogeomorfológico de la zona e incentivan a seguir aplicando la técnica para la evaluación de procesos hidrodinámicos, paleohidrológicos y de avenidas torrenciales en términos de geomorfología aplicada, en diferentes regiones del trópico.

Por otro lado, en la región andina de Colombia, los fenómenos torrenciales son comunes y altamente destructivos, sin embargo, se han realizado pocos estudios sobre el asunto (Arango et al., 2021). Específicamente en la zona de estudio, como se puede evidenciar anteriormente en la recopilación histórica de eventos torrenciales, los fenómenos son muy recurrentes y los parámetros morfométricos de la cuenca, especialmente los que están asociados al relieve y a la textura del drenaje, muestran que la cuenca de la QJG presenta una alta probabilidad de ocurrencia de AT, e incluso los diferentes depósitos reciente aluviotorrenciales, documentados en este estudio, permiten inferir que la frecuencia de dichos eventos es alta.

La información de datos pluviométricos de la única estación de la cuenca se presenta tan sólo desde 1970, por lo cual la temporalidad de los eventos torrenciales analizados con datos sistemáticos tiene un alcance de tan solo 50 años. Adicionalmente, los eventos históricos reportados pueden omitir otros registros no documentados. Sin embargo, la presencia de especies arbóreas de la familia *Fabaceae*, que presentan anillos de crecimiento anual, tienen edades con promedios de 90 a 100 años (Schöngart et al., 2017), que, aunque no alcancen las cronologías de zonas de latitudes altas como se muestra en la Figura 25, pueden brindar un rango de temporalidad de eventos torrenciales a escalas de hasta 100 años y por lo tanto mejorar la predicción de los períodos de retorno (Markus Stoffel & Bollschweiler, 2009).

5.2. Relación de registro de eventos históricos con el análisis hidrometeorológico.

A partir de los datos de la estación la Placita, se calcularon el caudal medio de la QJG por medio de los métodos de Turc, Coutagne, Thornthwaite y Cenicafé, y se obtuvo un promedio general para establecer un caudal medio mensual (Figura 26). En este caso hay una coincidencia con respecto a la precipitación media mensual de la cuenca. Según los datos históricos consultados, los reportes de avenidas torrenciales sobre la cuenca de la QJG se presentaron en los años 1931, 1940, 1953, 1972, 1996, 2009, 2014 con un ciclo de recurrencia aproximado de 11 años (Figura 27). Por otro lado, los mayores valores de precipitación anual (> 2700 mm) se reportaron en 1971, 1981, 1984, 1996, 1998, 2007, 2008 y 2011, coincidiendo únicamente el evento ocurrido en 1996, lo que indica que no hay una relación directa entre la pluviosidad anual y los eventos torrenciales (Figura 26). Sin embargo, si

existe una relación entre la precipitación media mensual y la ocurrencia de eventos, como se muestra en la Figura 27, ya que la precipitación media mensual es más alta que en otros años en relación con la ocurrencia de eventos, por lo cual existe alguna relación entre la pluviosidad mensual y la ocurrencia de eventos.

Por otro lado, el mes con mayor ocurrencia de AT es junio, lo cual puede ser producto de lluvias fuertes en períodos cortos, lluvias antecedentes y la ocurrencia de estos eventos en años niña según la clasificación presentada por Golden Gate Weather Services (<https://ggweather.com/enso/oni.htm>).

Los resultados también muestran que los árboles con PSI en las terrazas tienen un ECM de $1,21 \pm 0,27$ m y los PSI ubicados en el canal de $1,29 \pm 0,22$ m, por lo cual el ECM es similar. Además, en las terrazas el caudal máximo fue de $101.07 \text{ m}^3/\text{s}$, y en el canal de $125.93 \text{ m}^3/\text{s}$. Este último se acerca más al caudal máximo sin discriminar por geoformas ($123.5 \text{ m}^3/\text{s}$), pero sólo está representada por 6 árboles, por lo cual se definió establecer el caudal máximo sin discriminar ubicación geomorfológica, estableciendo $123.5 \text{ m}^3/\text{s}$ como en caudal máximo. Entonces ambas geoformas son confiables para reconstrucciones de caudal máximo basados en evidencia dendrogeomorfológicas (Figura 29).

5.3. Nueva metodología con aplicaciones dendrocronológicas.

El estudio de caudales máximos en general se ha enfocado en metodologías convencionales que utilizan datos sistemáticos de estaciones de aforo o modelos con grandes incertidumbres. La metodología utilizada en este estudio debe replicarse en otras cuencas tropicales, ya que puede generar resultados en cuencas sin datos meteorológicos y/o de caudal.

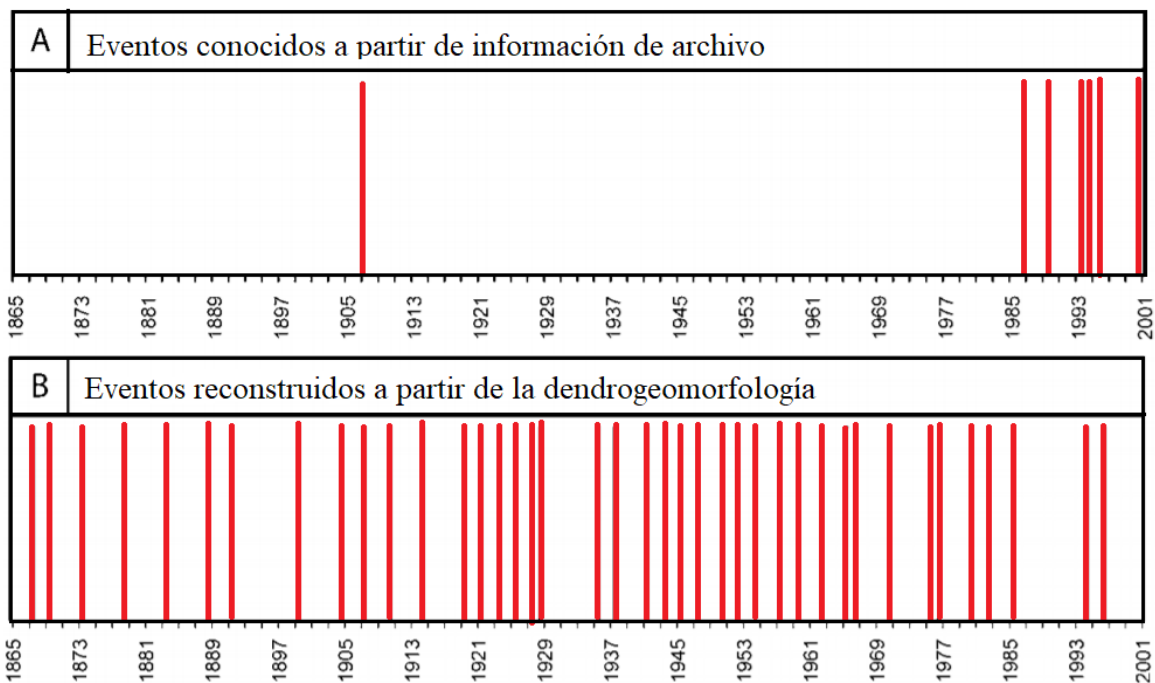


Figura 26: Ejemplo de reconstrucción dendrocronológica de eventos, con edades de anillos que alcanzan los 120 años. Modificado de (Markus Stoffel & Bollschweiler, 2009)

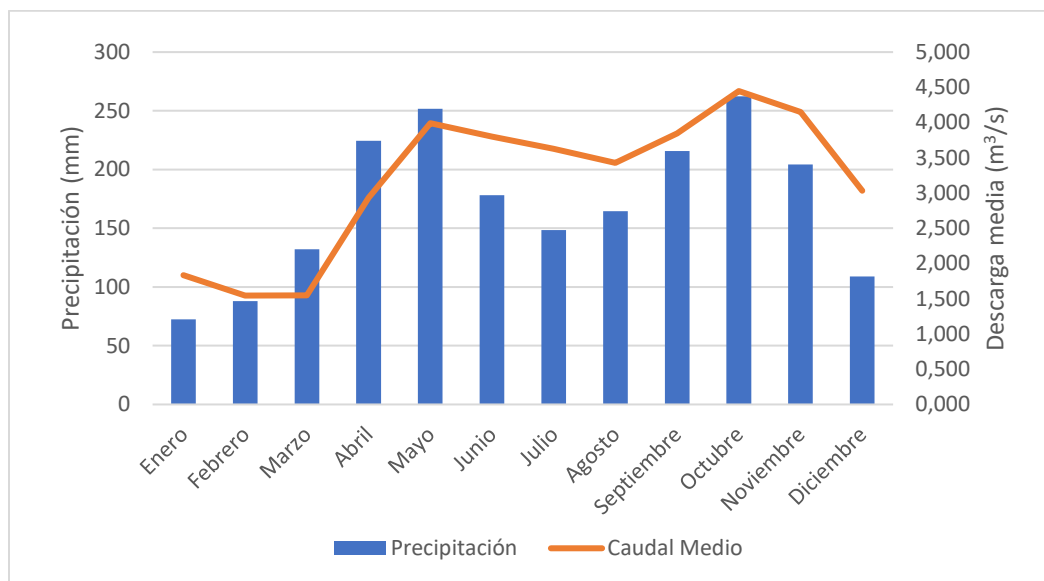


Figura 27: Gráfico de precipitación media mensual y su relación con el caudal medio.

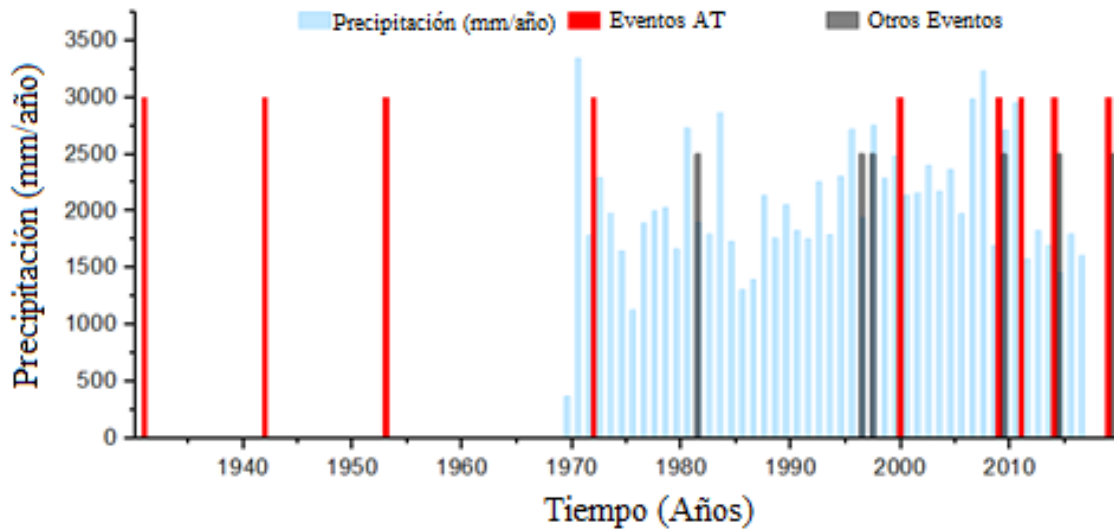


Figura 28: Ocurrencia de eventos de AT y otros eventos como movimientos en masa y fuertes lluvias y su ocurrencia en con la precipitación media mensual.

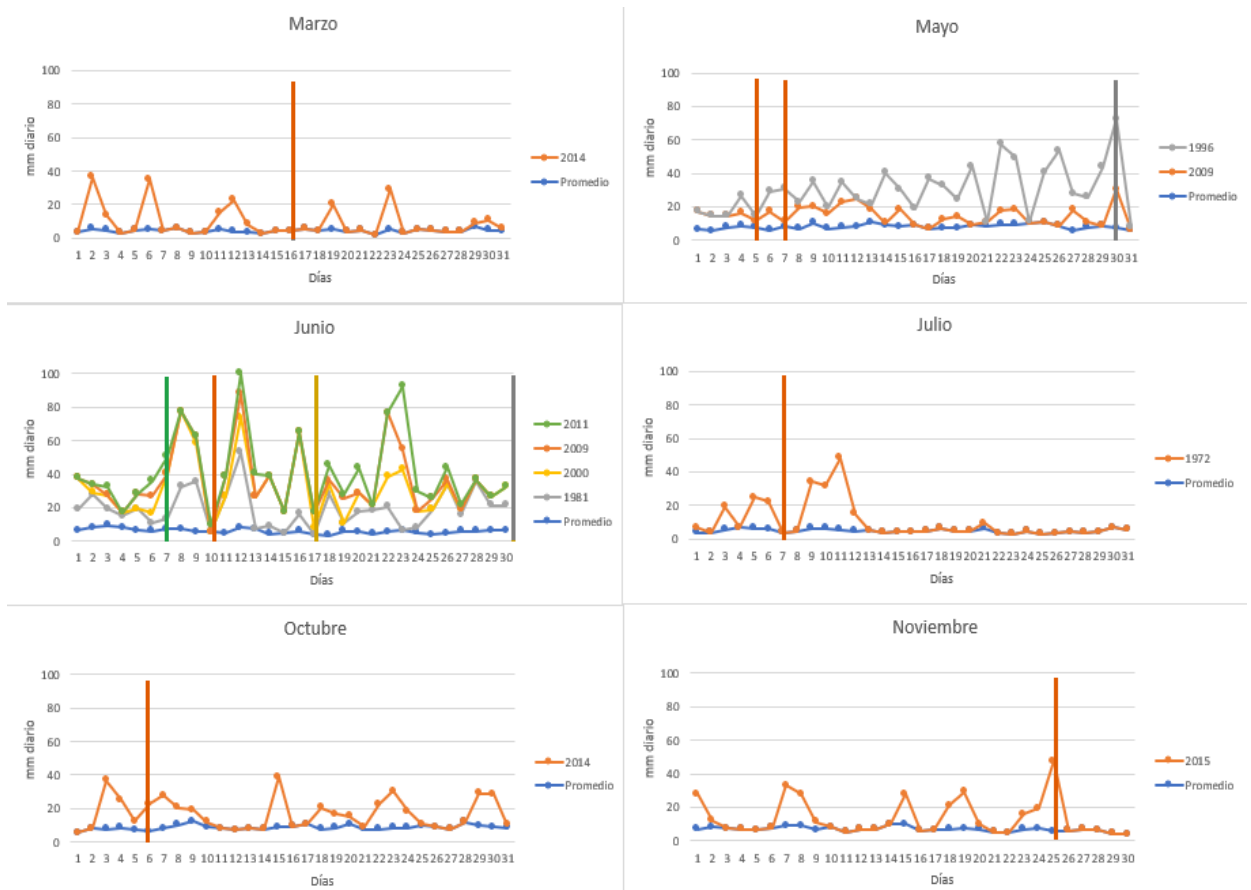


Figura 29: Meses con ocurrencia de avenidas torrenciales y su relación con el régimen pluviométrico diario. Se muestra la mayor ocurrencia de AT en el mes de junio.

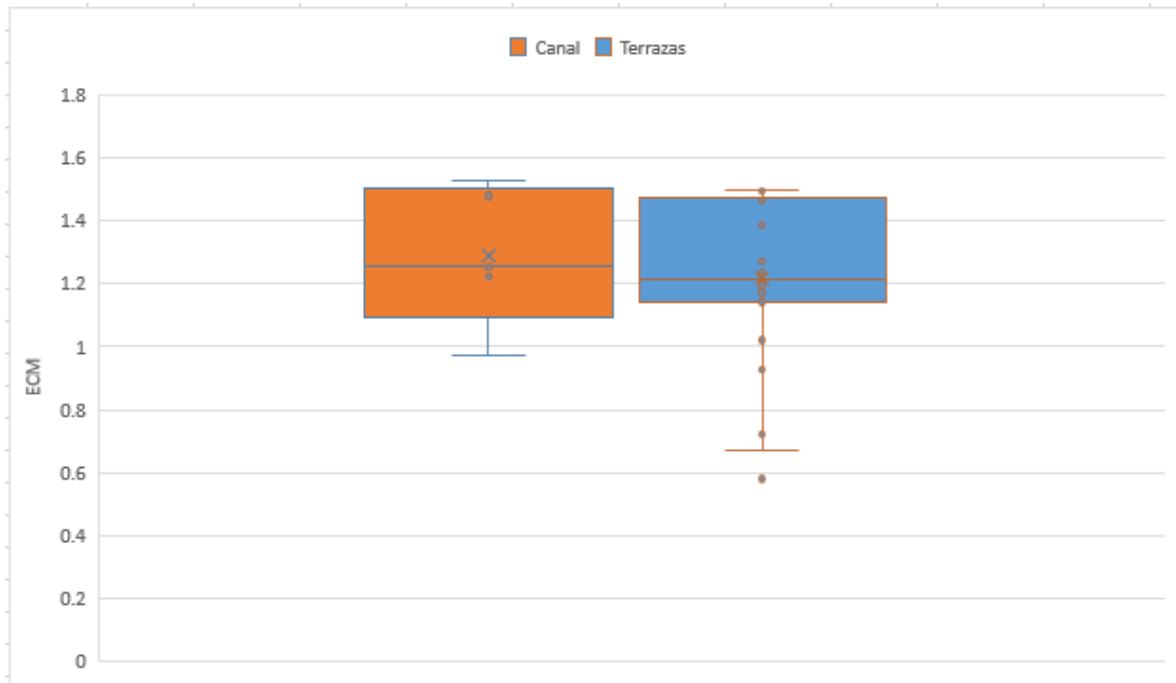


Figura 30: Diagramas de caja con el ECM calculado entre el caudal máximo medido con los PSI y el modelado como función de la posición geomorfológica de los árboles (Canal y Terrazas).

Además, una mejor precisión en el cálculo de caudales máximos ayuda a identificar los sitios críticos de la infraestructura vial como puentes o carreteras, cercanos a un canal torrencial y a la zonificación de inundaciones para el mejoramiento de los esquemas de ordenamiento territorial de los diferentes municipios, con el desarrollo de mapas de peligro y riesgo de inundación más detallados.

6. Conclusiones

Los análisis de amenaza por AT, que implican monitoreo instrumental y evaluación de la morfodinámica de una cuenca se hacen necesarios para el diseño y ejecución de planes de uso óptimo del territorio. Es de resaltar que los métodos dendrogeomorfológicos con aplicaciones de indicadores de paleonivel, acompañados del análisis geomorfológico y de un modelo hidráulico, permiten documentar eventos aluviotorrenciales, ocurridos en cuencas hidrológicas intramontanas tropicales y ayudan a mejorar los esquemas de ordenamiento territorial de los municipios afectados en materia de riesgos y desastres.

Al ser el segundo estudio con aplicación de indicadores de paleonivel mediante indicadores dendrogeomorfológicos en los trópicos húmedos, y el primero en Colombia, este estudio da pie a seguir aplicando técnicas dendrogeomorfológicas para la evaluación de AT en otros lugares con las mismas características climáticas. Además del análisis espacial con PSI, los árboles que presentan anillos de crecimiento anual en el trópico permiten aplicar un análisis dendrocronológico que conlleve a tener una comprensión temporal de las AT. Por lo tanto, los árboles impactados inventariados en este estudio deben ser muestreados para completar

el análisis espaciotemporal, con el que se generaría una mejor comprensión en el análisis de AT.

Anexos

Anexo 1. Parámetros morfométricos analizados en la cuenca del QJG y QJB

Parámetro	Símbolo	Cuenca Juan Garcia	Cuenca Juan Barriga	Referencia
Área (Km ²)	A	126.5	5,49	Schumm 1956)
Perímetro (Km)	P	62.41	14,93	Schumm 1956)
Longitud Máxima (Km)	LM	20.54	4,19	Schumm (1956)
Longitud del cauce principal (Km)	LCP	24.27	4,695	Schumm (1956)
Ancho de la Cuenca (km)	AC	6.16	1,31	Horton (1945)
Desnivel altitudinal (m)	DA	2836	1529	Strahler (1952)
Cota máxima (msnm)	Cmax	3291	2322,4	
Cota mínima (msnm)	Cmin	455	793,5	
Altitud media (msnm)	Am	2089	1489,7	
Altitud más frecuente (msnm)	Af	2251	1257,9	
Altitud mayor del cauce (msnm)	Amc	2601	2066	
Altitud menor del cauce (msnm)	Amec	463	811,8	
Pendiente promedio de la Cuenca (%)	Smed	11.685	32,56	

Anexo 2. Resultados de los parámetros morfométricos asociados a procesos de torrencialidad donde se indica la posibilidad media de generar eventos torrenciales de la QJG.

Índices Morfométricos	Unidades	Símbolo	Valor QJG	Valor QJB	Observaciones QJG	Observaciones QJB	Referencia
Factor Forma	NA	FF	0,300	0,313	Entre alargada y ligeramente alargada	Ligeramente alargada	(Horton, 1932)
Coefficiente de Compacidad	NA	Kc	1,554	1,784	Clase 3, oval - oblonga a rectangular - oblonga	Clase 3, oval - oblonga a rectangular - oblonga	(Gravelius, 1914)
Coefficiente de circularidad	NA	CC	0,408	0,310	Más alargada que ensanchada	Alargada	(Potter, 1953)

Relación de elongación	NA	Re	0,593 2	0,638	Cuenca plana con porciones accidentales	Cuenca plana con porciones accidentales	(Schumm, 1956)
Orden de la cuenca (Horton)	NA	Oc	5	4			(Strahler, 1952)
Longitud total de drenajes	Km	Lt	79,33	19,99			
Densidad de drenaje	NA	D	0,627	3,641	Cuenca mal drenada	Cuenca mal drenada	(Horton, 1932)
Frecuencia de drenajes	NA	F	0,672	15,48	Textura media	Textura media	(Horton, 1945)
# de drenajes orden 1	NA	N1	73,00	38			
# de drenajes orden 2	NA	N2	14,00	14			
Pendiente del cauce	(m/m)	Sc	0,088	0,267			
Tiempo de concentración	horas	Tc	1,767	0,336			(Rowe & Thomas, 1942)
Tiempo de concentración	horas	Tc	1,960	0,361			(Kirpich, 1940)
Tiempo de concentración	horas	Tc	2,369	0,624			(Giandotti, 1933)
Tiempo de concentración	horas	Tc	1,490	0,020			(V. Te Chow., 1994)
Tiempo de concentración	horas	Tc	2,123	0,501			(Temez Peláez, 1978)
Índice de melton, índice de rugosidad		IM	0,252	0,653			(Bertrand et al., 2013; Melton, 1957)
Relación de bifurcación		Rb	5,214	2,714			(Strahler, 1964)
Coefficiente de torrencialidad		Ct	0,577	6,922			(Camino et al., 2018)

Referencias

- Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia*.
- Arango, M. I., Aristizábal, E., & Gómez, F. (2021). Morphometrical analysis of torrential flows-prone catchments in tropical and mountainous terrain of the Colombian Andes by machine learning techniques. *Natural Hazards*, 105(1), 983–1012. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04346-5>

- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. *US Geological Survey Water-Supply Paper*, 2339. <https://doi.org/10.3133/wsp2339>
- Arias, L.A. (1996). Altiplanos y cañones en Antioquia: Una mirada genética. *Revista Facultad de Ingeniería: Universidad de Antioquia*, 12, 84–96.
- Arias, Luis Alberto, & James, L. M. (1981). *LA IMPORTANCIA DEL ANALISIS GEOMORFOLOGICO DE LOS SUPERFICIES DE EROSION Y DE LOS RASGOS TECTONICOS EN LA DETERMINACION DE LAS EDADES RELATIVAS DE DIFERENTES EVENTOS TECTONICOS EN LA PARTE NORTE DE LA CORDILLERA CENTRAL*.
- Aristizábal, E., Arango Carmona, M. I., & García López, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 242–258. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
- Ballesteros-Canovas, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Génova, M., Gutiérrez, E., Moya, J., Muntán, E., Oller, P., Rubiales, J., Ruiz-Villanueva, V., & Saz, M. Á. (2010). Dendrogeomorfología. Los árboles, fuente de conocimiento de los procesos y desastres naturales. En *Asociación Española de Arboricultura*.
- Ballesteros Cánovas, J. A., Eguibar, M., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Gutiérrez-Pérez, I. (2011). Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators. *Hydrological Processes*, 25(6), 970–979. <https://doi.org/10.1002/hyp.7888>
- Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Sanchez-Silva, M., & Stoffel, M. (2011). Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, 403(1–2), 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.045>
- Barneby, R. C., & Grimes, J. (1996). Silk tree, guanacaste, monkey's earring: a generic system of the synandrous Mimosaceae of the Americas. Part I. Abarema, Albizia, and allies. *Memoirs of the New York Botanical Garden*.
- Barnes, H. H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*.
- Benito, G., & Díez-Herrero, A. (2015). Palaeoflood Hydrology. En *Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disasters* (pp. 65–104). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394846-5.00003-5>
- Bertrand, M., Liébault, F., & Piégay, H. (2013). Debris-flow susceptibility of upland catchments. *Natural Hazards*, 67(2), 497–511. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0575-4>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bodoque, J. M., Ballesteros-Cánovas, J. A., & Stoffel, M. (2020). An application-oriented

- protocol for flood frequency analysis based on botanical evidence. *Journal of Hydrology*, 590, 125242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125242>
- Borga, M., Gaume, E., Creutin, J. D., & Marchi, L. (2008). Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. *Hydrological Processes*, 22(18), 3883–3885. <https://doi.org/10.1002/hyp.7111>
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., & Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.022>
- Bovi, R. C., Chartier, M. P., Domínguez-Castillo, V., Peres Chagas, M., Tomazello Filho, M., & Cooper, M. (2018). Application of growth rings and scars in exposed roots of *Schizolobium parahyba* as a tool for dating geomorphic processes in the State of São Paulo, Brazil. *Dendrochronologia*, 50, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.04.002>
- Bovi, R. C., Chartier, M. P., Roig, F. A., Filho, M. T., Castillo, V. D., & Cooper, M. (2019). Dynamics of erosion processes in the tropics: a dendrogeomorphological approach in an Ultisol of southeastern Brazil. *Plant and Soil*, 443(1–2), 369–386. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04227-2>
- Briceño, A. M., Rangel-Ch, J. O., & Bogino, S. M. (2016). ESTUDIO DE LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO DE *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) EN COLOMBIA. *Colombia Forestal*, 19(2). <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a07>
- Briceño Jiménez, A. M. (2017). *Dinámica del crecimiento y relación con el clima de especies arbóreas de los bosques de la región Caribe, Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59369>
- Briceño Jiménez, A. M., Arévalo F., R. L., Esquivel, H. E., & Fernández, F. (2010). *Potencial dendroclimático de la madera de cinco especies de árboles del bosque seco tropical de Armero Tolima*.
- Brienen, R. J. W., Schöngart, J., & Zuidema, P. A. (2016). *Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate Sensitivity of Tropical Trees* (pp. 439–461). https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20
- Bustos, X., Bermúdez, M. A., Toro, G. M., Bernet, M., Rojas, O., & Marin, M. I. (2013). Caracterización de superficies de erosión mediante geomorfología cuantitativa, Altiplano Antioqueño, Cordillera Central de Colombia. *Terra*, 29(46). http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892013000200004
- Caballero Acosta, J. H. (2012). Las avenidas torrenciales una amenaza potencial en el valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 45–50. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/29734>
- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López de Armentia, A., Del Río, J., & De Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73–97. <http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/pdf/reuge/v27n1/v27n1a05.pdf>

- Chow., V. Te. (1994). Applied Hydrology International ed., McGraw Hill Higher Education. *McGraw Hill Higher Education.*, 1, 390.
- Chow, V. T. (1959). Open-Channel Hydraulics. En *Science*.
- Corantioquia. (2004). *Evaluación del potencial acuífero de los municipios de Santa Fe de Antioquia, Sopetrán, San Jerónimo, Olaya y Liborina : informe final*.
- CORANTIOQUIA. (2006). *Conservación y Manejo In-situ y Ex-situ de Especies Forestales de Importancia Ecológica y Económica*. https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/FLORA/AIRNR_CN_6338_2005.pdf
- Correa, T., Obando, M., Zapata Villada, J. P., Ortiz, F. H., Rincon, A., & Rodríguez García, G. (2018). *GEOLOGÍA DEL BORDE OCCIDENTAL DE LA PLANCHA 130 SANTA FE DE ANTIOQUIA. MEMORIA EXPLICATIVA 1:50.000*.
- Daly, D. C. (1993). Notes on Bursera in South America, Including a New Species. Studies in Neotropical Burseraceae VII. *Brittonia*, 45(3), 240. <https://doi.org/10.2307/2807109>
- DANE. (2018). *Centro Nacional de Población y Vivienda*.
- Davidian, J. (1984). COMPUTATION OF WATER-SURFACE PROFILES IN OPEN CHANNELS. En *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*.
- del Valle, Jorge I, & Giraldo, J. A. (2020). RADIOCARBON AND DENDROCHRONOLOGY APPLIED IN A LEGAL DISPUTE: A CASE FROM COLOMBIA. *Radiocarbon*, 1–9. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.30>
- Del Valle, Jorge Ignacio, Ramirez, J. A., & Herrera, D. A. (2012). Experiencias dendroclimáticas con árboles de ecosistemas contrastantes de Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 21(2), 117–126. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v21n2.32217>
- Díez-Herrero, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Bodoque, J. M., & Ruiz-Villanueva, V. (2013). A new methodological protocol for the use of dendrogeomorphological data in flood risk analysis. *Hydrology Research*. <https://doi.org/10.2166/nh.2012.154>
- Díez-Herrero, Andres, Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Eguívar, M. A., Fernández, J. A., Génova, M. M., Laín, L., Llorente, M., Rubiales, J. M., & Stoffel, M. (2007). Mejoras en la estimación de la frecuencia y magnitud de avenidas torrenciales mediante técnicas dendrogeomorfológicas. *Boletín Geológico y Minero*, 118(4), 789–802.
- Díez Herrero, A. (2015). Buscando riadas en los árboles: Dendrogeomorfología. *Enseñanza de las ciencias de la tierra: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(3), 272–285.
- Espinal T., L. S. (1985). Geografía Ecológica del Departamento de Antioquia (Zonas de Vida (Formaciones Vegetales) del Departamento de Antioquia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 38(1), 5–106.
- Gallego Montoya, J. J. (2018). *Assessment of recent tectonic activity of the Sabanalarga Fault System, Western Antioquia – Colombia*. University of Bern.
- García-Oteyza, J., Génova, M., Calvet, J., Furdada, G., Guinau, M., & Díez-Herrero, A.

- (2015). Dating flash floods and debris flows through dendrogeomorphological methodologies (Portainé stream, Lleida, Spain). *Ecosistemas*, 24(2), 43–50. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2015.24-2.07>
- García, Y. C. (2011). *Reconstrucción Paleoambiental del Holoceno Tardío con base en el Análisis de Palinofacies de la Terraza San Nicolás, Registro del Paleolago Cauca, Colombia*. EAFIT.
- Giandotti, M. (1933). *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*.
- Gilvear, D., Winterbottom, S., & Sickingabula, H. (2000). Character of channel planform change and meander development: Luangwa River, Zambia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(4), 421–436. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200004\)25:4<421::AID-ESP65>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<421::AID-ESP65>3.0.CO;2-Q)
- Giraldo, J. A., del Valle, J. I., Sierra, C. A., & Melo, O. (2020). Dendrochronological Potential of Trees from America's Rainiest Region. En *Latin American Dendroecology* (pp. 79–119). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36930-9_5
- Giraldo, J., & del Valle, J. (2017). Variaciones siderales y del clima en Colombia: Registro en anillos de crecimiento. *7º Congreso Forestal Español, June*, 13.
- Giraldo Jiménez, J. A. (2011). DENDROCRONOLOGÍA EN EL TRÓPICO: APLICACIONES ACTUALES Y POTENCIALES. *Colombia Forestal*, 14(1), 97. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a08>
- Giraldo, V. D., & Del Valle, J. I. (2012). Modelación del crecimiento de *Albizia niopoides* (Mimosaceae) por métodos dendrocronológicos. *Revista de Biología Tropical*, 60(3), 1117–1036. <https://doi.org/10.15517/rbt.v60i3.1762>
- Gilvear, D., Winterbottom, S., & Sickingabula, H. (2000). Character of channel planform change and meander development: Luangwa River, Zambia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(4), 421–436. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200004\)25:4<421::AID-ESP65>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200004)25:4<421::AID-ESP65>3.0.CO;2-Q)
- Gottesfeld, A. S. (1996). British Columbia flood scars: maximum flood-stage indicators. *Geomorphology*, 14(4), 319–325. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00045-7](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00045-7)
- Gravelius, H. (1914). *Flusskunde* (Goschen'sc).
- Gutiérrez, M. (2006). El Rol de las Bases de Datos Espaciales en una Infraestructura de Datos. *SDI-9 Conference Proceedings, November 2006*, 6–10.
- Herrera, D. A., & del Valle, J. I. (2011). Reconstrucción de los niveles del río Atrato con anillos de crecimiento de *Prioria copaifera*. *DYNA (Colombia)*, 78(169), 121–130. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>
- Holdridge, L. R., Grenke, W. ., Hatheway, W. ., Liang, T., & Tosi, J. A. (1971). Forest environments in tropical life zones, a pilot study. En *Pergamon Press*.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350–361. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society*

of America, 56(3). [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)

- Hungr, O., Corominas, J., & Eberhardt, E. (2005). Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. En *Landslide Risk Management*.
- Hupp, C. R., & Bornette, G. (2003). Vegetation as a Tool in the Interpretation of Fluvial Geomorphic Processes and Landforms in Humid Temperate Areas. En M. Kondolf & H. Piégay (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology* (pp. 269–288).
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. I. (2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas*.
- Jarrett, R. D., & England, J. F. (2002). *Reliability of Paleostage Indicators for Paleoflood Studies* (pp. 91–109). <https://doi.org/10.1029/WS005p0091>
- Jiménez, J. A. G., & del Valle Arango, J. I. (2011). Estudio del crecimiento de prioria copaifera (Caesalpinaceae) mediante técnicas dendrocronológicas. *Revista de Biología Tropical*, 59(4), 1813–1831.
- Kaennel, M. (1996). A multilingual glossary of biotechnological terms. *Biochemical Education*, 24(1), 46. [https://doi.org/10.1016/s0307-4412\(96\)80010-0](https://doi.org/10.1016/s0307-4412(96)80010-0)
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- López-Ayala, J. L., Valdez-Hernández, J. I., Terrazas, T., & Valdez-Lazalde, R. J. (2006). Anillos de crecimiento y su periodicidad en tres especies tropicales del Estado de Colima, México. *Agrociencia*, 40(4), 533–544.
- López, J., del Valle, J. I., Giraldo, J. A., & Meinzer, F. (2014). Flood-promoted vessel formation in Prioria copaifera trees in the Darien Gap, Colombia. *Tree Physiology*, 34(10), 1079–1089. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu077>
- Melton, M. A. (1957). *An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology. Technical Report No. 11.*
- Mendez, W., Pacheco, H., Cartaya, S., Marcano, A., & León, C. (2015). Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas, Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 133–156. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50213>
- Page, W. D. (1986). *Geología sísmica y sismicidad del noroeste de Colombia*.
- Pearl, J. K., Keck, J. R., Tintor, W., Siekacz, L., Herrick, H. M., Meko, M. D., & Pearson, C. L. (2020). New frontiers in tree-ring research. *The Holocene*, 30(6), 923–941. <https://doi.org/10.1177/0959683620902230>
- Pineda-Herrera, E., Carreón-Santos, R. J., Valdez-Hernández, J. I., & Interian-Kú, V. M. (2019). Crecimiento en diámetro de tres especies arbóreas en una selva secundaria de Quintana Roo, México. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511601>
- Potter, P. E. (1953). A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee . V. C. Miller. *The Journal of Geology*, 65(1), 112–113. <https://doi.org/10.1086/626413>

- Pumijumnong, N. (2012). Teak Tree Ring Widths: Ecology and Climatology Research in Northwest Thailand. *Sci., Tech. and Dev*, 31(2), 165–174. http://www.researchgate.net/publication/233764422_Teak_Tree_Ring_Widths_Ecology_and_Climatology_Research_in_Northwest_Thailand/file/79e4150b5938bdf963.pdf
- Quesada-Román, A. (2020). *Deciphering natural hazard histories based on tree-ring analyses in contrasting tropical ecosystems of Costa Rica*. <https://www.researchgate.net/publication/348575444>
- 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*, 359, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107133>
- Ramírez, J. A. (2007). *Relación entre la señal climática de cronologías de Capparis odoratissima y Cercidium praecox con la variabilidad climática local y global de La Guajira, Colombia*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín[in].
- Ramírez, J. A., & del Valle, J. I. (2011). Paleoclima de la Guajira, Colombia; según los anillos de crecimiento de Capparis odoratissima (Capparidaceae). *Revista de Biología Tropical*, 59(3), 1389–1405. <https://doi.org/10.15517/rbt.v0i0.3406>
- Ramírez, J. A., & del Valle, J. I. (2012). Local and global climate signals from tree rings of Parkinsonia praecox in La Guajira, Colombia. *International Journal of Climatology*, 32(7), 1077–1088. <https://doi.org/10.1002/joc.2335>
- Rangel, J. O., Rivera, O., Franco, P., Torres, J. H., Hammen, T. van der, & Cleef, A. M. (2005). *Catálogo de la flora vascular del Macizo de Tatamá*.
- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (2020). Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An update. First part: Continental terranes. *Proterozoic-Paleozoic. Servicio Geológico Colombiano*, 1, 27. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>
- Rivera Builes, C. (2013). *POTENCIAL DENDROCRONOLÓGICO DE ÁRBOLES DE LA AMAZONIA COLOMBIANA*.
- Rivera Martin, L. E., Peñuela Mora, M. C., Jiménez Rojas, E. M., & Vargas Jaramillo, M. del P. (2013). *Ecología y silvicultura de especies útiles amazónicas*. <http://www.bdigital.unal.edu.co/36632/6/9789587616347.pdf>
- Romero Díaz, M. A., & López Bermúdez, F. (1987). MORFOMETRIA DE REDES FLUVIALES: REVISIÓN CRITICA DE LOS PARAMETROS MAS UTILIZADOS Y APLICACIÓN AL ALTO GUADALQUIVIR. *Papeles de geografía*, 12, 47–62. <https://doi.org/10.1093/nq/s3-V.126.435-a>
- Rowe, R. R., & Thomas, R. L. (1942). Comparative hydrology pertinent to California culvert practice. *California Highways and Public Works*.
- Rozendaal, D. M. A., & Zuidema, P. A. (2011). Dendroecology in the tropics: a review. *Trees*, 25(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0480-3>
- Ruiz-Villanueva, V., Martínez, J. J., Álvarez, J. A., Génova, M. del M., & Díez-Herrero, A. (2010). Aplicación de métodos dendrogeomorfológicos a la datación de eventos sísmicos: terremoto de el salvador, febrero de 2001. *Avances de la Geomorfología en España 2008-2010. XI Reunión Nacional de Geomorfología, Solsona 2010*, 517–520.

- Schöngart, J., Bräuning, A., Barbosa, A. C. M. C., Lisi, C. S., & de Oliveira, J. M. (2017). *Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges* (pp. 35–73). https://doi.org/10.1007/978-3-319-61669-8_3
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67(5), 597–646. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)
- Schwanghart, W., & Scherler, D. (2014). Short Communication: TopoToolbox 2 - MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. *Earth Surface Dynamics*, 2(1). <https://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014>
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. En *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)
- Servicio Geológico Colombiano, & EAFIT. (2014). *MEMORIA EXPLICATIVA DE LA ZONIFICACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA RELATIVA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000 PLANCHA 130 – SANTA FE DE ANTIOQUIA*.
- Servicio Geológico Colombiano, & Pontificia Universidad Javeriana. (2019). *Guía Metodológica de Amenaza por Avenidas Torrenciales*. <https://www.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=3185d3b45e37426ebf0c3838a268b431>
- Shroder, J. F. (1978). Dendrogeomorphological Analysis of Mass Movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research*, 9(2), 168–185. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(78\)90065-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(78)90065-0)
- Sigafoos, R. S. (1964). Botanical Evidence of Floods and Flood-Plain Deposition. *USGS Professional Paper*, 485-A.
- Šilhán, K. (2021). The spatio-temporal reconstruction of spoil heap landslide movements using anatomical tree growth responses. *Engineering Geology*, 281, 105988. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105988>
- Smith, M. J., Paron, P., & Griffiths, J. S. (2011). *Geomorphological mapping methods and applications* (J. J. Shrode (ed.)).
- Stiny, J. (1910). Die Muren: Versuch einer Monographie mit besonderer berücksichtigung der verhältnisse in Den Tiroler Alpen. *Wagner*.
- Stoffel, M., & Bollschweiler, M. (2008). Tree-ring analysis in natural hazards research - An overview. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(2), 187–202. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>
- Stoffel, Markus, & Bollschweiler, M. (2009). *What Tree Rings Can Tell About Earth-Surface Processes: Teaching the Principles of Dendrogeomorphology*. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00223.x>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

- Strahler, A. N. (1964). Handbook of applied hydrology. En Mc-Graw Hill Book Company (Ed.), *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks* (pp. 39–76).
- Temez Peláez, J. R. (1978). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. En *Centro de Estudios Hidrográficos*.
- Uribe Ángel, M. (1885). *Geografía general y compendio histórico del Estado de Antioquia en Colombia*. Imprenta de Victor Group y Jourdan.
- Villegas Gutiérrez, F. (1980). *Preliminary seismic Hazard Study Ituango Project Colombia : Phase I*.
- Webb, R. H., & Jarrett, R. D. (2013). *One-Dimensional Estimation Techniques for Discharges of Paleofloods and Historical Floods* (pp. 111–125). <https://doi.org/10.1029/WS005p0111>
- Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., & Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1), 61–66. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>
- Wilhelm, B., Ballesteros Cánovas, J. A., Macdonald, N., Toonen, W. H. J., Baker, V., Barriendos, M., Benito, G., Brauer, A., Corella, J. P., Denniston, R., Glaser, R., Ionita, M., Kahle, M., Liu, T., Luetscher, M., Macklin, M., Mudelsee, M., Munoz, S., Schulte, L., ... Wetter, O. (2019). Interpreting historical, botanical, and geological evidence to aid preparations for future floods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(1), e1318. <https://doi.org/10.1002/wat2.1318>
- Winchester, V., Gartner, H., & Bezzi, M. (2007). Dendrogeomorphological applications. En *Geomorphological Variations. Prague: Nakladatelstvi P3K* (pp. 183–203).
- Worbes, M., Blanchart, S., & Fichtler, E. (2013). Relations between water balance, wood traits and phenological behavior of tree species from a tropical dry forest in Costa Rica—a multifactorial study. *Tree Physiology*, 33(5), 527–536. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt028>
- Worbes, Martin. (1999). Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology*, 87(3), 391–403. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1999.00361.x>
- Worbes, Martin. (2002). One hundred years of tree-ring research in the tropics – a brief history and an outlook to future challenges. *Dendrochronologia*, 20(1–2), 217–231. <https://doi.org/10.1078/1125-7865-00018>
- Yanosky, T. M., & Jarrett, R. D. (2002). *Dendrochronologic Evidence for the Frequency and Magnitude of Paleofloods* (pp. 77–89). <https://doi.org/10.1029/WS005p0077>
- Zapata-Villada, J. P., Giraldo, W., Rodríguez, G., Geraldés, M. C., & Obando, M. (2021). Geoquímica y geocronología U-Pb de la Cuarzodiorita de Sabanalarga y el Gabro de Santa Fe, Colombia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(1), A280520. <https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a280520>

