



ESTIMACIÓN DEL APORTE DE SEDIMENTOS POR MOVIMIENTOS EN MASA A LA
AVENIDA TORRENCIAL OCURRIDA EN CERRO BRAVO, CUENCA DE LA QUEBRADA
LA TIGRA, MUNICIPIO DE VENECIA, ANTIOQUIA

Quantifying Sediment Contribution from Mass Movements to a Torrential Flow Event in the
Cerro Bravo Zone, La Tigra Stream Basin, Municipality of Venecia, Antioquia

ANDRÉS FELIPE CONDE VILLANUEVA
MARÍA ISABEL ECHAVARRÍA CORREA

Tesis

Asesor

Marco Fidel Gamboa Ramírez

Proyecto de grado presentado para optar por el título de
Geólogo/a

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2026

AGRADECIMIENTOS

Antes de presentar formalmente este trabajo, queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos al profesor Marco Fidel Gamboa Ramírez, asesor de este trabajo, por su orientación, paciencia, disposición, acompañamiento y apoyo constante a lo largo de todo el proceso de realización de este trabajo, convirtiéndose así en nuestra guía principal. De igual manera, agradecemos a los docentes de la Universidad EAFIT cuya enseñanza a lo largo de la carrera nos brindó los conocimientos y herramientas conceptuales necesarios para comprender y desarrollar este trabajo, así como a la universidad misma por brindarnos los espacios, herramientas y recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Extendemos también este agradecimiento a nuestros compañeros de carrera, por sus consejos, su compañía y por hacer de este proceso algo más llevadero y enriquecedor, convirtiéndose así en colegas y amigos para nosotros. Agradecemos también a nuestras familias, por el apoyo incondicional, la paciencia y la confianza depositada en nosotros durante todo este camino, estando siempre presentes durante todo nuestro proceso de aprendizaje, dándonos ánimo en los momentos difíciles y celebrando con nosotros las pequeñas victorias. Finalmente, nos agradecemos el uno al otro por el compromiso, la constancia, el esfuerzo, la disciplina, la complementariedad, la disposición para compartir ideas y escuchar sin juzgar al otro y, sobre todo, por la compañía a lo largo de este proceso. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo conjunto que va más allá de lo académico y el cual representa el cierre de una etapa de formación que da paso a nuestro futuro como profesionales.

DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

En el presente trabajo se utilizaron las plataformas de inteligencia artificial ChatGPT y Claude con el fin de mejorar la redacción, coherencia y cohesión de algunos párrafos en secciones como la discusión, la introducción y el resumen, así como para apoyar la traducción de este último.

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. GENERALIDADES.....	9
2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	9
2.2. HIPÓTESIS.....	9
2.3. OBJETIVO GENERAL	9
2.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3. ZONA DE ESTUDIO	10
4. METODOLOGÍA	12
4.1. ESTIMACIÓN DE APOORTE DE SEDIMENTOS.....	13
4.1.1. Volumen de agua.....	13
4.1.2. Volumen de sedimentos	15
4.1.2.1. Fotointerpretación e Inventario de movimientos en masa	15
4.1.2.2. Cálculo volumétrico por diferencia de alturas	15
4.1.2.3. Estimación de la incertidumbre y umbral mínimo de detección	16
5. RESULTADOS.....	17
5.1. Inventario de movimientos en masa.....	17
5.2. Volumen de sedimentos	18
5.2.1. Incertidumbre del DOD.....	19
5.3. Concentración de sedimentos.....	19
6. DISCUSIÓN.....	20
7. CONCLUSIONES	24
REFERENCIAS	25

ANEXOS.....	29
-------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa geológico del área de estudio: Cerro Bravo y Cuenca de la Quebrada La Tigra, municipio de Venecia, Antioquia	11
Figura 3. Esquema metodológico para el estudio	12
Figura 4. Mapa de ubicación del punto de control hidrológico P05, la estación pluviométrica 26200150 perteneciente al IDEAM	14
Figura 5. Mapa de procesos donde se observan las zonas de desprendimiento, acumulación y transporte de sedimentos	18

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tiempos de retorno para los caudales en m ³ /s de las quebradas La Tigra, Galápagos y Santa Bárbara	14
Tabla 2. Áreas y volúmenes estimados para las zonas de desprendimiento y acumulación en la cuenca de la Quebrada La Tigra	18
Tabla 3. Estimación de la concentración volumétrica de sedimentos para el evento de avenida torrencial	19

RESUMEN

Las avenidas torrenciales son fenómenos asociados a la movilización de agua y sedimentos desde laderas inestables, capaces de transportar entre el 20% y 60% de material sólido a velocidades de hasta 30 m/s. Estos eventos representan uno de los procesos naturales de menos tiempo de respuesta y con mayor incidencia en pérdidas humanas y materiales en Colombia. A pesar de su recurrencia, el aporte de sedimentos provenientes de movimientos en masa suele asumirse en un valor fijo del 40%, lo que puede causar incertidumbre a la hora de evaluar estos fenómenos. Este estudio tuvo como objetivo estimar el volumen (%) real de sedimentos aportados por movimientos en masa a la avenida torrencial ocurrida el 25 de junio de 2024 en el municipio de Venecia, Antioquia, zona de Cerro Bravo, específicamente en la cuenca de la Quebrada La Tigra. La metodología incluyó fotointerpretación de ortofotos, inventario de movimientos en masa y delimitación de áreas de desprendimiento y acumulación de material. Además, se generó un Modelo Digital de Elevación (DEM) que modela las condiciones previas al evento, a partir de los cuales se estimaron los volúmenes de sedimentos movilizados y su aporte al evento mediante diferencias de DEMs. Los resultados indican que aproximadamente el 34,3% del volumen total de la avenida torrencial corresponde a sedimentos aportados por movimientos en masa. Este resultado permite mejorar la comprensión de las avenidas torrenciales y aporta información para evaluar su impacto en función de la carga sólida transportada.

Palabras clave: Concentración de sedimentos, Diferencia de Modelos Digitales de Elevación (DoD), Quebrada La Tigra, fotointerpretación, avenida torrencial.

ABSTRACT

Torrential flows are phenomena associated with the mobilization of water and sediments from unstable slopes, capable of transporting between 20% and 60% solid material by volume at velocities of up to 30 m/s. These events rank among the natural hazards with the shortest warning times and the highest human and material toll in Colombia. Despite their recurrence, the sediment contribution from mass movements is commonly assumed as a fixed value of 40%, which may introduce considerable uncertainty in hazard assessment. This study aimed to estimate the actual volumetric proportion of sediments contributed by mass movements to the torrential flow that occurred on June 25, 2024, in the municipality of Venecia, Antioquia, Cerro Bravo area, specifically in the La Tigra stream basin. The methodology included photointerpretation of orthophotos, an inventory of mass movements, and the delineation of material detachment and accumulation zones. A pre-event Digital Elevation Model (DEM) was generated, from which the volumes of mobilized sediments and their contribution to the event were estimated through DEM differencing analysis. The results show that approximately 34.3% of the total volume of the torrential flow corresponds to sediments supplied by mass movements. These results contribute to a better understanding of torrential flow dynamics and provide relevant information for hazard assessment as a function of sediment concentration.

Key words: Sediment concentration, DEM of Difference (DoD), La Tigra stream, photointerpretation, torrential flow.

1. INTRODUCCIÓN

Las avenidas torrenciales se entienden como fenómenos que se desplazan a altas velocidades que suelen ser mayores a 5 m/s y pueden llegar hasta los 30 m/s con descargas pico muy altas, generalmente desarrollados en cuencas montañosas pequeñas con cauces confinados y de alta pendiente (mayores a 5%), usualmente desencadenados por periodos cortos de precipitación intensa y concentrada (Borga et al., 2014; Coussot & Meunier, 1996; Hungr et al., 2001; Koutroulis & Tsanis, 2010; Takahashi, 1981). En estos eventos se transporta una mezcla de agua, sedimentos y bloques de laderas inestables, además de elementos provenientes de vegetación aledaña al cauce, permitiendo un comportamiento del flujo que varía según la concentración y el tipo de material movilizado, lo que hace que el caudal de agua aumente considerablemente su volumen debido al transporte de material. La magnitud e intensidad de estos eventos están condicionadas por las características del sistema hidrológico-geomorfológico en el que se desarrollan: el área y forma de la cuenca, la configuración y pendiente de la red de drenaje, sedimentos disponibles en las laderas y la proximidad de los movimientos en masa al cauce. Estos factores determinan, en gran medida, el volumen total del flujo movilizado y la proporción de material sólido transportado. Diferentes autores han propuesto una clasificación de los flujos según el porcentaje de volumen de sedimentos transportado. De esta manera, flujos de agua como las inundaciones presentan concentraciones inferiores al ~20%, los flujos hiperconcentrados se ubican en el intervalo entre ~20% a ~60%, y los flujos de detritos, directamente asociados a movimientos en masa, superan el 60% o 70% de material sólido en volumen. De esta manera, las avenidas torrenciales se clasifican principalmente dentro del rango de los flujos hiperconcentrados, implicando que las propiedades del flujo pueden variar a lo largo del evento según la concentración de sedimentos, lo que explica la variabilidad en su dinámica y la dificultad para predecir su comportamiento. (Aristizábal et al., 2020; Cánovas et al., 2010; Fallas Salazar & Rojas González, 2021; Pierson, 2005; Pierson & Costa, 1987; Ramos et al., 2021). Estas características hacen que las avenidas torrenciales sean fenómenos impredecibles, generando así tiempos de respuesta cortos para la toma de decisiones y acciones preventivas o de evacuación por parte de las comunidades vulnerables (Aristizábal et al., 2020; Guerrero Hoyos & Aristizábal Giraldo, 2019; Koutroulis & Tsanis, 2010; Proyecto Multinacional Andino (PMA), 2007)

A nivel mundial, las inundaciones y avenidas torrenciales constituyen uno de los desastres naturales más frecuentes y letales, con un promedio de 169 eventos anuales registrados entre 2005

y 2024, causando entre 1.000 y 5.000 muertes anuales solo por eventos torrenciales (Delforge et al., 2026; World Meteorological Organization, 2021), con mayor incidencia en regiones montañosas tropicales de Asia y América del Sur. Actualmente, en Colombia las avenidas torrenciales son uno de los eventos que más pérdidas humanas y económicas causan a lo largo del país. De acuerdo con los datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DesInventar, citado en Alvarado Reyes, 2020), en el último siglo (1914 – 2017) se han registrado 1.363 avenidas torrenciales, causando más de 2.195 pérdidas humanas, cifra que ha ido en aumento (Aristizábal et al., 2020; Guerrero Hoyos & Aristizábal Giraldo, 2019). Entre los eventos más destacados a nivel nacional se encuentran los ocurridos en Mocoa (Putumayo) en 2017, El Playón (Santander) en 1979 y Salgar (Antioquia) en 2015. Para este último departamento, los eventos que resaltan han sido precisamente Salgar, junto con Andes y Dabeiba, ambos sucedidos en 1993. En conjunto, estos eventos dejaron un saldo de aproximadamente 736 vidas perdidas y al menos 2.275 viviendas afectadas (Alvarado Reyes, 2020; Aristizábal et al., 2020). Más recientemente, se registró una avenida torrencial el 25 de junio de 2024, en el municipio de Venecia, Antioquia, originada en la zona de Cerro Bravo, evento en el cual se enfocará este estudio.

A pesar de ser eventos frecuentes y de gran importancia en el departamento, el porcentaje aportado de material sólido por parte de movimientos en masa a la corriente de agua no ha podido establecerse con exactitud. Actualmente, el cálculo de este valor para nuestro contexto (departamento de Antioquia) se hace de forma general y solo se asume que es del 40%, de acuerdo con lo estipulado por el POMCA del Río Aburrá (CORANTIOQUIA et al., 2015). Esta simplificación tiene implicaciones directas en la evaluación de la amenaza: asumir un valor fijo del aporte sólido afecta el cálculo del volumen total del flujo y las propiedades reológicas del mismo, lo que repercute en la delimitación de zonas de amenaza y en el diseño de medidas de mitigación. Dado que el porcentaje real aportado durante un evento, siendo mayor o menor al propuesto, puede variar en función de las características del terreno, los eventos climáticos asociados y la ocurrencia de movimientos en masa contiguos al cauce, contar con estimaciones específicas por evento permitiría reducir esta incertidumbre y mejorar la precisión de los modelos de amenaza torrencial.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo propone la aplicación del método de Diferencia de Modelos Digitales de Elevación (DoD, por sus siglas en inglés), integrado con variables hidrológicas de la zona de estudio. Este método se complementó además con técnicas de

reconocimiento y caracterización geomorfológica con el fin de mejorar los resultados obtenidos. A partir de este enfoque metodológico, el trabajo tiene como objetivo central estimar el volumen de sedimentos aportado por los movimientos en masa al evento de avenida torrencial del caso de estudio, así como determinar su proporción respecto al volumen total del flujo movilizado. Esto, con el fin de contribuir a la comprensión de estos fenómenos y los posibles cambios en las propiedades del flujo. Sin embargo, se reconoce que la aplicación del método DoD está sujeta a limitaciones asociadas a la resolución espacial de los modelos de elevación disponibles, la escala de análisis y el tipo de información de entrada. Estas limitaciones se expresan a través de la incertidumbre del modelo, cuantificada mediante la desviación estándar del DoD en zonas estables (σ) y el Umbral Mínimo de Detección (UMD), factores que condicionan el nivel de detalle y la confianza asociada a las estimaciones volumétricas obtenidas.

2. GENERALIDADES

2.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el volumen de sedimentos aportado por los movimientos en masa a la avenida torrencial durante el evento ocurrido el 25 de junio de 2024 en Cerro Bravo?

2.2. HIPÓTESIS

La concentración de sedimentos del flujo de la avenida torrencial aportados por movimientos en masa fue de entre 25% a 40% del material estimado.

2.3. OBJETIVO GENERAL

Estimar el volumen de sedimentos aportado por los movimientos en masa a la avenida torrencial ocurrida en la zona de Cerro Bravo, en la cuenca de la Quebrada La Tigra y su proporción respecto al volumen total del flujo.

2.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y delimitar las zonas de desprendimiento y acumulación de material asociadas a movimientos en masa en Cerro Bravo.
- Estimar el volumen total de sedimentos transportados por la avenida torrencial.
- Determinar la concentración de sedimentos aportados a la avenida torrencial utilizando la información hidrológica existente.
- Analizar la incertidumbre asociada a la estimación volumétrica de sedimentos.

3. ZONA DE ESTUDIO

La cuenca de la Quebrada La Tigra cuenta con un área de $\sim 3,054 \text{ km}^2$ y se ubica en el municipio de Venecia y parte del municipio de Fredonia, en la subregión suroeste del departamento de Antioquia, principalmente en el área de Cerro Bravo. Dentro de esta cuenca fue delimitada la zona de estudio, la cual cuenta con un área de $\sim 1,12 \text{ km}^2$. El área se ubica al suroriente de la cabecera municipal de Venecia, en la zona rural de Cerro Bravo y en la parte alta occidental de la cuenca. Aquí afloran rocas desde finales del Pérmico hasta el Cuaternario, donde predominan las formaciones Amagá (Tos) y Combia (Tmc) (Figura 1). De acuerdo con la memoria explicativa de la plancha 166 de Jericó (Calle Z. et al., 1980), perteneciente al Servicio Geológico Colombiano, la Formación Amagá está compuesta por interestratificaciones de tobas, derrames eruptivos aglomerados, brechas, basaltos, andesitas, areniscas y conglomerados y corresponde al basamento rocoso de la mayor parte de la zona. Su composición y la presencia de materiales volcánicos intercalados la hacen susceptible a procesos de meteorización diferencial, favoreciendo la generación de material detrítico disponible para ser movilizado durante eventos torrenciales. La Formación Combia, por su parte, está compuesta por interestratificaciones de areniscas bien cementadas, arcillas pizarrosas y bancos delgados de conglomerados y carbón, donde los sedimentos finos de esta formación representan una fuente potencial de sedimentos en suspensión durante eventos de alta energía.

También se encuentra una unidad compuesta de Rocas Hipoabisales Porfíricas (Tadm), la cual es la litología predominante para esta zona y se encuentra intruyendo las formaciones Amagá y Combia, como se observa en la Figura 1. Esta unidad se caracteriza principalmente por tener una composición andesítica con textura porfírica y un contenido de augita en la matriz (Calle Z. & González I., 1980). Si bien esta unidad está compuesta de una roca más competente, los contactos de las formaciones con el cuerpo intrusivo generan zonas de debilidad que favorecen el fracturamiento y el desprendimiento de bloques, además de una posible acción de meteorización que debilita la roca. Se encuentran también unidades de depósitos cuaternarios identificados como depósitos aluviotorrenciales (Qat), los cuales fueron desplazados por los canales durante eventos anteriores para finalmente acumularse y los cuales son susceptibles a ser retrabajados en nuevos eventos y depósitos de vertiente (Qv), correspondientes a movimientos en masa acumulados en cambios de pendiente, los cuales representan una fuente directa de sedimentos.

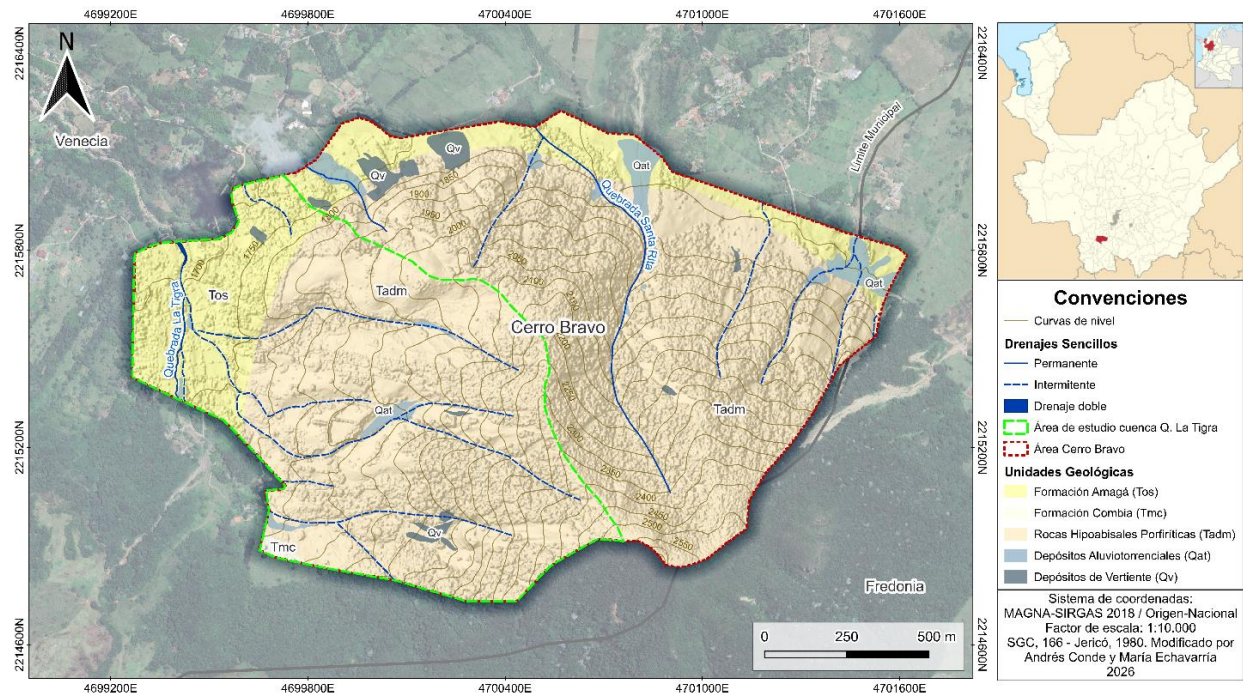


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio: Cerro Bravo y Cuenca de la Quebrada La Tigra, municipio de Venecia, Antioquia. Fuente: Tomada y modificada de (Calle Z. et al., 1980).

Por otra parte, de acuerdo con Calle Z. y González I. (1980) la zona se encuentra dominada por al menos diecinueve unidades geomorfológicas. Entre estas unidades predominan las laderas onduladas y las sierras sinclinales, asociadas principalmente al miembro superior de la Formación Amagá y a la Formación Combia. Las laderas onduladas tienden a tener pendientes inclinadas a escarpadas, condición que favorece la inestabilidad de las vertientes y la generación de movimientos en masa, principales aportantes de sedimento al evento torrencial. A su vez, las sierras sinclinales se caracterizan por una topografía colinada con pendientes suaves y colinas de baja altura, limitadas por laderas de contrapendiente. También se destacan las unidades de criptodomas asociadas a los cuerpos ígneos intrusivos de rocas hipoabisales porfíricas. En estos criptodomas se tienen pendientes inclinadas a muy inclinadas, con laderas irregulares y una estructura en forma cónica o cómica que favorece el desprendimiento de rocas y la acumulación de material detrítico en la base de las vertientes. En el área de la cuenca de estudio se presentan también pendientes escarpadas superiores al 75%, donde el proceso erosivo más característico es el desprendimiento de rocas, por lo que los afloramientos rocosos son característicos y lo que implica una fuente adicional de material (Giraldo Upegui, 2005).

4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este trabajo se llevó a cabo siguiendo el orden mostrado en el esquema de la Figura 2. Estos procesos se describen con mayor detalle en las siguientes secciones. Para el procesamiento de la información, se utilizó el software ArcGis Pro, versión 3.6.0 (Esri, 2024a).

4. METODOLOGÍA

```

graph TD
    A([Insumentos Cartográficos  
Estudio de detalle de  
Venecia (Universidad  
EAFIT et al., 2025)]) --> F
    F[Fotointerpretación] --> B{Concavidades}
    F --> C{Convexidades}
    B --> D[Inventario de  
Movimientos en Masa]
    C --> D
    D -- "Surface  
Volume" --> E[Volúmen de  
Sedimentos  
Vol. desprendido -  
Vol. acumulado]
    E --> F1((Cálculo de la concentración  
volumétrica (Cv) en la cuenca  
de la Quebrada La Tigra  
Cv(%)= Vs/Va *100))
    F2[Volúmen de Agua] --> F1
    F1 --> G[Diferencia de Modelos  
Digitales de Elevación  
(DoD)  
DEM_Post - DEM_Prev]
    G -- "Raster  
Calculator" --> H[DEM previo al  
evento  
5 x 5 m]
    I[DEM de la zona de estudio  
1 x 1 m] -- "Topo  
to Raster" --> J{Curvas de  
nivel}
    J -- "Reescalado 5 x 5 m  
Resample" --> H
    H --> G
    
```

Estación IDEAM → FREDONIA (26200150)

Punto de Control Hidrológico → P05

(Universidad EAFIT et al., 2025)

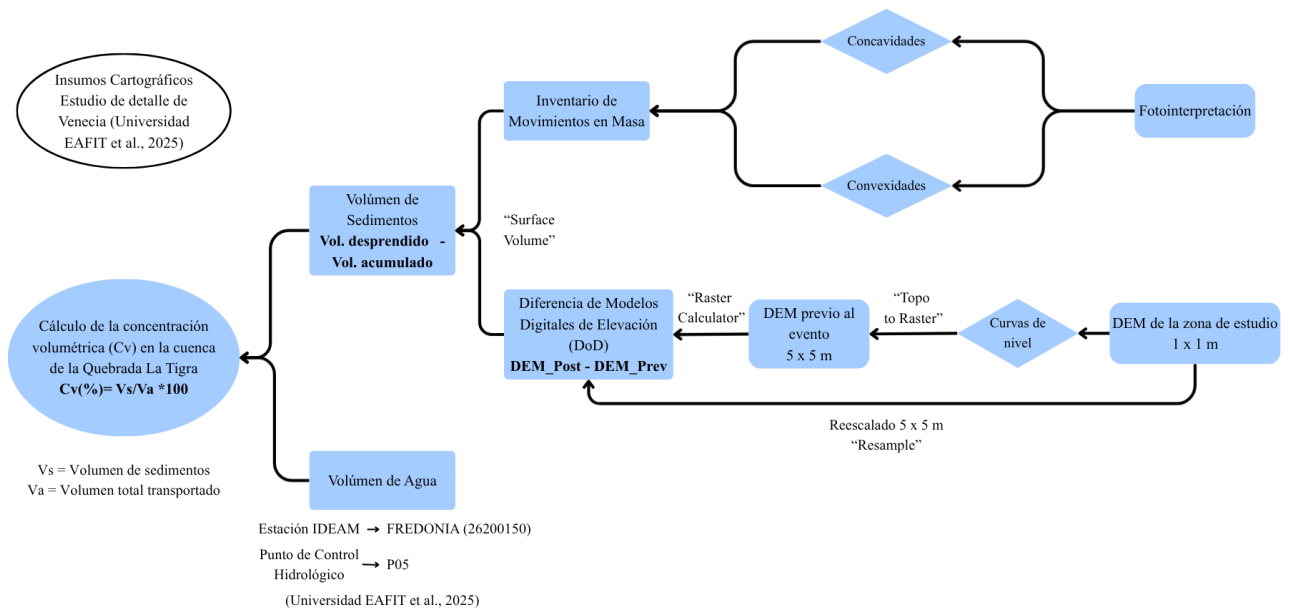


Figura 2. Esquema metodológico para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

4.1. ESTIMACIÓN DE APOORTE DE SEDIMENTOS

La concentración de sedimentos aportados por los movimientos en masa durante la avenida torrencial se estimó mediante la Ecuación 1:

$$Cv(\%) = \frac{V_s}{V_a} * 100 \quad (1)$$

Donde C_v es la concentración volumétrica expresada en porcentaje. V_s es el volumen de sólidos, en este caso de sedimentos provenientes de movimientos en masa. Finalmente, V_a es el volumen de agua registrado durante el evento de torrencialidad. El proceso de obtención de los valores de V_s y V_w usados para la fórmula es explicada a continuación:

4.1.1. Volumen de agua

Se recopilaron insumos cartográficos proporcionados por la Universidad EAFIT, utilizados para el proyecto de Estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025). Este fue realizado por la universidad y llevado a cabo durante enero-abril de 2025. Se realizó la hidrología para el cálculo de caudales utilizando como insumo la estación pluviométrica del IDEAM identificada con el código 26200150 ubicada en el municipio de Fredonia a ~1,6 km de la zona de estudio. A partir los datos de caudales para los Tiempos de Retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, se seleccionó el punto de control hidrológico P05 como punto de referencia para la recolección de datos, ubicado sobre el drenaje principal de la Quebrada La Tigra y a ~1,8 km de la zona de estudio, siendo la estación que registró el principal evento torrencial. Los caudales para cada uno de los puntos de control hidrológico se presentan en la Tabla 1 y se puede observar su ubicación en la Figura 3. Es pertinente destacar que el evento de precipitación del 25 de junio de 2024, que dio origen a la avenida torrencial, ocurrió en un lapso aproximado de una hora. Además, de acuerdo con el ciclo anual de precipitación de la zona, el mes de junio presenta una precipitación media mensual cercana a 250 mm, siendo uno de los meses de mayor precipitación en la zona para este año.

Tabla 1. Tiempos de retorno para los caudales en m³/s de las quebradas La Tigra, Galápago y Santa Bárbara. Se resalta en rojo el punto hidrológico elegido para el análisis. Tomado y modificado de: Estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025).

TR	P01	P02	P03	P04	P05	P10
	Q. La Tigra	Q. Galápago	Q. La Tigra	Q. Galápago	Q. La Tigra	Q. Sta Bárbara
2,33	35,39	17,00	22,69	14,81	22,51	17,29
5	43,68	20,91	28,07	18,22	27,84	20,91
10	49,97	23,91	32,14	20,85	31,87	23,66
25	59,64	28,49	38,42	24,93	38,10	27,73
50	67,18	32,06	43,31	28,10	42,95	30,85
100	75,81	36,12	48,94	31,70	48,53	34,42

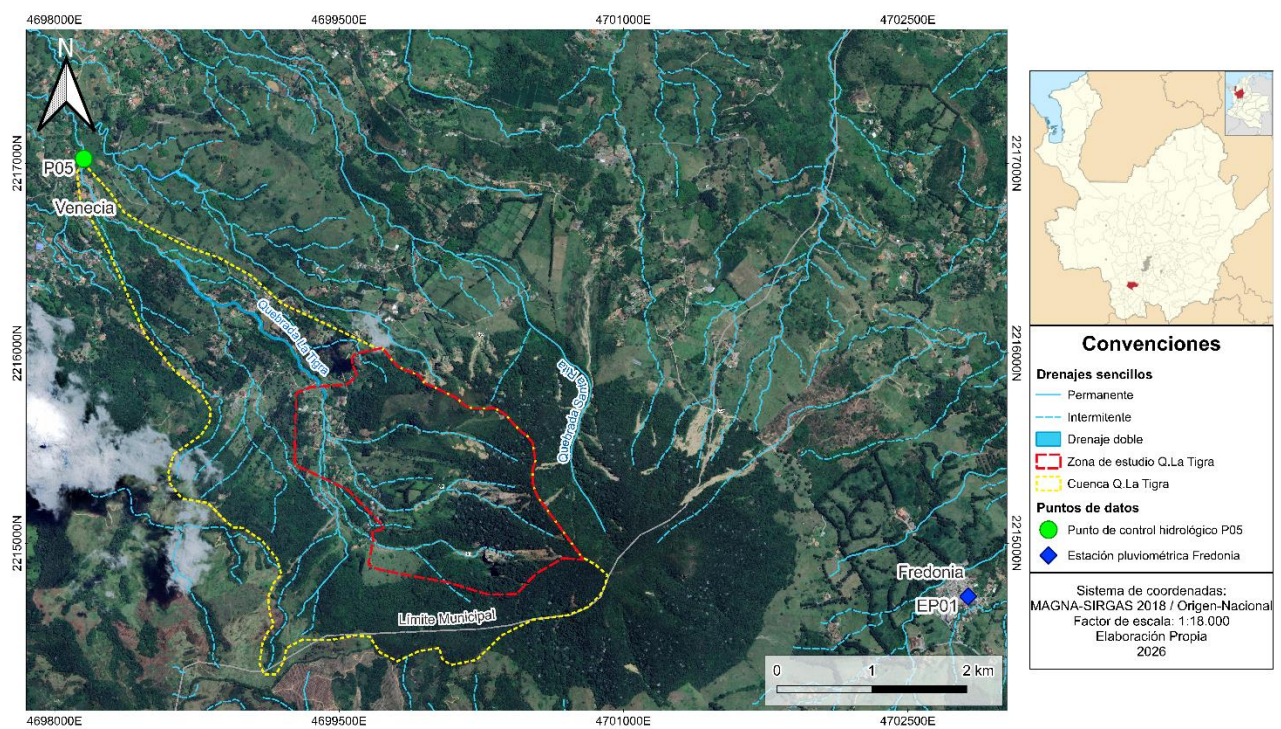


Figura 3. Mapa de ubicación del punto de control hidrológico P05, la estación pluviométrica 26200150 perteneciente al IDEAM. Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. Volumen de sedimentos

4.1.2.1. Fotointerpretación e Inventario de movimientos en masa

Los insumos proporcionados por la Universidad EAFIT y utilizados en el Estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025) para la fotointerpretación y elaboración del inventario de movimientos en masa fueron obtenidos mediante un dron equipado con un sensor LiDAR. Como resultado, se generó un Modelo Digital de Elevación con resolución espacial de 1x1 m, del cual se derivaron curvas de nivel cada 5 m, así como una ortofoto de la zona de Cerro Bravo con una resolución de 3,84 cm/píxel. La delimitación de la zona de estudio se realizó considerando características como la red hídrica asociada a la cuenca de la quebrada La Tigra, la extensión del DEM disponible, dado que este no cubría la totalidad de la cuenca y, principalmente, teniendo en cuenta la distribución de los movimientos en masa que efectivamente aportaron material al evento torrencial, excluyendo las áreas de la cuenca donde no se registraron procesos de remoción en masa significativos. En consecuencia, el análisis se concentró en la porción de la cuenca contenida dentro de la cobertura del insumo topográfico suministrado. Sobre esta zona se realizó la fotointerpretación utilizando la ortofoto y las curvas de nivel para cartografiar las áreas de desprendimiento y acumulación de material, mediante la identificación de patrones topográficos cóncavos y convexos observados en el terreno.

4.1.2.2. Cálculo volumétrico por diferencia de alturas

Con las curvas de nivel de 5 m creadas mediante herramientas GIS haciendo uso del DEM tomado del Estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025) se construyó un DEM correspondiente a las condiciones previas al evento torrencial, con una resolución espacial de 5x5 m utilizando la herramienta “Topo to Raster”, la cual genera superficies continuas de elevación a partir de datos de entrada, garantizando coherencia hidrológica en la interpolación (Esri, 2024b). Posteriormente, el DEM de 1x1 m obtenido mediante el sensor LiDAR fue reescalado a una resolución de 5x5 m con la herramienta “Resample”, esto con el fin de que se tuvieran las mismas características en ambos y permitir las operaciones entre ellos. A partir de estos insumos, se utilizó la herramienta “Raster Calculator” para calcular la Diferencia de Modelos Digitales de Elevación (DoD, por sus siglas en inglés) ampliamente empleada en geomorfología cuantitativa (Wheaton et al., 2010; Williams, 2012) mediante la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$DoD = Dem_{Post} - Dem_{Prev} \quad (2)$$

Donde “DEM_Post” es el Modelo Digital de Elevación con las condiciones posteriores al evento de torrencialidad y “DEM_Prev” es el DEM que recrea las condiciones previas al evento. Se separaron los polígonos de las zonas de desprendimiento y acumulación de sedimentos únicamente en la zona de influencia de la cuenca de la Quebrada La Tigra, debido a que en sus drenajes fue donde se dio la ocurrencia de la avenida torrencial. Luego se usó la herramienta “Surface Volume” en los polígonos filtrados para obtener el volumen total desprendido y el que quedó acumulado a lo largo de las laderas. Por último, se restan los valores para obtener el volumen total de sedimentos transportados por la avenida torrencial.

4.1.2.3. Estimación de la incertidumbre y umbral mínimo de detección

Con el fin de mejorar la confiabilidad de los cambios topográficos obtenidos mediante la Diferencia de Modelos Digitales de Elevación (DoD), se estimó la incertidumbre asociada a la resta entre superficies y se definió un umbral mínimo de detección (UMD), el cual permite discriminar entre cambios reales y variaciones que se pueden atribuir al ruido de los datos.

La incertidumbre del DoD (σDoD) se estimó a partir de la desviación estándar de los valores del modelo diferencial en zonas consideradas estables (DoDestable), es decir, áreas donde no se esperaban cambios geomorfológicos significativos. Estas zonas fueron identificadas mediante la selección de valores de baja variabilidad en el ráster DoD. La incertidumbre se calculó mediante la Ecuación 3:

$$\sigma\text{DoD} = \text{std}(\text{DoDestable}) \quad (3)$$

Posteriormente, el umbral mínimo de detección (UMD) se calculó por medio de la Ecuación 4:

$$\text{UMD} = 1,96 * \sigma\text{DoD} \quad (4)$$

Este umbral representa el valor mínimo a partir del cual un cambio puede considerarse estadísticamente significativo y donde 1,96 representa el valor que corresponde a un nivel de confianza del 95%. En consecuencia, los valores del DoD cuyo valor absoluto fue menor al UMD fueron considerados ruido y excluidos del análisis, mientras que aquellos superiores fueron interpretados como cambios reales asociados a procesos de erosión o acumulación.

La implementación de este procedimiento se realizó mediante un script desarrollado en Python, utilizando la librería NumPy para el procesamiento de formatos ráster y el cálculo de la desviación estándar. El código completo empleado para el cálculo del umbral mínimo de detección y el filtrado del modelo diferencial se presenta en el Anexo A, con el fin de garantizar la reproducibilidad del análisis.

5. RESULTADOS

De acuerdo con el Estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025), el evento de torrencialidad corresponde a un periodo de retorno de 50 años. Por lo tanto, los procedimientos y cálculos que se desarrollaron a lo largo del estudio reflejan las condiciones asociadas a un evento de dicha magnitud, tanto en términos hidrológicos como en la estimación del aporte de sedimentos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología aplicada previamente.

5.1. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA

Con la fotointerpretación se identificaron 51 zonas de desprendimiento y 13 zonas de acumulación, observadas en la Figura 4, a lo largo de las laderas del área de estudio. El mapa permite diferenciar que las zonas de acumulación se encuentran distribuidas a lo largo de los cauces pertenecientes a la cuenca. Por otra parte, las zonas de desprendimiento se encuentran concentradas en el sector oriental de la zona de estudio. Adicionalmente, se obtuvieron las zonas de transporte, las cuales permiten identificar mejor los corredores fluviales por los que se movilizó el material durante el evento.

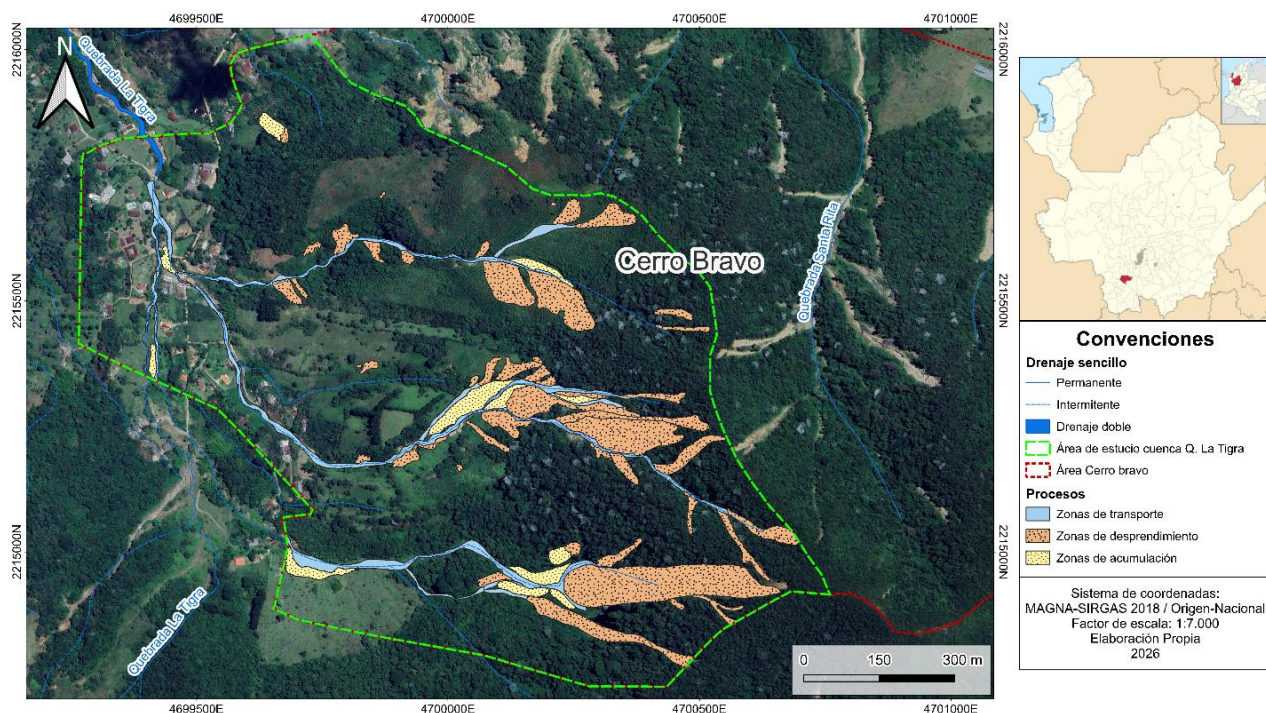


Figura 4. Mapa de procesos donde se observan las zonas de desprendimiento, acumulación y transporte de sedimentos. Fuente: Elaboración Propia.

5.2. VOLUMEN DE SEDIMENTOS

Una vez delimitadas las áreas de los desprendimientos y acumulaciones de material de la zona de estudio, la diferencia de modelos digitales de elevación (DoD, por sus siglas en inglés) evidenció que el volumen total de desprendimiento fue de 35.373,59 m³, mientras que el volumen de acumulación correspondió a 8.872,89 m³, los cuales se encuentran expresados en la Tabla 2.

Tabla 2. Áreas y volúmenes estimados para las zonas de desprendimiento y acumulación en la cuenca de la Quebrada La Tigra. Fuente: Elaboración propia.

Zona	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Volumen total de sedimentos transportado (m ³)
Desprendimiento	109.990,07	35.373,59	26.500,7
Acumulación	23.139	8.872,89	

5.2.1. Incertidumbre del DOD

A partir de las zonas definidas como estables, se obtuvo que la desviación estándar asociada al DoD es:

$$\sigma_{\text{DoD}} = 0,0138 \text{ m}$$

Este valor representa la variabilidad del DoD en ausencia de cambios reales y equivale aproximadamente a una incertidumbre de $\pm \sim 1.4$ cm en la elevación. Posteriormente, el umbral mínimo de detección (UMD) obtenido fue de:

$$UMD = 0,0271 \text{ m}$$

La aplicación de este umbral permitió filtrar el raster DoD, eliminando los cambios no significativos y conservando únicamente aquellos asociados a procesos reales de erosión y acumulación. Como resultado, el análisis volumétrico presentado en la Tabla 2 se basa en cambios que superan el umbral mínimo de detección, lo que incrementa la confiabilidad de las estimaciones obtenidas.

5.3. CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS

A partir de los volúmenes estimados de sedimentos y el caudal de agua registrado en el punto de control hidrológico P05 para un tiempo de retorno de 50 años (Tabla 1), la concentración volumétrica de sedimentos para la avenida torrencial fue obtenida mediante la relación entre el volumen de sedimentos y el volumen de agua tomado del Estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025). Dicha concentración se encuentra en la Tabla 3. El resultado obtenido fue de **34,3%**, lo que indica que aproximadamente una tercera parte del volumen total asociado al evento estuvo conformada por sedimentos aportados por movimientos en masa.

Tabla 3. Estimación de la concentración volumétrica de sedimentos para el evento de avenida torrencial.
Fuente: Elaboración propia.

Volumen de sedimentos (V_s) (m^3)	Caudal (m^3/s)	Volumen de agua (V_a) (m^3)	Concentración volumétrica (C_v) (%)
26.500,7	42,95	77.310	34,3%

6. DISCUSIÓN

El evento ocurrido en Venecia, Antioquia en 2024 representa un caso de estudio que permite evaluar la relación entre los movimientos en masa y su aporte sedimentológico a las avenidas torrenciales en la región andina colombiana. A partir de su análisis, los resultados obtenidos (Tabla 3) indican que el aporte de sedimentos asociado al evento no coincide con los porcentajes estipulados en instrumentos de planificación. Debido a que los valores calculados arrojaron un aporte de sedimentos por movimientos en masa a la avenida torrencial del 34,3%, cumpliendo de esta manera la hipótesis planteada. El POMCA del Río Aburrá (CORANTIOQUIA et al., 2015) reconoce que la torrencialidad está asociada al ingreso de material de arrastre al cauce e incluso incorpora un incremento del 40% en el caudal de diseño para corrientes susceptibles a flujos torrenciales, la metodología propuesta en este trabajo permite cuantificar dicho aporte de sedimentos a partir de fotointerpretación, Modelos Digitales de Elevación y herramientas SIG, evitando usar valores arbitrarios no representativos de las diferentes zonas de estudio.

El volumen total de sedimentos transportados permitió inferir que no todo el material generado por movimientos en masa contribuyó a la avenida torrencial. Parte de este volumen, el cual fue de 8.872,89 m³ (Tabla 2), quedó acumulado a lo largo de las laderas, principalmente en el sector oriental, asociada a las partes altas de la cuenca y los drenajes secundarios de la Quebrada La Tigra. Este patrón puede explicarse por las características geomorfológicas de la zona, pues los sectores donde se concentraron las zonas de desprendimiento corresponden principalmente a laderas de pendientes inclinadas a escarpadas y unidades de criptodomas, donde la inestabilidad de las vertientes favorece la generación de movimientos en masa. Además, las áreas de acumulación se asocian a cambios de pendiente a lo largo de los drenajes secundarios, donde el flujo pierde capacidad de transporte y deposita el material antes de alcanzar el cauce principal, limitando así su contribución al sistema torrencial. Estas zonas de acumulación (Figura 4), junto a la ortofoto de la zona, permitieron identificar los tipos de depósitos cuaternarios encontrados en la cuenca.

Desde el punto de vista metodológico, el procedimiento aplicado concuerda con el enfoque de cambios morfológicos basados en Diferencias de Modelos Digitales de Elevación. Este enfoque consiste en comparar dos superficies topográficas de diferentes momentos para identificar y cuantificar zonas de erosión y acumulación, permitiendo estimar cambios morfológicos y volúmenes de sedimento movilizado (Wheaton et al., 2010; Williams, 2012). En este sentido, la

principal fortaleza de la metodología propuesta es que adapta un procedimiento utilizado en geomorfología cuantitativa a un problema local de gestión del riesgo por avenidas torrenciales, en el que el aporte de sedimentos suele representarse mediante valores establecidos. No obstante, los autores Wheaton et al. (2010) y Williams (2012) también advierten que la confiabilidad del DoD depende del control de la incertidumbre asociada a la resolución espacial de los Modelos Digitales de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés), su alineación geométrica y la propagación del error entre ambas superficies, especialmente cuando los modelos provienen de diferentes fuentes o técnicas de levantamiento.

Otros autores han empleado el método de DoD para cuantificar cambios morfológicos, procesos de erosión y acumulación, volúmenes de materiales disponibles propensos a ser re TRABAJADOS y canales asociados a flujos de detritos. Trabajos como los de Blasone et al. (2014), Cavalli et al. (2017) y Cucchiari et al. (2019) muestran el uso de DEMs multitemporales, LiDAR y fotointerpretación para estimar volúmenes de material erosionado, acumulado o movilizado en eventos similares. Sin embargo, en estos estudios el uso del DoD se orienta principalmente a la caracterización geomorfológica y a la obtención de volúmenes de materiales disponibles que pueden ser re TRABAJADOS por nuevos eventos, más que a la estimación de una concentración de sedimentos integrada con las condiciones hidrológicas e hidrográficas del evento. Por otra parte, la estimación de sedimentos en flujos de detritos o avenidas torrenciales también ha sido abordada mediante otros métodos, como modelos empíricos basados en regresión múltiple que relacionan el volumen de sedimentos con variables de cuenca, área deslizada, geología y lluvia (Chang et al., 2011) o mediante modelación hidráulica y reológica con herramientas como FLO-2D (Chen & Chuang, 2014). Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio busca integrar la metodología DoD con componentes como fotointerpretación, inventario de movimientos en masa, reconstrucción de condiciones del terreno pre y pos-evento. Además, se incorpora el análisis hidrológico de la cuenca, incluyendo los caudales asociados a periodos de retorno. Esto permite diferenciar el enfoque de este trabajo respecto a otros estudios que, si bien también emplean el método DoD, se centran en la obtención de volúmenes de materiales disponibles que pueden ser re TRABAJADOS por nuevos eventos o en la modelación de amenazas. En contraste, este estudio emplea el DoD para vincular directamente los cambios topográficos registrados en la zona con la respuesta hidrológica del sistema.

Adicionalmente, los resultados pueden ser equiparables a lo propuesto por otros autores acerca de los tipos de flujos. Aristizábal et al. (2020), Pierson (2005), Ramos et al. (2021) y Scott et al. (1995) mencionan una clasificación de los tipos de flujos, donde un flujo de agua o inundación se caracteriza por tener <5-15% del volumen de sedimentos, un flujo hiperconcentrado entre el 15-60% y un flujo de detritos >60%. Esto sitúa a las avenidas torrenciales dentro del margen de flujos hiperconcentrados, transportando generalmente volúmenes de sedimentos entre 20-60%. De esta manera, el porcentaje obtenido para la concentración de sedimentos transportados en la avenida torrencial de Venecia, el cual es de **34,3%**, clasifica en el rango de porcentajes que se propone para este tipo de eventos, siendo así un resultado coherente con la literatura preexistente.

Por otra parte, aunque un 5.7% menos de sedimentos respecto al valor propuesto del 40% en el POMCA se podría considerar menospreciable, realmente implica una diferencia de aproximadamente 4.400 m³ menos de material sólido transportado en el fluido. Según autores como Silva-Cerón et al. (2025) y Ramos et al. (2021) la intensidad del flujo está en función de la profundidad y la velocidad de este. Si el flujo presenta una mayor o menor concentración de sedimentos transportados, esto implicaría que este muestre cambios en su comportamiento o en el área de afectación. Un fluido con mayor concentración de sedimentos tiende a volverse más viscoso y, aunque se puede volver más lento al desplazarse, la altura tiende a aumentar, permitiendo mayor capacidad de transporte de material, generando así una mayor fuerza de empuje o presión sobre los objetos y, por ende, una mayor capacidad de daño (Chen, 1987; Iverson, 1997; Pierson & Costa, 1987; Silva-Cerón et al., 2025; Zheng et al., 2022).

Sin embargo, esta metodología también presenta limitaciones. La primera de estas es la resolución espacial de los insumos. En este estudio, aunque el DEM posterior al evento fue construido con una mayor resolución (1x1 m) por el sensor LiDAR en el En el estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025). Para el análisis se ajustó la resolución del DEM previo a una de 5x5 m, el cual fue generado a partir de interpolación y de supuestos sobre la geometría original del terreno utilizando herramientas SIG. Por tanto, la capacidad de detectar cambios pequeños en las acumulaciones o desprendimientos quedó condicionada por la resolución del DEM previo. La segunda limitación es la incertidumbre inherente al uso de DEM provenientes de distintas fuentes y fechas. La literatura sobre DoD advierte que la resta directa entre superficies puede sobrestimar o subestimar los cambios reales si no se controla la propagación del error y el

umbral mínimo de detección. A diferencia de otros enfoques basados en errores porcentuales, en este estudio se empleó un análisis de incertidumbre basado en el umbral mínimo de detección, el cual permite discriminar cambios significativos sin requerir un valor de referencia real, el valor de 0,0271 m nos indica que todos los valores absolutos del DoD que sean menores a este deberían ser considerados ruido y excluidos del análisis. Esto indica que únicamente los cambios topográficos con magnitud superior a ± 2.7 cm pueden considerarse estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%, mientras que los valores inferiores a este umbral corresponden a variaciones atribuibles al ruido del modelo. En términos prácticos, esto indica que incluso en zonas sin cambio geomorfológico, el modelo puede presentar pequeñas variaciones dentro de este rango debido a errores asociados a la adquisición, resolución y alineación de los modelos digitales de elevación.

A lo anterior se suma que el volumen erosionado no equivale necesariamente al volumen que fue aportado a la avenida torrencial. Parte del material puede permanecer almacenado temporalmente en laderas, canales secundarios o zonas intermedias. Asimismo, la interpretación del evento hidrometeorológico se ve condicionada por la disponibilidad de información pluviométrica, debido a que la estación del IDEAM utilizada se encontraba en el municipio de Fredonia, a $\sim 1,6$ km de distancia, por lo que los registros de precipitación pueden no reflejar con total precisión las condiciones locales del momento que desencadenaron el evento torrencial. Asimismo, el punto de control hidrológico más cercano encontrado en el Estudio de detalle de Venecia (Universidad EAFIT et al., 2025) se encuentra a $\sim 1,8$ km de la zona de estudio, lo que podría afectar el valor real del caudal, debido a que durante la trayectoria del evento pudo haber cambios en la concentración del volumen de sedimentos transportado. Finalmente, en canales con acumulación previa de sedimentos, el flujo puede retrabajar el material del lecho y las márgenes, lo que no necesariamente corresponde a aportes de ladera, representando así una incertidumbre en la estimación del volumen de sedimentos del evento.

A pesar de estas limitaciones, se resaltan los siguientes puntos de la propuesta: Permite pasar de una aproximación regional y genérica a una estimación local y más representativa del aporte de sedimentos en los eventos. Por otra parte, genera un procedimiento replicable con herramientas SIG accesibles, lo cual facilita su aplicación en otros eventos o cuencas con condiciones similares. Adicionalmente, favorece la comprensión y la caracterización del flujo asociado al evento de torrencialidad. Esto, entendiendo la manera en la que la concentración de

sedimentos afecta el comportamiento del flujo, pues al aumentar la concentración de los sedimentos, se pueden afectar las propiedades reológicas, permitiendo un flujo más viscoso y con más capacidad destructiva. De esta forma, es posible saber las posibles afectaciones que un evento así podría tener sobre una población y la infraestructura (Aristizábal et al., 2020; Hungr et al., 2014; Pierson & Costa, 1987; Ramos et al., 2021). Finalmente, el estudio aporta información que puede fortalecer la delimitación de zonas de susceptibilidad, la evaluación más detallada de la amenaza, la priorización de intervenciones y la formulación de medidas de manejo y mitigación del riesgo.

En cuanto a recomendaciones para futuros trabajos, se sugiere utilizar un Modelo Digital de Elevación con la mayor resolución posible de las condiciones previas al evento a estudiar, esto disminuiría el margen de error del cálculo al no haberse generado con interpolación. Igualmente, de ser posible, se recomienda realizar el modelamiento de los puntos hidrológicos en lugares más cercanos a la zona de estudio, esto para disminuir la cantidad de fenómenos que se puedan atribuir a cambios dentro de la dinámica de la avenida torrencial. Adicionalmente, para el análisis bajo distintos tiempos de retorno, se recomienda proyectar las condiciones para generar escenarios más exactos, garantizando así una representación más fiel del comportamiento del flujo ante eventos más o menos extremos. Por último, se recomienda realizar un análisis morfométrico detallado del cauce, con el fin de complementar la caracterización del sistema torrencial y tener un mejor conocimiento de la cuenca que se está estudiando.

Para finalizar, en el caso de estudio, la metodología propuesta evidencia que el porcentaje de aporte sólido no debería asumirse como un valor fijo para todas las cuencas o para todos los eventos, ya que las características intrínsecas de cada cuenca, tales como la geomorfología o la hidrología hacen que se presenten cambios en el aporte de sedimentos. Por el contrario, los resultados obtenidos indican que dicho porcentaje puede variar en función de la magnitud del desprendimiento, la conectividad geomorfológica con el cauce, la capacidad del flujo para transportar sedimentos y la localización de las áreas de acumulación. De esta manera, el principal aporte del trabajo en aportar una base técnica que permita mejorar los valores estipulados en planes de manejo de cuencas y ordenamiento territorial para mejorar de manera progresiva el nivel de detalle de estos. Bajo esta perspectiva, la metodología propuesta constituye una herramienta para complementar los análisis de planificación y gestión del riesgo en Antioquia.

7. CONCLUSIONES

La metodología propuesta permitió estimar el aporte de sedimentos por movimientos en masa a la avenida torrencial ocurrida el 25 de junio de 2024 en la zona de Cerro Bravo, cuenca de la Quebrada La Tigra, en el municipio de Venecia, Antioquia. A partir de la delimitación de zonas de desprendimiento y acumulación, el análisis mediante Diferencia de Modelos Digitales de Elevación (DoD, por sus siglas en inglés) y el cálculo volumétrico usando los volúmenes obtenidos y los caudales calculados, se obtuvo un volumen de sedimentos transportado de 26.500,7 m³ y una concentración volumétrica de 34,3 % para un evento con periodo de retorno de 50 años.

Los resultados muestran que el aporte de sedimentos asociado a una avenida torrencial no debería asumirse automáticamente como un valor fijo para todas las cuencas o todos los eventos. En el caso analizado, el valor estimado de **34,3 %** se encuentra por debajo del 40 % que suele adoptarse de manera general en el POMCA del Río Aburrá (CORANTIOQUIA et al., 2015), lo que evidencia que el aporte de sedimentos depende de las condiciones específicas del evento, de la conectividad geomorfológica con el cauce y de la distribución espacial de las zonas de desprendimiento y acumulación.

Desde el punto de vista metodológico, el principal aporte de este trabajo consiste en desarrollar un procedimiento replicable que permite pasar de la estimación generalizada del aporte de sedimentos a una cuantificación local basada en fotointerpretación de ortofotos de alta resolución, análisis de Diferencia de Modelos Digitales de Elevación (DoD) e información hidrológica del evento. Esta aproximación, aplicada a un evento real de avenida torrencial en Antioquia, demuestra que es posible estimar la concentración volumétrica de sedimentos con herramientas SIG accesibles, sin instrumentación en campo durante el evento y sin registros históricos detallados del evento. De realizarse de manera sistémica, el procedimiento constituye una técnica que puede ser transferible a otras cuencas de la región con características similares, permitiendo definir valores aplicables y más confiables, con potencial para favorecer el entendimiento del flujo, contribuyendo así a la gestión del riesgo por avenidas torrenciales más ajustada a las condiciones locales.

REFERENCIAS

- Alvarado Reyes, L. (2020). *Análisis de las metodologías implementadas en la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en la gestión de riesgo en Colombia*. Universidad de Antioquia.
- Aristizábal, E., Carmona, M. I. A., & López, I. K. G. (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.
- Blasone, G., Cavalli, M., Marchi, L., & Cazorzi, F. (2014). Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning. *Catena*, 123, 23–36.
- 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.
- Calle Z., B., & González I., H. (1980). *Geología y geoquímica de la Plancha 166, Jericó. Escala 1:100.000. Memoria explicativa*.
- Calle Z., B., González I., H., De La Peña D., R., Escorce B., E., & Durango M., J. (1980). *Geología de la Plancha 166 Jericó*.
- Cánovas, J. A. B., Eguibar, M., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Gutiérrez-Pérez, I. (2010). Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators. *Hydrological Processes*, 25(6), 970–979.
- Cavalli, M., Goldin, B., Comiti, F., Brardinoni, F., & Marchi, L. (2017). Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. *Geomorphology*, 291, 4–16.
- Chang, C.-W., Lin, P.-S., & Tsai, C.-L. (2011). Estimation of sediment volume of debris flow caused by extreme rainfall in Taiwan. *Engineering Geology*, 123, 83–90.
- Chen, C. (1987). Comprehensive review of debris flow modeling concepts in Japan. In J. E. Costa & G. F. Wieczorek (Eds.), *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation* (Vol. 7, pp. 13–29). Geological Society of America.

- Chen, J.-C., & Chuang, M.-R. (2014). Discharge of landslide-induced debris flows: Case studies of Typhoon Morakot in southern Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2, 315–346.
- CORANTIOQUIA, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & CORNARE. (2015). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Aburrá – NSS (2701-01)*.
- Cousot, P., & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3–4), 209–227.
- Cucchiaro, S., Cavalli, M., Vericat, D., Crema, S., Llena, M., Beinat, A., Marchi, L., & Cazorzi, F. (2019). Geomorphic effectiveness of check dams in a debris-flow catchment using multi-temporal topographic surveys. *Catena*, 174, 73–83.
- Delforge, D., Below, R., Wathelet, V., Tonnelier, M., Alonso, A., & Speybroeck, N. (2026). *2025 Disasters in Numbers*.
- Esri. (2024a). *ArcGIS Pro* (3.6.0).
- Esri. (2024b). *Topo to Raster (Spatial Analyst)*. ArcGIS Pro Documentation.
- Fallas Salazar, S., & Rojas González, A. M. (2021). Evaluation of Debris Flows for Flood Plain Estimation in a Small Ungauged Tropical Watershed for Hurricane Otto. *Hydrology*, 8(3), 122.
- Giraldo Upegui, N. (2005). *Plan de manejo para el Área de Reserva Forestal Protectora Cerro Bravo*.
- Guerrero Hoyos, L. A., & Aristizábal Giraldo, E. (2019). Estimación y análisis de umbrales críticos de lluvia para la ocurrencia de avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá (Antioquia). *Revista EIA*, 16(32), 97–111.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(3), 221–238.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296.

- Koutroulis, A. G., & Tsanis, I. K. (2010). A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: Case study for the 13–14 January 1994 flood, Giofiros basin, Crete, Greece. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 150–164.
- Pierson, T. C. (2005). *Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds*.
- Pierson, T. C., & Costa, J. E. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. In J. E. Costa & G. F. Wieczorek (Eds.), *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation* (Vol. 7, pp. 1–12). Geological Society of America.
- Proyecto Multinacional Andino (PMA). (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*.
- Ramos, A. M., Reyes, A. A., Munévar, M. A., Ruiz, G. L., Machuca, S. V., Rangel, M. S., Prada, L. F., Cabrera, M. Á., Rodríguez, C. E., Escobar, N., Quintero, C. A., Escobar, J. A., Giraldo, J. D., Medina, M. S., Durán, L., Trujillo, D. E., Medina, D. F., Capachero, C. A., León, D., Pérez, M. A. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Servicio Geológico Colombiano y Pontificia Universidad Javeriana.
- Scott, K. M., Vallance, J. W., & Pringle, P. T. (1995). *Sedimentology, behavior, and hazards of debris flows at Mount Rainier, Washington*.
- Silva-Cerón, A. L., Prieto, J. A., & Gamboa, M. F. (2025). Physical vulnerability assessment procedures for confined and unconfined (unreinforced) clay brick masonry buildings due to mass movements, rigid foundation. *Engineering Geology*, 352, 108091.
- Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13, 57–77.
- Universidad EAFIT, Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Antioquia (DAGRAN), & Alcaldía de Venecia. (2025). *Informe técnico: Estudio de detalle Venecia*.
- Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136–156.

Williams, R. D. (2012). DEMs of difference. In *Geomorphological Techniques* (pp. 1–17). British Society for Geomorphology.

World Meteorological Organization. (2021). *Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019)*.

Zheng, H., Shi, Z., de Haas, T., Shen, D., Hanley, K. J., & Li, B. (2022). Characteristics of the impact pressure of debris flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127, e2021JF006488.

ANEXOS

Anexo A. Script para el cálculo del UMD y filtrado del DoD.

El siguiente script corresponde al procedimiento utilizado para estimar la incertidumbre del DoD y aplicar el umbral mínimo de detección descrito en la metodología.

```
# =====  
# 1. Subir archivo DoD (.tif)  
# =====  
from google.colab import files  
uploaded = files.upload()  
  
# =====  
# 2. Librerías  
# =====  
import numpy as np  
import rasterio  
  
# =====  
# 3. Leer el raster DoD  
# =====  
ruta = list(uploaded.keys())[0]
```

```

with rasterio.open(ruta) as src:
    DoD = src.read(1).astype(float)
    profile = src.profile # guardar info para exportar

# =====
# 4. Crear máscara de zonas estables. Se puede ajustar el rango (-0.1, 0.1)
# =====
mask_estable = np.where((DoD > -0.1) & (DoD < 0.1), 1, 0)

# =====
# 5. Extraer valores estables
# =====
valores = DoD[mask_estable == 1]

# Eliminar NaN si existen
valores = valores[~np.isnan(valores)]

# =====
# 6. Calcular incertidumbre
# =====
sigma_DoD = np.std(valores)

# =====
# 7. Calcular UMD (95%)
# =====
UMD = 1.96 * sigma_DoD

print("----- RESULTADOS -----")
print("sigma_DoD:", round(sigma_DoD, 4))
print("UMD:", round(UMD, 4))

```