

Amenazas naturales concatenadas: avenida torrencial del 13 de noviembre de 2020 en el municipio de Dabeiba (Colombia)

Edier Aristizábal^{1*} ; Edwin Fabián García-Aristizábal² ; Juan Carlos Guzmán-Martínez² ; Alejandro García-Ramírez¹ ; Sebastián Gómez-Ríos¹ ; Emmanuel Castillo-Cardona¹ ; David Zapata-Valencia¹ 

¹Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. (*) evaristizabalg@unal.edu.co; algarciaara@unal.edu.co; sebgomezrio@unal.edu.co; eecastilloc@unal.edu.co; dzapatav@unal.edu.co.

²Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. edwin.garcia@udea.edu.co; juanc.guzman@udea.edu.co

Resumen

La noche del 13 de noviembre de 2020, una tormenta intensa en las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón (Dabeiba, Colombia) provocó numerosos deslizamientos que generaron flujos de escombros de alta velocidad con gran poder destructivo. Este artículo presenta una descripción y análisis exhaustivo de los deslizamientos y el evento concatenado de flujo de escombros. El estudio se desarrolló en cuatro etapas. Primero, se caracterizó la morfometría de la cuenca para obtener información sobre las características geomorfológicas que influyen en las respuestas hidrológicas. Luego, se reconstruyó la dinámica del evento hidrometeorológico a partir de datos satelitales y registros meteorológicos. La tercera etapa consistió en trabajo de campo para identificar evidencia física y caracterizar la secuencia de deslizamientos y flujos de escombros. Finalmente, se modeló la generación de sedimentos con TRIGRS, para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, y RUSLE, para estimar la erosión. Además, se utilizó el modelo r.ava.flow para simular la hidrodinámica del flujo y delimitar áreas de inundación. Los resultados incluyen representación cartográfica de la extensión de las inundaciones torrenciales, rutas de tránsito y zonas de depósito, además de la identificación de 175 deslizamientos que afectaron 75,4 hectáreas. La precipitación alcanzó intensidades máximas de 74 mm/h en la cuenca El Mohán, y 52 mm/h en El Botón, por lo que generó inestabilidad generalizada en las laderas. Como consecuencia, los flujos de escombros alcanzaron tasas máximas de descarga de 146 m³/s en El Mohán y 73 m³/s El Botón, lo cual evidencia su impacto hidrológico y geomorfológico.

Palabras clave: Movimientos en masa; Precipitación; Flujo de escombros; Amenazas concatenadas.

Concatenated Natural Hazards: Modeling of the November 13, 2020 Debris Flow in the Municipality of Dabeiba (Antioquia)

Abstract

On the night of November 13, 2020, an intense storm in the basins of the El Mohán and El Botón streams (Dabeiba, Colombia) triggered numerous landslides, which generated high-velocity debris flows with

Forma de citar: Aristizábal, E.; García-Aristizábal, E.F.; Guzmán-Martínez, J.C.; García-Ramírez, A.; Gómez-Ríos, S.; Castillo-Cardona, E.; Zapata-Valencia, D. (2025). Amenazas naturales concatenadas: avenida torrencial del 13 de noviembre de 2020 en el municipio de Dabeiba (Colombia). *Boletín de Geología*, 47(2), 107-123. <https://doi.org/10.18273/revbol.v47n2-2025005>

significant destructive power. This article presents a comprehensive description and analysis of the landslides and the concatenated debris flow event. The study was conducted in four stages. First, the morphometry of the basins was characterized to obtain information on the geomorphological features influencing hydrological responses. Then, the dynamics of the hydrometeorological event were reconstructed using satellite data and meteorological records. The third stage involved fieldwork to identify physical evidence and characterize the sequence of landslides and debris flows. Finally, sediment generation was modeled using TRIGRS to assess landslide susceptibility and RUSLE to estimate erosion. Additionally, the r.ava.flow model was used to simulate flow hydrodynamics and delineate flood-prone areas. The results include a cartographic representation of the extent of torrential floods, flow paths, and deposition zones, as well as the identification of 175 landslides that affected 75.4 hectares. Precipitation reached maximum intensities of 74 mm/h in the El Mohán basin and 52 mm/h in the El Botón basin, causing widespread slope instability. As a result, debris flows reached peak discharge rates of 146 m³/s in El Mohán and 73 m³/s in El Botón, underscoring their significant hydrological and geomorphological impact.

Keywords: Landslides; Rainfall; Debris flow; Concatenated hazards.

Introducción

La noche del 13 de noviembre de 2020, en el municipio de Dabeiba, ubicado en el noroccidente de los Andes colombianos, ocurrió un evento de precipitación intensa que desencadenó una serie de movimientos en masa y generó una mezcla de agua y sedimentos que se desplazaron a gran velocidad con un gran poder destructivo a lo largo de las quebradas El Mohán y El Botón. De acuerdo con la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (ONGRD, 2020), este evento resultó en la muerte de 6 personas, 22 heridos y 3 desaparecidos. Además, 360 familias resultaron afectadas, y se presentó un total de 1112 personas damnificadas. En cuanto a los daños materiales, se destruyeron 67 viviendas y 104 quedaron averiadas; se perdieron 5,5 km de vías, y también resultaron afectados 3 acueductos, 1 sistema de alcantarillado y 3 centros educativos. Esta situación llevó a la declaratoria de calamidad pública en el municipio de Dabeiba, inicialmente decretada el 14 de noviembre de 2020, mediante el Decreto n.º 210.21.523, posteriormente modificado el 18 de noviembre de 2020, y finalmente extendido el 21 de noviembre de 2020 (ONGRD, 2022).

La magnitud de los daños observados en Dabeiba ejemplifica la complejidad de estos fenómenos, que se enmarcan dentro del concepto de multiamenaza. Un escenario de multiamenaza se refiere a la interacción de dos o más amenazas que ocurren en una misma área geográfica y temporal, y genera impactos combinados que pueden ser más severos o diferentes de los que podrían producirse de forma individual (De Angeli *et al.*, 2022).

Eventos como el ocurrido en Dabeiba se han registrado en los Andes colombianos desde principios del siglo XVIII. Entre los primeros desastres por amenazas naturales que se encuentran en las bases de datos se destacan los eventos torrenciales de la quebrada La Iguaná, el 23 de abril de

1880. Este evento destruyó el poblado de Aná en Medellín, causó 9 muertos y 2500 heridos. Otro evento significativo ocurrió en la quebrada La Doctora, en el municipio de Sabaneta, en septiembre de 1901, con una persona muerta y daños sobre amplias zonas de cultivos. Recientemente, se destacan los flujos de escombros que afectaron al municipio de Mocoa (Putumayo) en el suroccidente de los Andes colombianos, en 2017, y el evento del 18 de mayo de 2015 sobre la cuenca de la quebrada La Liboriana, en el municipio de Salgar (Antioquia) (Hoyos *et al.*, 2019). El desastre asociado a amenazas de origen natural con el mayor número de pérdidas humanas en Colombia corresponde al flujo de lodos de origen volcánico (lahar), también un 13 de noviembre, pero de 1985, que destruyó la población de Armero (Tolima) y dejó 23.000 muertos y pérdidas económicas estimadas en 339 millones de dólares (Voight, 1990).

Estos eventos señalan a Colombia como un país altamente susceptible a las amenazas de origen natural, especialmente a fenómenos en cascada, que tienen una gran capacidad destructiva creciente a medida que avanza espacial y temporalmente el evento. Colombia se caracteriza por un complejo marco geológico y tectónico, donde convergen dos placas oceánicas (Kellogg *et al.*, 1995). Estos procesos de colisión y subducción generan la cadena montañosa del norte de la Cordillera de los Andes, con sistemas de fallas activos y 63 volcanes, de los cuales 17 están activos (Marín-Cerón *et al.*, 2019). A esto se suma la ubicación de Colombia en el trópico, que contribuye a un régimen de precipitaciones intensas debido a la alta convección (Bedoya-Soto *et al.*, 2019).

Sin embargo, las condiciones tectónicas y climáticas no son la causa de la reiterada ocurrencia de desastres en el territorio colombiano. La ocupación y urbanización de áreas susceptibles han sido determinantes en la materialización de estas amenazas en desastres (Lavell,

2005). Por lo tanto, la elaboración de estudios de susceptibilidad y amenaza y su inclusión en los planes de ordenamiento territorial son fundamentales para planificar territorios sostenibles (Aristizábal y Hermelin, 2011), especialmente considerando el incremento en la magnitud y frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos debido al cambio climático (Fowler *et al.*, 2021; IPCC, 2021; Tabari, 2020).

Este trabajo tiene como objetivo registrar y describir en detalle el evento del 13 de noviembre de 2020 en el municipio de Dabeiba. Estos eventos se caracterizan por desencadenar diversos procesos geomorfológicos a escala de cuenca, que se concatenan y dan lugar a un nuevo fenómeno con mayor capacidad destructiva. El documento está estructurado de tal forma que describe la secuencia del evento concatenado que se presentó en estas cuencas, por lo que inicialmente se presenta el área y se caracterizan morfométricamente las cuencas. Luego se procede a describir las condiciones hidrometeorológicas y la dinámica del evento de lluvia

desencadenante, que se complementa con un trabajo de campo minucioso para identificar la evidencia física del evento y caracterizar la secuencia y naturaleza de los procesos concatenados. Finalmente, se describe el enjambre de movimientos en masa que dio lugar al evento torrencial y los resultados de los modelos de base física que se acoplaron para simular el comportamiento del flujo y delimitar las áreas de inundación.

Caracterización del área

El municipio de Dabeiba se localiza en el occidente del departamento de Antioquia sobre la vertiente del río Atrato, en la parte norte de la Cordillera Occidental de los Andes colombianos (Figura 1). El área afectada tiene una extensión aproximada de 22,6 km² y una altura promedio de 1320 m s. n. m., y se ubica al sur de la cabecera municipal del municipio de Dabeiba, en las veredas El Botón, Mohán, Dabeiba Viejo, El Espinazo y El Pital.

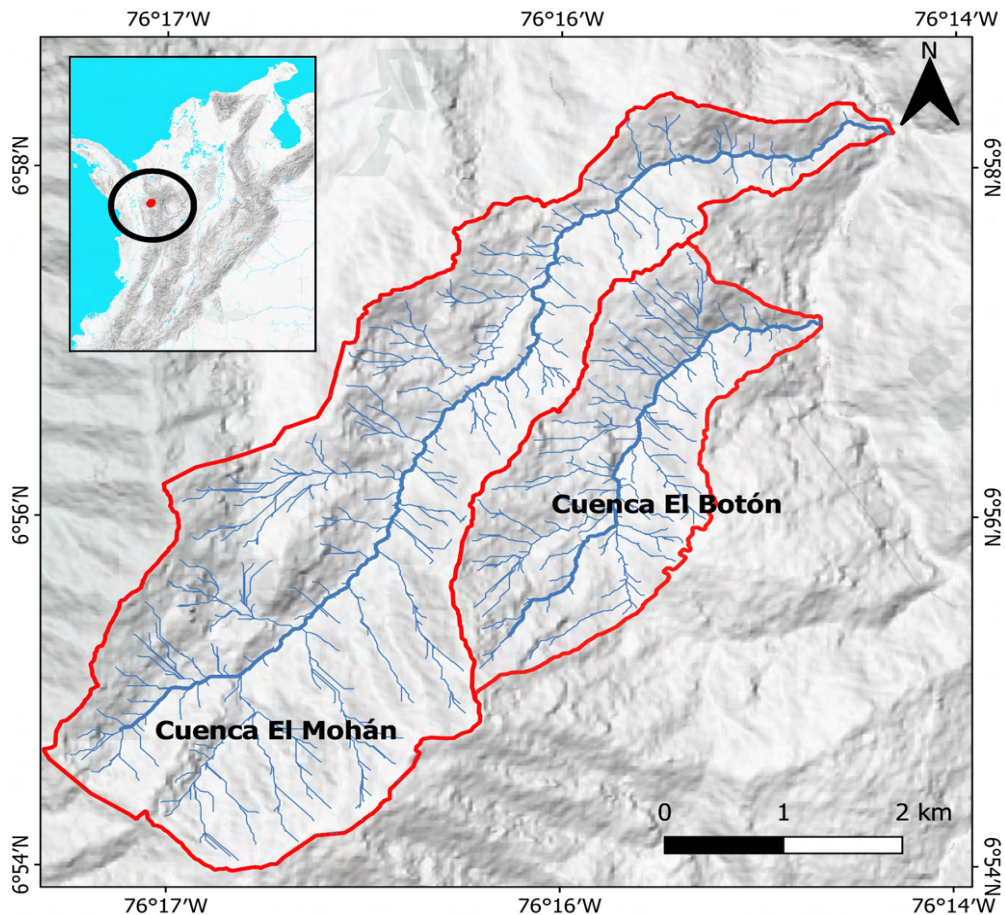


Figura 1. Delimitación de las cuencas hidrográficas de las quebradas El Mohán y El Botón, indicadas con contornos rojos, y la red de drenaje representada por líneas azules. El recuadro insertado en la parte superior izquierda indica la ubicación general del área de estudio dentro del contexto nacional de Colombia.

Geológicamente, el área está conformada por rocas ígneas volcánicas, rocas sedimentarias detríticas y de origen químico de ambiente marino, así como depósitos cuaternarios (Figura 2). Las principales unidades geológicas corresponden al Complejo Cañasgordas de edad cretácica superior, donde se encuentran el Miembro Urrao y el Miembro Nutibara. El Miembro Urrao está compuesto por bloques tectónicos de diabasas y basaltos, junto con

paquetes de chert y calizas. Por su parte, el Miembro Nutibara se caracteriza por la presencia de bloques de lodolitas, limolitas y arenitas líticas (Gómez *et al.*, 2010; SGC, 2013). Los suelos predominantes en el área se clasifican como limos inorgánicos (ML), arenas limosas (SM) y limos de alta plasticidad (MH), según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Corpourabá, 2018).

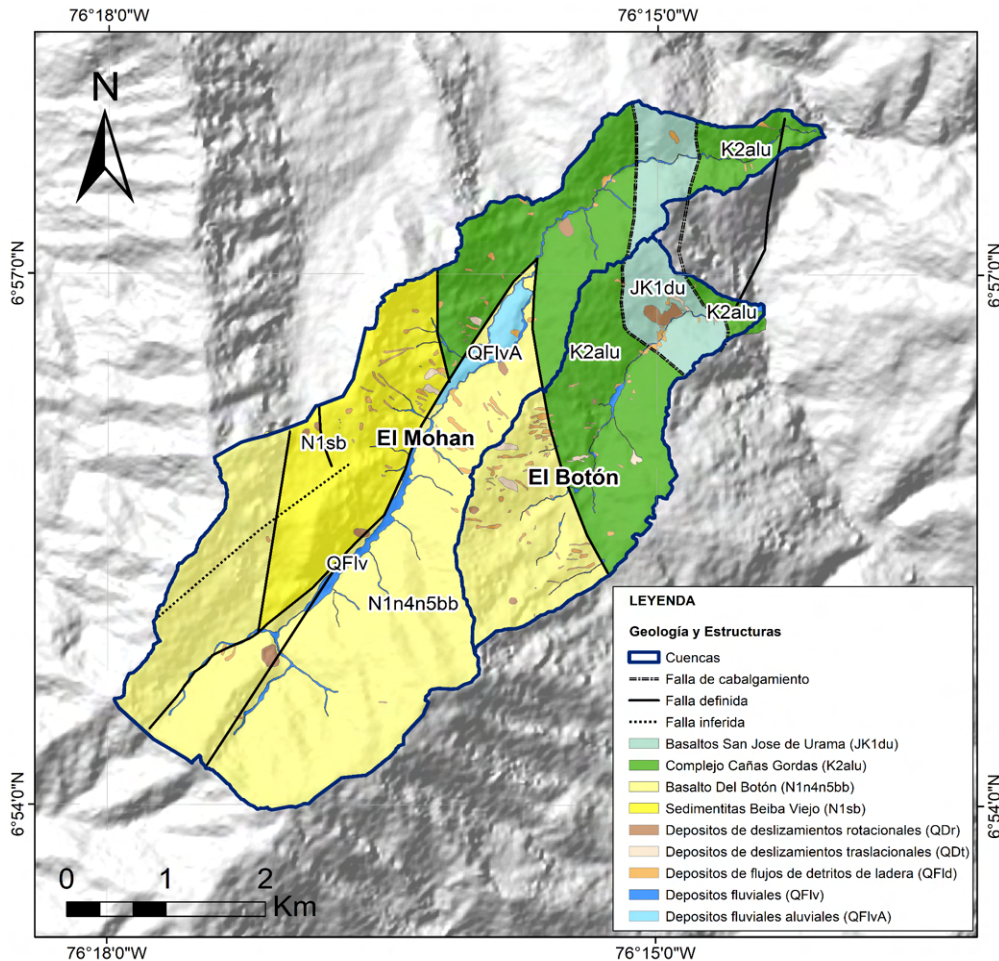


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio a escala 1:25.000. Las unidades geológicas se representan con distintos colores según la leyenda.

La Figura 3 presenta el análisis de cobertura del suelo en ambas cuencas, con patrones distintivos. En la cuenca El Mohán, el bosque predomina, cubre el 61% del área total; seguido por zonas de pastos que abarcan un 29%; áreas de suelo desnudo que

representan un 9 %, y zonas urbanas que comprenden menos del 1%. En contraste, la cuenca El Botón presenta una distribución diferente, con un 40% de cobertura boscosa, 34% de pastos, 24% de suelo desnudo y un 2% de áreas urbanas.

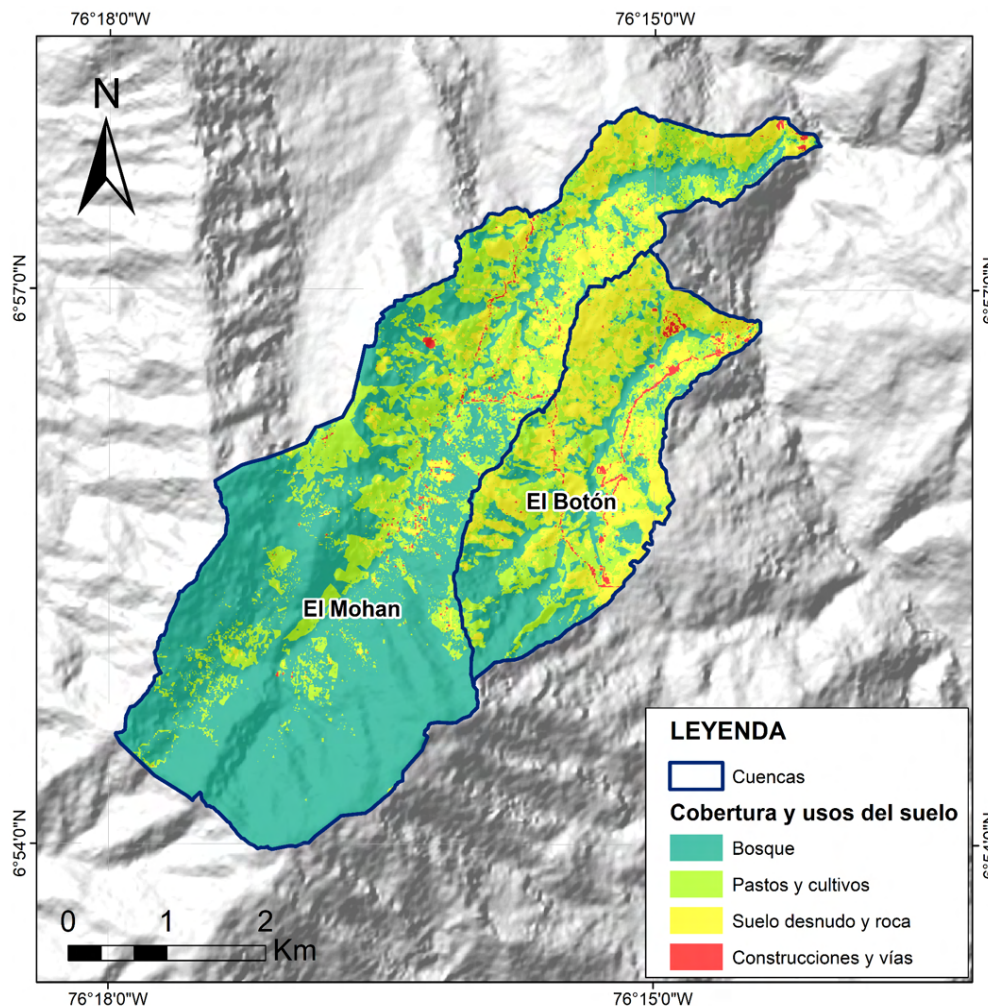


Figura 3. Distribución de los diferentes tipos de cobertura y uso del suelo en la zona de estudio, incluidos bosques, pastos y cultivos, suelos desnudos y áreas antrópicas.

Caracterización morfométrica de las cuencas

La cuenca El Mohán es de orden 5, con un área de 16,6 km² y un perímetro aproximado de 25 km. Presenta un factor de forma muy alargada y un relieve de 1,7 km. El tiempo de concentración es de 56 minutos, lo cual indica la posibilidad de ocurrencia de flujos hiperconcentrados (Arango *et al.*, 2021). El coeficiente de torrencialidad de la cuenca es de 27,85, lo que sugiere la posible ocurrencia de flujos de detritos (Arango *et al.*, 2021).

Por otro lado, la cuenca El Botón es de orden 4, con un área de 5,9 km² y un perímetro de 12,757 km. También presenta un factor de forma alargada y un relieve de

1,5 km. El tiempo de concentración es de 31 minutos, lo cual indica la capacidad de generar diferentes tipos de flujos (Arango *et al.*, 2021).

Ambas cuencas presentan características torrenciales y una geometría alargada, con valores bajos de elongación, circularidad y factor de forma, así como una pendiente media de 12°. Estas características indican un fuerte control estructural en el desarrollo de ambas cuencas. La curva hipsométrica también señala un estado de rejuvenecimiento relativo, con valores de 0,5 para la cuenca El Mohán y 0,4 para El Botón. Una síntesis de los índices obtenidos para ambas cuencas se presenta en la [Tabla 1](#).

Tabla 1. Comparación detallada de los parámetros morfométricos de las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón. Los valores del tiempo de concentración están basados en los estudios de Vélez-Upegui y Botero-Gutiérrez (2011).

Parámetro	Símbolo	El Mohán	El Botón
Orden de la cuenca	Su	5	4
Longitud del cauce principal (km)	Cl	11,120	5,102
Número total de corrientes	Nu	4502	207
Longitud total de las corrientes (km)	Lu	99,653	47,225
Relación de bifurcación	Rb	4,410	5,904
Relación de longitud	Rl	1,966	2,026
Coefficiente rho	P	0,4	0,3
Longitud de la cuenca (km)	Lb	8,992	4,508
Área (km ²)	A	16,6	5,9
Tiempo de concentración (min)	Tc	56	31
Perímetro (km)	P	25,162	12,757
Factor forma	Ff	0,2	0,3
Relación de elongación	Re	0,512	0,610
Relación de circularidad	Rc	0,33	0,46
Coefficiente de compacidad	Cc	1,7	1,5
Relación de textura	Rt	14,307	12,934
Relación de aptitud	Rf	0,442	0,4
Wandering Ratio	Rw	1,24	1,13
Frecuencia de drenaje	Fs	27,055	34,819
Densidad de drenaje	Dd	5,99	7,94
Constante de mantenimiento del canal	C	0,167	0,126
Intensidad de drenaje	Di	4,516	4,383
Número de infiltración	If	162,092	276,591
Coefficiente de torrencialidad	Ct	21,644	27,754
Longitud del flujo superficial (km)	Lg	0,083	0,063
Relieve (km)	H	1,745	1,456
Pendiente media de la cuenca (°)	S	12,049	12,049
Relación de relieve	Rh	0,194	0,323
Número de robustez	Rn	10,455	11,563
Índice de Melton	M	0,428	0,597
Integral hipsométrica	HI	0,53	0,43

Evento hidrometeorológico detonante

Dentro de la zona de estudio no existen estaciones pluviográficas con resolución temporal horaria (o mayor), por esta razón, se caracterizó el evento de precipitación utilizando los datos de una estación pluviográfica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), denominada Dabeiba 2 AUT - 11117050, con registros cada 10 minutos. Esta estación se encuentra a 7,5 km del área de estudio. Además, se utilizaron estimaciones

satelitales de lluvia del producto IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) en su versión V06, que presenta una resolución temporal de media hora (Huffman, 2021). Los datos del IMERG corresponden a estimaciones de la precipitación obtenidas a partir de sensores de la constelación de satélites GPM (Global Precipitation Measurement Missions) y están calibrados con estaciones pluviográficas en tierra. La resolución espacial de estos datos es de aproximadamente 11 km × 11 km para el trópico.

En la [Figura 4](#) se presenta la evolución temporal de la precipitación entre las 00:00 horas del 13 de noviembre de 2020 y las 12:00 horas del 14 de noviembre de 2020. En la [Figura 5](#) se muestra la evolución temporal

de la precipitación promedio en la zona de las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón, utilizando el producto IMERG.

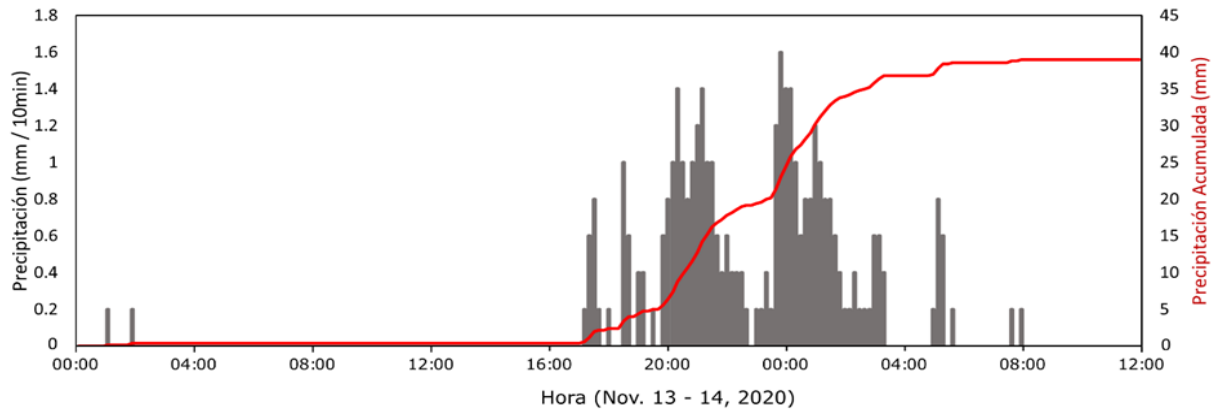


Figura 4. Precipitación medida en intervalos de 10 minutos (barras grises) y precipitación acumulada (línea roja) en la estación Dabeiba 2 (AUT-11117050) durante el evento lluvioso entre las 00:00 horas del 13 de noviembre y las 12:00 horas del 14 de noviembre de 2020.

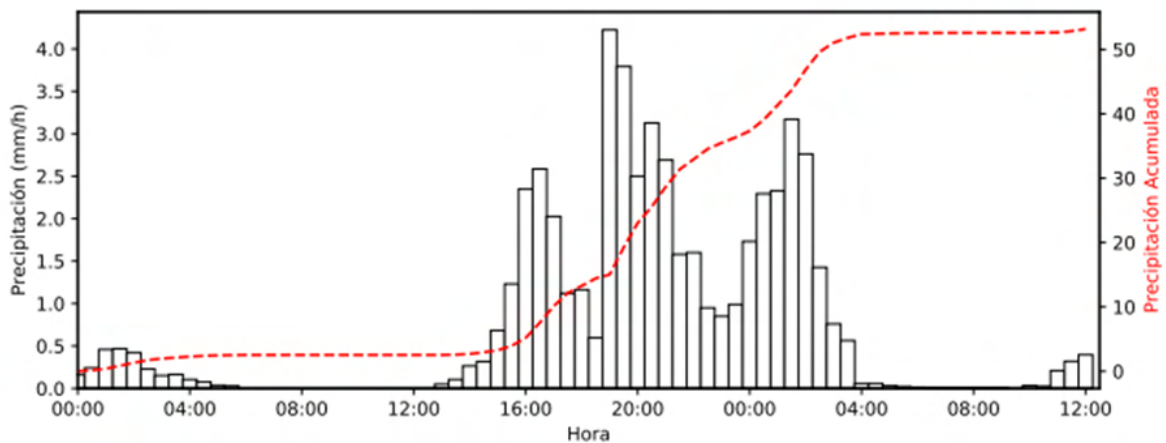


Figura 5. Precipitación media estimada cada media hora (barras blancas) y precipitación acumulada (línea roja discontinua) con datos IMERG en la región de las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón, entre las 00:00 horas del 13 de noviembre y las 12:00 horas del 14 de noviembre de 2020.

En las [figuras 4](#) y [5](#) se observan dos eventos de precipitación antes de las 00:00 del 14 de noviembre. Según la información satelital de IMERG, el primer evento se inició alrededor de las 13:00 horas, con su intensidad máxima en torno a las 16:30 horas, y se redujo posteriormente hasta las 18:30 horas. Los datos de la estación pluviográfica indican que este evento se intensificó rápidamente a partir de las 16:00 horas, y alcanzó su máxima intensidad dentro de la siguiente hora. Luego de este primer evento, se desarrolló un segundo evento de precipitación, considerablemente más fuerte, con un pico de intensidad registrado entre las 19:00 (según IMERG) y las 20:00 horas (según

la estación pluviográfica), probablemente asociado a un sistema de convección profunda. Tras el pico de intensidad, la precipitación disminuyó hasta las 23:00 horas. A partir de ese momento, se desarrolló un nuevo evento de precipitación hasta las 4:00 a. m. del día siguiente. Este último evento fue clave y probablemente detonó las avenidas torrenciales en las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón. La máxima intensidad de la precipitación cerca de la medianoche se observa en los datos de la estación pluviográfica, pero no se ve reflejada en los datos de IMERG, probablemente debido a su carácter promedio del área.

Desde el punto de vista hidrológico, no solo fue relevante el evento de lluvia cerca de la medianoche, sino también los eventos de lluvia precedentes, que incrementaron la humedad del suelo, disminuyeron su capacidad de infiltración y aumentaron la escorrentía superficial.

Una ventaja de la información satelital, como la de IMERG, es su amplia cobertura espacial, lo que permite examinar los eventos de precipitación en un contexto regional y nacional. En la [Figura 6A](#) y [Figura 6B](#) se presentan mapas de la precipitación acumulada entre las 12:00 del 13 de noviembre y las

4:00 del 14 de noviembre de 2020, para todo Colombia y un enfoque en el noroccidente del país. Se observa que las secciones norte de la Cordillera Occidental y de la costa Pacífica presentaron acumulaciones significativas de precipitación en comparación con el resto del país. Ninguna otra región de Colombia tuvo acumulados de lluvia similares a los registrados en la Cordillera Occidental. La avenida torrencial del 13-14 de noviembre de 2020 en las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón se enmarca en un contexto meteorológico favorable para la generación de acumulados de precipitación significativos en la Cordillera Occidental.

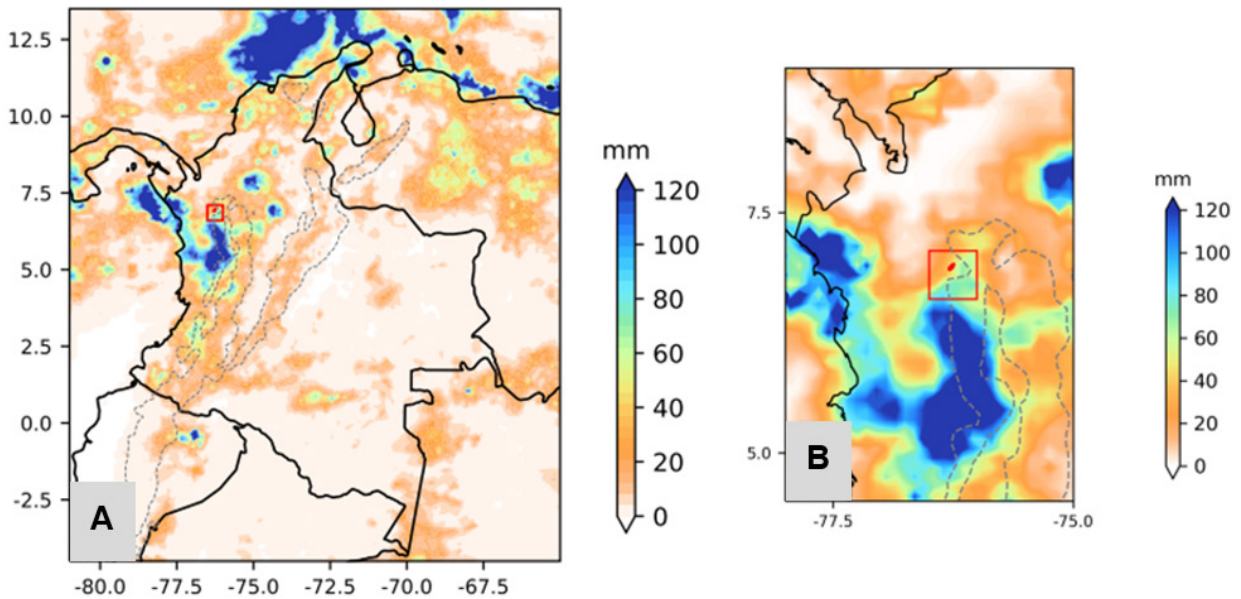


Figura 6. Distribución espacial de la precipitación acumulada obtenida mediante datos satelitales IMERG. **A.** Totalidad del territorio colombiano. **B.** Enfoque ampliado de la región del noroccidente de Colombia. La caja roja destaca el área de estudio que incluye las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón. Los colores representan los valores de precipitación acumulada; varían desde áreas con bajas precipitaciones (naranja) hasta valores máximos superiores a 120 mm (azul oscuro).

Durante el día del evento, se observó abundante nubosidad en el país, especialmente en la región Andina, la región Pacífica y en la costa del Pacífico y Caribe. Un aspecto relevante fue la gran cantidad de nubosidad asociada a la depresión tropical Iota, localizada al norte de Colombia en ese momento. La proximidad de la depresión tropical Iota generó cambios en los patrones de circulación atmosférica, e impactó el desarrollo de los sistemas de precipitación en el norte del país (Meza-Núñez, 2022). Este ciclón tropical intensificó el Chorro del Chocó y la circulación de bajo nivel desde el Pacífico en dirección oeste-este, y favoreció la advección de humedad hacia la Cordillera Occidental. En la tropósfera media (700 hPa), también se observó una perturbación en el campo de circulación debido a la depresión tropical Iota, lo

cual facilitó el ingreso de humedad a niveles medios hacia las cordilleras.

La [Figura 7](#), basada en el reanálisis ERA5 del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Hersbach *et al.*, 2023), muestra la humedad relativa promedio y el campo de viento a 500 hPa. Se observan valores altos de humedad relativa sobre la cordillera, indicadores de un ambiente atmosférico favorable para el desarrollo de nubes con grandes cantidades de agua precipitable, lo cual se refleja en las lluvias abundantes que ocurrieron ese día y que detonaron las avenidas torrenciales en Dabeiba. Además, los vectores de viento indican el transporte de humedad en niveles medio-altos desde el Pacífico hacia el noroccidente de Colombia, facilitado por la depresión tropical Iota.

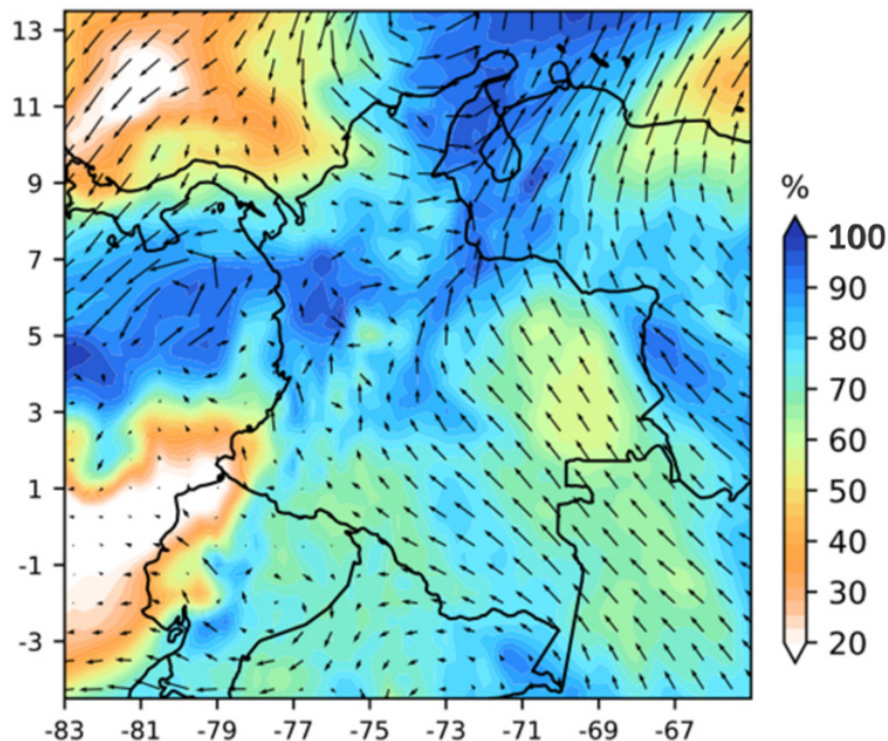


Figura 7. Distribución espacial de la humedad relativa (en %) y el campo de viento a 500 hPa sobre Colombia el 13 de noviembre de 2020, según datos del modelo ERA5. Las áreas en tonos azulados representan zonas con alta humedad relativa, mientras que los tonos anaranjados indican menores porcentajes de humedad. Los vectores negros ilustran la dirección e intensidad del viento a nivel de 500 hPa.

En regiones tropicales, el desarrollo de estos sistemas de precipitación se ve favorecido por la alta disponibilidad de humedad y el calentamiento atmosférico rápido debido a la radiación solar. En una zona de orografía compleja como el extremo norte de la Cordillera de los Andes, donde se encuentra el municipio de Dabeiba, la convección se intensifica debido al ascenso orográfico de masas de aire húmedo propiciado por la topografía montañosa. Cuando las condiciones atmosféricas son favorables, se generan sistemas convectivos a mesoescala, con una extensión de cientos de kilómetros, que son capaces de detonar eventos de alta intensidad, como fue el caso de Salgar en 2015 (Hoyos *et al.*, 2019).

Descripción del enjambre de movimientos en masa y del evento torrencial

Los movimientos en masa que se presentaron en las cuencas El Mohán y El Botón se describen como estrechos y de poca profundidad respecto a la longitud de la superficie de falla y la propagación de dichos eventos. La profundidad de la superficie de falla varía entre 1 y 3 metros, lo cual corresponde al contacto entre el suelo residual y el saprolito, y presenta una geometría plana y paralela a la ladera.

La ubicación de la superficie de falla, en el contacto entre el horizonte del suelo residual y el horizonte saprolítico, señala la formación de un nivel freático colgado. Este nivel freático se genera por el cambio de permeabilidad y conductividad hidráulica entre ambos horizontes de suelo. El suelo residual está influenciado generalmente por raíces de la vegetación, la intervención de animales y procesos químicos que generan macroestructuras y conductos preferenciales, que incrementan en varios órdenes de magnitud la conductividad hidráulica. Debido a esto, durante el proceso de infiltración del agua en el suelo, se genera un flujo subsuperficial con altura Z_w . Al aumentar Z_w , también aumentan las presiones de poros positivas, lo cual reduce los esfuerzos efectivos y, por lo tanto, disminuye la resistencia al cortante.

La falla de la ladera bajo presiones de poros positivas se confirma por el comportamiento tipo flujo del material fallado, generado por un proceso denominado licuefacción estática, en el cual el material del suelo, bajo condiciones de saturación o cercanas a la saturación, falla rápidamente, causa una pérdida de resistencia al cortante y deforma completamente el material.

Del evento ocurrido entre los días 13 y 14 de noviembre de 2020 en las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón, se cartografiaron un total de 175 movimientos en masa, como se observa en la [Figura 8](#). Estos

movimientos fueron inventariados a través de sensores remotos, como imágenes satelitales de Google Earth con resolución submétrica posterior a la fecha del evento.

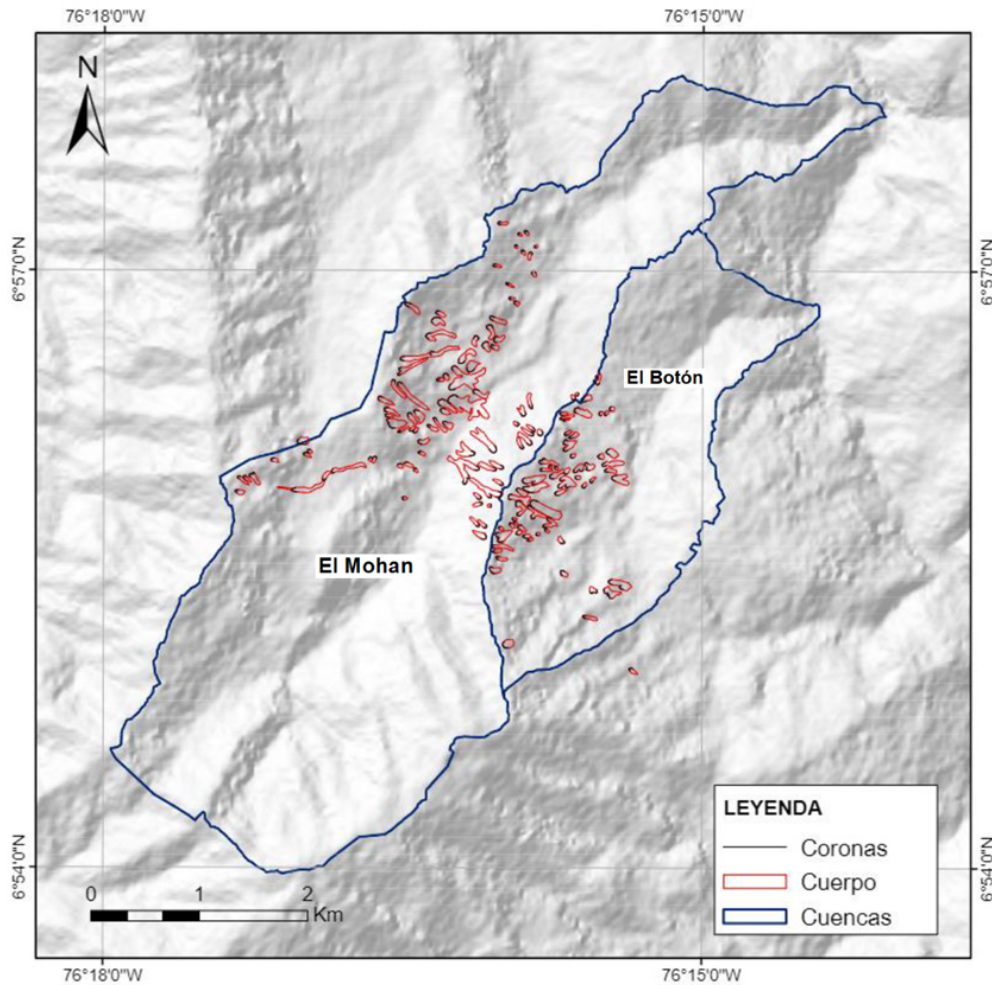


Figura 8. Distribución espacial de los deslizamientos desencadenados por el evento de precipitación en la región de Dabeiba, Antioquia. Los elementos del inventario incluyen las coronas y cuerpos de los movimientos en masa.

Las unidades geológicas donde se desencadenaron los procesos son basaltos El Botón (57%), sedimentitas de Dabeibaviejo (26%) y el Complejo Cañasgordas - Miembro Urrao (17%). Estas unidades se caracterizan por estar compuestas por suelos residuales de baja cohesión. En términos de pendiente, las laderas afectadas presentan inclinaciones en un rango entre 28° y 43°, con direcciones predominantes hacia el este y el oeste.

Como se observa en la [Figura 8](#), los movimientos en masa se localizaron principalmente en la parte media de la cuenca, lo cual puede estar relacionado con la distribución espacial reducida del evento de lluvia o las mayores intensidades del evento. El área afectada por los procesos varía desde 0,06 hasta 4,33 hectáreas, con

una sumatoria total de 75,4 hectáreas. Las longitudes de los movimientos oscilan entre los 30 y los 700 metros. De los procesos registrados, el 58% corresponde a deslizamientos traslacionales (algunos con un componente de flujo), mientras que el 42% corresponde a flujos de lodos y detritos. Espacialmente, el inventario se encuentra distribuido principalmente en las partes centrales de ambas cuencas. Aproximadamente el 54% de los movimientos en masa ocurrieron en la cuenca El Botón, donde predominan los deslizamientos traslacionales con cerca del 62%. En la cuenca El Mohán se registró poco más del 45% de los movimientos, con predominancia de deslizamientos traslacionales, que representan el 54% del total.

Descripción del evento torrencial

No existen registros visuales del flujo torrencial que permitan describir directamente el evento. Por lo tanto, se realizó un trabajo de campo detallado para identificar las evidencias asociadas a fenómenos torrenciales dentro de la cuenca. Adicionalmente, se modeló el evento torrencial mediante el programa Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability analysis (TRIGRS) (Baum *et al.*, 2008), lo cual permitió comparar los resultados con las evidencias obtenidas en campo.

En las cuencas El Mohán y El Botón se registraron 44 indicios de la ocurrencia de avenidas torrenciales a lo largo del canal, incluidos 9 sitios con cobertura de arena limosa sobre llanuras o terrazas, 12 puntos con marcas de erosión en corteza de árboles, 18 sitios con remanentes de represión y 5 sitios con sedimentos adosados en paredes

del canal o en cortezas de árboles. En la [Figura 9A](#) se presenta una superficie de arena limosa sobre una llanura aluviotorrencial, donde se observa material fino depositado sobre los primeros niveles como llanuras o terrazas bajas, que indican avenidas muy recientes. La [Figura 9B](#) muestra remanentes de represión, una de las evidencias más frecuentes en estas cuencas. Estos remanentes son áreas donde persisten materiales que obstruyeron o continúan obstruyendo el flujo de la cuenca, típicamente compuestos por grandes bloques de roca y troncos de árboles. Las marcas de erosión en la vegetación son comunes debido a la gran cantidad de bosque en el lecho de la quebrada, donde el paso de un evento torrencial deja evidencia del nivel alcanzado por el flujo ([Figura 10A](#)). Por último, otra evidencia de torrencialidad son los sedimentos adosados contra la vegetación o las paredes del canal, ilustrados en la [Figura 10B](#), donde se observa un canto incrustado contra el tronco de un árbol.

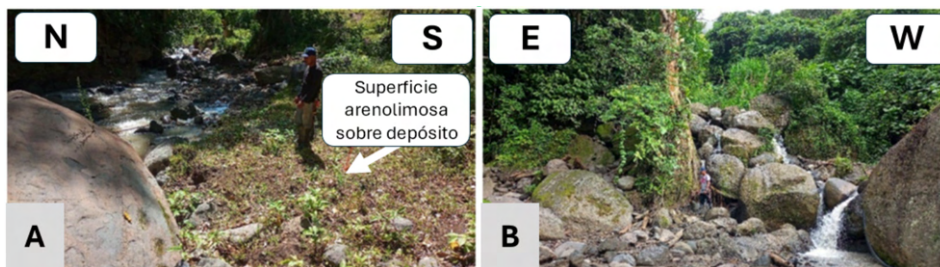


Figura 9. A. Superficie areno-limsa sobre llanura fluviotorrencial. B. Remanentes de represamientos en la quebrada El Mohán.

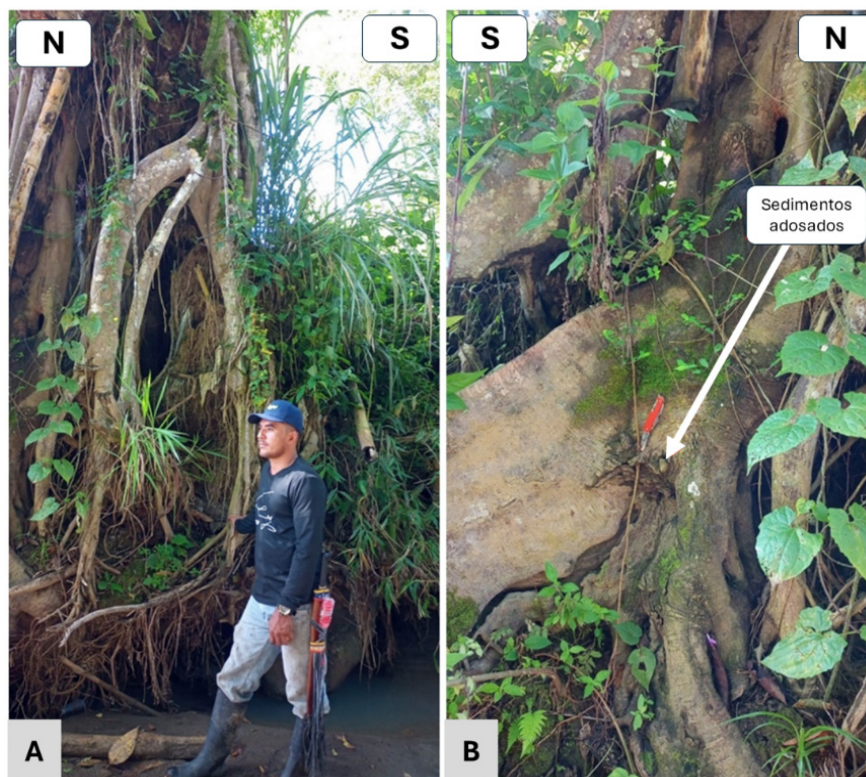


Figura 10. A. Marcas de erosión en la vegetación. B. Sedimentos adosados en la vegetación.

Un elemento fundamental del flujo torrencial es el tiempo de concentración de cada cuenca. El tiempo de concentración representa el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida (Smith y Vélez-Otálvaro, 1997). Este tiempo se da en función de las características morfométricas de cada cuenca, presentadas previamente. Numerosos autores han desarrollado formulaciones empíricas para este cálculo. En este trabajo se calcularon los tiempos de concentración bajo diferentes formulaciones empíricas, incluidas Kirpich, Williams, Johstone y Témez, tal como se presenta en Vélez-Upegui y Botero-Gutiérrez (2011). Para la cuenca El Mohán se obtuvieron tiempos de concentración de entre 37 y 136 minutos, con un valor medio de 55 minutos. Para la cuenca El Botón se encontraron valores de entre 16 y 70 minutos, con un valor medio de 31 minutos.

Para la estimación de caudales máximos se calcularon las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y se utilizó el método de hidrógrafa unitaria del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service - SCS). En la cuenca El Mohán, se estimaron precipitaciones de 74 mm/hora, con caudales de hasta 100 m³/s; mientras que en la cuenca El Botón se estimaron precipitaciones de 52 mm/hora, con caudales de 65 m³/s, ambos para periodos de retorno de 100 años. En el escenario más crítico evaluado, con un periodo de retorno de 500 años, se estimaron caudales máximos de 146 m³/s para la quebrada El Mohán y de 73 m³/s para la quebrada El Botón.

En cuanto a los tiempos de tránsito de la creciente, en la cuenca El Mohán, el tiempo total es de aproximadamente 240 minutos (4 horas), con el pico de la creciente en unos 80 minutos desde el inicio de la precipitación efectiva. La fase de recesión tras el pico máximo de caudal tarda alrededor de 160 minutos (2 horas y media). Para la

quebrada El Botón, el tiempo total de tránsito de la creciente es de aproximadamente 130 minutos (2 horas y 10 minutos), con el pico de la creciente alrededor de los 40 minutos desde el inicio de la precipitación efectiva, y una recesión de unos 90 minutos (una hora y media). Estos valores incluyen únicamente los aportes de escorrentía superficial derivados de la precipitación efectiva (caudal líquido), sin considerar los aportes sólidos generados en la cuenca.

Para la estimación del volumen de sedimentos transportados en el evento se utilizó el modelo TRIGRS (Baum *et al.*, 2008), con el objetivo de estimar el volumen de sedimentos generado por movimientos en masa detonados por lluvias. Además, se empleó un modelo de erosión que utiliza la ecuación universal para la pérdida de suelo. El modelo TRIGRS, escrito en Fortran, evalúa la distribución temporal y espacial de movimientos en masa superficiales detonados por lluvia, calcula los cambios transitorios de la presión de poros y su impacto en la variación del factor de seguridad. Los parámetros usados para la implementación del modelo fueron las condiciones topográficas de la zona, el mapa de espesor del suelo, las propiedades mecánicas e hidrológicas del suelo, las condiciones de lluvia como factor detonante y las condiciones iniciales del agua en el suelo.

El mapa de espesor del suelo se obtiene a partir del modelo matemático propuesto por Catani *et al.* (2010), donde el espesor se estima relacionando el ángulo de la pendiente. Los parámetros geotécnicos se obtuvieron a partir de la parametrización definida para las zonas geotécnicas homogéneas (Tabla 2). Con respecto a los parámetros hidráulicos, se considera el proceso de infiltración bajo condiciones saturadas, por ende, solo se emplea la conductividad hidráulica saturada (Ks), la cual se estima mediante aproximaciones dadas por funciones de pedotransferencia (PTF) con base en la textura del suelo, consignada en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros geotécnicos de los suelos (SUCS) asociados a las unidades geológicas superficiales (UGS).

UGS	ID	c' (kPa)	φ°	γs (kN/m ³)	D0 (m ² /s)	ks (m/s)	USCS
Basaltos El Botón	N1n4n5bb	15	32	17,35	6,22E-05	6,22E-07	ML
Basaltos San José de Urama	JK1du	15	32	17,35	6,22E-05	6,22E-07	ML
Complejo Cañas Gordas	K2alu	11	30	17,20	5,05E-05	5,05E-07	CH
Chert y calizas de Nutibara	K2cn	16	29	16,70	1,26E-04	1,26E-07	MH
Depósitos de deslizamiento rotacionales	QDr	7	23	19,00	6,22E-05	6,22E-07	ML
Depósitos de deslizamiento transaccionales	QDt	7	23	19,00	6,22E-05	6,22E-07	ML
Depósitos de flujos de detritos de ladera	Qfid	7	23	17,35	6,22E-05	6,22E-07	ML
Depósitos fluviotorrenciales	QFlv	20	29	19,25	1,00E-05	1,00E-07	SM
Sedimentitas Dabeiba Viejo	N1sb	10	27	19,25	1,47E-05	1,47E-07	SM

En cuanto al modelo de erosión, se utilizó el modelo clásico de RUSLE (por sus siglas en inglés, *Revised Universal Soil Loss Equation*) de acuerdo con la implementación recientemente propuesta por [Tefera et al.](#) (manuscrito en revisión), que considera 6 factores: factor de erosividad de la lluvia (R), factor de erodabilidad del suelo (K), factor de longitud y pendiente de la ladera (LS), factor de cobertura (C) y factor de prácticas de conservación (P). Los resultados del modelo muestran que para la quebrada El Mohán, los caudales sólidos estimados fueron de 130 m³/s tanto para periodos de retorno de 100 como de 500 años, sin variaciones significativas entre ambos escenarios. En el caso de la quebrada El Botón, se estimaron caudales sólidos de 71 m³/s para un periodo de retorno de 100 años, mientras que, para un periodo de retorno de 500 años, el caudal sólido aumentó a 110 m³/s, lo cual evidencia una mayor sensibilidad a eventos extremos en esta cuenca.

Los resultados de ambos modelos fueron integrados para obtener los volúmenes totales de sedimentos transportados durante el evento. La validación de los resultados se realizó mediante la comparación del inventario de 175 movimientos en masa documentados con las zonas de falla identificadas por el modelo. Los resultados muestran una correspondencia espacial significativa, particularmente en las áreas donde se concentraron los mayores daños durante el evento del 13-14 de noviembre de 2020. Adicionalmente, se contrastaron las alturas de flujo modeladas con las evidencias de campo documentadas, incluidas las 44 evidencias de avenidas torrenciales registradas, que comprenden superficies areno-limosas sobre llanuras o terrazas, marcas de erosión en cortezas de árboles, remanentes de represamiento y sedimentos adosados en paredes de canal.

La simulación hidrodinámica se llevó a cabo mediante la herramienta *r.avaflow* desarrollada por [Mergili et al. \(2017\)](#), una herramienta computacional para la simulación de flujos, avalanchas y otros procesos concatenados, que emplea un modelo bifásico (sólido y fluido) o de única fase con fricción tipo Voellmy.

La funcionalidad central de *r.avaflow* consiste en la redistribución de la masa y el momento empleando un modelo de flujo dinámico y un esquema numérico a través de un sistema de seis ecuaciones diferenciales para un modelo bifásico. Este modelo emplea la plasticidad de Mohr-Coulomb para el esfuerzo del sólido. El esfuerzo del fluido es modelado como un esfuerzo viscoso no newtoniano de un volumen sólido con gradiente de fracción mejorado. La transferencia de impulso interfacial generalizada incluye resistencia viscosa, flotabilidad y masa virtual inducida por la aceleración relativa entre las fases.

Para la simulación de una avenida torrencial en la zona de estudio se evaluaron los periodos de retorno de 2; 2,33; 5; 10; 50; 100; 300 y 500 años a través de las hidrógrafas del flujo para el caudal líquido y los volúmenes de sedimentos estimados de movimientos en masa y erosión de laderas. Estos sedimentos son distribuidos en el tiempo a través de la hidrógrafa de creciente de cada periodo de retorno.

En las [figuras 11A y 11B](#) se presentan los resultados obtenidos para las cuencas El Botón y El Mohán bajo un escenario de periodo de retorno de 500 años. En ambas cuencas, los resultados muestran que la mayoría de las acumulaciones significativas (superiores a 1 m) se encuentran concentradas en el cauce principal, lo cual indica la trayectoria preferencial del flujo hacia la parte baja del valle. Se puede observar que, aunque las áreas inundadas sean similares en extensión, la cuenca de la quebrada El Botón presenta áreas donde el flujo excede los 3 m con mayor frecuencia en comparación con la quebrada El Mohán. Lo que señala una mayor disponibilidad de sedimentos o mayores pendientes que facilitan el movimiento de flujo torrencial en la cuenca El Botón.

Comparado con la [Figura 12](#), los resultados de modelación se ajustan a las características cartografiadas del evento del 13-14 de noviembre de 2020, el cual estuvo limitado al valle estrecho de la cuenca, con pequeñas áreas donde el valle se ensancha levemente, y donde se registraron espesores de flujo superiores a 3 m.

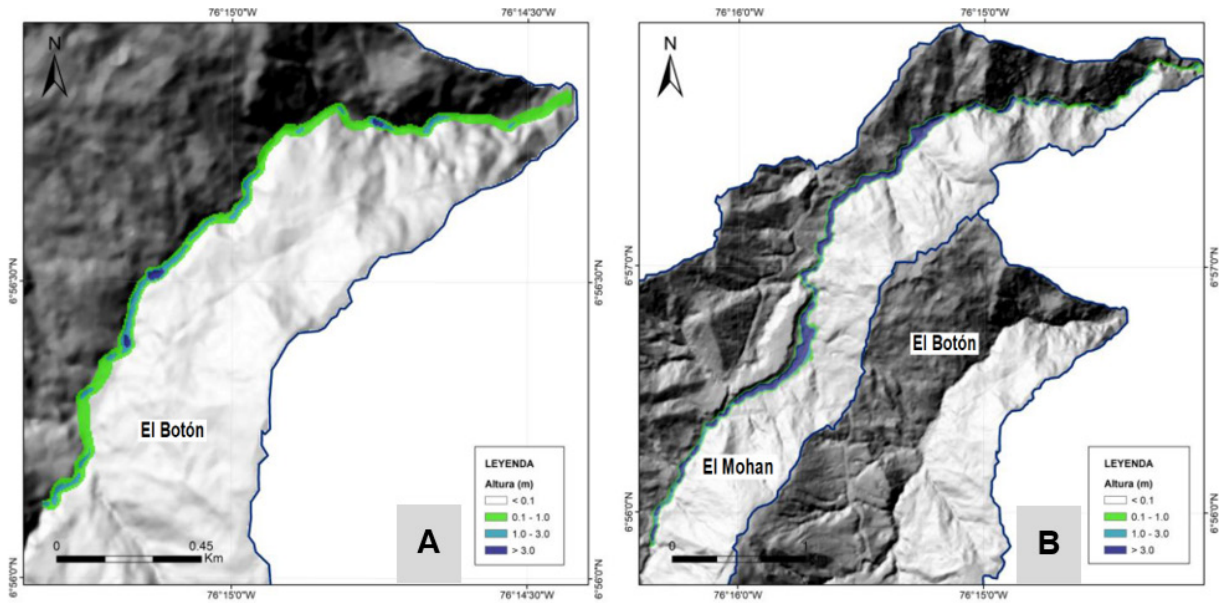


Figura 11. Resultados de la simulación de los flujos para las cuencas de las quebradas **A.** El Botón y **B.** El Mohán bajo un escenario de periodo de retorno de 500 años. Los colores indican la altura del flujo (en metros), desde menos de 0,1 m (en blanco) hasta alturas superiores a 3 m (en azul).

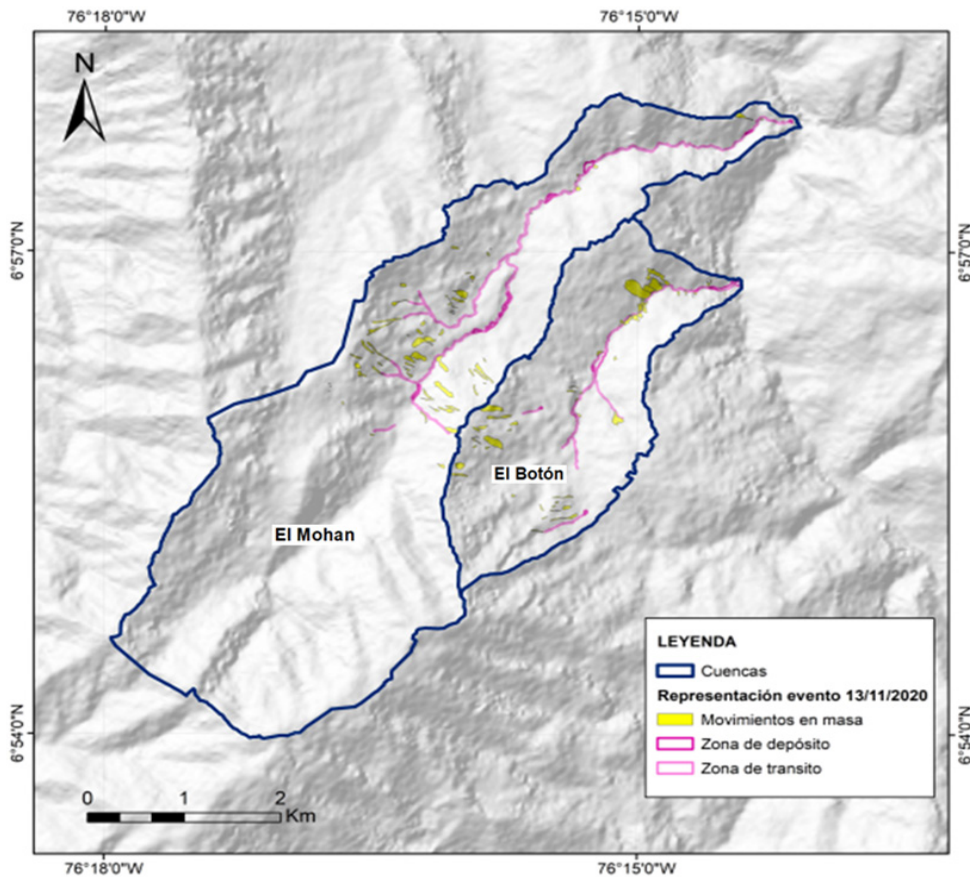


Figura 12. Movimientos en masa, zonas de depósito y zonas de tránsito del material movilizado en el evento de avenida torrencial ocurrido en las cuencas de las quebradas El Mohán y El Botón durante el 13 y 14 de noviembre de 2020. Las zonas de depósito y tránsito están resaltadas en rosa y amarillo, respectivamente.

La simulación fluidodinámica reveló que los flujos de escombros generados por estos movimientos en masa se concentraron sobre todo en los cauces principales, y alcanzaron alturas de flujo de hasta 3 m en algunos tramos. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones de estos modelos. La principal radica en la homogeneidad asumida en las propiedades del suelo dentro de cada unidad geológica, cuando en realidad existe una variabilidad espacial significativa. Otras limitaciones incluyen la incertidumbre en la estimación del espesor del suelo, la resolución temporal de los datos de lluvia disponibles, la simplificación del proceso de infiltración y la no consideración de efectos tridimensionales en la estabilidad.

La modelación integrada de los procesos de movimientos en masa y flujo torrencial mediante los modelos TRIGRS y *r.avaflow* ha permitido una comprensión más completa de la dinámica del evento del 13-14 de noviembre de 2020 en las cuencas El Mohán y El Botón. Los resultados del modelo TRIGRS muestran que las zonas de mayor susceptibilidad a movimientos en masa coinciden con las áreas de mayor pendiente y menor cobertura vegetal, particularmente en las partes medias y altas de ambas cuencas. Esto se correlaciona con el inventario de movimientos en masa observados durante el evento, y valida la capacidad predictiva del modelo. Por su parte, la simulación fluidodinámica con *r.avaflow* reveló que los flujos de escombros se concentraron sobre todo en los cauces principales, y alcanzaron alturas de flujo de hasta 3 m en algunos tramos. La interacción entre estos dos procesos es evidente en la distribución espacial de los depósitos fluviotorrenciales recientes, que se concentran en las zonas de transición entre las laderas y los valles.

Conclusiones

Las avenidas torrenciales, como la ocurrida en el municipio de Dabeiba el 13-14 de noviembre de 2020, corresponden a eventos complejos de cuenca en los que se concatenan diversos fenómenos hidrometeorológicos. Estos eventos incluyen tormentas intensas de lluvia que desencadenan crecientes súbitas a lo largo del cauce de la cuenca, así como enjambres de movimientos en masa sobre las laderas, los cuales aportan una gran cantidad de sedimentos al cauce. La interacción de estos procesos da lugar a la generación de una mezcla de agua y sedimentos en diferentes proporciones, que presenta un comportamiento reológico variable y se desplaza a lo largo del cauce a altas velocidades, con una gran capacidad destructiva.

El análisis detallado del evento hidrometeorológico detonante reveló la importancia crítica de las

condiciones atmosféricas específicas en la generación de avenidas torrenciales. La combinación de factores como la presencia de la depresión tropical Iota, la intensificación del Chorro del Chocó y el transporte de humedad desde el Pacífico creó un escenario propicio para precipitaciones intensas y localizadas. Se identificaron 175 movimientos en masa superficiales tipo planares y flujos en laderas conformadas por rocas volcánicas con pendientes superiores a 28°. Estos sedimentos provenientes de los movimientos en masa que alcanzaron los cauces, sumado con un volumen importante de sedimentos aluviales, se propagaron aguas abajo conformando un flujo hiperconcentrado con caudales picos estimados de 146 m³/s y 73 m³/s para la cuenca El Mohán y El Botón, respectivamente.

Estos flujos torrenciales, que son el resultado de una cadena de procesos que incluye crecientes súbitas y movimientos en masa, son comunes en los Andes colombianos, tal como se ha observado en eventos como el de Salgar, en 2015, y el de Mocoa, en 2017. Sin embargo, aún no se han realizado suficientes estudios que consideren de manera conjunta estos eventos a nivel de cuenca. En general, los estudios existentes se enfocan en el componente hidrológico, e intentan explicar la propagación del flujo torrencial a lo largo del cauce (Tohari, 2018), o en estudios geológico-geotécnicos que intentan explicar la ocurrencia de movimientos en masa sobre las laderas (Pradhan y Kim, 2015; Do y Yin, 2018; Maragaño-Carmona *et al.*, 2023). Ambos enfoques abordan el mismo evento de lluvia detonante de manera aislada. Sin embargo, la modelación integrada de ambos procesos —tanto el de ladera como el de cauce— sigue siendo muy limitada a nivel local y mundial.

Este trabajo pretende contribuir en este sentido, incentivando un enfoque articulado entre hidrología y geología para la comprensión integral de las avenidas torrenciales, que permita establecer medidas de prevención y mitigación para reducir el número de pérdidas humanas y económicas que ocurren anualmente en nuestro país debido a estos eventos. La colaboración interdisciplinaria entre expertos en hidrología y geología resulta esencial para mejorar la predicción, evaluación y manejo de desastres asociados a estos eventos extremos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (Dagran) del departamento de Antioquia y a la corporación ambiental Corantioquia por el apoyo económico al presente proyecto.

Referencias

- 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>
- Aristizábal, E.; Hermelin, M. (2011). Propuesta de zonificación del suelo para la gestión del riesgo enfocada al ordenamiento territorial. *Gestión y Ambiente*, 14(2), 7-16.
- Baum, R.L.; Savage, W.Z.; Godt, J.W. (2008). TRIGRS: A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0. Reston, VA, USA: US Geological Survey.
- Bedoya-Soto, J.M.; Aristizábal, E.; Carmona, A.M.; Poveda, G. (2019). Seasonal shift of the diurnal cycle of rainfall over Medellín's valley, Central Andes of Colombia (1998-2005). *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00092>
- Catani, F.; Segoni, S.; Falorni, G. (2010). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, 46(5). <https://doi.org/10.1029/2008WR007450>
- Corpourabá. (2018). POMCA Río Sucio Alto - Fase de diagnóstico unidades geológicas de superficie. Corporación Autónoma Regional.
- De Angeli, S.; Malamud, B.D.; Rossi, L.; Taylor, F.E.; Trasforini, E.; Rudari, R. (2022). A multi-hazard framework for spatial-temporal impact analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73, 102829. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102829>
- Do, H.M.; Yin, K.L. (2018). Rainfall threshold analysis and Bayesian probability method for landslide initiation based on landslides and rainfall events in the past. *Open Journal of Geology*, 8(7), 674-696. <https://doi.org/10.4236/ojg.2018.87040>
- Fowler, H.J.; Ali, H.; Allan, R.P.; Ban, N.; Barbero, R.; Berg, P.; Blenkinsop, S.; Cabi, N.S.; Chan, S.; Dale, M.; Dunn, R.J.H.; Ekström, M.; Evans, J.P.; Fossier, G.; Golding, B.; Guerreiro, S.B.; Hegerl, G.C.; Kahraman, A.; Kendon, E.J.; Lenderink, G.; Lewis, E.; Li, X.; O'Gorman, P.A.; Orr, H.G.; Peat, K.L.; Prein, A.F.; Pritchard, D.; Schär, C.; Sharma, A.; Stott, P.A.; Villalobos-Herrera, R.; Villarini, G.; Wasko, C.; Wehner, M.F.; Westra, S.; Whitford, A. (2021). Towards advancing scientific knowledge of climate change impacts on short-duration rainfall extremes. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2195). <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0542>
- Gómez, J.F.; Zapata, G.; Rodríguez G.G. (2010). Geología de la parte oriental de la plancha 114 Dabeiba. Escala 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Sabater-Muñoz, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Rozum, I.A.O. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Hoyos, C.D.; Ceballos, L.I.; Pérez-Carrasquilla, J.S.; Sepúlveda, J.; López-Zapata, S.M.; Zuluaga, M.D.; Velásquez, N.; Herrera-Mejía, L.; Hernández, O.; Guzmán-Echavarría, G.; Zapata, M. (2019). Meteorological conditions leading to the 2015 Salgar flash flood: Lessons for vulnerable regions in tropical complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2635-2665. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2635-2019>
- Huffman, G. (2021). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 Degree x 0.1 Degree V06 [map]. <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Kellogg, J.N.; Vega, V.; Stailings, T.C.; Aiken, C.L.V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. In: P. Mann (ed.). *Geologic and tectonic development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (pp. 75-90). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/SPE295-p75>
- Lavell, A. (2005). Desastres y desarrollo: hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: El caso del huracán Mitch en

- Centroamérica. En: A. Fernández (ed.). *Comarcas vulnerables: Riesgos y desastres naturales en Centroamérica y el Caribe* (pp. 11-45). CRIES.
- Maragaño-Carmona, G.; Fustos-Toribio, I.J.; Descote, P.Y.; Robledo, L.F.; Villalobos, D.; Gatica, G. (2023). Rainfall-induced landslide assessment under different precipitation thresholds using remote sensing data: A Central Andes case. *Water*, 15(14), 2514. <https://doi.org/10.3390/w15142514>
- Marín-Cerón, M.I.; Leal-Mejía, H.; Bernet, M.; Mesa-García, J. (2019). Late Cenozoic to modern-day volcanism in the Northern Andes: A geochronological, petrographical, and geochemical review. En: F. Cedié, R.P. Shaw (eds.). *Geology and tectonics of Northwestern South America* (pp. 603-648). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_8
- Mergili, M.; Fischer, J.T.; Krenn, J.; Pudasaini, S.P. (2017). ravaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*, 10(2), 553-569. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-553-2017>
- Meza-Núñez, A.F. (2022). Caracterización del huracán Iota y su impacto en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina en 2020. Tesis de grado, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- ONGRD (2020). En Dabeiba, Antioquia, se mantienen acciones de estabilización a familias afectadas por las lluvias. Oficina Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/En-Dabeiba,-Antioquia,-se-mantienen-acciones-de-estabilizacion-a-familias-afectadas-por-las-lluvias.aspx>
- ONGRD (2022). Redacciones especiales: nueva fijación. Oficina Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <https://www.elespectador.com/contenido-patrocinado/unidad-nacional-para-la-gestion-del-riesgo-de-desastres-nueva-fijacion/>
- Pradhan, A.M.S.; Kim, Y.T. (2015). Application and comparison of shallow landslide susceptibility models in weathered granite soil under extreme rainfall events. *Environmental Earth Sciences*, 73, 5761-5771. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3829-x>
- SGC. (2013). Plancha 114 memoria explicativa. Servicio Geológico Colombiano.
- Smith, Q.R.; Vélez-Otálvaro, M.V. (1997). Hidrología de Antioquia. Secretaría de Obras Públicas Departamentales, Medellín, Colombia.
- Tabari, H. (2020) Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10, 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- Tefera, T.; Teshome, A.; Tadesse, W.; Tadesse, A. (manuscrito en revisión). Estimation of soil loss using the RUSLE Model integrated with GIS tools: A case study of the Ribb Dam Catchment, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5145263/v1>
- Tohari, A. (2018). Study of rainfall-induced landslide: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118, 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012036>
- Vélez-Upegui, J.J.; Botero-Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Dyna*, 78(165), 58-71.
- Voight, B. (1990). The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: Anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44(3-4), 349-386. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90027-D](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90027-D)

Fecha de recibido: 29 de enero de 2024

Fecha de aceptado: 31 de marzo de 2025
