



**Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y
concepto técnico sobre el trazado alternativo de la vía Panamericana – Municipio
de Rosas**

Colombia, departamento de Cauca

Bogotá, D. C., enero de 2023



Dirección de
Geoamenazas

Servicio Geológico Colombiano

Héctor Julio Fierro Morales

Director general

John Makario Londoño Bonilla

Director técnico de Geoamenazas

Yenny Paola Casallas

Directora técnica de Geociencias Básicas

Autores

Edgar Carrillo

Nathalia Contreras

Faver Sánchez

Jorge Alpala

Bernardo Pulgarín

Enif Medina

Andrés Reyes

Carlos Gamboa

Carlos Muñoz

John Galarza

Carlos Laverde

Adriana Agudelo

Citación: Carrillo, E., Contreras, N. Sánchez, F., Alpala, J. Pulgarín, B., Medina, E. Reyes, A., Gamboa, C. Muñoz, C., Galarza, J. Laverde, C., y Agudelo, A. (2023). *Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

<https://doi.org/10.32685/4.3.2020.922>



Agradecimientos

Durante los trabajos realizados en campo se contó con el apoyo de varias entidades, comunidades, profesionales y público en general a quienes el SGC extiende sus agradecimientos

Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres – UNRGD
Policía Nacional de Colombia
Fuerza Aérea Colombiana - FAC
Instituto Nacional de Vías – Invías
Alcaldía Municipal de Rosas
Comunidades campesinas e indígenas del municipio de Rosas
Ingeniero John Edinson Ordúz Fernández –Piloto Drones – UNGRD
Ingeniero Iván René Adarme – UNGRD
Mayor Hader Barrios – Piloto – FAC
Teniente Nicolás Jiménez – Piloto –FAC
Técnico Álvaro Bernal – FAC
Técnico Oscar Martínez – FAC
Técnico John Alex González – FAC
Técnico Iván Rodríguez – FAC
Técnico Aeronáutico Andrés Zuluaga – FAC
Ingeniero Lucio Cruz - Unicauca
Ingeniero Geólogo Edgar Alexander Rodríguez
Geólogo Héctor Cepeda
Ingeniero Yordy Díaz – Invías
Geólogo Jaider Quintero – Invías
Geóloga Diana Lozano
Ingeniera Luisa Alvarado
Ingeniero Juan Martínez

A la comunidad de Santa Clara, Párraga Viejo y Párraga, a los señores Franklin Flores, Christian Viveros, Ricardo, Aurelio, Andrés, Andrea y a Rafael Garcés. Al cuerpo de bomberos voluntarios y a las lideresas y líderes de Párraga, por su hospitalidad y acompañamiento en las labores de campo

Contenido

Agradecimientos	3
1. Introducción	5
2. Alcances y limitaciones	5
2.1. Limitaciones modelaciones fluido-dinámicas	6
3. Generalidades	7
3.1. Localización y área de influencia del movimiento en masa	7
4. Caracterización geoambiental de la cuenca de la quebrada Chontaduro	9
4.1. Características geológicas de la microcuenca de la quebrada Chontaduro	9
4.2. Características geomorfológicas de la microcuenca de la quebrada Chontaduro	18
4.3. Análisis de precipitación	24
4.3.1. Lluvia acumulada	26
4.3.2. Lluvias máximas	26
4.3.3. Resultados cálculo de periodos de retorno para lluvias máximas	27
4.4. Registros sísmicos	28
5. Caracterización del movimiento en masa	30
5.1. Actividad en la corona	33
5.2. Actividad en los flancos	34
5.3. Actividad en el pie del movimiento	36
5.3.1. Fases del flujo	36
5.4. Evolución del movimiento en masa – Zona de restricción	44
6. Modelos fluidodinámicos	46
6.1. Condiciones de entrada hidrógrafa	46
6.2. Modelos numéricos	47
6.2.1. Modelo riverflow2d ©	47
6.2.2. Modelo flo-2d pro ©	52
6.2.3. Modelo titan2d	58
Conclusiones	66
Recomendaciones	69
Referencias	70

1. Introducción

Dada la magnitud del evento ocurrido en el municipio de Rosas el 9 de enero y de acuerdo con la misionalidad del Servicio Geológico Colombiano – SGC, se programó una comisión que coincidió con la solicitud de la Oficina Asesora de Gestión del Riesgo del Cauca (OAGRD-Cauca), con el objeto de apoyar la evaluación técnica del movimiento en masa que afectó las veredas La Soledad, Santa Clara, Chontaduro, Párraga Viejo, destruyendo al menos 150 viviendas, zonas de cultivo, zonas de bosque, daños a los acueductos veredales, la infraestructura eléctrica y la vial y la pérdida de la banca en un tramo de aproximadamente 300 m de la vía Panamericana a la altura de este municipio, dejando incomunicado el sur del país y generando grandes pérdidas económicas, por fortuna sin ocasionar pérdidas de vida. Para ello, el SGC desplazó varias comisiones técnicas entre el 11 y el 19 de enero de 2023 con el fin de brindar el apoyo técnico a las entidades de orden municipal, departamental y nacional.

Adicionalmente, en el marco del Séptimo Comité Nacional para el Manejo de Desastres, el día 12 de enero de 2023, se solicitó al SGC un concepto técnico relacionado con la propuesta, por parte de Invias, de un trazado alternativo que permita reconectar la vía Panamericana, afectada por el movimiento en masa.

Este informe contiene aspectos geológicos, geomorfológicos, la caracterización y evolución del movimiento en masa a raíz de la emergencia que afecta la microcuenca de la quebrada Chontaduro y provocó la restricción del paso sobre la vía Panamericana (PR75 +0300 al PR75 + 0600) a la altura del municipio de Rosas (departamento del Cauca). Además, contiene un concepto técnico de las condiciones geológico-geomorfológico de la zona donde se tiene considerado realizar el trazo alternativo de la vía Panamericana por parte de Invias.

2. Alcances y limitaciones

Como resultado de la emergencia que se presentó en el municipio de Rosas debido al movimiento en masa en la vereda La Soledad, el SGC elaboró el presente informe, el cual se basa en las inspecciones visuales realizadas en campo, información secundaria y testimonios de miembros de la comunidad local, junto con acompañamiento de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el Instituto Nacional de Vías (Invias), de tal manera que corresponde a un diagnóstico y evaluación técnica, que puede constituirse en una herramienta de apoyo para la gestión del riesgo y toma decisiones por parte de las autoridades competentes.

Como apoyo a la actividad de campo se realizaron sobrevuelos con drones (UNGRD, SGC, Policía Nacional) y sobrevuelos con helicóptero (FAC). En la definición de las posibles zonas afectadas por el retroceso del movimiento en masa se contó con el apoyo de personal de la UNGRD y la comunidad local; así mismo, para la evaluación de la zona baja (vereda Chontaduro) con fines del trazado de la vía alterna con el apoyo de profesionales del Invias. Las diferentes comisiones estuvieron en la zona entre el 11 y el 19 de enero de 2023, mientras que el recorrido de las zonas norte y occidental del movimiento en masa se realizó durante los días 12 y 13 de enero, en difíciles condiciones de acceso y constantes lluvias.

Así mismo, el acceso a la zona baja de la cuenca de la quebrada Chontaduro se limitó a la zona de la margen izquierda de la quebrada Chontaduro, debido a las restricciones físicas, por lluvias y de tiempo en el momento de visita.

Las consideraciones geológico-geomorfológicas con énfasis en el comportamiento geotécnico del material en la zona del trazado de la vía alterna se realizaron a partir de inspecciones visuales, por lo cual no reemplaza los estudios de investigación del subsuelo y los ensayos de laboratorio complementarios para este tipo de trabajos, los cuales no se realizaron por un criterio de oportunidad y debido a la urgencia de entregar este informe por la emergencia, con miras a que las entidades puedan contar de una manera oportuna con la información contenida en este informe. Si bien esta información puede servir para tomar decisiones (dadas las condiciones actuales de emergencia), se debe tener en cuenta que la información presentada en este informe presenta limitaciones y no es totalmente concluyente.

2.1. Limitaciones modelaciones fluido-dinámicas

Las modelaciones fluido-dinámicas se realizaron con el fin de aproximarse a las alturas y velocidades de un posible flujo que se genere por efecto de precipitaciones máximas y volúmenes acumulados de agua en la masa movilizada en la cuenca alta y media de la quebrada Chontaduro (vereda Soledad) y que pueda transitar hacia la cuenca baja (vereda Chontaduro) aguas abajo del cruce con la vía Panamericana en la zona que ha sido considerada para la construcción de la vía alterna provisional.

Las características y propiedades del flujo para la modelación numérica se contemplaron con base en las observaciones de campo, por lo cual se listan las siguientes limitaciones:

- La topografía (Modelo Digital del Terreno - MDT) utilizada corresponde a la condición de la zona del día 13 de enero de 2023. De acuerdo con lo visto en campo, la base del cauce actual de la quebrada Chontaduro se incrementa a medida que se depositan los sedimentos provenientes de la masa movilizada en la vereda La Soledad. Por tanto, las condiciones morfométricas de la quebrada son dinámicas y no se contemplan dentro de los modelos fluidodinámicos.
- La reología (características que permiten que un flujo se deforme al aplicarse un esfuerzo) y la composición del flujo son aproximadas y fueron determinadas a partir de lo observado en campo (terrestre y aéreo) y los videos tomados por la comunidad, debido a que, a pesar de tomarse muestras del flujo para su análisis en laboratorio, los ensayos requeridos deben cumplir con normas que establecen tiempos de secado de las muestras, razón por lo cual aún no se cuenta con los resultados al momento de elaboración de este informe.
- Existe alta incertidumbre en los volúmenes de flujo que puedan ocurrir en el futuro cercano, por lo cual, los resultados de los modelos hidrodinámicos están basados en un evento extremo probable, determinado por el volumen disponible de la masa movilizada y el volumen de agua proveniente de las precipitaciones y acumuladas en la masa según los sobrevuelos con dron y helicópteros.
- Los modelos hidrodinámicos (FLO-2D© y RiverFlow2d©), con los cuales se realizó la modelación numérica están diseñados para materiales que se comportan como un fluido. Sin embargo, se observó en campo una masa con menor cantidad de agua que avanza de manera intermitente y velocidades menores a las alcanzadas por un flujo hiperconcentrado. Debido a que esta masa puede avanzar sobre el cauce de la quebrada Chontaduro hacia la zona del emplazamiento del puente del trazado de la vía se consideró aplicar el modelo Titan2d (Patra *et al.*, 2005. Esto implica que hay limitaciones en cuanto a los alcances de los resultados de este informe respecto al modelamiento hidrodinámico, dada la complejidad del movimiento en masa y sus diferentes variantes en cuanto a su comportamiento reológico.
- Los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas en este informe no son totalmente concluyentes, dadas las limitaciones de tiempo y de elementos adicionales que no se incluyeron

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

(reología de material, modelos de terreno más finos, otros esquemas de modelamiento, entre otros) y que permitirían obtener resultados más contundentes. Por lo tanto, se deben tener presente estas limitaciones al usar los resultados de este informe para tomar decisiones.

3. Generalidades

A continuación, se describen los aspectos generales de la localización, área de influencia del movimiento en masa, sensores remotos empleados, entre otros.

3.1. Localización y área de influencia del movimiento en masa

El movimiento en masa ocurrido el 9 de enero de 2023 se localiza en Rosas - Cauca (figura 1) en la vereda La Soledad. Este municipio limita al norte con los municipios de El Tambo, Timbío y Sotará; al sur con el municipio de La Sierra, al oriente con Sotará y al occidente con El Tambo. Este deslizamiento es de estilo complejo y extiende en aproximadamente 90 ha, sobre la microcuenca de la quebrada Chontaduro, en la base del cerro Broncazo. Este movimiento afectó las veredas La Soledad, Santa Clara, Párraga Viejo y Chontaduro, destruyendo al menos 150 viviendas y un tramo de aproximadamente 300 m de la vía Panamericana (figura 2).

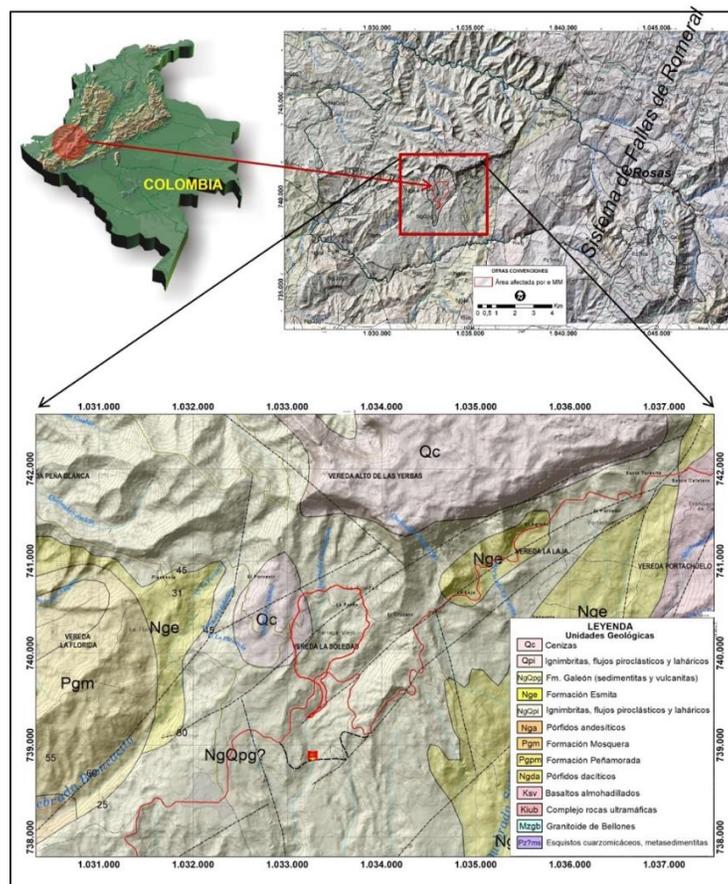


Figura 1. Localización movimiento en masa en la microcuenca de la quebrada Chontaduro. Nótese la cercanía al sistema de fallas de Romeral. También se muestra la geología de la zona de estudio.



Figura 2. Localización del trazado vial propuesto por Invias

Mediante vuelos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) realizados por el SGC, en conjunto con UNGRD, Policía Nacional y Ejército Nacional, se han tomado en diversos planes de vuelo más de 2.700 fotografías ortogonales del área del movimiento en masa. Con estos insumos se construyó mediante fotogrametría una ortofoto de resolución aproximada de 5 cm/px y un modelo digital de terreno (DTM) de resolución de 20 cm/px, cubriendo un área de 300 ha (figura 3).

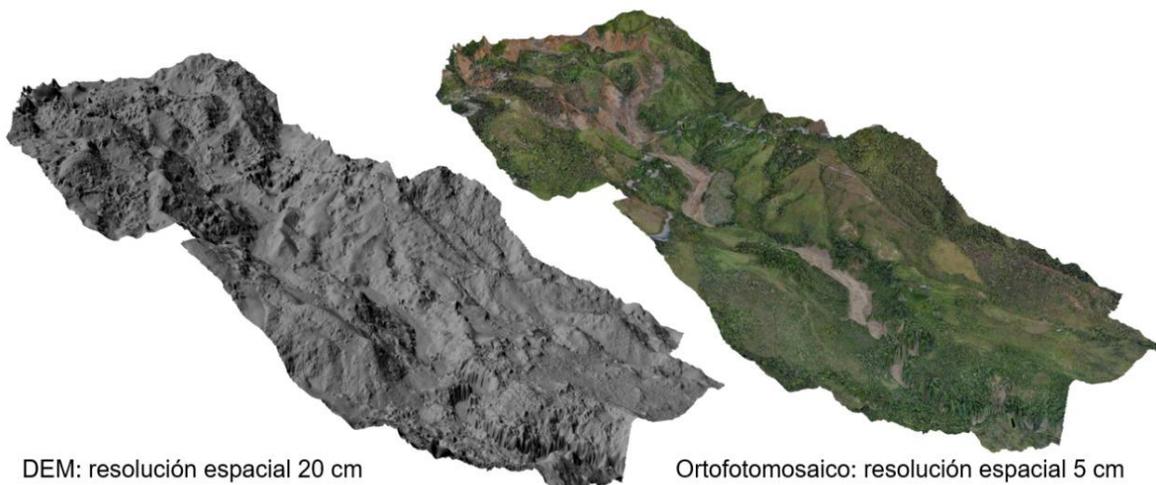


Figura 3. Modelo digital de elevación y ortomosaico generados a través de vuelos con UAV en la zona del movimiento en masa
Izquierda: DEM, derecha: Ortofotomosaico.

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

Adicionalmente se utilizaron los siguientes insumos:

- a) Zonificación de la amenaza por movimientos en masa escala 1:25 000, municipio de Rosas - Cauca (SGC, 2020).
- b) Base cartográfica del IGAC, escala 1:25 000 y el Modelo Digital de Elevación (MDE) SRTM ASF de 12,5 m de resolución espacial horizontal.
- c) Información de precipitación de la estación Párraga [Código 52010050] del IDEAM (<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>).
- d) Información de registro sísmico de la Red Sismológica Nacional de Colombia del SGC (<http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/index.php>).
- e) Información de registro del Sistema de Información de Movimientos en Masa - SIMMA- (<http://simma.sgc.gov.co/#/>).

4. Caracterización geoambiental de la cuenca de la quebrada Chontaduro

Este capítulo describe las características geoambientales, las cuales contribuyen a la susceptibilidad del terreno a la ocurrencia del movimiento en masa, partiendo de una visión regional, a partir de observación en campo, las características particulares del movimiento en masa y su implicación sobre el trazado vial alterno propuesto por el Invias.

4.1. Características geológicas de la microcuenca de la quebrada Chontaduro

Regionalmente el área de esta microcuenca está enmarcada en la plancha geológica 364-Timbío (Orrego y Acevedo, 1993) (figura 4). De acuerdo con estos autores, en el área se encuentra una secuencia de rocas epiclásticas y rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Galeón (TQpg). Entre los sectores donde afloran estas rocas, particularmente se encuentra el cerro Broncazo y sus alrededores, incluyendo los ríos Quilcacé y Esmita, donde estos rellenos volcanoclásticos pueden alcanzar espesores totales hasta de 800 m.

Esta secuencia de depósitos se caracteriza porque exhiben escarpes abruptos y bajas inclinaciones de sus capas, que estos autores las atribuyen a movimientos recientes de bloques tectónicos asociados a la falla Mosquerillo-La Tetilla, del Sistema de Fallas de Romeral. Hacia la parte inferior, esta secuencia también presenta mezclas con fragmentos de rocas metamórficas y de rocas verdes, mientras que los fragmentos de rocas volcánicas se hacen más abundantes hacia la parte media y superior de esta secuencia. Se pueden encontrar capas de gravas, arenas, limos, con abundantes fragmentos de rocas volcánicas intercaladas con capas de depósitos volcánicos de flujos piroclásticos, lahares y caídas de cenizas. Estos autores indican que las capas de lahares pueden alcanzar hasta 10 m de espesor y algunas veces están intercaladas con capas más delgadas de arenas y de gravas con espesores entre 1 m y 5 m, también se presentan capas de ceniza volcánica.

Hacia la parte superior de esta secuencia, abundan más las capas de sedimentos volcánicos e ignimbritas, que están cubiertas discordantemente por cenizas volcánicas muy meteorizadas y en algunos sectores, por una capa de ignimbrita soldada, esta última asociada a la Formación Popayán (Unidad Río Hondo, de acuerdo con Orrego y Acevedo, 1993), por lo que estos autores indican que la Formación Galeón es más antigua que la Formación Popayán o al menos más antigua que la Unidad Río Hondo, de ésta última formación.



Figura 5. Vista general del movimiento en masa (MM) en la quebrada Chontaduro (municipio de Rosas, Cauca) Obsérvese la carretera Panamericana destruida y cubierta por los sucesivos emplazamientos de los flujos lodosos resultantes del gran MM que ha venido manifestándose desde el 9 de enero de 2023, generado múltiples hundimientos escalonados hacia las partes altas y laterales altas dejando expuestas coronas sucesivas semicirculares y lineales con taludes expuestos hasta de 40 m de altura. Fotografía desde helicóptero de la FAC.

- Capas medias a gruesas de depósitos de arena media a gruesa de color habano, bien seleccionadas, semicompactas y ligeramente alteradas, que están inclinadas suavemente al W, individualmente tienen espesores entre 40 cm a 1 m (figura 7). Estas capas afloran al final (talud vertical en descenso, de unos 8 m de altura) de la zona relativamente plana (zona hacia el sur de la escuela de Chontaduro) donde llegan inicialmente los recientes depósitos de flujos lodosos provenientes de las partes altas del MM, para saltar a una segunda superficie también ligeramente plana y más baja, donde continúan casi en una pendiente uniforme, hasta la desembocadura al río Esmita. Estas capas, se encuentran también a ambos lados de la carretera Panamericana, en la entrada hacia el sitio de la tarabita que actualmente es usada para cruzar al lado W de la quebrada (figura 8), donde tienen un espesor acumulado de unos 3 m a 4 m y están a un nivel un poco más elevado que las antes descritas, por lo que el espesor total visible en el sector, podría ser cercano a 12 m. Estas capas corresponden a depósitos de lahares hiperconcentrados, seguramente generados a partir de removilizaciones hacia partes lejanas, de la matriz de antiguos depósitos de flujos piroclásticos.



Figura 6. Sector del movimiento en masa, sobre el tramo destruido de la carretera Panamericana. En la figura se muestra un bosquejo de la litología del lugar, enmarcada dentro de la Formación Galeón. Toma desde el sitio de la tarabita, extremo E. Se observa el primer cambio a pendiente suave del depósito de flujo al llegar desde la parte alta.

- Capa muy gruesa de un depósito fragmentario con mala selección, conformado por un 50% de fragmentos volcánicos, angulares, con tamaños menores de 50 cm embebidos en una matriz de color habano con tonalidades verdosas. Exhibe un espesor de unos 15 a 20 m; posiblemente corresponda a un depósito de flujo piroclástico. (Inspección a distancia).
- Secuencia de capas de cenizas volcánicas alteradas, posiblemente de caída, de coloraciones anaranjado a rojizas, con espesor total de unos 8 a 10 m, cuyos contactos inferior y superior se aprecian discordantes. (Inspección a distancia).



Figura 7. Sector del movimiento en masa, cercano al tramo destruido de la carreta Panamericana
a) Se aprecia la llegada de uno de los pulsos de flujo de material lodoso (del 19 de enero) a la planicie localizada inmediatamente al W y S de la escuela de la vereda Chontaduro, en donde se reparte en tres brazos (W, centro y E de dicha zona de baja pendiente); b) y c) Obsérvense las capas de depósitos arenosos, semi-compactos, que afloran en este sector, en el cambio de pendiente de esa planicie, los cuales corresponden también a los mismos que se encuentran a la entrada del camino a la tarabita. Foto tomada desde la tarabita, margen E de la acumulación de depósitos de flujo del movimiento en masa. Se observa, además, el detalle del paso del pequeño flujo lodoso al cruzar por la base del talud arenoso al final de la planicie inicial. Las figuras a) y b) tienen la misma orientación que la a).



Figura 8. Conjunto de capas tabulares medias a gruesas de depósitos de lahares hiperconcentrados arenosos (depósitos epiclásticos), bien seleccionados, semi-compactos, asociados a la Formación Galeón Tienen una suave inclinación hacia el W. A) y b) Detalles en diferente aproximación de los depósitos; ambos con igual orientación. C) Vista general del afloramiento. Estos depósitos afloran en el costado E del movimiento en masa, a nivel de la carretera Panamericana, margen izquierda de la quebrada Chontaduro, en la entrada del camino para la tarabita, ubicado contiguo a la escuela de la vereda Chontaduro. Profesionales del SGC y del Invias, en discusiones de campo.

- Capas de ceniza retrabajada y suelo, de color ligeramente más oscuro que las anteriores (marrón rojizo) que en ocasiones se observa discordante sobre las cenizas subyacentes. Cuando se involucran en los flujos que se generan, les imprimen esa coloración. (Inspección a distancia).
- Capa del nuevo depósito de flujos lodosos provenientes del reciente MM, conformado por un 15% de fragmentos volcánicos redondeados a subredondeados con variados grados de meteorización y predominantemente no vesiculados. Su contenido de matriz es de un 85% de carácter lodoso, color marrón a rojizo e involucra una notable carga de biomasa (árboles y palmeras). Está bastante saturado de agua y expele un fuerte olor a podrido, debido a la descomposición de la materia orgánica. Tanto sobre el depósito como sobre las masas desestabilizadas se aprecian abundantes encharcamientos (figura 9), algunas de ellas de varios metros de diámetro y profundidades de varias decenas de centímetros, que cuando son alimentadas por aguas de lluvia y de los drenajes afluentes, que vienen cargados de material de arrastre, se desbordan y generan nuevos pulsos de flujos que se distribuyen en varios brazos sobre la planicie inicial y posteriormente se unen aguas abajo de la quebrada. El espesor que tiene hasta ahora este depósito en este sector, a nivel de la

carretera Panamericana, puede alcanzar entre 3 y 7 m. De otro lado, sobre la margen derecha de la quebrada Chontaduro, hacia el WSW del Restaurante La Esmeralda, se observa una terraza de unos 10 m de alta, conformada por depósitos fragmentarios embebidos en una matriz, con tamaños menores a 1 m, que quizás corresponda a depósitos fluviotorrenciales generados a partir de MM relictos en esta misma cuenca. El nivel de esta terraza está algunos metros por debajo del nivel de la carretera Panamericana, del lado W del MM. En dicho sector, se presentan también algunos hundimientos del terreno, sobre los lomeríos, a ambos lados de la vía actual.



Figura 9. Encharcamientos de agua sobre el cuerpo del movimiento en masa y sobre los depósitos de flujos generados y acumulados a partir de éste
a) Sobre la parte alta; b) en la parte media, contiguo a la escuela de Chontaduro; c) detalle de uno de estos encharcamientos en la parte media a la altura de la escuela de Chontaduro.

En la parte alta del deslizamiento, sobre el escarpe principal y los flancos, se identificaron capas gruesas de suelos rojizos asociados a antiguos depósitos de cenizas volcánicas y en la base capas de flujos piroclásticos (inspección a distancia) (figura 10 y 11)



Figura 10. Antiguos depósitos volcánicos de la Formación Galeón
Las líneas discontinuas amarillas muestran los diferentes niveles o capas; la línea roja señala las estrías del movimiento que se generaron en el escarpe principal.



Figura 11. Suelos residuales de depósitos volcánicos de la Formación Galeón
Los suelos residuales en el flanco derecho corresponden a cenizas volcánicas, presentan una coloración rojiza más intensa y su espesor es de 20 m, son plásticos en estado húmedo. Los suelos residuales de los antiguos flujos piroclásticos presentan una textura blocosa, son friables y deleznable al tacto.

De otro lado, sobre la margen derecha de la quebrada Chontaduro, hacia el WSW del restaurante La Esmeralda, se observa una terraza de unos 10 m de alta, conformada por depósitos fragmentarios embebidos en una matriz, con tamaños menores a 1 m, que quizás corresponda a depósitos fluvio-torrenciales generados a partir de MM relictos en esta misma cuenca. El nivel de esta terraza está algunos metros por debajo del nivel de la carretera Panamericana, del lado W del MM. En dicho sector, se presentan también algunos hundimientos del terreno, sobre los lomeríos, a ambos lados de la vía actual.

Por inspección realizada posterior a las visitas del SGC, el ingeniero geólogo Edgar Rodríguez facilitó a los autores de este informe fotografías y muestras de dos sitios cercanos al trazado de la vía propuesta por Invias, en dirección SW a partir del restaurante mencionado (el primero a unos 160 m y el segundo a 500 m), se evidencia que las capas arenosas (lahares hiperconcentrados) descritas en las figuras 7 (c) y 8 se encuentran también por esta zona del trazado. Allí, están cubiertas por capas de ceniza fina de caída, de color habano amarillento, semicompactas, meteorizadas y fracturadas, de unos 3 m de espesor (figura 12), compuestas por cristales angulares y de feldespatos, anfíbol, biotita y cuarzo, embebidos en una matriz de vidrio volcánico alterado a arcilla. Subyaciendo a dichas capas, sobre el trazo de la vía propuesta, se encuentran además intercalaciones de varios tipos de depósitos (figura 13): capas medias a gruesas y endurecidas de depósitos de flujos piroclásticos, de color gris oscuro y gris claro, alteradas, con cristales de feldespatos, anfíbol, biotita y cuarzo, pero también fragmentos líticos de colores gris oscuro y rojizos, así como fragmentos de pómez, estos últimos menores que 1 cm. Intercalado con éstos, se observa un depósito fluvio-torrencial, conformado por una capa gruesa (2 m) no continua, clastosoportada, endurecida, cuyos clastos son volcánicos muy redondeados.



Figura 12. Capas endurecidas y fracturadas de cenizas de caída, de 3 m de espesor

Se encuentran sobre la superficie, en el terreno del trazado de la vía alterna (margen izquierda), a unos 160 m al SW del restaurante La Esmeralda. Fuente: Fotografía Ingeniero geólogo Edgar A. Rodríguez.



Figura 13. Intercalación de unos 7 m de espesor, de capas de depósitos de cenizas de caída (superficie), lahares hiperconcentrados arenosos, flujos piroclásticos (en el medio y la base) y una capa gruesa de un depósito fluviotorrencial que se pincha a la derecha (en el medio) 500 m al SW del restaurante La Esmeralda, cerca al trazado de la nueva vía y sobre la orilla derecha de la quebrada Chontaduro. Fuente: Fotografía Ingeniero geólogo Edgar Rodríguez.

4.2. Características geomorfológicas de la microcuenca de la quebrada Chontaduro

El relieve presente en el área del municipio de Rosas ha sido modelado por procesos orogénicos, volcánicos, denudacionales y fluviales, que se manifiestan en unidades y elementos geomorfológicos correspondientes a estos mismos ambientes. En una primera interpretación, se reconoce en la microcuenca de la quebrada Chontaduro un escarpe de origen estructural que pudo haber generado movimientos en masa relictos, es decir, que ocurrieron bajo condiciones geomórficas o climáticas diferentes a las actuales, posiblemente hace miles de años (Cruden y Varnes, 1996). Bajo esta premisa, se infiere que en esta zona existe un retroceso del escarpe, evidenciado en la morfología semicircular de sus extremos, asociada con la denudación y el control estructural del trazo de las fallas Alto de las Yervas y Broncazo (SGC, 2020).

En este sector, se distinguen elementos geomorfológicos de origen estructural como facetas triangulares, lomos alineados; de origen denudacional como cicatrices de pequeños movimientos en masa antiguos en las márgenes de las quebradas; y de origen volcánico como mesetas y lomos, conformados por capas de

En las figuras 16 y 17 se presentan modelos tridimensionales para las fechas del 9 y 19 de enero de 2023 en donde se evidencia el retroceso de la corona principal del MM y donde se plantea un posible escenario de sus características geométricas que involucran una masa de más de 20 millones de metros cúbicos. Esta masa ha estado sometida a un continuo reacomodamiento debido a la carga del cauce de la quebrada Chontaduro, las intensas lluvias y a las ramificaciones tanto superficiales como subterráneas, en donde la gravedad ha permitido que la corona principal vaya avanzando retrogresivamente hacia el escarpe del Alto de Las Yervas.

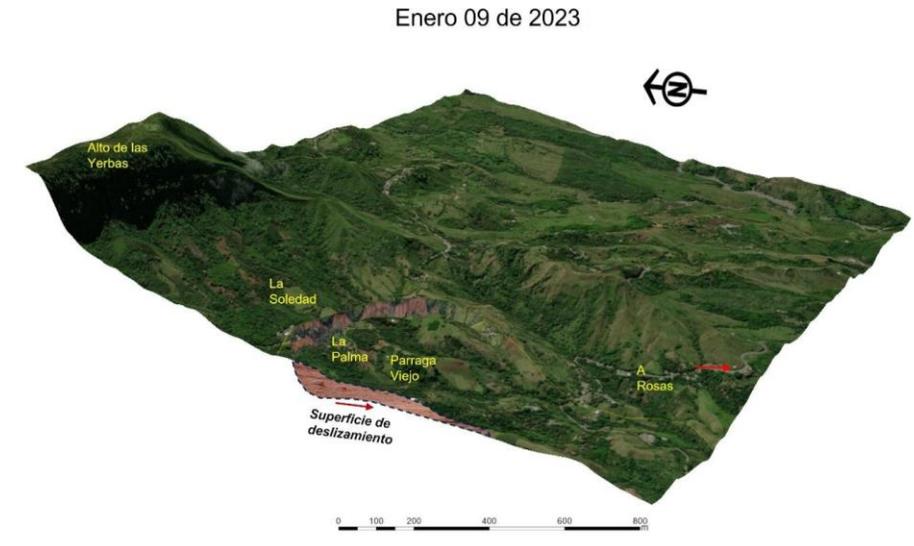


Figura 16. Perfil tridimensional mostrando la corona inicial del MM y la superficie de corte del MM para el día 09 de enero de 2023

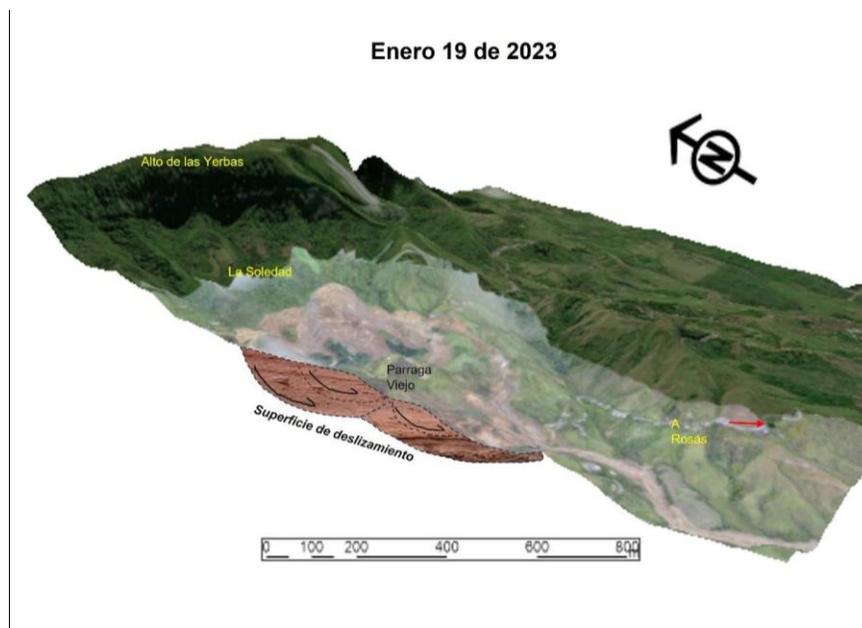


Figura 17. Perfil tridimensional mostrando la evolución de corona inicial del MM y la superficie aproximada de la superficie de corte del MM

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alternativo de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

De otra parte, considerando que el periodo invernal se estará prolongando hasta el mes de marzo y que ya se ha comenzado a ejecutar la construcción de la vía alterna (con carácter provisional ver figura 18) para poder reconectar a la mayor brevedad la vía Panamericana, es muy prudente establecer un plan de manejo y monitoreo constante con el fin de poder alertar a tiempo a todo el personal y a los grupos de trabajo que operan en la zona afectada.



Figura 18. Perfil tridimensional mostrando el sector de la vía alterna

Con base en experiencias anteriores se muestra un mapa que presenta en color amarillo la zona superior de la microcuenca de la quebrada Chontaduro (figura 19) más susceptible a ser afectada por el movimiento retrogrado del fenómeno y que involucra más de 300.000 m² anotando también la posibilidad, en un escenario lejano, de que pueda suceder otro movimiento de grandes dimensiones.

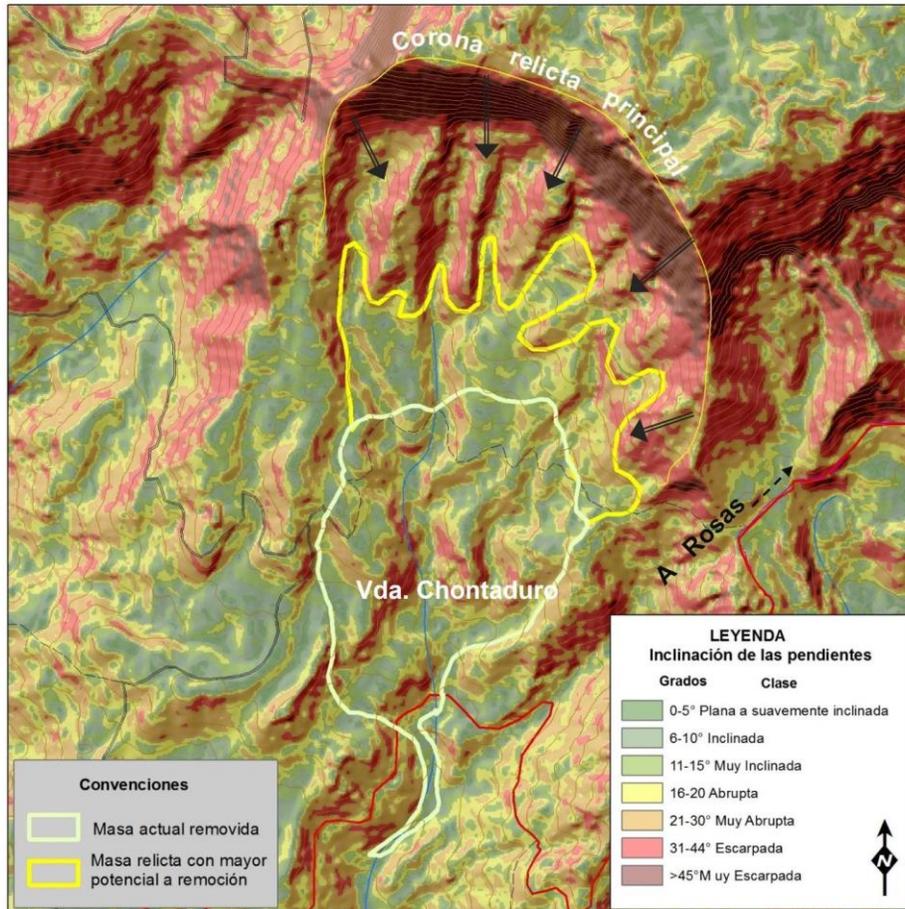


Figura 19. Mapa basado en conocimiento de eventos similares en el territorio colombiano para delimitar la porción de terreno de depósitos relictos que se ubican hacia la parte superior del MM

Geomorfológicamente la microcuenca de la quebrada Chontaduro se caracteriza por presentar en la divisoria un escarpe de origen tectónico que bordea el cerro Broncazo. Este escarpe tiene una altura aproximada de 220 m, una longitud de 1040 m y pendientes superiores a 45°. Los límites o bordes oriental y occidental de este escarpe evidencian procesos denudacionales asociados a deslizamientos traslacionales y caídas de detritos.

En la parte baja del cerro se observan lomos denudados angostos, alineados y facetados, orientados en dirección suroeste, con cimas agudas y laderas muy abruptas a escarpadas (20°-45°), que presentan alturas variables entre 20 y 70 m, fuertemente disectados por drenajes subparalelos.

El sector medio de la microcuenca desarrolla lomos denudados en forma de S, con orientación principal hacia el suroeste, con cimas anchas hasta de 33 m, laderas suavemente inclinadas a muy inclinadas (5°-15°) y alturas entre 10 y 30 m, que se encuentran fuertemente incisados.

Al oriente, la microcuenca está limitada por lomos denudados de dirección NE-SW, de cima angosta y laderas muy abruptas (>20°). Al occidente, por lomos denudados de cimas anchas a angostas de dirección NS y NE-SW. Algunos de estos lomos pueden asociarse a controles estructurales relacionados con la zona de falla del sistema Cauca-Romeral.

De acuerdo con el análisis morfométrico de cuencas realizado en el estudio de Zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de Rosas - Cauca Escala 1:25.000, elaborado por el SGC en 2020, se calculó el índice de Strahler para la microcuenca de la quebrada Chontaduro, donde se identificaron 140 corrientes de orden 1, lo cual indica una mayor susceptibilidad a la erosión. El valor de la relación de bifurcación es de 3,7, asociado con cuencas homogéneas en su litología. Por su parte, la curva hipsométrica indica un relieve fuertemente erosionado, donde el equilibrio entre procesos erosivos y agradacionales, lo cual infiere que el cauce está alcanzando su nivel base.

Adicionalmente, el factor de asimetría normalizado, el cual permite evaluar la existencia de inclinación o basculamiento tectónico en una cuenca hidrográfica, demostró que la microcuenca de Chontaduro se encuentra basculada al suroeste, con un valor de 43,7. La relación entre el ancho y el alto del valle indicó que existe alta actividad tectónica con valles ensanchados por erosión lateral y denudación asociada a movimientos en masa.

Según el reporte de inventario de proceso morfodinámicos del estudio del SGC (2020), la mayoría de movimientos en masa identificados corresponden a deslizamientos traslacionales localizados sobre el talud de la vía Rosas-La Sierra. El 46 % de los procesos relacionados con períodos de lluvias intensas.

4.3. Análisis de precipitación

La información correspondiente a la precipitación en el área de estudio corresponde a la estación Párraga [Código 52010050] administrada por el Ideam. La serie de tiempo estudiada integra 29 años de información desde 1995 a 2023. La región está representada por dos temporadas de lluvias: la primera de enero a mayo, que se caracteriza por tener menores precipitaciones que la segunda, que se registra entre los meses de octubre a diciembre, como se observa en la figura 20.

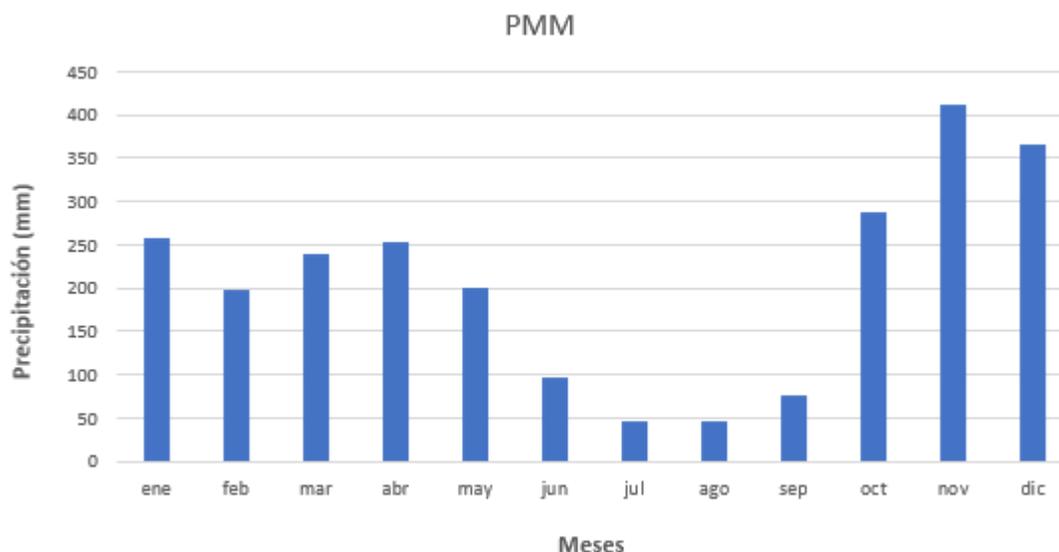


Figura 20. Precipitación media mensual (PMM) para la estación Párraga, expresada en milímetros/mes
Fuente de datos: Ideam.

La serie de tiempo diaria de la estación Párraga muestra valores máximos que oscilan entre 95 mm y 115 mm, cuyos valores se utilizaron para definir los periodos de retorno de la serie de tiempo de precipitación (figura 21).

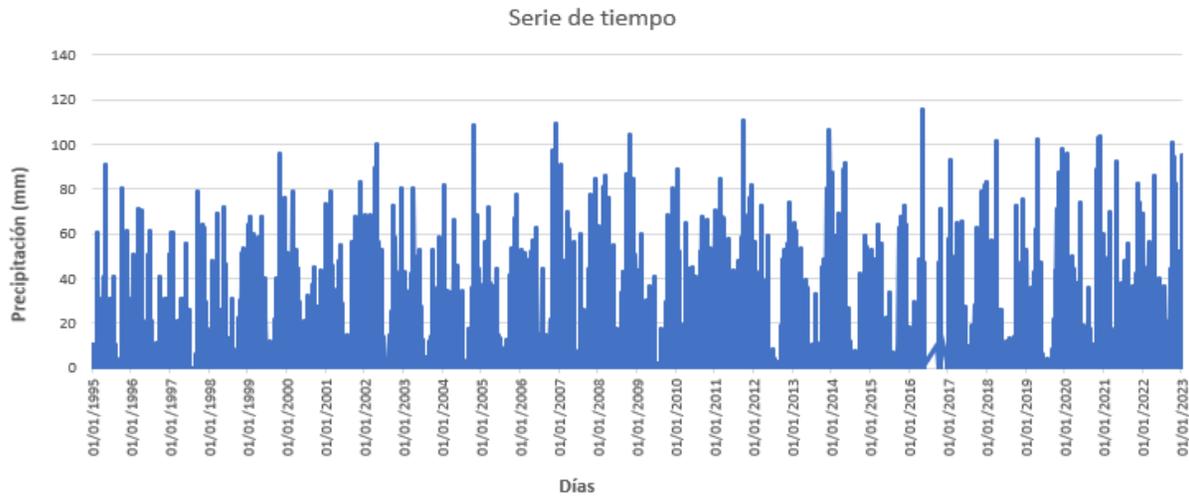


Figura 21. Serie de tiempo de precipitación para la estación Párraga (1995-2023), expresada en mm/día (Fuente de datos: IDEAM).

En la figura 22 se puede observar los 4 años con valores más altos de precipitación registrados en la estación Párraga, oscilando alrededor de los 3.600 mm en los años 1999, 2008, 2011 y 2022.

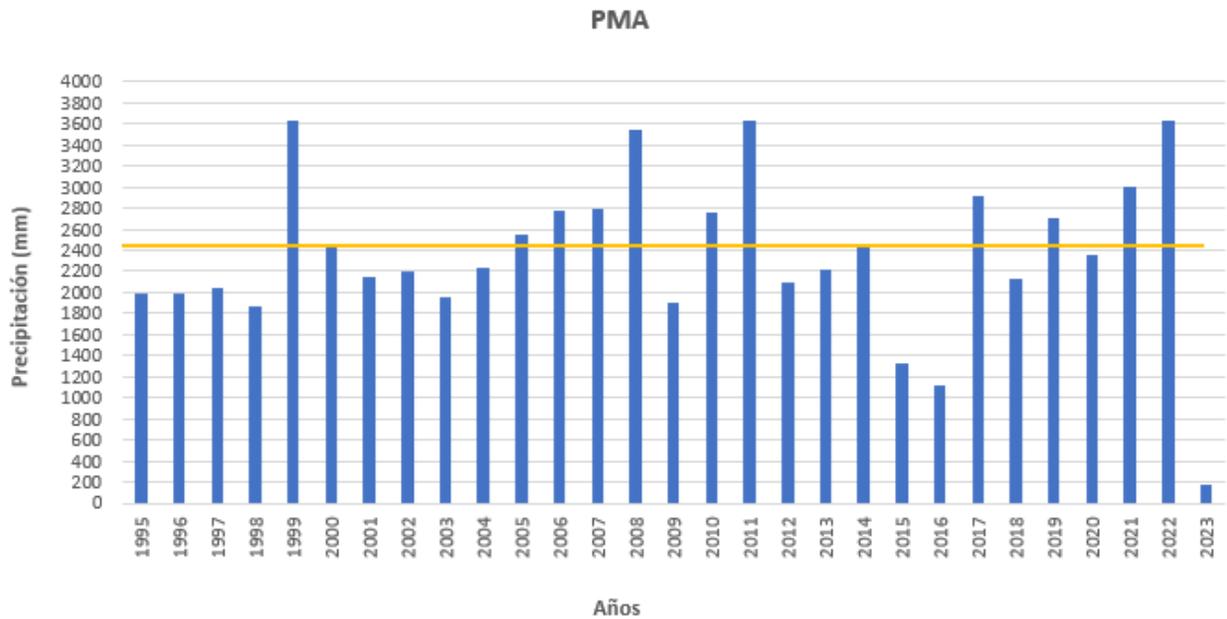


Figura 22. Precipitación media multianual (PMA) para la estación Párraga, expresada en mm/año (Fuente de datos: Ideam).

4.3.1. Lluvia acumulada

Los escenarios de lluvia acumulada se calcularon para 30 y 15 días antes del evento, lo cual se muestra en las figuras 23 y 24. El valor de precipitación acumulada para 30 días es de 416 mm; mientras que para 15 días es de 282 mm.



Figura 23. Histograma que representan la lluvia acumulada para 30 días antes del evento



Figura 24. Histograma que representa la lluvia acumulada para 15 días antes del evento

4.3.2. Lluvias máximas

La tabla 1 presenta los valores máximos de precipitación registrados en la estación Párraga, donde se resalta que los cuatro años más lluviosos fueron 2004, 2006, 2011 y 2016.

Tabla 1. Registros máximos de precipitación (mm) en 24 horas de cada año

Año	Precipitación (mm)	Año	Precipitación (mm)
1995	90.6	2010	88.5
1996	70.8	2011	110.3
1997	78.9	2012	73.6
1998	71.5	2013	106.1
1999	95.8	2014	91.7
2000	78.9	2015	72.6
2001	83.2	2016	115.6
2002	100.3	2017	92.8
2003	80	2018	101.7
2004	108.5	2019	102.1
2005	77.8	2020	103.7
2006	109.5	2021	92.1
2007	90.7	2022	100.6
2008	104.1	2023	94.8
2009	80.4		

4.3.3. Resultados cálculo de periodos de retorno para lluvias máximas

De acuerdo con los registros de precipitación máxima 24 horas multianual de la estación Párraga, se procedió a realizar el ajuste de las series de precipitaciones máximas a una función probabilística, y cuya elección de la distribución con el mejor ajuste se sustenta en los resultados de la prueba de ajuste de Kolmogorov-Smirnov que es el más sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución, por ello, no sobrevalora los resultados de su aplicación. Para esta estimación se utilizó el software de uso libre Hydrognomon (<https://www.itia.ntua.gr/en/softinfo/28/>).

En la figura 25 se observa la gráfica de ajuste y los resultados de la prueba y, por tanto, se escoge para este estudio la función “GEV MAX”, como expresión de probabilidad de valores extremos a implementar, que en este caso representa adecuadamente series de valores máximos registrados.

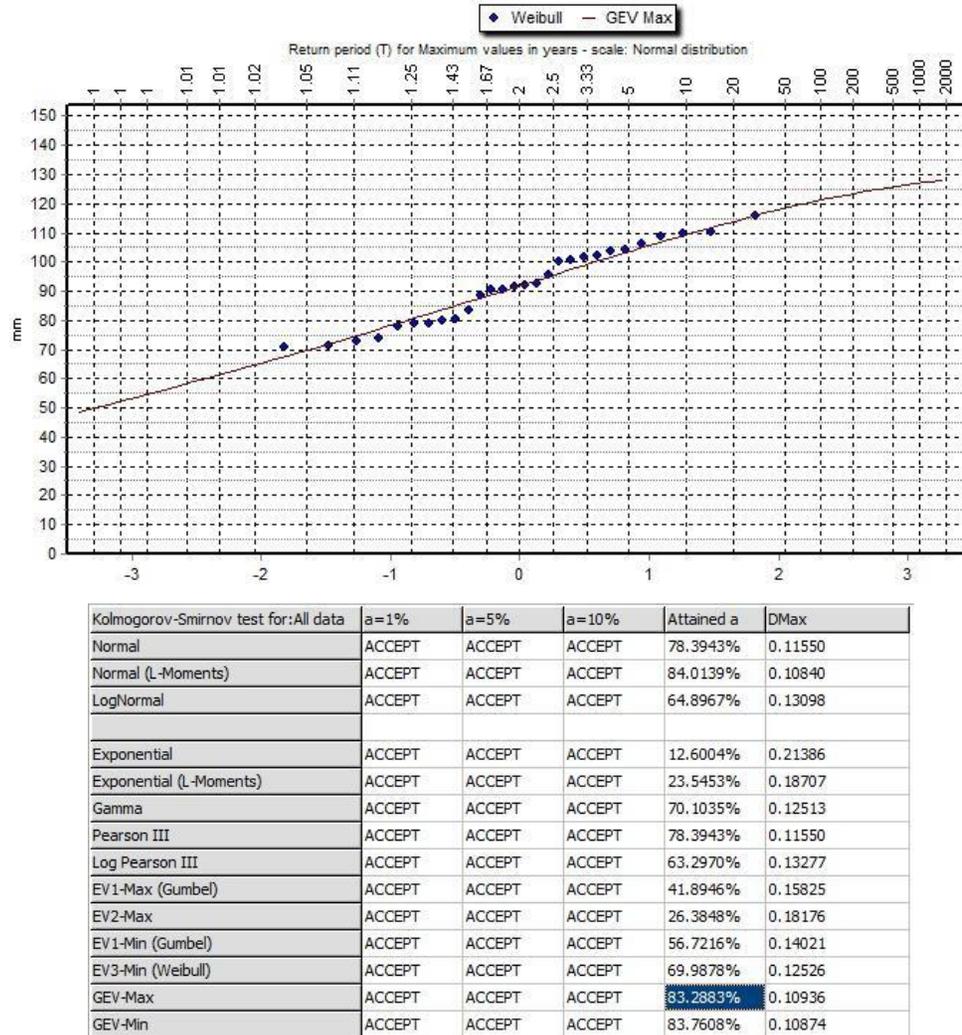


Figura 25. Ajuste de serie de precipitaciones máximas en 24 horas

De acuerdo con la función de probabilidad, se pudo establecer que la lluvia asociada a un período de retorno (TR) de 100 años es de 121 mm; de igual forma, la lluvia de 115 mm que es valor máximo de precipitación registrado en la serie de datos diarios está relacionada con un TR de 24 años; por otra parte, el valor de lluvia diaria de 94,8 mm registrado el pasado 9 de enero, día del evento, se asocia a un TR de 2,4 años.

4.4. Registros sísmicos

Se realizó una búsqueda, en la base de datos de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), de la sismicidad registrada en la zona de Rosas - Cauca, con un período comprendido desde el 2010 hasta el 12 de enero de 2023 y un radio de 50 km (figura 26).

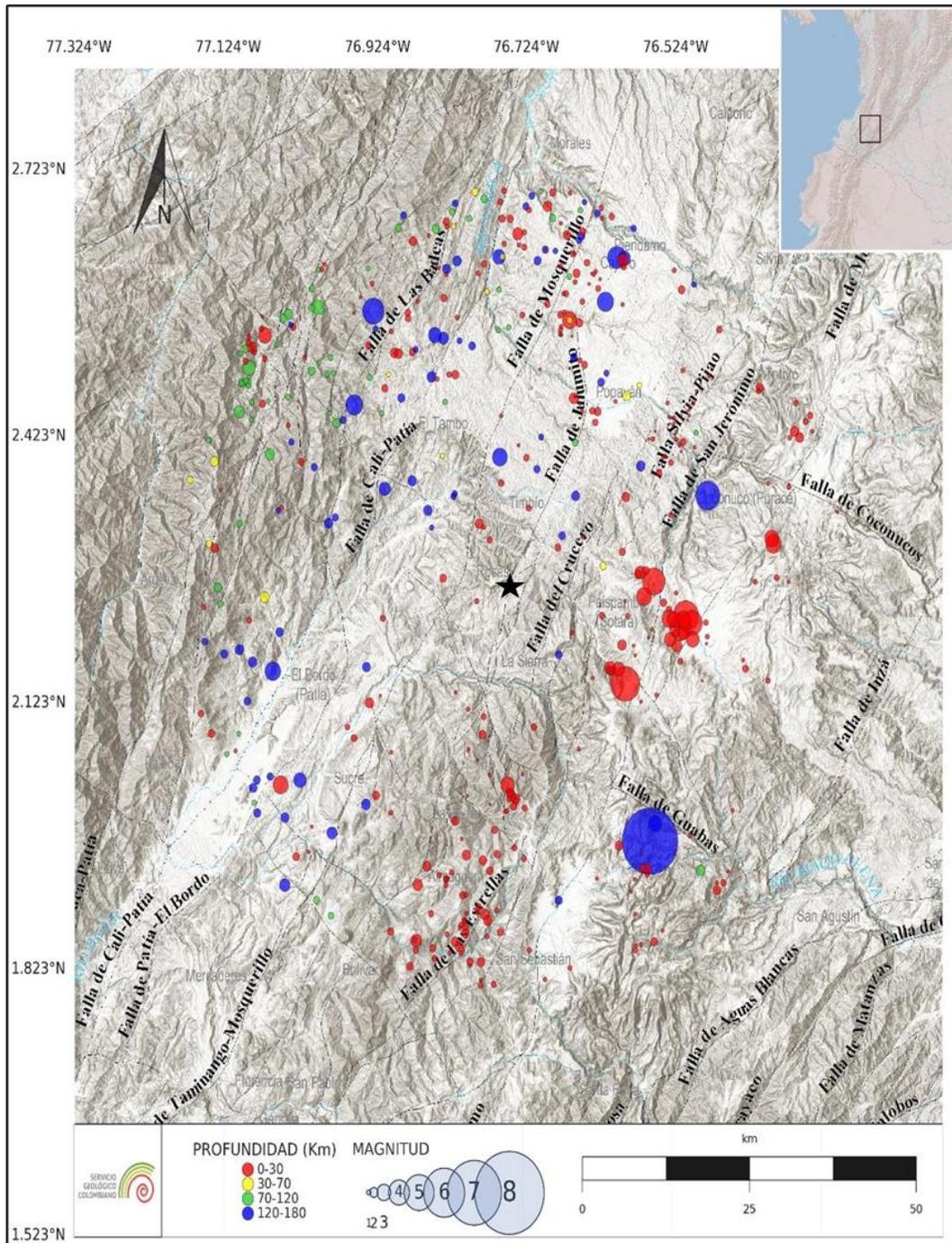


Figura 26. Información sísmica de la RSNC para una zona de 50 km de radio alrededor del centroide. La estrella negra representa el sitio donde ocurrió el movimiento en masa. Esta información corresponde a los registros sísmicos entre el 2010 y el 12 de enero de 2023.

Los registros sísmicos mencionados se evaluaron con el fin de establecer la posible ocurrencia de un sismo que estuviera relacionado con el movimiento en masa que se generó en la vereda La Soledad el día 9 de enero, sin embargo, de acuerdo con la información disponible no se consideró esa posibilidad.

5. Caracterización del movimiento en masa

El movimiento en masa que se presentó en la microcuenca de la quebrada Chontaduro corresponde a un deslizamiento rotacional activo de estilo complejo, con distribución retrogresiva y ensanchada. Este deslizamiento que afectó las veredas La Soledad, Santa Clara, Párraga Viejo y Chontaduro inició a 900 m de la cima del cerro Broncazo y a 700 m de su base (figura 27). Los habitantes del sector manifestaron que las primeras evidencias de inestabilidad se observaron el 4 de enero como pequeñas fisuras en la zona de la corona con longitudes entre 20 cm y 30 cm, en inmediaciones del colegio Alfonso Córdoba.

Estas fisuras fueron monitoreadas por la comunidad y evolucionaron a grietas con desplazamientos hasta de 50 cm, por lo que, decidieron iniciar las evacuaciones de las cuatro veredas mencionadas anteriormente. Este proceso de evacuación finalizó el 8 de enero. Las personas que acompañaron la comisión de geólogos en el sector de Párraga Viejo manifestaron que, el 9 de enero a las 3 o 4 pm se profundizó el agua de la quebrada donde estaba ubicada la bocatoma del acueducto veredal. A las 4 am del 10 de enero, según los testigos, se marcaron perfectamente la corona y los flancos y se desplazó toda la masa, empezando por el borde de la quebrada Chontaduro (flanco izquierdo).



Figura 27. Cerro Broncazo

La línea discontinua roja señala la localización aproximada de la corona del movimiento de Chontaduro y en azul el curso de los drenajes antes de la ruptura. La dirección del movimiento se indica con una flecha roja. Fuente: Fotografía cortesía de Christian Viveros, habitante de Párraga Viejo, tomada el 5 de enero.

Tabla 2. Personas afectadas por vereda

Vereda	Afectados	
	# Personas	# Hogares
Soledad	197	73
Chontaduro	182	64
Santa Clara	133	29
Párraga Viejo	87	49
Lomagrande	2	2
No establecido	6	2
Total	607	219

Fuente: UNGRD

De acuerdo con los testimonios y el análisis multitemporal realizado con el control de campo y las fotografías y ortofotos obtenidas durante los días 10 a 18 de enero, se determinó que la dirección principal del movimiento es SSW (210° azimuth), en el centro de la corona. Las direcciones de movimiento en el flanco derecho están entre 95°-115° (ESE) y en el flanco izquierdo entre 250°-320° (SW-NW) (figura 28).

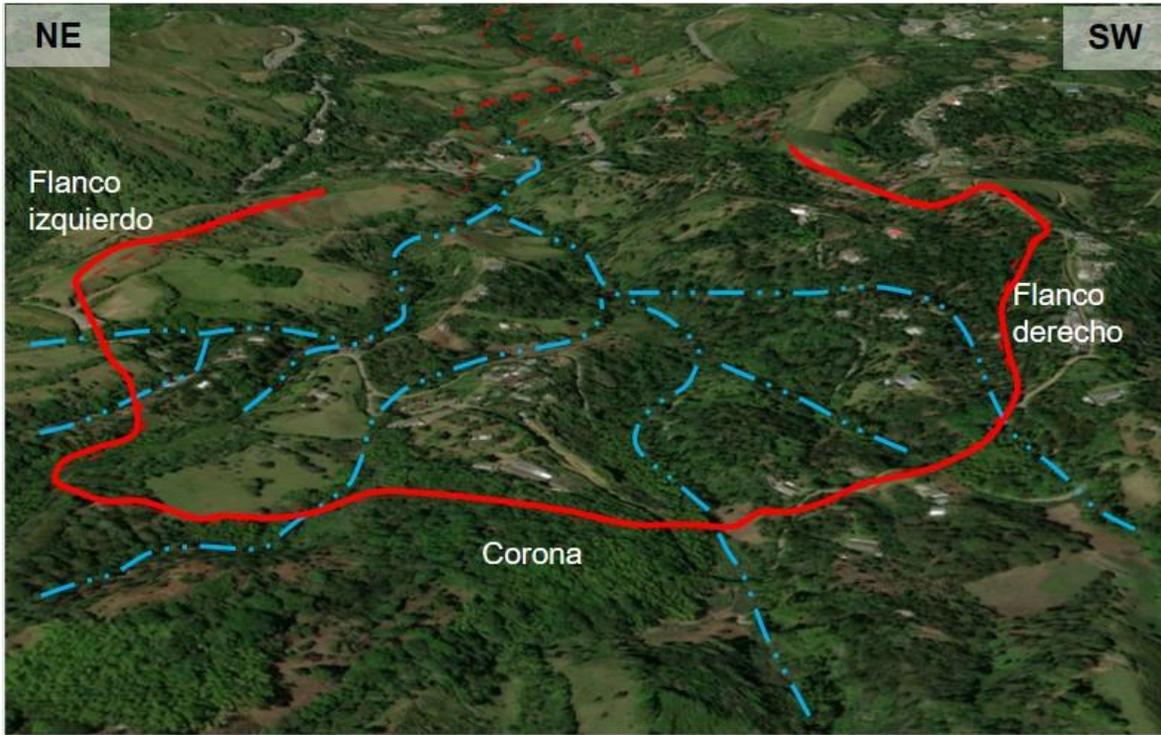


Figura 28. Vista 3D desde la zona de inicio del movimiento en masa

Se identifica la corona y los flancos representados en la topografía previa al deslizamiento, vista generada en arcscene, azimuth 187° (SSW).

El deslizamiento se caracteriza por presentar movimientos diferenciales y distintos mecanismos de falla en cada una de sus partes. En la corona, zona de inicio del movimiento, los desplazamientos están asociados a un mecanismo de falla rotacional; en los flancos (costados laterales del deslizamiento) predominan las fallas de tipo traslacional; en el cuerpo (masa desplazada) se observa intensa deformación, hundimientos y agrietamientos transversales y paralelos a la corona principal; en la pata del movimiento, es decir, la zona inferior del material desplazado y más alejado de la corona, se observan deslizamientos traslacionales, caídas de bloques de suelo y flujos de tierra, detritos y lodo, que se encauzaron por las zonas de menor pendiente). Todas estas combinaciones de movimientos evidencian que el deslizamiento es de estilo complejo y su actividad y comportamiento ha ido cambiando y evolucionando, de acuerdo con la disponibilidad de agua en la parte alta de la cuenca (figura 29).

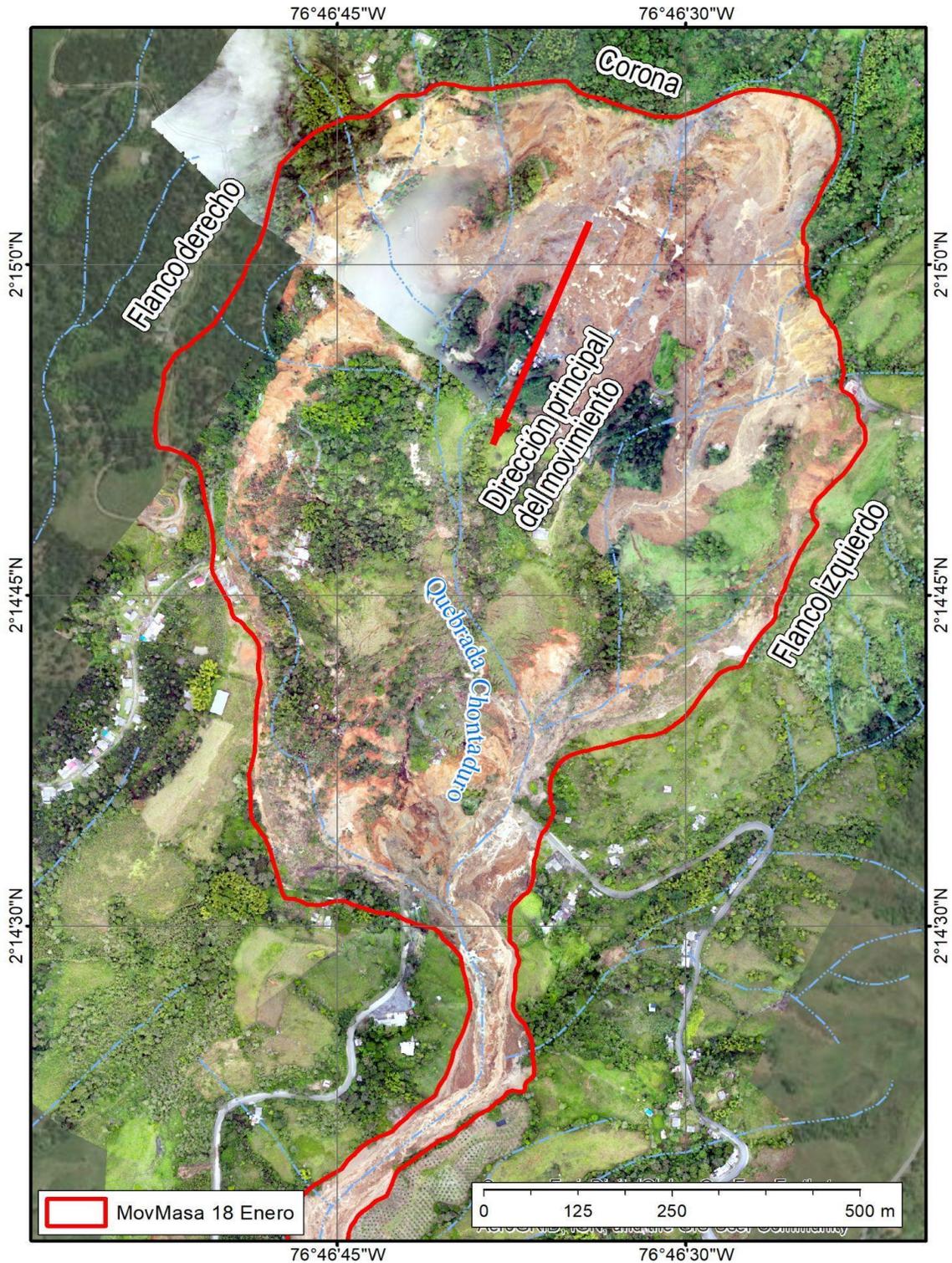


Figura 29. Vista en planta del deslizamiento de Chontaduro Generado a partir de las ortofotos del 11 y 18 de enero de 2023.

5.1. Actividad en la corona

El movimiento en masa inició como un deslizamiento de tipo rotacional (la superficie de ruptura es de forma curva semicircular y cóncava hacia arriba, figura 30), exponiendo un escarpe vertical hasta de 20 m de altura, conformado por intercalaciones de capas de suelos residuales de ceniza y de flujos piroclásticos de la Formación Galeón. Parte del cuerpo adyacente a la corona del movimiento se inclinó hacia atrás debido a la concavidad de la superficie de falla, es decir, que el terreno se hundió, luego se generaron encharcamientos (figura 31).



Figura 30. Fotografías de vuelo de dron del 10 de enero de 2023

a) Forma semicircular de la corona; b) encharcamientos en la zona de hundimiento; c) basculamiento o inclinación de un bloque adyacente a la corona; d) detalle de la posición de las viviendas hundidas y basculadas.



Figura 31. Detalle de los encharcamientos generados en la zona adyacente a la corona

Captura de pantalla de video de dron en la vereda La Soledad, tomada de El Tiempo, 10 de enero de 2023. (<https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/rosas-cauca-impactantes-imagenes-del-derrumbe-sobre-via-panamericana-732354>).

El basculamiento de bloques hacia la corona generó contraescarpes hasta de 10 m, superficies verticales a subverticales cuya dirección de inclinación es contraria a la del escarpe principal y a la dirección general del movimiento, lo cual puede asimilarse morfológicamente a estructuras tipo horst y graben.

Sin embargo, a medida que la zona de hundimiento o basculamiento se saturó, debido al aporte del agua lluvia (posterior al evento) y al agua libre de las quebradas que caían sobre el escarpe principal, se degradó la capa vegetal que permanecía en este sector y luego fluyó a través de los flancos. A los dos o tres días de presentarse el flujo principal, el agua abrió camino en la parte central de la masa desplazada, intentando recuperar el cauce original (figura 32). Estos flujos han sido ampliamente observados desde el 10 de enero hasta la fecha de elaboración de este informe (23 de enero de 2023), sobre el tramo de la vía Panamericana afectada por este movimiento.

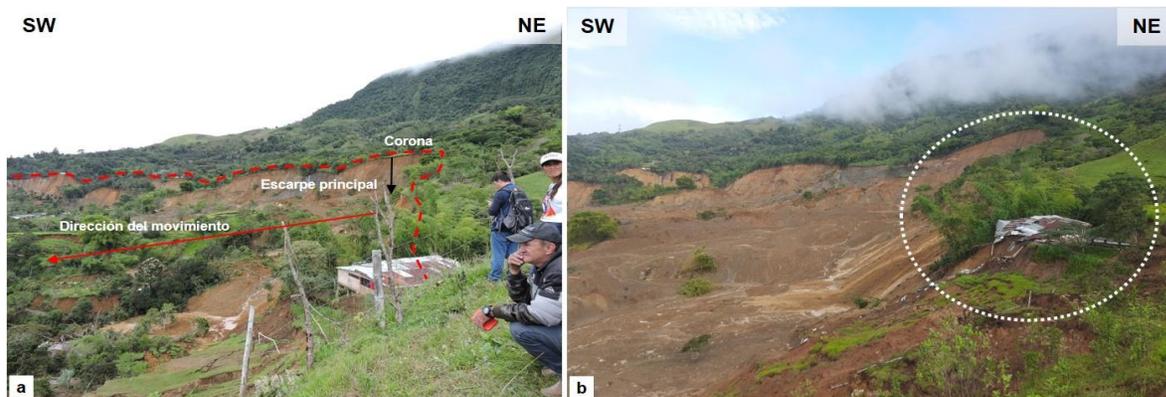


Figura 32. Evolución de la corona del deslizamiento de Chontaduro

a) Escarpe de 30 m de altura por retroceso de la corona del deslizamiento, fotografía del 12 de enero; b) se observa el retroceso de la corona y la degradación de la masa desplazada, la cual fluye, fotografía del 20 de enero.

Durante los días 10 a 18 de enero, se observó un retroceso de la corona de 114 m y un aumento del escarpe principal hasta de 40 m, debido a la reducción de la resistencia de los suelos que lo conforman, ya que se encuentran altamente saturados. Este proceso genera grietas de tensión paralelas al trazo de la corona principal.

5.2. Actividad en los flancos

Los flancos derecho e izquierdo del deslizamiento se caracterizan por sus escarpes hasta de 20 m de altura conformados por suelos residuales rojizos de antiguos depósitos de ceniza de alta plasticidad. Los flancos presentan mecanismo de falla de tipo traslacional (superficie de ruptura plana), donde también se observan grietas de tensión y escarpes de menores alturas al escarpe principal, paralelos a la dirección del flanco (NS), que indican un proceso de ensanchamiento (figura 33). Esto se observa principalmente cuando la corona retrocede en los extremos derecho e izquierdo, respectivamente (figura 34).

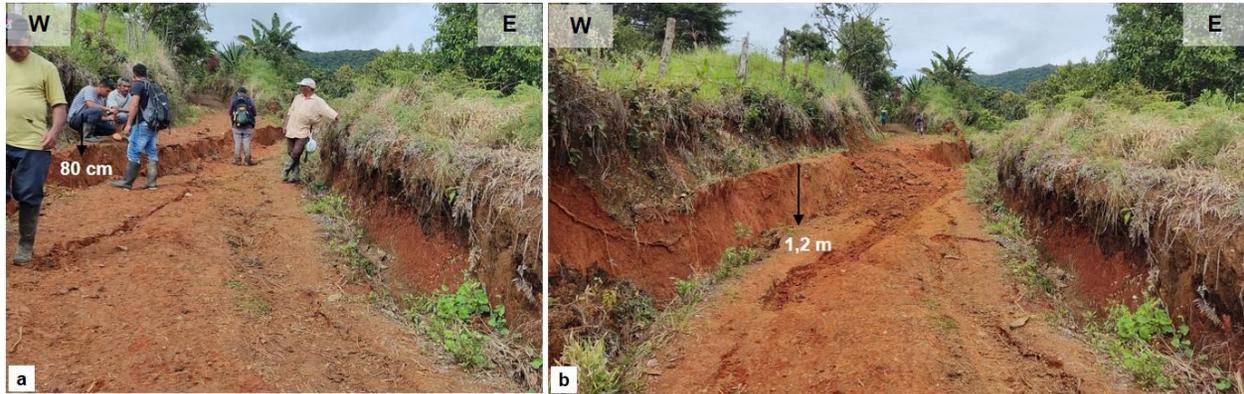


Figura 33. Grietas de tensión y escarpes observados en el flanco derecho, sector Santa Clara

a) La grieta evolucionó a un escarpe de 80 cm de profundidad y una apertura de 15 cm, 12 de enero; b) El 13 de enero, el escarpe tenía 1,20 m de profundidad y su apertura en la parte central era de 30 cm. Las personas del sector rellenaron el hueco, para facilitar el tránsito por el único camino veredal que queda disponible en este sector.



Figura 34. Grietas de tensión y escarpes observados en el flanco izquierdo, sector La Gallera, vereda La Soledad

a) Grieta de tensión paralela a la corona, a 23 m de la corona principal, 18 de enero; b) Grieta de tensión paralela al flanco izquierdo, de 15 m de longitud; c) detalle de apertura de la grieta, 1 cm.

Como la masa principal o cuerpo del movimiento se recostó en el flanco derecho, en esta zona se generó una masa viscosa saturada en la base, que aumentaba en altura y se movía lentamente (figura 35), hasta que el miércoles 18 de enero, empezó a moverse con mayor velocidad cuando el agua represada encontró salida en el sector de Chontaduro por la margen derecha de la quebrada.



Figura 35. Flanco derecho en el sector de la escuela de Párraga Viejo
a) Masa saturada acumulada sobre el flanco derecho; b) La masa forma un lóbulo de 3 m de altura, de aspecto viscoso, que se encuentra confinada por un cerro o lomo estructural.

5.3. Actividad en el pie del movimiento

En el pie o pata del movimiento en masa de Chontaduro, se han presentado flujos de tierra y flujos de lodo, cuya composición granulométrica varía de acuerdo con la zona de aporte del cuerpo del movimiento y de la masa y el agua disponible. Este tipo de movimientos obedece a la desintegración de los suelos que conforman el cuerpo del movimiento que intentan retomar el cauce de la quebrada Chontaduro y afectaron la vía Panamericana (figura 36). A continuación, se describen las fases de flujo observadas.

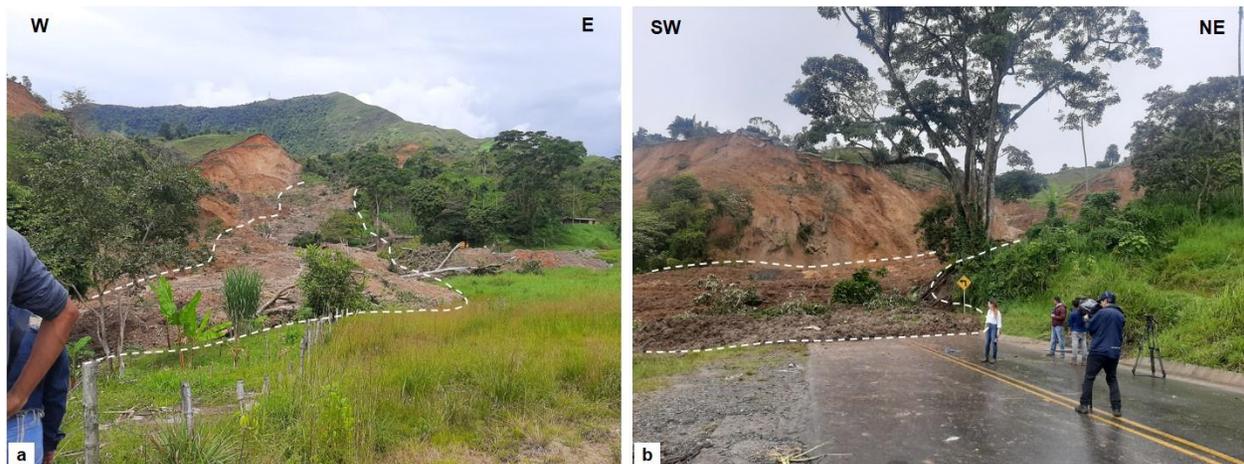


Figura 36. Flujos en la pata o pie del movimiento en masa de Chontaduro
a) Flujo del 11 de enero; b) Flujo del 12 de enero.

5.3.1. Fases del flujo

La evolución del movimiento en masa ha dado lugar a flujos que han afectado la vía Panamericana, al discurrir desde el cruce de la quebrada Chontaduro en la coordenada 4.579.793 E, 1.806.308 N (Origen Único Nacional), Longitud: -76.77799272; Latitud: 2.2420543 (coordenadas geográficas en el sistema MAGNA) en dirección del cauce de la quebrada, la cual desemboca en el río Esmita.

Previo a la ocurrencia del deslizamiento, la pendiente promedio de los drenajes que confluyen unos 100 m antes de la vía son de unos 11° (20%) calculados en la cuenca media. Entre el cruce de la quebrada con la vía Panamericana y el río Esmita la longitud aproximada es de 3 600 m, siendo la pendiente de los primeros 700 m de 6° (10%); y de 4° (7%) en la longitud restante hasta la desembocadura con el río Esmita (figura 37).

Los valores presentados de pendiente y la ausencia de evidencias geomorfológicas de unidades indicativas de torrencialidad reciente, dan cuenta de flujos sin la energía suficiente para socavar el fondo del drenaje.

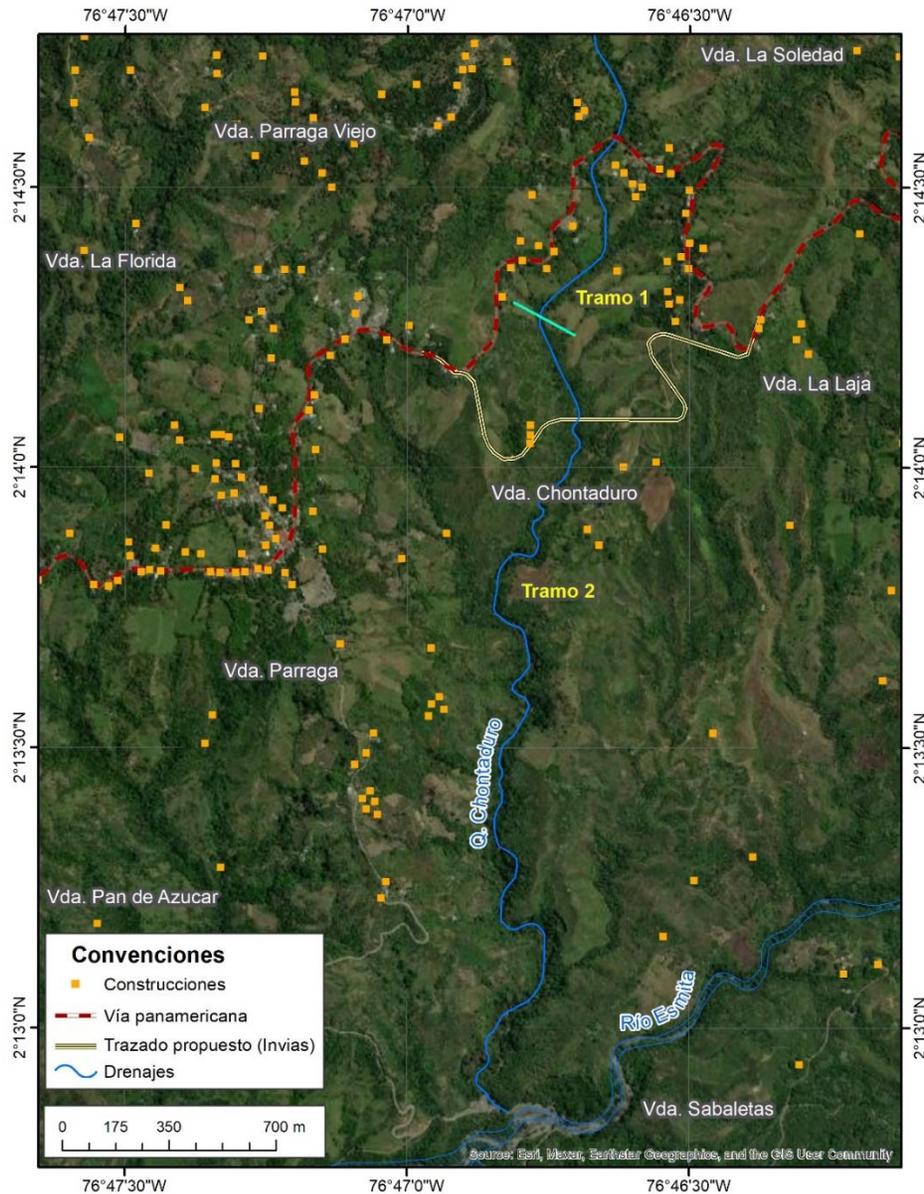


Figura 37. Drenaje principal quebrada Chontaduro, desde la vía Panamericana hasta el río Esmita
Fuente imagen base del año 2021: Google Earth.

Como se mencionó, el deslizamiento se detonó el día 9 de enero de 2023 y a su paso destruyó la vía Panamericana en una longitud aproximada de 300 m; así mismo, el depósito viene avanzando hacia la escuela de la vereda Chontaduro (figura 38). El cauce de la quebrada Chontaduro hacia aguas abajo se amplió hasta en 90 m, incluyendo las zonas de peralte que dejó el flujo inicial (del 9 de enero de 2023).

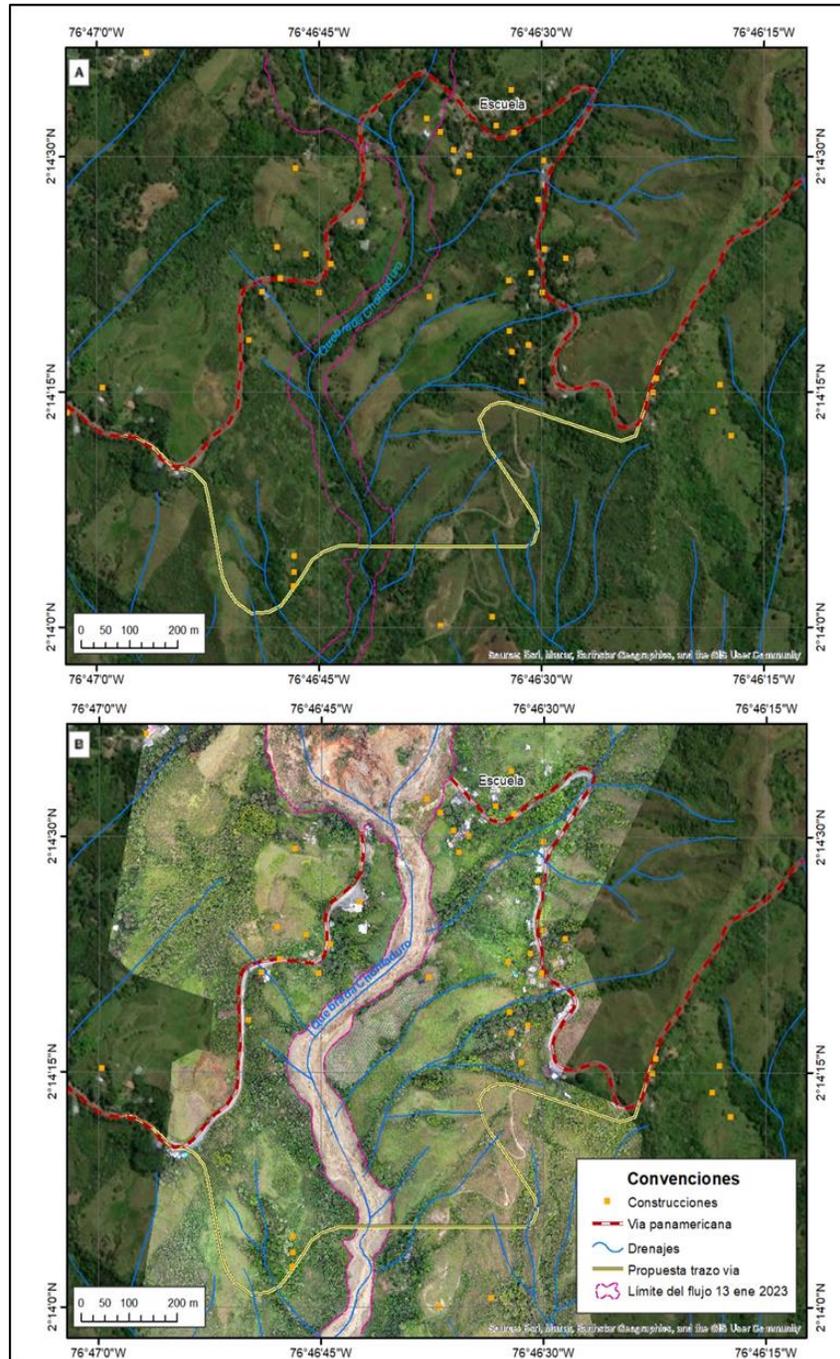


Figura 38. Imágenes del sector de la vía Panamericana en la vereda Chontaduro sobre el cauce de la quebrada Chontaduro

Superior: Pre-evento (fuente imagen base del año 2021: Google Earth). Inferior: Post-Evento (ortofoto 13-ene-2023, elaborada por el SGC).

En los registros fotográficos y de videos circulados por redes sociales, el día 9 de enero, se observa que los flujos han avanzado sobre la quebrada Chontaduro, como el presentado en el noticiero del canal CityTV (<https://www.youtube.com/watch?v=4cld4spbTQk>), que corresponde a un flujo en el cual se visualiza un árbol incorporado por el flujo (figura 39). Según mediciones aproximadas, se infiere una velocidad cercana a los 7 km/h y un espesor cercano a los 2 m, con un material que corresponde a una capa superficial con alto contenido de finos. La velocidad estimada de 7 km/h (aproximadamente 2 m/s) es clasificada por Cruden y Varnes (1996) como muy rápida a extremadamente rápida.



Figura 39. Flujo en el sector vereda Chontaduro en el cruce con la vía Panamericana, costado oeste de la quebrada. Fuente: Fotograma del video que circuló en redes sociales y fue presentado en City TV, <https://www.youtube.com/watch?v=4cld4spbTQk>.

Adicionalmente, para el mismo día 9 de enero, se cuenta con una fotografía tomada hacia la 1:20 p.m. por Lucio Cruz, el profesor de la Universidad del Cauca (figura 40), se observa el depósito dejado sobre el cauce de la quebrada Chontaduro, aguas abajo de la escuela de Chontaduro.



Figura 40. Registro del flujo del día 9 de enero de 2023 en el sector de la vereda Chontaduro
Fuente: Lucio Cruz, Universidad del Cauca.

El día 10 de enero, el profesor Cruz tomó algunas fotografías con dron, observándose que el depósito de material en la zona de la escuela se mantuvo respecto del día anterior (figura 41), sin embargo, se observan cambios en la ladera hacia la margen derecha de la quebrada, en la cual el día 9 de enero aún se observa material vegetal que se reduce significativamente para el día 11 de enero.



Figura 41. Registro del flujo del día 10 de enero de 2023 en el sector de la vereda Chontaduro
Fuente: Lucio Cruz – Universidad del Cauca.

El día 11 de enero, durante la visita técnica realizada por los profesionales del SGC, pese a que durante la jornada de trabajo no se registraron lluvias, el material fluía de manera intermitente, con velocidades aproximadas a las descritas para el día 9 de enero de unos 7 km/h. El espesor depositado en el sector de la vía era de aproximadamente 2 m respecto al nivel de la vía (figura 42).



Figura 42. Registro del flujo del día 11 de enero de 2023 en el sector de la vereda Chontaduro

La masa movilizada que fluye por el drenaje a la altura de la vía ha ido incrementando su volumen y ha avanzado hacia la escuela de Chontaduro. El día 11 de enero de 2023, hacia las 6:30 p.m., hubo un movimiento importante de la masa deslizada localizada en el cuerpo del deslizamiento, por incremento en el volumen de agua, debido a la precipitación previa.

El 13 de enero se elaboró una ortofoto en la zona baja de la cuenca de la quebrada Chontaduro, desde la escuela Chontaduro hacia aguas abajo. La ortofoto se complementó con material levantado por la Policía Nacional y la UNGRD; sin embargo, en la zona de interés para el análisis de los flujos, la información fue levantada por el SGC. Con esta información se realizó una comparación con medidas aproximadas del avance del flujo entre el 11 de enero (antes de las 6:00 p.m.) y el 13 de enero (a las 12:00 p.m.), en la cual se observa que sobre la vía avanzó unos 16 m, pero hacia el área posterior de la escuela (figura 43).



Figura 43. Avance del depósito en la zona de la vía Panamericana entre los días 9 y 13 de enero de 2023 en el sector de la escuela de la vereda Chontaduro
a).Imagen del 9 de enero; b) imagen del 13 de enero. Fuente: Lucio Cruz y SGC.

El material que se deposita en el sector de la vía Panamericana debido a un cambio en la pendiente, está conformado por una matriz de material fino que la biomasa y que en total es de aproximadamente un 85%. El 15% restante corresponde a material con diámetros promedio de hasta unos 10 cm, de redondeados a sub-angulares y en diferentes estados de meteorización. Hacia aguas abajo, donde las pendientes son aproximadamente de un 10%, el material es predominantemente fino; sin embargo, el frente del material grueso seguirá avanzado a menor velocidad, con movimientos intermitentes y que dependen principalmente de la cantidad de agua que reciba, con lo cual, el peso de la masa aumenta y, por efecto de la fuerza de la gravedad, sucede el movimiento (figura 44).

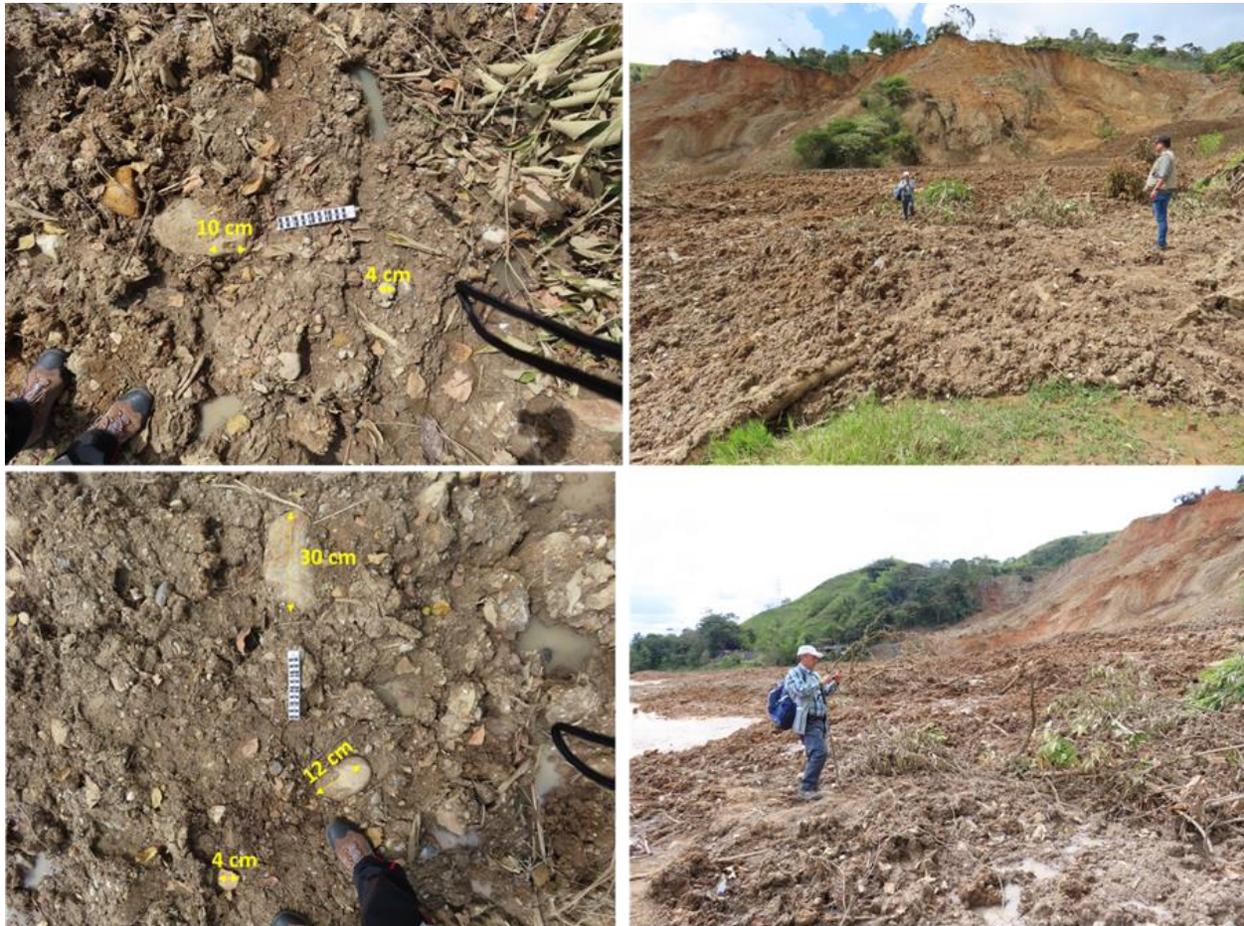


Figura 44. Tamaños de las partículas gruesas contenidas en una matriz fina en el depósito que se viene conformando en el sector de la vía Panamericana cerca a la escuela de Chontaduro.

Sobre el material depositado discurren flujos con menores concentraciones de sedimentos, principalmente lodos, que se encauzan sobre el drenaje de la quebrada aguas abajo de la vía Panamericana, con pendientes del cauce que oscilan entre un 7% y 10% hasta su desembocadura en el río Esmita.

La importancia de describir las características del movimiento en masa radica en entender su dinámica, para aproximarse al modelo numérico que mejor lo represente, establecer sus alcances y limitaciones e interpretar los resultados del mismo.

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

De acuerdo con la revisión realizada por Aristizábal *et al.* (2020), los flujos que se generan en la cuenca de la quebrada Chontaduro no obedecen estrictamente a la definición de inundaciones súbitas, las cuales tienen en común un inicio rápido en cuencas de tamaños pequeños, con pendientes relativamente pronunciadas, aunque no se hace referencia a la concentración de sedimentos.

Se esperaría que el avance del material grueso se dé sobre el cauce de la quebrada Chontaduro, lo cual incrementa el nivel base del cauce actual, pero tratando de mantener un equilibrio para alcanzar el nivel del cauce en la desembocadura del río Esmita.

Por tanto, por las características morfológicas descritas y la composición textural de los flujos en las condiciones actuales, no se espera que las crecientes socaven el cauce de la quebrada Chontaduro. Sin embargo, si pueden generar procesos erosivos en las márgenes y, por el peso de la masa desplazada o la velocidad de los flujos, son potencialmente destructivos.

5.4. Evolución del movimiento en masa – Zona de restricción

De acuerdo con el monitoreo realizado del 10 al 18 de enero de 2023, se pudo establecer que el movimiento en masa es de estilo complejo, distribución retrogresiva y ensanchada. El retroceso de la corona y la ampliación de los flancos se ha cartografiado en tres polígonos: 10 de enero, 13 de enero y 18 de enero (figura 45). Para el 10 de enero, el área afectada por el movimiento en masa fue de 64,72 ha; el 13 de enero de 87,16 ha y el 18 de enero fue de 89,12 ha.

Debido a lo anterior, el SGC establece una zona de restricción que involucra toda la parte alta de la microcuenca de la quebrada Chontaduro, con el fin de realizar un monitoreo diario, donde se restringe toda actividad y circulación de personas y animales, dado que la presencia de suelos residuales de origen volcánico puede extenderse un poco más arriba de la corona actual y de los flancos, involucrando nuevas áreas de ruptura.

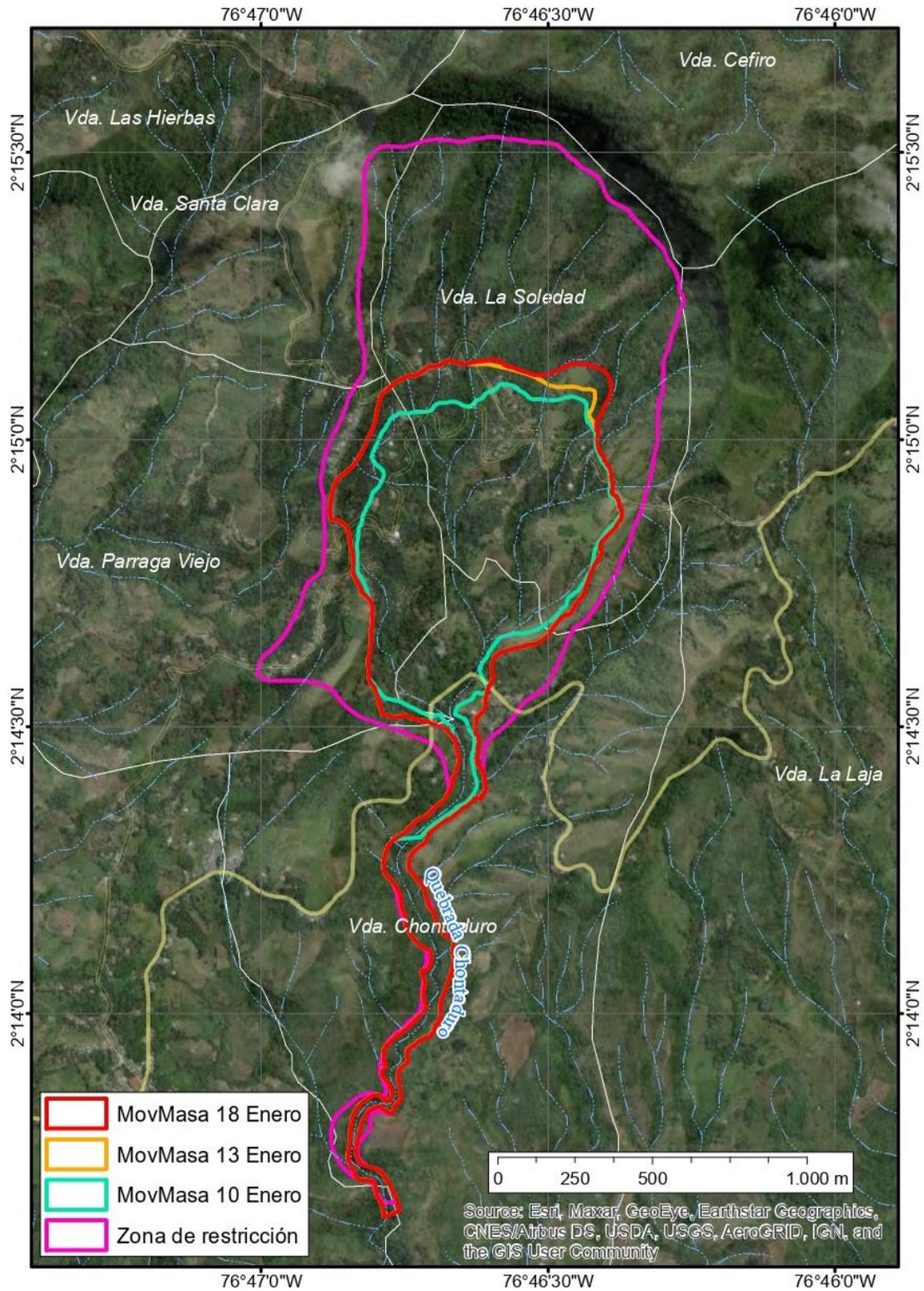


Figura 45. Evolución espacial del movimiento en masa

6. Modelos fluidodinámicos

De acuerdo con lo descrito, con el fin de determinar las características y el comportamiento del flujo hacia aguas abajo del cruce de la quebrada Chontaduro con la vía Panamericana con fines del trazado de la vía alterna entregado por el Invias, se realizaron modelos fluidodinámicos, con los cuales se espera tener una aproximación de las alturas y velocidades de los posibles flujos producto de la masa movilizada en la parte alta y media de la cuenca de la quebrada.

Los modelos fluidodinámicos permiten tener aproximarse a una representación de procesos naturales basados en la física que son aplicados a fenómenos naturales asociados a flujos de agua y sedimentos con distintas concentraciones y velocidades, que discurren por drenajes naturales o artificiales.

Como condición de entrada general a los modelos fluidodinámicos se estableció una lluvia asociada a un periodo de retorno (TR) de 24 años, con un valor de 115 mm que corresponde al valor máximo de precipitación registrado en la serie de datos diarios de la estación Párraga del Ideam desde el año 1995.

Como se mencionó en el capítulo 3.1, los modelos fluidodinámicos generados presentan limitaciones asociadas al MDT dada que la condición del terreno es la del 13 de enero de 2023 y debido al cambio constante del nivel base del drenaje de la quebrada Chontaduro producto de la depositación del material proveniente de la masa movilizada en la vereda Soledad, las condiciones iniciales son dinámicas.

Así mismo, se tiene la limitación sobre la caracterización reológica de los materiales que componen el flujo, la cual fue determinada a partir de observaciones en campo ya que en el momento no se cuenta con resultados de laboratorio y por último, se presenta una incertidumbre en los volúmenes de flujo que puedan ocurrir en el futuro dado que el volumen asumido está basado en un evento extremo probable.

Por lo anterior, se deben tener presentes estas limitaciones a la hora de utilizar estos resultados en la toma de decisiones.

6.1. Condiciones de entrada hidrógrafa

Para la construcción de hidrógrafas o hidrogramas que permitan la alimentación de volúmenes a los modelos de simulación computacional con caudales distribuidos en el tiempo, se empleó una metodología de hidrograma unitario sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos (Mokcus, 2008). Para la construcción de la hidrógrafa, los parámetros de entrada principales involucran características morfométricas de la cuenca y de la zona de despegue de los flujos (longitud del cauce, pendiente máxima, área planimétrica). Adicionalmente, valores de acumulación (en cantidad y tiempo) de agua y de sólidos, que se obtienen a partir de la estimación del potencial de represamiento de volúmenes (y la consecuente ruptura de presas naturales que puedan formarse), junto con la información pluviométrica de la microcuenca.

Para las simulaciones con RiverFlow2D se utilizaron hidrógrafas para los tres puntos de inicio definidos, con volúmenes de aproximadamente un millón de metros cúbicos cada una (distribuidas en aproximadamente 9.5 horas), con una concentración en volumen constante de 35 % y un caudal pico de unos 113 m³/s. (figura 46).

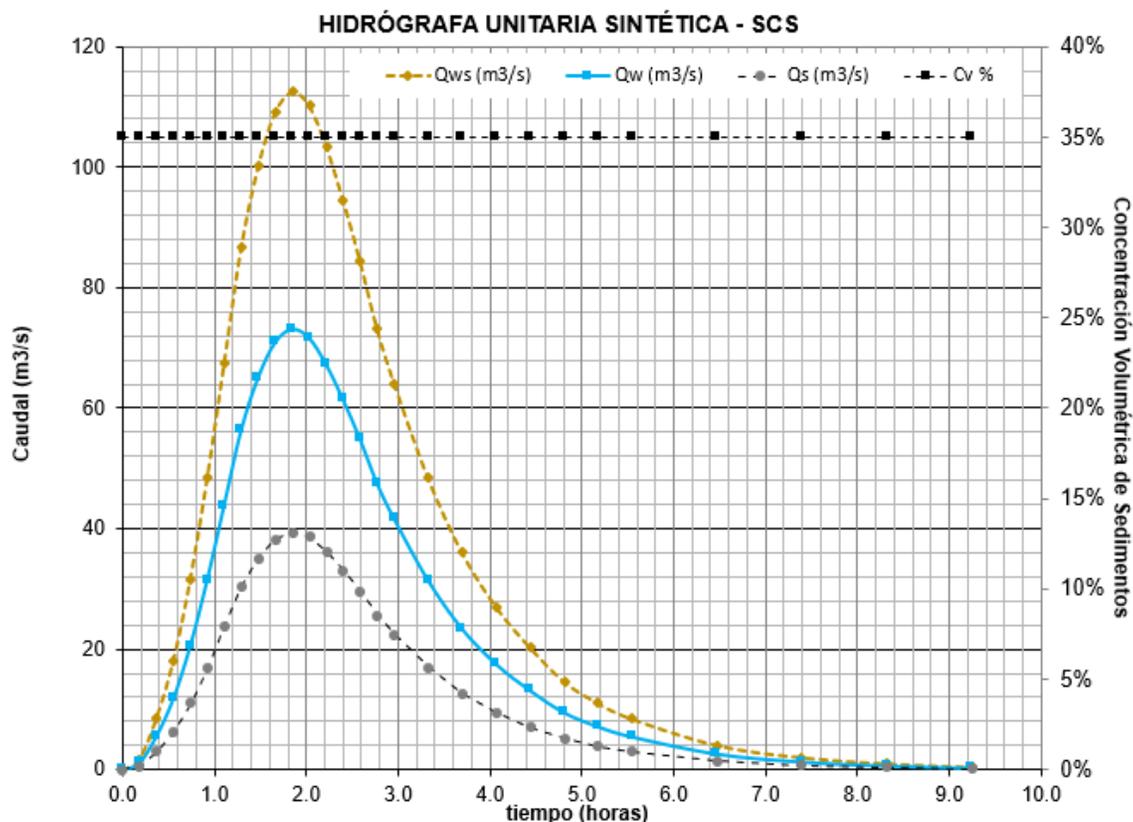


Figura 46. Hidrógrafa unitaria sintética empleada para las simulaciones con RiverFlow2D

6.2. Modelos numéricos

Con el fin de aproximarse a las características de alturas y velocidades en el sitio considerado para el trazado de la vía alterna entregado por Invias se aplicaron tres modelos numéricos: RiverFlow2d®, FLO2D® y Titan2d

6.2.1. Modelo riverflow2d ©

Se realizaron modelaciones de flujos hiperconcentrados por medio del software RiverFlow2D®, el cual es un modelo bidimensional de malla flexible que dispone de un módulo especializado para la simulación de flujos de lodo y detritos que permite evaluar el comportamiento de los fluidos viscosos no Newtonianos. RiverFlow2D® es un modelo monofásico (Hydronia LLC, 2020). Este software dispone de una serie de capacidades como:

- Está basado en una malla flexible compuesta por triángulos de distintos tamaños, en cada uno de los cuales se calculan las profundidades y velocidades del flujo, entre otros parámetros. Esto permite utilizar resoluciones variables para captar gradientes y geometrías irregulares presentes en el terreno, así como los obstáculos que puedan afectar el movimiento del fluido.
- Utiliza el método numérico de Volúmenes Finitos, con lo cual presenta una alta precisión en la conservación de masa y momentum, generando resultados que representan de manera eficiente el movimiento de este tipo de flujos.

- El módulo de flujo de lodos y detritos dispone de 8 fórmulas reológicas que se pueden adaptar a distintos tipos de fluidos viscosos y no Newtonianos.

6.2.1.1. Dominio de modelación riverflow2d®

El dominio de modelación comprende la quebrada Chontaduro desde la parte media del movimiento en masa presentado el 9 de enero de 2023, hasta 900 m aguas abajo del trazado de la vía propuesta por Invias, con un área total de 91,5 ha. Para la modelación se generó una malla triangular de 5 metros, refinada en el cauce a 2 metros, para un total de 130.800 elementos, teniendo como insumo el MDE de 90 cm/px que se considera de resolución adecuada, teniendo en cuenta la eficiencia del modelo y los tiempos computacionales del mismo. En la figura 25, se observa un detalle de la malla empleada para la modelación en el área de la propuesta de trazado de vía. Adicionalmente, se asumió un coeficiente de rugosidad (n de Manning) de 0,03 por las condiciones del terreno del área analizada; y se definieron por condiciones de frontera tres entradas con la hidrógrafa referenciada, cuyos puntos de arranque se pueden observar en la figura 47.

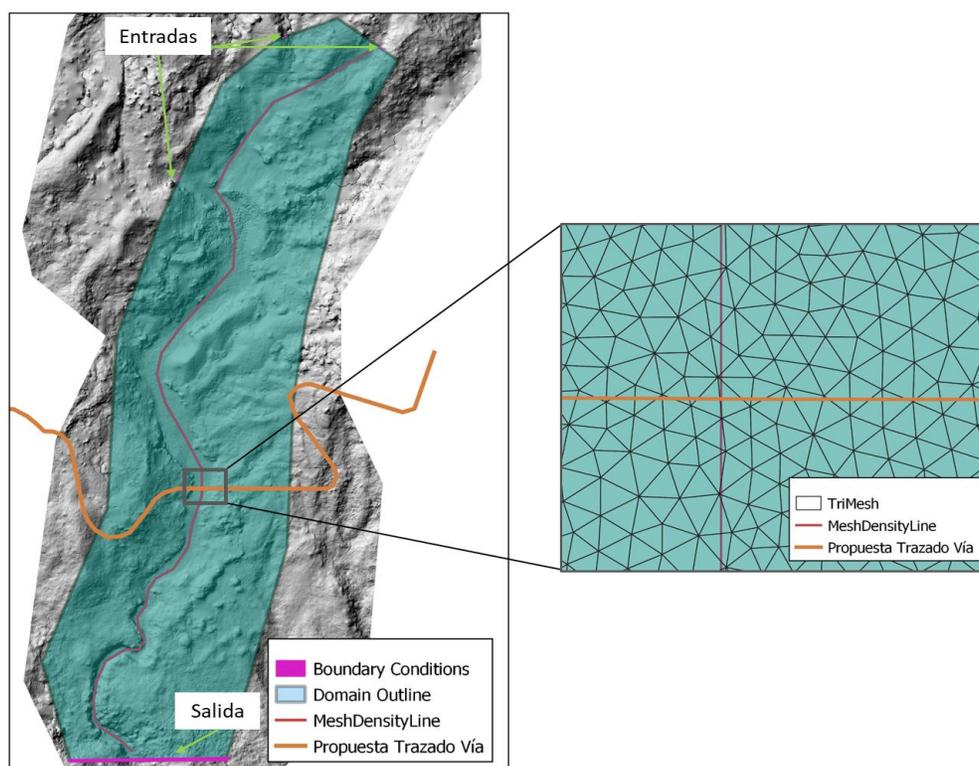


Figura 47. Dominio de modelación e imagen de la malla computacional generada en el modelo RiverFlow2D®, junto con los puntos de arranque (entradas) de las simulaciones

De acuerdo con las observaciones de campo, se pudo evidenciar que los materiales transportados por los flujos en su gran mayoría corresponden material fino (figura 48), por lo cual se determinó que concentraciones volumétricas de sólidos de 35% representan de manera aproximada las características de los flujos que se han presentado desde el 9 enero de 2023. Por otra parte, debido a la incertidumbre en la composición del flujo se utilizó la fórmula reológica de Full Bingham, cuyos parámetros usados dentro del modelo se especifican en la figura 49.



Figura 48. Flujo ocurrido en la quebrada Chontaduro el 9 de enero de 2023 predominante de matriz fina

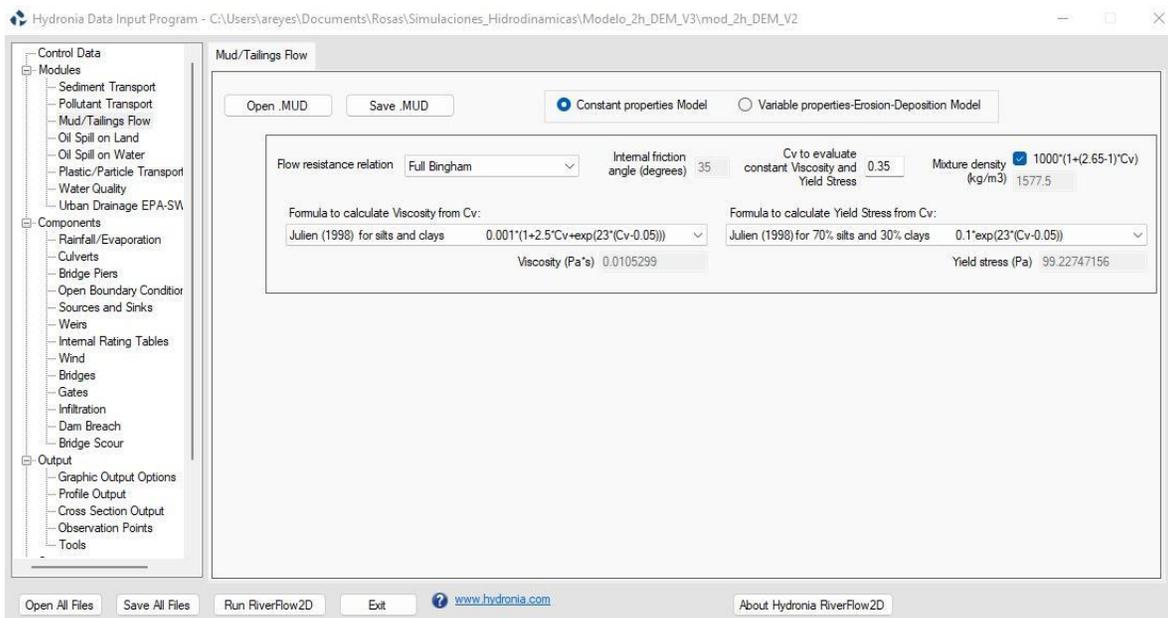


Figura 49. Modelo reológico utilizado en las modelaciones hidrodinámicas en RiverFlow2D®

6.2.1.2. Resultados de la modelación

Los resultados del modelo en RiverFlow2D© arrojaron unas profundidades de flujo entre 0,1 y 14,7 metros. Las mayores alturas del flujo se presentan aguas abajo del sector del trazado propuesto por Invias. El cauce de la quebrada Chontaduro entre el cruce de la vía Panamericana y su desembocadura en el río Esmita, se amplió con el evento del 9 de enero cambiando sustancialmente las condiciones morfométricas, dando lugar a secciones transversales amplias, lo que permite el paso de volúmenes relativamente altos sin generar desbordamientos, por esta razón en la zona entre la vía panamericana y

la vía propuesta por Invias, se tienen alturas de hasta 4 m. Por otra parte, aguas abajo de la vía propuesta, el cauce presenta un entallamiento paulatino dando lugar a la reducción y profundización de su sección, lo que permite que el flujo alcance alturas hasta de 14,7 metros, sin presentar desbordamientos (figura 50). Los resultados del modelo en RiverFlow2D© arrojaron unas profundidades de flujo entre 0,1 y 14,7 metros, después del movimiento en masa del 9 de enero las condiciones morfométricas de la microcuenca cambiaron sustancialmente, dando lugar a secciones transversales amplias, lo que permite el paso de volúmenes relativamente altos sin generar un desbordamiento con alturas de hasta 3,2 m. Por otra parte, aguas abajo de la vía Panamericana el cauce presenta un entallamiento paulatino dando lugar a la reducción y profundización de su sección, lo que permite que el flujo alcance alturas hasta de 14,7 metros, sin presentar desbordamientos (figura 50).

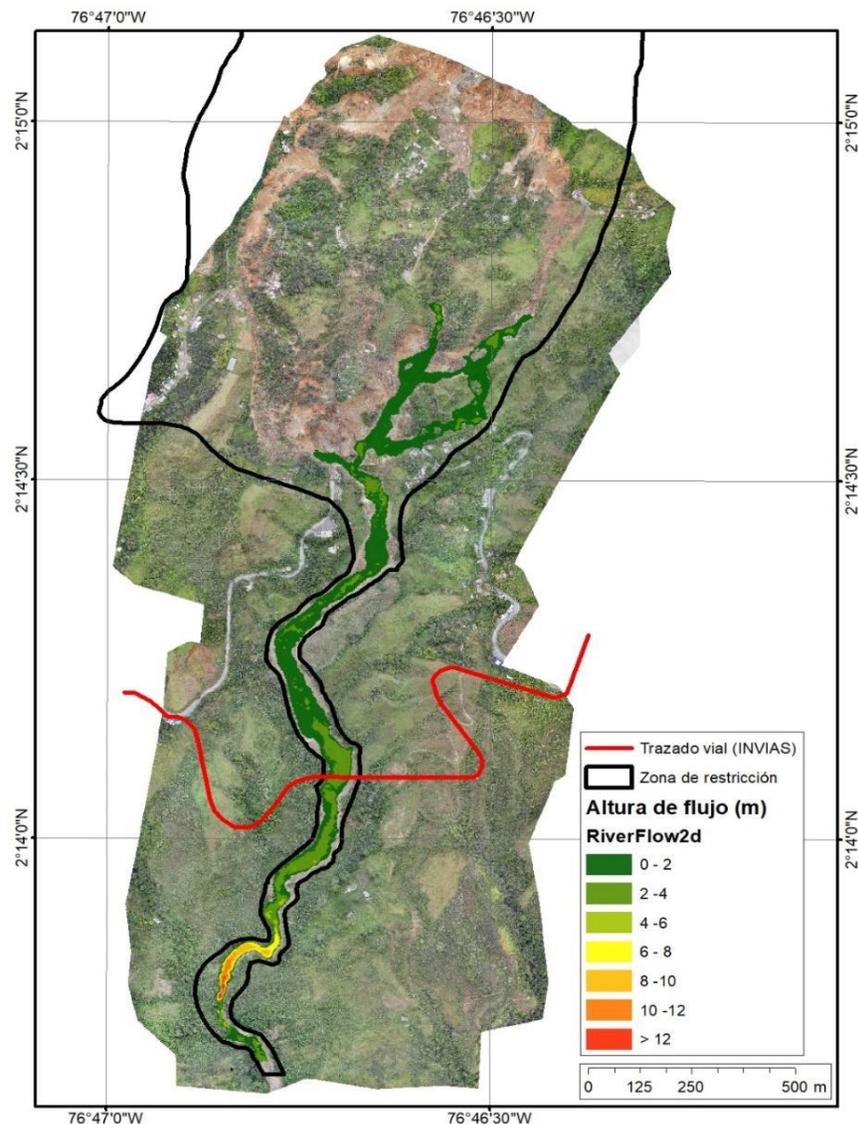


Figura 50. Alturas de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro
Alturas obtenidas a través de las simulaciones computacionales empleando el software riverflow2d. Se representa en línea roja el trazo aproximado de la variante vial propuesta por Invias; y en línea negra, la zona de restricción propuesta por el SGC.

En la sección de interés (A-A') donde se proyecta preliminarmente el trazado de la vía, la altura máxima alcanzada por el flujo, de acuerdo con la simulación, es de 3,3 metros (figura 51).

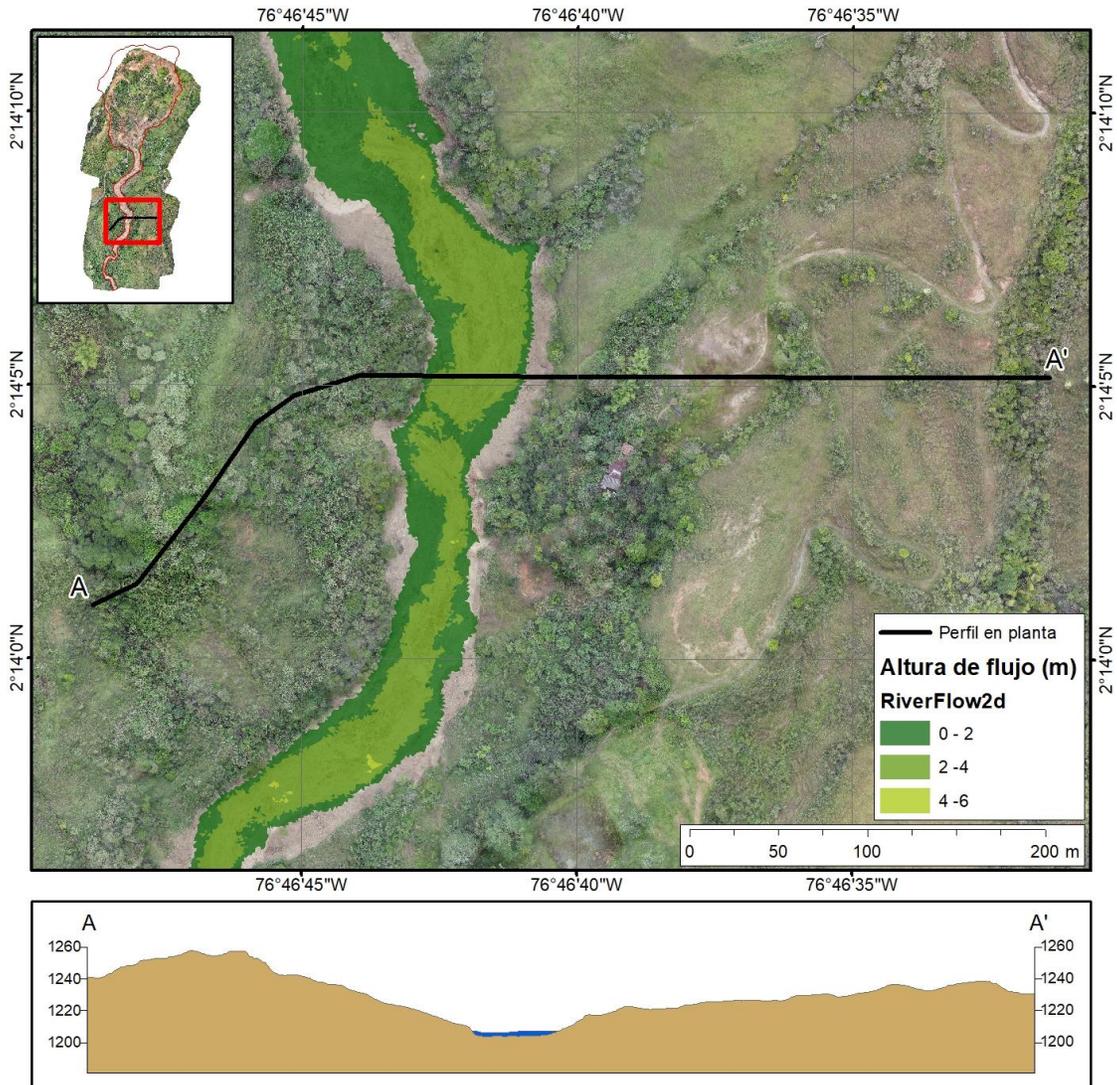


Figura 51. Vista en planta del área aledaña al trazo vial propuesto por Invias

Se definió la sección transversal A - A' (línea negra). Se observa, en una escala cromática que va del verde al rojo, las alturas del flujo obtenidas a través de las simulaciones computacionales empleando el software riverflow2d.

En cuanto a las velocidades máximas obtenidas en el modelo, se estuvieron entre 0,1 y 15,2 m/s, encontrando los mayores valores en donde se presentaba cambios en dirección de flujo y/o pendiente. En la sección transversal de análisis (A-A') se puede evidenciar que la velocidad mayor es del orden de 5,5 m/s hacia la margen izquierda del cauce, debido a la curva que presenta la quebrada Chontaduro en este sector. Sin embargo, aguas arriba y aguas abajo de la vía propuesta se pueden observar velocidades de hasta 9 m/s, que son debidas a cambios en la pendiente local de dichas zonas del cauce por el proceso de sedimentación que se presenta en la quebrada actualmente (figura 52).

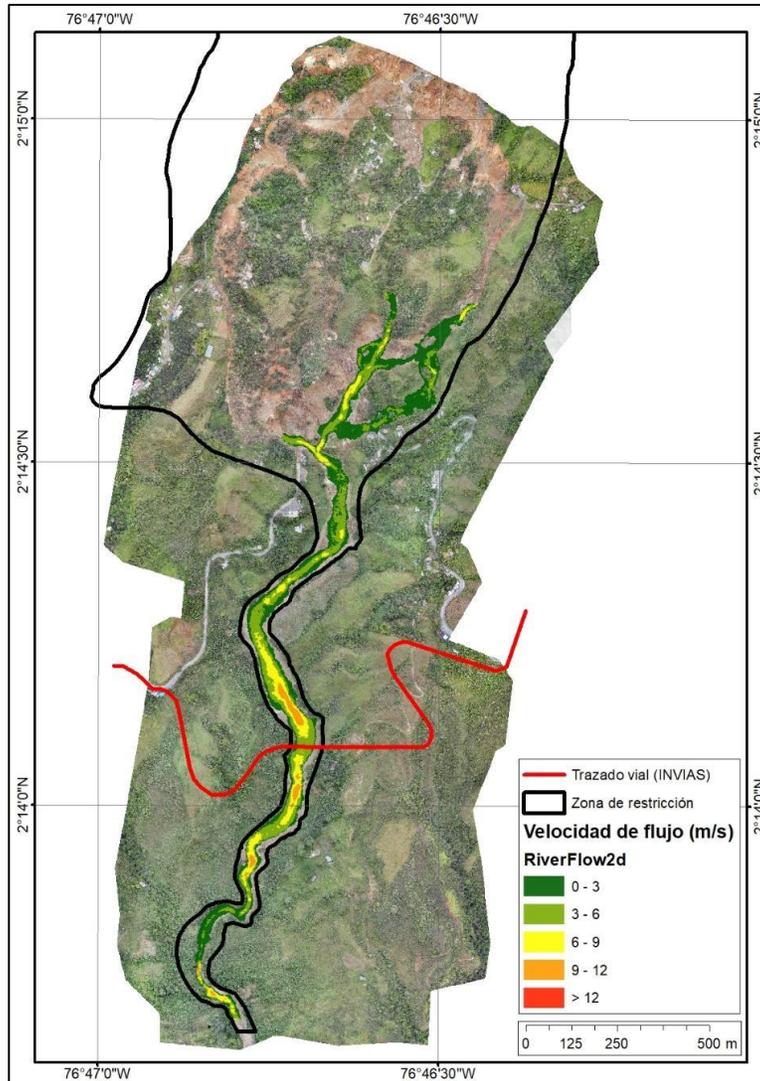


Figura 52. Velocidades de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro
Las velocidades se obtuvieron a través de las simulaciones computacionales empleando el software riverflow2d. Se representa en línea roja el trazo aproximado de la variante vial propuesta por INVÍAS; y en línea negra, la zona de restricción propuesta por el SGC.

6.2.2. Modelo flo-2d pro ©

El software FLO-2D es ampliamente utilizado para simular el comportamiento de distintos tipos de flujos a nivel mundial, especialmente flujos hiperconcentrados. Cuenta con la aprobación por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) de los Estados Unidos (FLO-2D Inc., 2018).

Algunas de las características principales de este software (FLO-2D Inc., 2015) son las siguientes:

- Es un modelo de tipo bidimensional, superficial, no confinado, con un método de dirección de flujo en ocho direcciones
- Calcula los intercambios de flujo entre el canal y la planicie de inundación
- Puede simular el comportamiento de la lluvia sobre el área

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

- Evalúa la variación de los caudales y el almacenamiento
- Simula el movimiento de sedimento y el flujo de lodo/escombros

FLO-2D Pro © analiza de forma numérica el movimiento de flujos hiperconcentrados, como un fluido viscoso en función de la concentración volumétrica de sedimentos, e incluye un modelo reológico cuadrático que permite estimar el esfuerzo de cizalla y la viscosidad.

Son dos las ecuaciones que resuelve el modelo matemático empleado por FLO-2D Pro ©: la ecuación de continuidad del flujo y la ecuación de cantidad de movimiento para onda dinámica (O'Brien, 2017). Estas ecuaciones son resueltas en el modelo, mediante un esquema numérico de diferencias finitas centrales. La solución resulta de una representación discreta de la ecuación cuando se aplica en un solo punto.

6.2.2.1. Dominio de modelación FLO-2D Pro ©

El dominio de modelación comprende la quebrada Chontaduro desde la parte media del movimiento en masa ocurrido el 9 de enero de 2023, hasta 900 m aguas abajo del trazado de la vía propuesta por Invias, con un área total de 91,5 ha. Para la modelación se generó una malla (estructurada) cuadrada de 5 metros que integra 83.182 elementos, teniendo como insumo el MDE de 90 cm/px de resolución que se considera de adecuada resolución, teniendo en cuenta la eficiencia del modelo y los tiempos computacionales del mismo. En la figura 53, se observa un detalle de la malla utilizada en el dominio computacional. Es importante mencionar que se asumió un coeficiente de rugosidad (n de Manning) de 0,03 asociado a las condiciones del terreno del área de interés y se definieron como condiciones de frontera tres entradas a partir de la hidrógrafa referenciada, cuyos puntos de arranque se pueden observar en la figura en referencia.

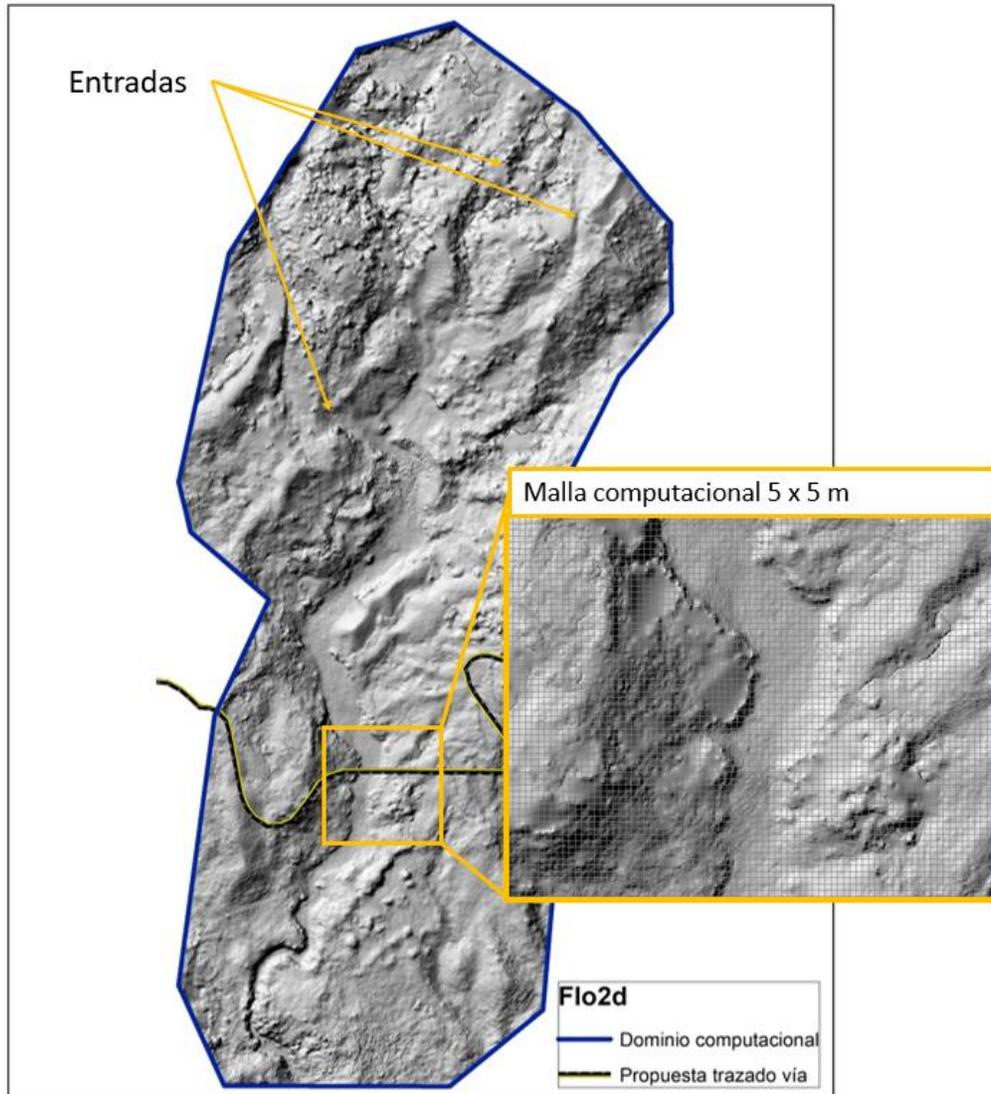


Figura 53. Dominio de modelación e imagen de la malla computacional generada en el modelo RiverFlow2D®, junto con los puntos de arranque (entradas) de las simulaciones

De acuerdo con las observaciones de campo y como se mencionó, se pudo evidenciar que los materiales transportados por los flujos en su gran mayoría corresponden materiales, por lo cual se determinó que concentraciones volumétricas de sólidos de 35% representan de manera aproximada las características de los flujos que se han presentado desde el 9 enero de 2023.

La parametrización del modelo se presenta en la figura 54, donde se destaca el tiempo de modelación de 9,5 horas y el módulo Mud/Debris.

FLO-2D Control Variables

Time Control and Plot Variables

Simulation Time (hrs):

Output Interval (hrs):

Graphics Display: Text Screen
 Detailed Graphics

Metric Backup File

Global Data Modification

n-value Adjustment: Floodplain Limiting Froude No:

Flow Depth for Depth Duration Analysis: Shallow Flow n-value:

Bulking Concentration: Encroachment Depth:

Area Reduction Factor:

System Component Switches

Main Channel Area Reduction Factors (ARF)

Streets Multiple Channels (Fill and Gullies)

Levees

Floodplain Display Options

Print Options:

Create Supercritical Output File

Physical Processes Switches

Rainfall

Infiltration

Evaporation

MODFLO-2D Modelling

Volume Rating Tables

Storm Drain

Mud/Debris

Sediment Transport

None

Channel Display Options

Check "Main Channel" to activate "Channel Print Options"

Channel Print Options:

Time Lapse Output

Output Interval (hrs):

Conveyance Structure Switches

Hydraulic Structures

Floodway Analysis

Debris Basin

Numerical Stability Parameters

Surface Detention:

Percent Change in Flow Depth:

Dynamic Wave Stability Coefficient:

Courant Numbers

Floodplain:

Channel:

Street:

Change Accelerator Rate:

Animate Flow within GDS

Figura 54. Parámetros de modelación FLO-2D Pro ©

6.2.2.2. Resultados de la modelación

Los resultados del modelo en FLO-2D Pro© arrojaron unas profundidades de flujo entre 0,1 y 17,5 metros, después del movimiento en masa del 9 de enero las condiciones morfométricas de la microcuenca cambiaron sustancialmente, dando lugar a secciones transversales amplias, lo que permite el paso de volúmenes relativamente altos sin generar un desbordamiento con alturas de hasta 4,7 m. Por otra parte, aguas abajo de la vía Panamericana el cauce presenta un entallamiento paulatino dando lugar a la reducción y profundización de su sección, lo que permite que el flujo alcance alturas hasta de 17,5 metros, sin presentar desbordamientos (figura 55).

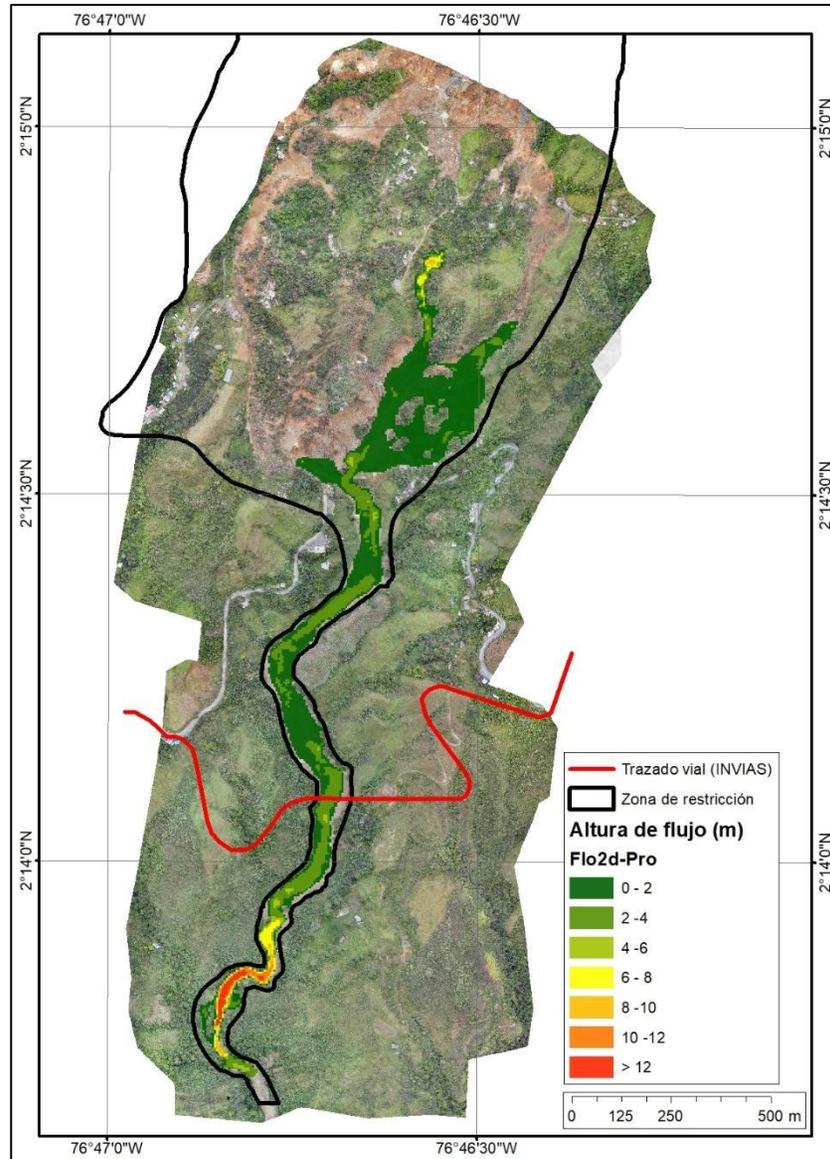


Figura 55. Alturas de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro
Obtenidas a través de las simulaciones computacionales empleando el software FLO-2D Pro©. Se representa en línea roja el trazo aproximado de la variante vial propuesta por INVÍAS; y en línea negra, la zona de restricción propuesta por el SGC.

En la sección de interés (A-A') donde se proyecta preliminarmente el trazado de la vía, la altura máxima alcanzada por el flujo, de acuerdo con la simulación, es de entre 2,4 y 3,0 metros (figura 56).

En cuanto a las velocidades máximas obtenidas en el modelo, se estuvieron entre 0,1 y 17,2 m/s, encontrando los mayores valores en donde se presentaba cambios en dirección de flujo y/o pendiente. En la sección transversal de análisis (A-A') se puede evidenciar que la velocidad mayor es del orden de 6,3 m/s hacia la margen izquierda del cauce, debido a la curva que presenta la quebrada Chontaduro en este sector. Sin embargo, aguas arriba y aguas abajo de la vía propuesta se pueden observar velocidades de hasta 9,2 m/s, que son debidas a cambios en la pendiente local de dichas zonas del cauce por el proceso de sedimentación que se presenta en la quebrada actualmente (figura 57).

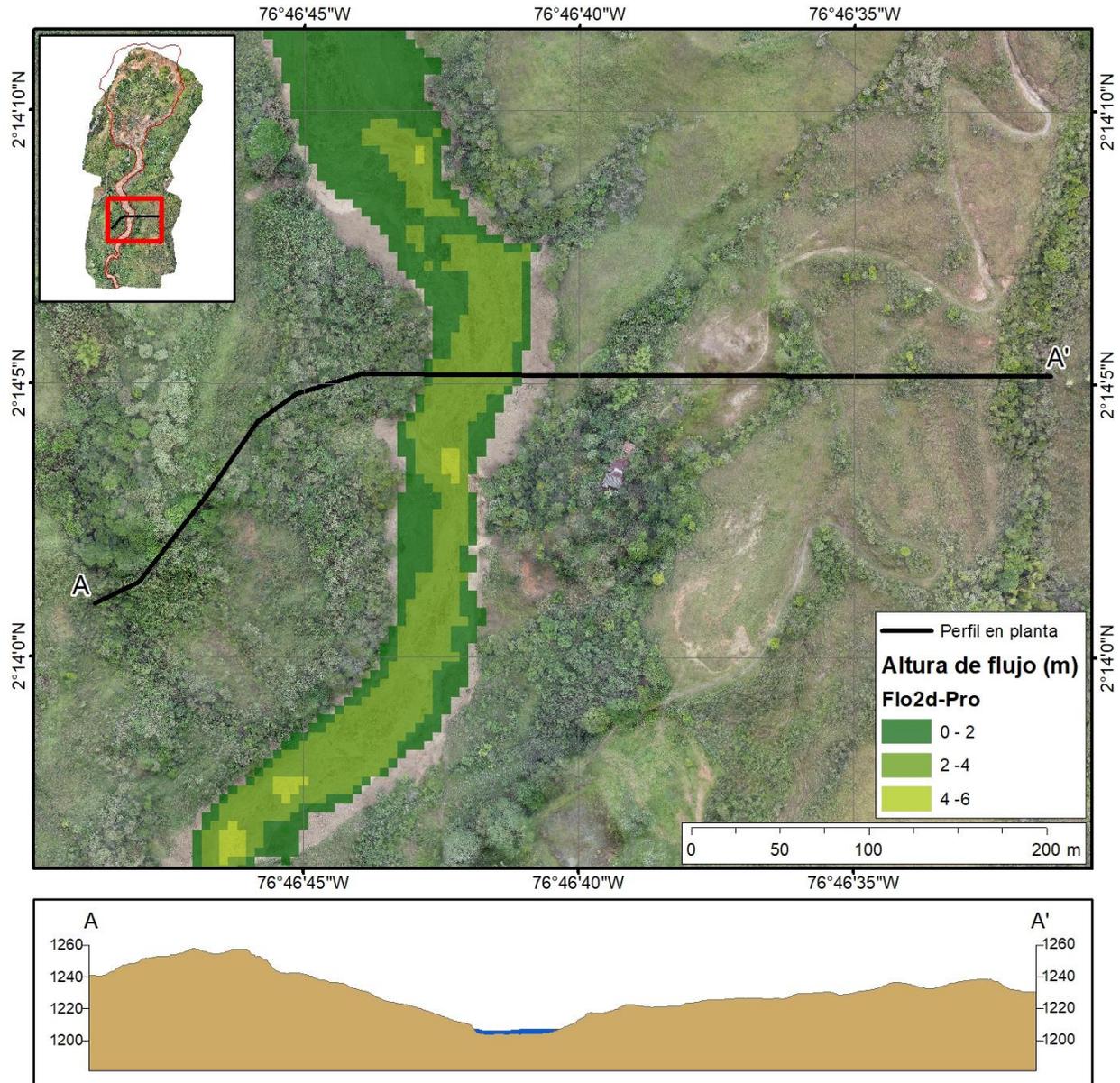


Figura 56. Vista en planta del área aledaña al trazo vial propuesto por Invías
A partir de este perfil se definió la sección transversal A - A' (línea negra). Se observa, en una escala cromática que va del verde al rojo, las alturas del flujo obtenidas a través de las simulaciones computacionales empleando el software FLO-2D Pro ©.

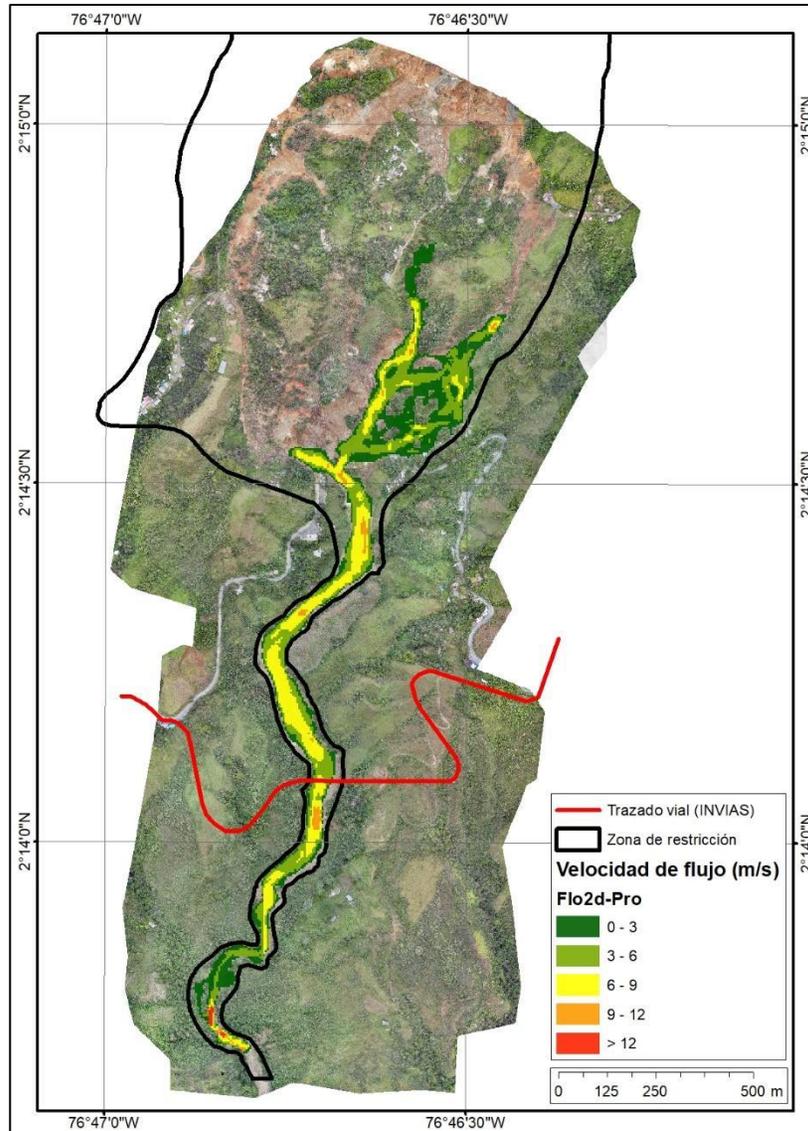


Figura 57. Velocidades de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro. Obtenidas a través de las simulaciones computacionales empleando el software riverflow2d. Se representa en línea roja el trazo aproximado de la variante vial propuesta por INVIAS; y en línea negra, la zona de restricción propuesta por el SGC.

6.2.3. Modelo titan2d

Titan2D es un código desarrollado para simular flujos granulares sobre modelos digitales de terrenos. Fue desarrollado por el Grupo de Investigación de Flujos de Masa (GMFG, por su sigla en inglés) de la Universidad Estatal de New York en Buffalo - EEUU (Patra *et al.*, 2005; Simakov *et al.*, 2019 y Patra *et al.*, 2020) y es idóneo para simular flujos de masa secos, como corrientes de densidad piroclástica densas o avalanchas de escombros.

El programa está basado en las ecuaciones de conservación de masa y de momentum que son resueltas utilizando un término de fricción de Coulomb para la interfaz entre el material granular y la superficie basal; y un término de fricción interna del flujo (Pitman *et al.*, 2003).

6.2.3.1. Datos de entrada y resultados

Para realizar simulaciones de flujos de tierra en Titan2D, se requiere como parámetros de entrada principales:

- El modelo digital de elevaciones del terreno (MDT), obtenido de vuelos no tripulados realizados en conjunto por el SGC, UNGRD y Policía Nacional, con el cual se obtuvo más de 2700 fotografías del área del movimiento en masa de Rosas - Cauca. Con estos insumos se ha realizado, mediante fotogrametría, la construcción de una ortofoto de resolución aproximada de 5 cm/px y un MDT de resolución cerca a los 20 cm/px, cubriendo un área aproximada de 300 ha. Se corrigen las direcciones de flujo requeridas por las simulaciones utilizando el código TerraHidro del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE) a través del algoritmo “removepits” (Rosim *et al.*, 2013).
- El volumen del flujo a simular, obtenido de la comparación de las altitudes de un MDT elaborado previamente al movimiento de masa y otro MDT post-evento, a partir de la cual se define la tasa de liberación de volumen para un periodo determinado (extrusion rate).
- El ángulo de fricción basal es determinado a partir de la caracterización geomorfológica de la zona de despegue y tránsito de los posibles flujos de tierra que se podrían presentar (lodos de limos y algo de gravas) y de la revisión de la información sobre ángulos de fricción basal en Stinton (2004).
- El ángulo de fricción interno del material a simular, el cual se asume aproximado a un ángulo de reposo promedio para material granular (34°).
- La localización del centroide de la zona de despegue del flujo (coordenadas X, Y).
- La velocidad inicial del flujo, que para este caso se asume nula (0 m/s), por cuanto se está tratando de reproducir en la simulación un movimiento gravitacional.

Parámetros computacionales adicionales son: la densidad de malla computacional y el número máximo de pasos o tiempo máximo esperado de simulación, entre otros.

Como resultado de la simulación en Titan2D se obtiene:

- Distribución de las alturas del flujo
- Distribución de la energía cinética
- Distribución de la presión dinámica
- Velocidades promedio, alturas de inundación máximas y volumen distribuido por el flujo, entre pasos computacionales
- La longitud o alcance del flujo

6.2.3.2. Simulación de flujos con alta concentración de sedimentos y baja movilidad

Se tiene como objetivo analizar el avance posibles flujos con baja movilidad como el que se observa en la vía Panamericana en el sector de la escuela de la vereda Chontaduro que se podrían movilizar hacia la zona de localización del puente del trazado de la vía alterna. Se simularon dos escenarios de volumen: el Escenario 1 de 1,2 millones de m³; y el Escenario 2 de 1,7 millones de m³.

6.2.3.2.1. Escenario 1: Simulación para un volumen de 1,2 millones m³

El volumen liberado en la zona de despegue fluye al dominio computacional de la simulación a manera de una hidrógrafa de caudal constante por un periodo de 2 horas, con una tasa de liberación del material inicial de 3 m/s, para un área de despegue de radio 20 m, con ángulo de fricción interna de 34° y de fricción basal de 10° y definiendo como criterio de parada 250.000 pasos computacionales, con lo cual se alcanza a distribuir un volumen de 1,2 millones m³ (tabla 3).

Tabla 3. Parámetros de entrada principales de la simulación computacional – Escenario 1 – Titan2D

Parámetro	Valor
Centroide área de despegue	302 334 m Este UTM 18N
	248 465 m Norte UTM 18N
Tasa inicial de liberación de volumen	3 m/s
Duración total de la hidrógrafa	2 horas
Ángulo de fricción basal	10°
Ángulo de fricción interno	34°
Radio del área de despegue	20 m
Coefficiente de refinamiento de malla computacional	100
Criterio de parada: Número de pasos computacionales	250.000

La figura 58 muestra el área que podría ser afectada por el flujo de tierra para este escenario, alcanzando una longitud sobre el cauce de 2,5 km, sin lograr llegar al área de la vía propuesta, sobre el cauce de la quebrada Chontaduro (el flujo se detiene aproximadamente 153 m antes del trazo de la vía). Las alturas del flujo se definen por los matices hipsométricos cada 2 m.

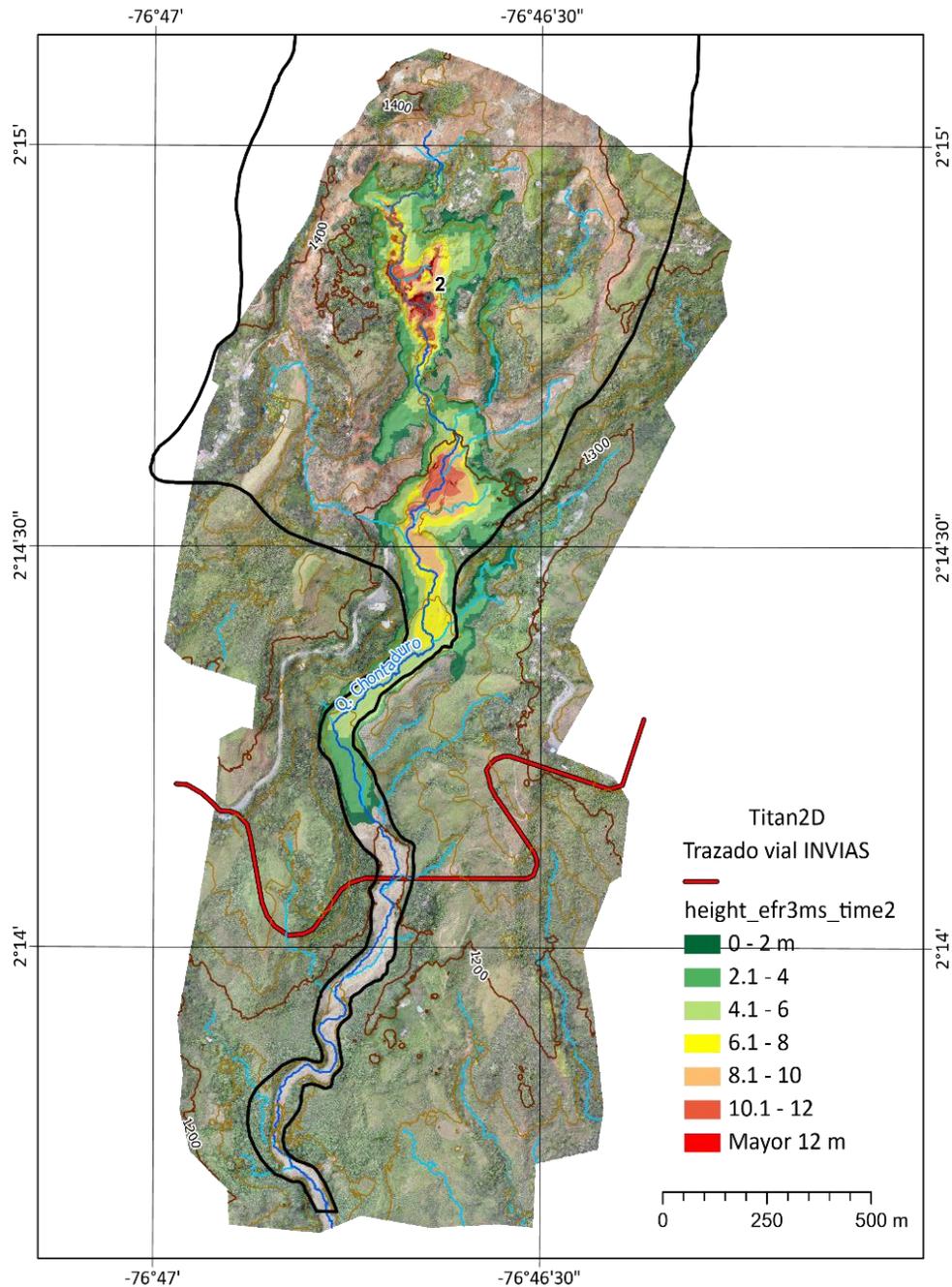


Figura 58. Alturas de flujo para el escenario 1 a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro. Obtenidas a través de simulaciones computacionales empleando el software Titan2D para un volumen de 1,2 millones de m³. La línea roja representa el trazado aproximado de la variante vial propuesta por INVIAS y en línea negra, la zona de restricción propuesta por el SGC.

Como resultados de la simulación para el Escenario 1 y, de acuerdo con la tasa de liberación de volumen del flujo, se alcanza un volumen 1,2 millones de m³, con una velocidad promedio del flujo de 1,2 m/s y una altura en el frente del flujo al detenerse de 1,1 m, avanzando 2,5 km (tabla 4).

Tabla 4. Resultados de la simulación de flujos de tierra para un volumen $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$

Salida (Output summary)	Valor
Pasos computacionales	250 000
Volumen transitado	$1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$
Avance del flujo en el cauce desde su área de despegue	2508 m
Velocidad promedio	1,3 m/s
Altura del flujo en la zona de la vía propuesta	(el flujo no alcanza esta zona)
Ancho del flujo en la zona de la vía propuesta	(el flujo no alcanza esta zona)

6.2.3.2.2. Escenario 2: Simulación para un volumen de 1,7 millones m^3

Datos de entrada al modelo Titan2D, definida para una tasa inicial de liberación de volumen de 3 m/s a manera de una hidrógrafa de caudal constante, para un periodo de 2 h y un área de despegue con un radio de 20 m, con ángulo de fricción basal de 10° y de fricción interna de 34° , definiendo como criterio de parada 350 000 pasos computacionales (tabla 5). Para este escenario de simulación, se empleó el método del “problema inverso”, es decir, tratar de determinar cuánto volumen de material se requiere para que el flujo de tierra alcance el área del trazo de la vía propuesto por Invias, obteniéndose un volumen aproximado de 1,7 millones de m^3 .

Tabla 5. Parámetros de entrada principales de la simulación computacional – Escenario 2 – Titan2D

Parámetro	Valor
Centroide área de despegue	302 334 m Este UTM 18N
	248 465 m Norte UTM 18N
Tasa inicial de liberación de volumen	3 m/s
Tiempo total de la hidrógrafa	2 horas
Ángulo de fricción basal	10°
Ángulo de fricción interno	34°
Radio del área de despegue	20 m
Coefficiente de refinamiento de malla computacional	100
Criterio de parada: Número de pasos computacionales	350 000

En la figura 59 se observa la zona que podría ser afectada por el tipo de flujos simulado (flujos que por su concentración de sólidos tienen menor movilidad), para un volumen de 1,7 millones m^3 y una longitud sobre el cauce de 2,9 km, pasando bajo la vía proyectada con una altura de flujo máxima de 3,7 m. Las alturas del flujo están representadas por la escala de matices hipsométricos en intervalos de 2 m.

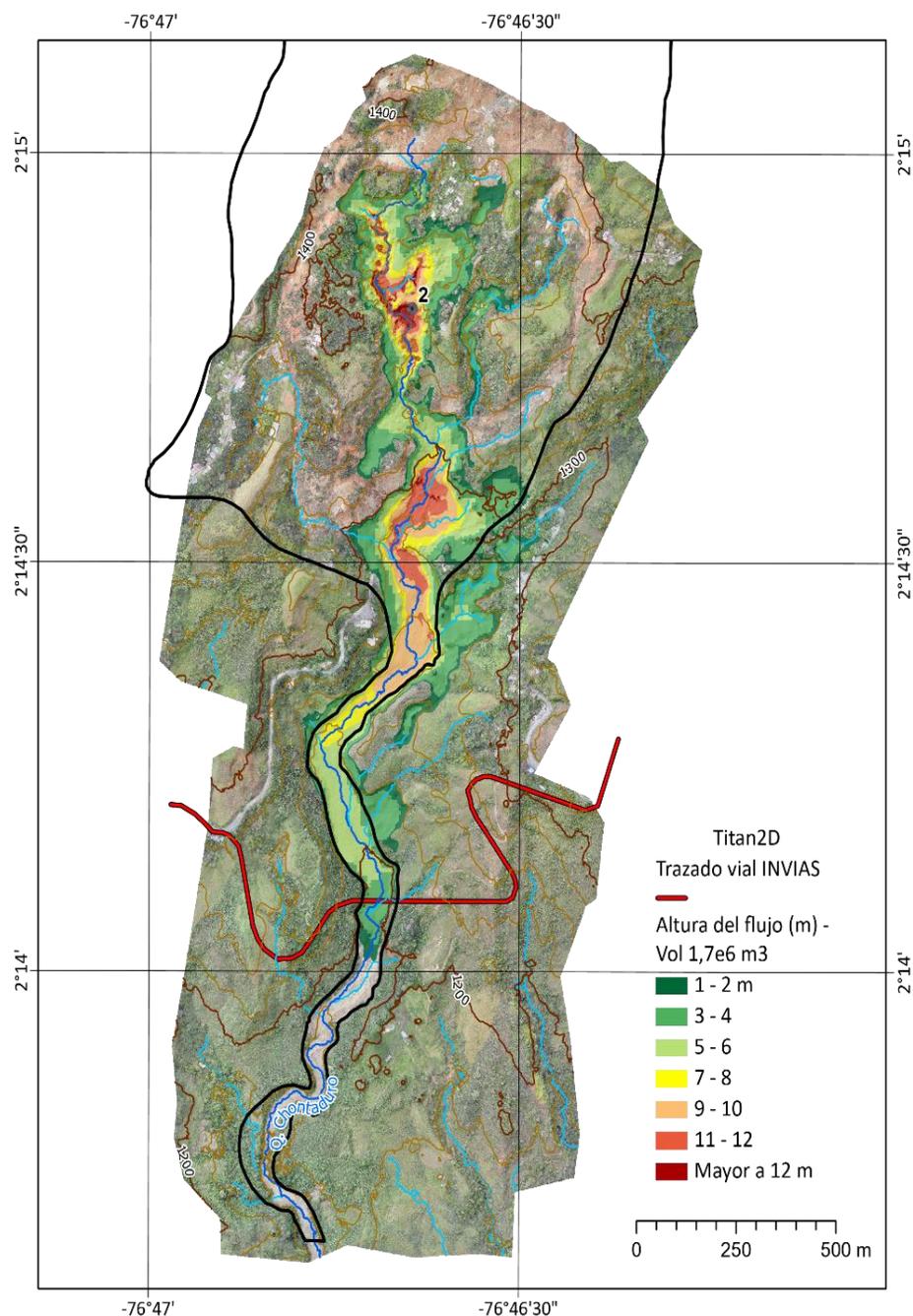


Figura 59. Alturas de flujo para el Escenario 2 a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro Obtenidas a través de simulaciones computacionales empleando el software Titan2D para un volumen $1,65 \times 10^6 \text{ m}^3$. La línea roja representa el trazado aproximado de la variante vial propuesta por INVIAS y en línea negra, la zona de restricción propuesta por el SGC.

Como resultado de la simulación se obtiene un volumen de 1,7 millones de m^3 para una tasa de liberación de volumen de 3 m/s y 350.000 pasos computacionales, avanzando el flujo 2,9 km con una velocidad promedio de 1,3 m/s, pasando por debajo de la vía propuesta con una altura del flujo de 3,7 m y un ancho de flujo 86,8 m (tabla 6).

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alternativo de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

Tabla 6. Resultados de la simulación para el Escenario 2 para un volumen $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$

Salida (Output summary)	Valor
Pasos computacionales	350 000
Volumen transitado	$1,65 \times 10^6 \text{ m}^3$
Avance del flujo en el cauce desde su área de despegue	2920 m
Velocidad promedio	1,3 m/s
Altura del flujo en la zona de la vía propuesta	3,7 m
Ancho del flujo en la zona de la vía propuesta	86,8 m

Sobre la vista en planta se representa la variación del nivel de los flujos por escala hipsométrica variando cada 2 m; y sobre la vía proyectada por Invias se define la sección de interés (A-A'), como se observa en la figura 60.

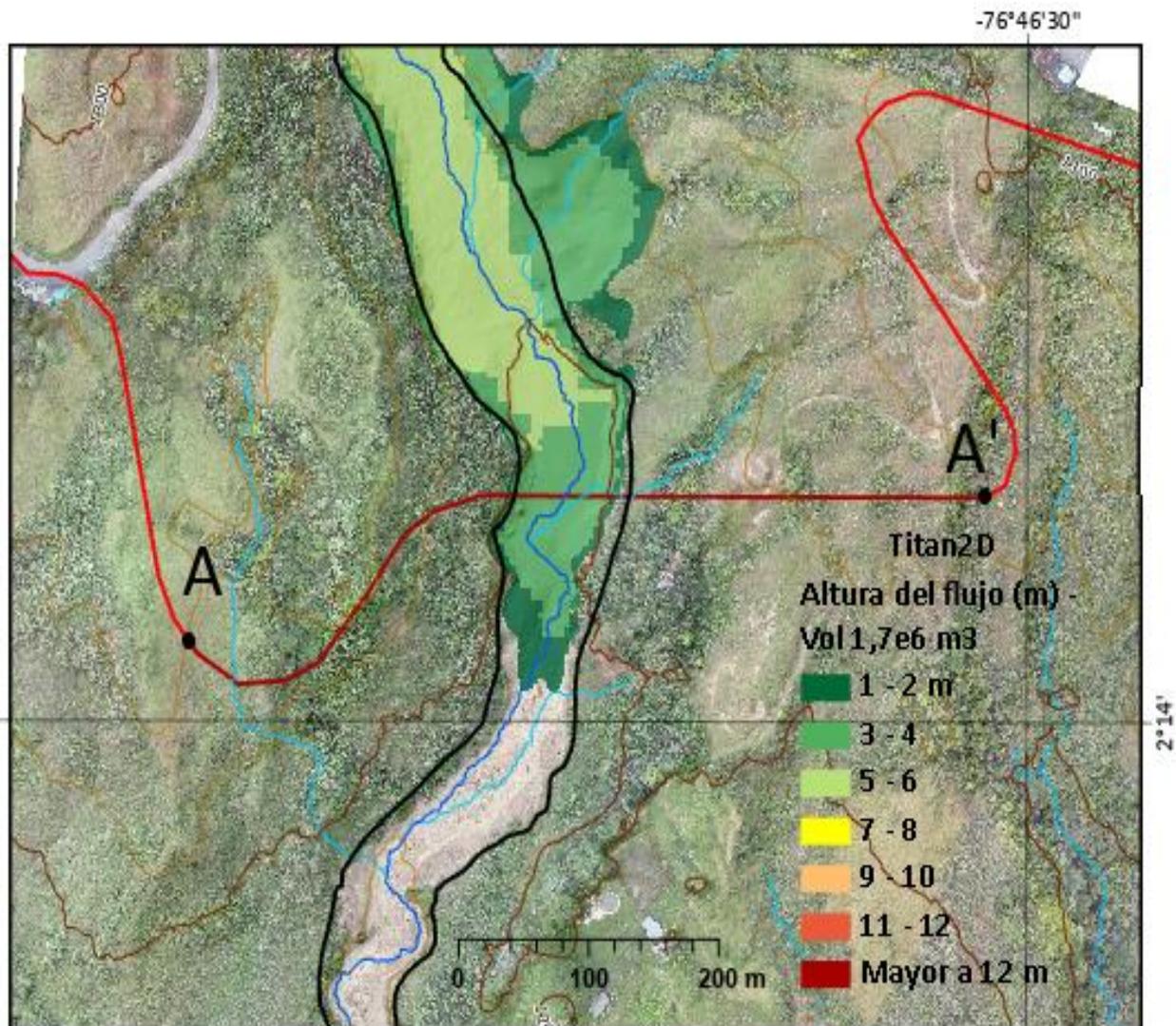


Figura 60. Vista en planta de la localización de la sección transversal (A-A') sobre el eje vial propuesto por Invias, en la que se observa en escala hipsométrica la altura alcanzada por el flujo

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

En la sección transversal trazada entre los puntos A-A' sobre el eje vial se representa el relieve y la altura del flujo de tierra simulado en Titan2D para un volumen de $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$, obteniendo como altura máxima de los flujos 3,7 m sobre el cauce de la quebrada Chontaduro a lo largo del eje vial (figura 61).

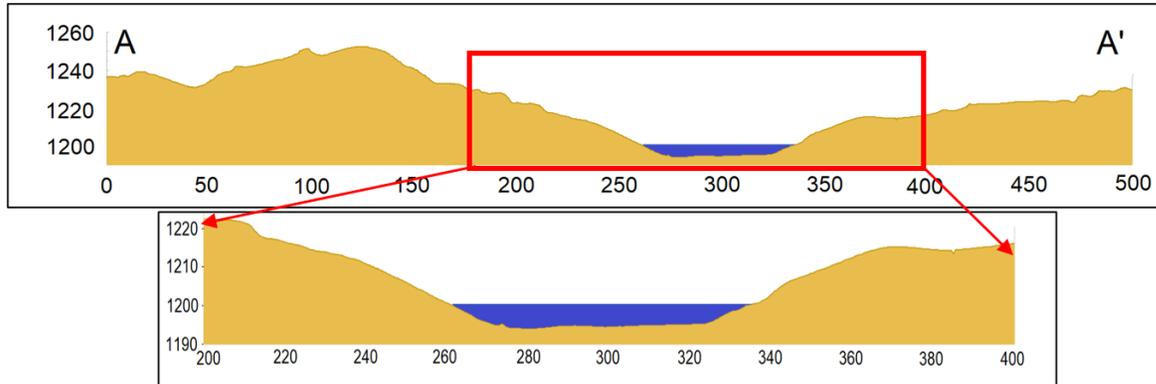


Figura 61. Sección transversal A-A'. Se muestra en color azul la lámina del flujo simulado con Titan2D, de acuerdo con los resultados obtenidos con la simulación computacional para un volumen de $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$

Conclusiones

Como resultado de la emergencia que se presenta en el municipio de Rosas debido al movimiento en masa en la vereda La Soledad, el SGC elaboró este informe a partir de inspecciones visuales realizadas en campo, información secundaria y testimonios de miembros de la comunidad local, junto con acompañamiento de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el Instituto Nacional de Vías (Invias).

El movimiento en masa se presentó en la microcuenca de la quebrada Chontaduro detonado por la época invernal que se viene presentando en la zona. Corresponde a un deslizamiento rotacional activo de estilo complejo, con distribución retrogresiva y ensanchada, afectando las veredas La Soledad, Santa Clara, Párraga Viejo y Chontaduro. Los habitantes del sector manifestaron que las primeras evidencias de inestabilidad se observaron el 4 de enero como pequeñas fisuras en la zona de la corona con aberturas de entre 20 cm y 30 cm, en inmediaciones del colegio Alfonso Córdoba. El movimiento en masa se detonó el 9 de enero a las 4:00 a.m, según los testigos, se marcaron perfectamente la corona y los flancos y se desplazó toda la masa, empezando por el borde de la quebrada Chontaduro (flanco izquierdo).

La precipitación del 9 de enero fue de 94,8 mm que corresponde a un periodo de retorno de 2,4 años, sin embargo, de acuerdo con el análisis de los datos hidrológicos las precipitaciones del año 2022 de 3.600 mm son comparables con los valores más altos registrados en los años 1999, 2008 y 2011, considerados años con influencia del fenómeno de La Niña.

Localmente las características geológicas del sector del movimiento en masa corresponden a capas de arenas semicompactas y ligeramente inclinadas de depósitos volcanoclásticos (flujos piroclásticos), con importante grado de meteorización de la Formación Galeón, cubiertos por capas superficiales de ceniza posiblemente de caída, altamente meteorizados.

El paisaje de la microcuenca de la quebrada Chontaduro es el resultado de la acción de procesos volcánicos, estructurales (cercanía a la Falla Mosquerillo-La Tetilla, del Sistema de Fallas de Romeral), aspectos geológicos e hidrometeorológicos sumados a los factores antrópicos contribuyeron a la ocurrencia del movimiento en masa que dejó incomunicado el sur del país debido a la pérdida de la banca en un tramo de 300 m de la vía Panamericana, afectaciones a 150 familias y cuantiosas pérdidas económicas.

Debido a la actual situación que se presenta en esta región del Cauca y conocidas las condiciones inherentes al impacto de esta afectación, se hace necesario establecer a la mayor brevedad posible un plan de manejo y monitoreo continuo por parte de las entidades que hacen parte del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - SNGRD.

Así mismo, el movimiento en masa se encuentra activo y puede continuar avanzando hacia sus flancos y la corona (carácter retrogresivo), pudiendo resultar afectadas otras zonas, por lo tanto se debe hacer seguimiento al comportamiento del deslizamiento observando la humedad del terreno, el avance de los agrietamientos, como medida que permita generar alertas a la comunidad que se localiza en los alrededores y que en el momento cruza la quebrada Chontaduro de una tarabita improvisada.

Los materiales deslizados e involucrados en los flujos, son mayormente sedimentos finos retrabajados de las litologías descritas con un contenido menor de fragmentos volcánicos principalmente redondeados en diferente estado de meteorización, que al mezclarse con el agua están generando sucesivos pulsos de estos flujos lodos que se van acumulando secuencialmente, evidenciándose a nivel de la carretera

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

panamericana, espesor entre 3 a 7 m hasta ahora, que ya han afectado la Escuela de Chontaduro, del lado E del movimiento en masa.

El subsuelo del trazo propuesto de la vía alterna, está conformado por una secuencia de intercalaciones de capas de depósitos de cenizas de caída, lahares hiperconcentrados arenosos, flujos piroclásticos y depósitos fluviotorrenciales, pertenecientes a la denominada, en la Plancha geológica 364-Timbío (escala 100.000) Formación Galeón, que no conforman una litología de roca muy competente y por lo tanto se deberá tener en cuenta, para la obra, las especificaciones ingenieriles necesarias según los requerimientos de ésta, de acuerdo a ese tipo de litología.

Se realizaron modelamientos numéricos de los posibles flujos que pueden generarse por efecto de altas precipitaciones y volúmenes de agua acumulados en la masa movida con las herramientas computacionales FLO2D© y RiverFlow-2d ©. Los resultados fueron analizados principalmente en el sector del cauce de la quebrada Chontaduro entre el cruce con la vía Panamericana y el cruce con el puente según el trazado entregado por Invias.

De acuerdo con las modelaciones fluvio-dinámicas empleando el software Flo2D-PRO © y RiverFlow2d ©, el flujo en el cauce de la quebrada Chontaduro entre el cruce con la vía Panamericana y el puente del trazado de la vía alterna entregado por Invias pueden alcanzar alturas de hasta 4 m, donde la mancha de flujo presenta anchos cercanos a los 90 metros. Específicamente en la zona del puente propuesto por Invias se tendrían alturas entre 3 m y 4 m, con velocidades entre 5 m/s y 7 m/s.

Complementario a las simulaciones de flujos trabajados con Flo-2d y Riverflow-2d, se realizaron modelamientos numéricos para flujos que por su concentración de sólidos tienen menor movilidad, utilizando el software Titan2D; en el caso del escenario para un volumen de 1,7 millones de m³, el flujo alcanzaría en la zona de la vía propuesta por Invias sobre el cauce de la quebrada Chontaduro, una altura aproximada de 4 m y un ancho de inundación cercano a los 87 m.

Como resultado de la emergencia que se presentó en el municipio de Rosas debido al movimiento en masa en la vereda La Soledad, el SGC elaboró el presente informe, el cual se basa en las inspecciones visuales realizadas en campo, información secundaria y testimonios de miembros de la comunidad local, junto con acompañamiento de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el Instituto Nacional de Vías (Invias), de tal manera que corresponde a un diagnóstico y evaluación técnica, que puede constituirse en una herramienta de apoyo para la gestión del riesgo y toma decisiones por parte de las autoridades competentes.

Como apoyo a la actividad de campo se realizaron sobrevuelos con drones (UNGRD, SGC, Policía Nacional) y sobrevuelos con helicóptero (FAC). En la definición de las posibles zonas afectadas por el retroceso del movimiento en masa se contó con el apoyo de personal de la UNGRD y la comunidad local; así mismo, para la evaluación de la zona baja (vereda Chontaduro) con fines del trazado de la vía alterna con el apoyo de profesionales del Invias. Las diferentes comisiones estuvieron en la zona entre el 11 y el 19 de enero de 2023, mientras que el recorrido de las zonas norte y occidental del movimiento en masa se realizó durante los días 12 y 13 de enero, en difíciles condiciones de acceso y constantes lluvias.

Así mismo, el acceso a la zona baja de la cuenca de la quebrada Chontaduro se limitó a la zona de la margen izquierda de la quebrada Chontaduro, debido a las restricciones físicas, por lluvias y de tiempo en el momento de visita.

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

Las consideraciones geológico-geomorfológicas con énfasis en el comportamiento geotécnico del material en la zona del trazado de la vía alterna se realizaron a partir de inspecciones visuales, por lo cual no reemplaza los estudios de investigación del subsuelo y los ensayos de laboratorio complementarios para este tipo de trabajos, los cuales no se realizaron por un criterio de oportunidad y debido a la urgencia de entregar este informe por la emergencia, con miras a que las entidades puedan contar de una manera oportuna con la información contenida en este informe. Si bien esta información puede servir para tomar decisiones (dadas las condiciones actuales de emergencia), se debe tener en cuenta que la información presentada en este informe presenta limitaciones y no es totalmente concluyente.

Es importante recalcar las limitaciones que este informe tiene respecto a los resultados y recomendaciones. Con respecto al modelo digital del terreno (MDT) se reitera que corresponde al modelo levantado el 13 de enero de 2023, y que la masa movilizada continúa cambiando las condiciones morfométricas a la fecha de la elaboración de este informe (24 de enero de 2023). Esto influye directamente sobre los modelos fluidodinámicos que se propusieron.

La reología (características que permiten que un flujo se deforme al aplicarse un esfuerzo) y la composición del flujo son aproximadas. Estas fueron determinadas a partir de lo observado en campo (terrestre y aéreo) y no se contempló el uso de datos de laboratorio de las características reológicas de los materiales que componen el flujo.

Respecto a la incertidumbre en los volúmenes de flujo que puedan ocurrir en el futuro cercano, se recalca que los resultados de los modelos hidrodinámicos están basados en un evento extremo probable, determinado por el volumen disponible de la masa movilizada y el volumen de agua proveniente de las precipitaciones y acumuladas en la masa según los sobrevuelos con dron y helicoportados. No se consideran otros volúmenes que puedan generarse por eventos posteriores y que no fueron tenidos en cuenta en este informe.

Los modelos hidrodinámicos (FLO-2D© y RiverFlow2d©), con los cuales se realizó la modelación numérica están diseñados para materiales que se comportan como un fluido. Para modelar el flujo de tierra se usó el Titan2D. Esto implica que la masa movilizada puede comportarse con características tanto de fluido si le ingresa cierta cantidad de agua o como un sólido si no le ingresara. Esta complejidad genera limitaciones a los resultados obtenidos en este informe.

Se reitera que los resultados obtenidos en las simulaciones presentadas en este informe no son totalmente concluyentes, dadas las limitaciones de tiempo y de elementos adicionales que no se incluyeron (reología de material, modelos de terreno más finos o actualizados de acuerdo a la dinámica de la masa movilizada, otros esquemas de modelamiento, entre otros) y que permitirían obtener resultados más contundentes.

Recomendaciones

De acuerdo con el modelamiento numérico de los posibles flujos en el sector de emplazamiento del trazado de la vía alterna se recomienda un gálibo del puente no menor a 15 m y una luz mínima de 100 m, debido a las incertidumbres asociadas a este tipo de procesos y el incremento en el nivel base del cauce de la quebrada Chontaduro por efecto de la depositación de los materiales que provienen del movimiento en masa.

De otra parte, considerando que el período invernal se estará prolongando hasta el mes de marzo de 2023 y que ya se ha comenzado a ejecutar la construcción de la vía alterna (con carácter provisional ver figura 8e) para poder reconectar a la mayor brevedad la vía Panamericana, es muy prudente establecer un plan de manejo y monitoreo constante con el fin de poder alertar a tiempo a todo el personal y grupos de trabajo que operan en la zona afectada.

Implementar un sistema de monitoreo superficial en tiempo real con diferentes equipos (sismómetros, GNSS, cámaras web, entre otros) con el fin de detectar los cambios que debido al ensanchamiento del movimiento en masa pueda afectar nuevas zonas que deban ser evacuadas o de infraestructura vital que debe ser relocalizada, como son las torres de interconexión eléctrica.

Complementar el sistema de monitoreo superficial con sobrevuelos regulares tripulados y no tripulados.

Se debe continuar con el monitoreo que viene realizando la oficina de gestión del riesgo de la Alcaldía en conjunto con las comunidades, especialmente en las zonas definidas como de restricción por el SGC, de acuerdo con la evolución del movimiento en masa (figura 47).

Referencias

- Aristizábal, Edier; Arango Carmona, María Isabel; García López, Ingrid Katherine. 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. doi: 10.15446/rcdg.v29n1.72612.
- FLO-2D Inc. (2018). FLO-2D - Descripción de la teoría para la simulación de flujos de sedimentos hiperconcentrados (flujos de lodo y escombros). Webinar.
- FLO-2D Inc. (2015). Introducción al Modelo FLO-2D Pro. Presentación.
- Hydronia. (2018). RiverFlow2D-Modelo bidimensional de inundaciones y dinámica de ríos. Manual de referencia.
- Julien, P., y O'Brien, J. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. Journal of Hydraulic Engineering, 114(8), 877-887.
- Mockus, V. (2008). Design Hydrographs. Hydrology. Chapter 21. En National Engineering Handbook. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture. Disponible en <https://directives.sc.egov.usda.gov/opennonwebcontent.aspx?content=31542.wba>
- O'Brien, J. (2017). FLO-2D. User's manual. FLO-2D Software. Inc., Nutrioso.

Índice de figuras

Figura 1. Localización movimiento en masa en la microcuenca de la quebrada Chontaduro	7
Figura 2. Localización del trazado vial propuesto por Invias	8
Figura 3. Modelo digital de elevación y ortomosaico generados a través de vuelos con UAV en la zona del movimiento en masa	8
Figura 4. Mapa geológico del municipio de Rosas – Cauca a escala 1:100.000	10
Figura 5. Vista general del movimiento en masa (MM) en la quebrada Chontaduro (municipio de Rosas, Cauca)	11
Figura 6. Sector del movimiento en masa, sobre el tramo destruido de la carreta Panamericana	12
Figura 7. Sector del movimiento en masa, cercano al tramo destruido de la carreta Panamericana	13
Figura 8.. Conjunto de capas tabulares medias a gruesas de depósitos de lahares hiperconcentrados arenosos (depósitos epiclásticos), bien seleccionados, semi-compactos, asociados a la Formación Galeón	14
Figura 9. Encharcamientos de agua sobre el cuerpo del movimiento en masa y sobre los depósitos de flujos generados y acumulados a partir de éste	15
Figura 10. Antiguos depósitos volcánicos de la Formación Galeón	16
Figura 11. Suelos residuales de depósitos volcánicos de la Formación Galeón	16
Figura 12. Capas endurecidas y fracturadas de cenizas de caída, de 3 m de espesor	17
Figura 13. Intercalación de unos 7 m de espesor, de capas de depósitos de cenizas de caída (superficie), lahares hiperconcentrados arenosos, flujos piroclásticos (en el medio y la base) y una capa gruesa de un depósito fluviotorrencial que se pincha a la derecha (en el medio)	18
Figura 14. Mapa de hipsometría de un área regional y detalles de las fallas geológicas que cruzan la región	19
Figura 15.. Mapa de Elementos geomorfológicos del movimiento en masa	20
Figura 16. Perfil tridimensional mostrando la corona inicial del MM y la superficie de corte del MM para el día 09 de enero de 2023	21
Figura 17. Perfil tridimensional mostrando la evolución de corona inicial del MM y la superficie aproximada de la superficie de corte del MM	21
Figura 18. Perfil tridimensional mostrando el sector de la vía alterna	22
Figura 19. Mapa basado en conocimiento de eventos similares en el territorio colombiano para delimitar la porción de terreno de depósitos relictos que se ubican hacia la parte superior del MM	23
Figura 20. Precipitación media mensual (PMM) para la estación Párraga, expresada en milímetros/mes	24
Figura 21. Serie de tiempo de precipitación para la estación Párraga (1995-2023), expresada en mm/día	25
Figura 22. Precipitación media multianual (PMA) para la estación Párraga, expresada en mm/año	25
Figura 23. Histograma que representan la lluvia acumulada para 30 días antes del evento	26
Figura 24. Histograma que representa la lluvia acumulada para 15 días antes del evento	26
Figura 25. Ajuste de serie de precipitaciones máximas en 24 horas	28
Figura 26. Información sísmica de la RSNC para una zona de 50 km de radio alrededor del centroide	29
Figura 27. Cerro Broncazo	30
Figura 28. Vista 3D desde la zona de inicio del movimiento en masa	31
Figura 29. Vista en planta del deslizamiento de Chontaduro	32
Figura 30. Fotogramas de vuelo de dron del 10 de enero de 2023	33
Figura 31. Detalle de los encharcamientos generados en la zona adyacente a la corona	33
Figura 32. Evolución de la corona del deslizamiento de Chontaduro	34
Figura 33. Grietas de tensión y escarpes observados en el flanco derecho, sector Santa Clara	35
Figura 34. Grietas de tensión y escarpes observados en el flanco izquierdo, sector La Gallera, vereda La Soledad	35
Figura 35. Flanco derecho en el sector de la escuela de Párraga Viejo	36
Figura 36. Flujos en la pata o pie del movimiento en masa de Chontaduro	36
Figura 37. Drenaje principal quebrada Chontaduro, desde la vía Panamericana hasta el río Esmita	37
Figura 38. Imágenes del sector de la vía Panamericana en la vereda Chontaduro sobre el cauce de la quebrada Chontaduro	38
Figura 39. Flujo en el sector vereda Chontaduro en el cruce con la vía Panamericana, costado oeste de la	

Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca

quebrada.	39
Figura 40. Registro del flujo del día 9 de enero de 2023 en el sector de la vereda Chontaduro	40
Figura 41. Registro del flujo del día 10 de enero de 2023 en el sector de la vereda Chontaduro	40
Figura 42. Registro del flujo del día 11 de enero de 2023 en el sector de la vereda Chontaduro	41
Figura 43. Avance del depósito en la zona de la vía Panamericana entre los días 9 y 13 de enero de 2023 en el sector de la escuela de la vereda Chontaduro	42
Figura 44. Tamaños de las partículas gruesas contenidas en una matriz fina en el depósito que se viene conformando en el sector de la vía Panamericana cerca a la escuela de Chontaduro.	43
Figura 45. Evolución espacial del movimiento en masa	45
Figura 46. Hidrógrafa unitaria sintética empleada para las simulaciones con RiverFlow2D	47
Figura 47. Dominio de modelación e imagen de la malla computacional generada en el modelo RiverFlow2D®, junto con los puntos de arranque (entradas) de las simulaciones	48
Figura 48. Flujo ocurrido en la quebrada Chontaduro el 9 de enero de 2023 predominante de matriz fina	49
Figura 49. Modelo reológico utilizado en las modelaciones hidrodinámicas en RiverFlow2D®	49
Figura 50. Alturas de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro	50
Figura 51. Vista en planta del área aledaña al trazo vial propuesto por Invias	51
Figura 52. Velocidades de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro	52
Figura 53. Dominio de modelación e imagen de la malla computacional generada en el modelo RiverFlow2D®, junto con los puntos de arranque (entradas) de las simulaciones	54
Figura 54. Parámetros de modelación FLO-2D Pro ©	55
Figura 55. Alturas de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro	56
Figura 56. Vista en planta del área aledaña al trazo vial propuesto por Invias	57
Figura 57. Velocidades de flujo a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro	58
Figura 58. Alturas de flujo para el escenario 1 a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro	61
Figura 59. Alturas de flujo para el Escenario 2 a lo largo del cauce de la quebrada Chontaduro	63
Figura 60. Vista en planta de la localización de la sección transversal (A-A') sobre el eje vial propuesto por Invias, en la que se observa en escala hipsométrica la altura alcanzada por el flujo	64
Figura 61. Sección transversal A-A'. Se muestra en color azul la lámina del flujo simulado con Titan2D, de acuerdo con los resultados obtenidos con la simulación computacional para un volumen de 1,7x106 m3	65

Índice de tablas

Tabla 1. Registros máximos de precipitación (mm) en 24 horas de cada año	27
Tabla 2. Personas afectadas por vereda	30
Tabla 3. Parámetros de entrada principales de la simulación computacional – Escenario 1 – Titan2D	60
Tabla 4. Resultados de la simulación de flujos de tierra para un volumen $1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$	62
Tabla 5. Parámetros de entrada principales de la simulación computacional – Escenario 2 – Titan2D	62
Tabla 6. Resultados de la simulación para el Escenario 2 para un volumen $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$	64