



Informe mensual de actividades

Anexo WP1.2.5 Modelación de avenidas
torrenciales

Fecha de 2025



Contrato

CCT 261 de 2025

Contenido

Introducción	2
Área de estudio inicial	2
WP1.2.5 Priorización de cuencas	4
Metodología	4
Variables consideradas	6
Análisis Multicriterio con lógica difusa	9
Resultados	10
Discusión y conclusiones	14
WP1.2.5 Modelación de Avenidas Torrenciales	15
Metodología	15
Resultados	16
Discusión y conclusiones	18
WP1.2.5 Diseño de Sensores	20
Metodología	20
Resultados	22
Discusión y conclusiones	33
Referencias	35

WP1

Observatorio de amenazas y riesgos

Este WP tiene como objetivo generar conocimiento que sirva como insumo para la alerta temprana y la toma de decisiones a partir del monitoreo, análisis, modelación y generación de alarmas y alertas sobre múltiples componentes físicos, a través de actividades de investigación y operaciones que permitan avanzar en la caracterización, entendimiento, seguimiento y pronóstico de múltiples amenazas ambientales y evaluación de riesgos asociados.

Se avanzará en la consolidación del observatorio de múltiples amenazas, el cual es fundamental dada la variedad de amenazas que pueden impactar la sociedad y el territorio. Para este fin, el WP1 está constituido por tres grandes grupos de actividades: WP1.1 - Caracterización y monitoreo de variables y procesos asociados con las amenazas. El grupo WP1.2 - Modelación y pronóstico de la calidad del aire, las lluvias y otros fenómenos asociados con las amenazas. Por último, el grupo WP1.3 - Información para la gestión y herramientas operacionales que permitan la consolidación del observatorio de amenazas y riesgos en su primera fase, para el apoyo a emergencias, se enfoca en la aplicación (transferencia) de esta investigación a las operaciones para generar alertas y apoyar la gestión, a través de la consolidación de un observatorio multi-amenaza.

Introducción

Una avenida torrencial se entiende como un flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con altas pendientes longitudinales, originado generalmente por lluvias intensas, y que transporta una mezcla de agua y sólidos en distintas proporciones (Servicio Geológico Colombiano and Pontificia Universidad Javeriana, 2021). El material sólido puede provenir tanto de las laderas como del lecho del cauce, y se deposita cuando el flujo alcanza zonas de menor pendiente, generando acumulaciones a lo largo de su trayectoria (Servicio Geológico Colombiano and Pontificia Universidad Javeriana, 2021). Estos eventos constituyen una de las amenazas hidrometeorológicas más destructivas, con un elevado potencial de pérdida de vidas humanas y daños económicos, especialmente en regiones tropicales y montañosas como Colombia (Aristizábal et al., 2020). Su ocurrencia repentina, gran energía y capacidad de transporte de material hacen que representen un riesgo considerable para las comunidades asentadas en zonas de influencia, lo que plantea la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo, alerta y gestión del riesgo.

La línea de investigación aquí desarrollada se centra en la identificación y análisis de cuencas con susceptibilidad a la ocurrencia de avenidas torrenciales, orientándose a la selección de cinco cuencas que sirvan como base para elegir una cuenca piloto destinada al diseño de estrategias de monitoreo y alerta temprana. Para ello, se priorizaron aquellas cuencas que ya cuentan con algún Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC) activo para inundaciones o multiamenaza, de manera que se facilite la apropiación social y la integración de la comunidad en el proceso de gestión del riesgo. El marco metodológico propuesto se articula en tres fases complementarias.

La primera fase corresponde a la priorización de cuencas, mediante la aplicación de un análisis multicriterio que integra variables geomorfológicas, hidrometeorológicas, sociales y de exposición, con el fin de establecer un ranking preliminar que permita identificar aquellas cuencas con mayor potencial torrencial.

En la segunda fase, correspondiente a la modelación física y empírico-numérica, se inicia con la determinación de las masas potencialmente inestables mediante modelos físicos de estabilidad como SHALSTAB y TRIGRS, empleados en la línea de investigación de movimientos en masa de tipo húmedo. Una vez identificadas estas zonas críticas, se procede a modelar la propagación de los materiales que podrían originar una avenida torrencial, utilizando herramientas empírico-numéricas como r.avaflow y Flow-R. Estos modelos, alimentados con insumos como modelos digitales de elevación, delimitación de áreas fuente y parámetros hidrometeorológicos, permiten generar escenarios de susceptibilidad espacial y mapas de amenaza, a partir de los cuales se evalúa la posible afectación sobre la población y la infraestructura. Como resultado conjunto de estas dos fases se obtiene la selección de la cuenca piloto, que será objeto de instrumentación detallada.

Finalmente, la tercera fase contempla el diseño e implementación de una red de sensores, instalada tanto en la zona fuente como en la zona de tránsito de la cuenca seleccionada, con énfasis en los sectores de mayor riesgo y en aquellas áreas más expuestas a la ocurrencia de avenidas torrenciales. Este escenario constituye la base para un análisis detallado y la propuesta de instrumentación. La red permitirá registrar en tiempo real variables hidrometeorológicas y geotécnicas clave, con el propósito de generar alertas tempranas oportunas y fortalecer la capacidad de respuesta y prevención de la comunidad frente a este tipo de eventos.

Área de estudio inicial

El análisis de avenidas torrenciales se fundamenta en la capacidad de respuesta de una cuenca hidrográfica ante eventos de lluvia y en el aporte de sedimentos, por lo que es importante definir la unidad territorial que influye en los comportamientos hidrológicos de los cauces. Este estudio aborda un análisis regional de las cuencas tributarias del río Aburrá, considerando aquellas con influencia directa en los nueve municipios

del Valle de Aburrá y en el Distrito de Medellín, en la Figura 1 se puede ver el área de estudio.

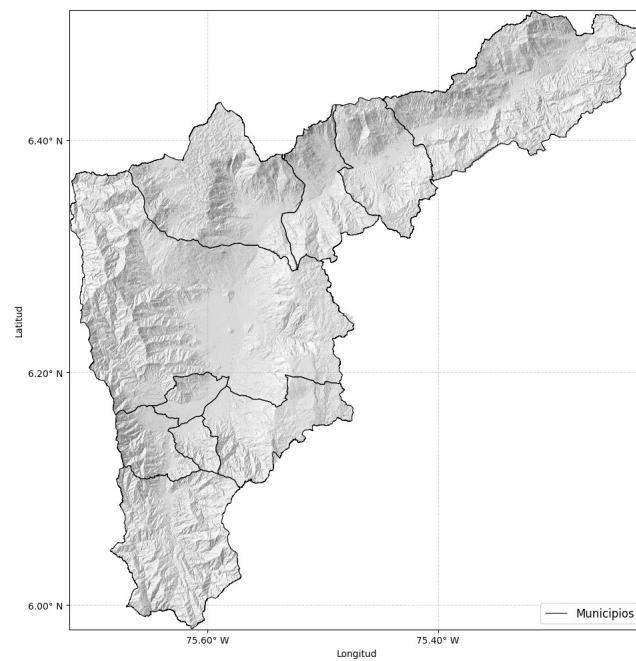


Figura 1. Área de estudio inicial.

WP1.2.5

Priorización de cuencas

Metodología

La metodología diseñada integra un análisis multicriterio que considera variables morfométricas, hidrometeorológicas, de exposición y antecedentes de eventos, priorizando aquellas cuencas con mayor potencial de generar impactos y con mayor disponibilidad de datos históricos en sus sensores. Con ello, se busca facilitar la apropiación social, realizar la selección dentro del Valle de Aburrá y, a partir de las cuencas priorizadas, efectuar modelaciones en la zona de tránsito, así como un análisis del grado de exposición de las estructuras, para finalmente definir la cuenca piloto que será instrumentada.

El proceso inició de la mano con el equipo Social con la identificación de cuencas que ya contaban con algún Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC) o sistema de instrumentación, ya fuera por inundación o por multiamenaza, con el fin de facilitar la apropiación social y el trabajo comunitario en fases posteriores. Se seleccionaron 52 cuencas distribuidas a lo largo del Valle de Aburrá, las cuales constituyen la base para la aplicación de la metodología de priorización. Adicionalmente, se realizaron visitas a las unidades de gestión del riesgo de cada municipio, con el propósito de recopilar información sobre aquellas cuencas que, aun sin contar con procesos comunitarios avanzados, presentan recurrencia de crecientes súbitas o han registrado históricamente eventos de avenidas torrenciales. De esta manera, se garantiza que el proceso de priorización no se limite únicamente a las cuencas con SATC existentes, sino que incorpore también el conocimiento territorial y las experiencias locales de gestión del riesgo.

En la Figura 2 se puede observar todo el proceso metodológico propuesto para la selección de la cuenca y piloto de instrumentación.

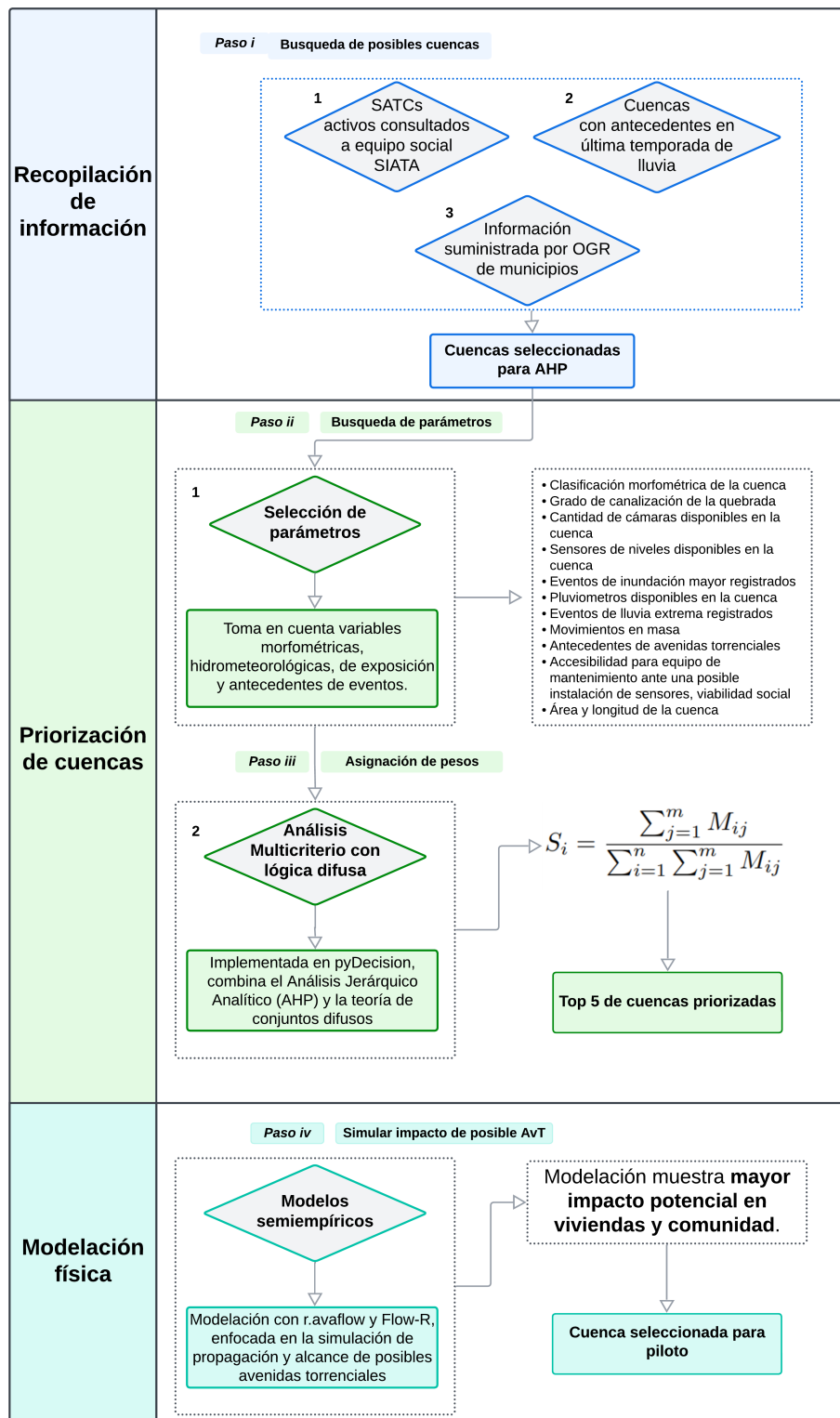


Figura 2. Metodología para priorización de cuencas torrenciales.

Variables consideradas

Para priorizar las cuencas, se aplicó un primer filtro a partir del análisis multicriterio que considera un total de 11 variables evaluadas para cada cuenca (Tabla 1).

Tabla 1. Variables consideradas en el análisis multivariado para la priorización de cuencas.

Variable	Descripción
TF	Clasificación torrencial según parámetros morfométricos presentados en la vigencia pasada.
CN	Grado de canalización.
CM	Número de cámaras
N	Número de niveles disponibles
CIM	Número de eventos de inundación mayor registrados.
P	Número de pluviómetros ubicados a menos de 1 km del nivel
CEEL	Número de eventos extremos de lluvia medidos en pluviómetros
MM	Existencia de movimientos en masa
AVT	Existencia de eventos torrenciales
LOG	Accesibilidad (vías, caminos, estaciones, torres eléctricas) y social
ÁREA	Tamaño de la cuenca y longitud de cuenca

Clasificación torrencial según análisis morfométrico (TF):

Esta clasificación fue desarrollada en el marco de la presente línea de investigación durante la vigencia anterior, a partir del análisis morfométrico de las cuencas. Para el presente análisis jerárquico, cada categoría se valoró de la siguiente forma:

- 1: Inundación.
- 2: Inundación de escombros.
- 3: Flujos de escombros no granulares.
- 4: Flujos de escombros granulares.

La asignación de estos valores se debe a que los flujos de escombros granulares corresponden a fenómenos monofásicos con comportamiento reológico no newtoniano, caracterizados por altas concentraciones de sólidos y elevada energía cinética, lo que incrementa significativamente su capacidad destructiva. Por otro lado, las inundaciones de escombros y los flujos no granulares presentan menores concentraciones sólidas o una dinámica más dispersa, lo que reduce su energía.

Grado de canalización (CN):

Esta variable evalúa el grado de intervención antrópica en los cauces principales de las cuencas, bajo el criterio de que un cuerpo de agua más cercano a su estado natural favorece la conservación de procesos hidrológicos y geomorfológicos propios, lo que permite un comportamiento más representativo en los análisis morfodinámicos. La asignación de valores se definió de la siguiente manera:

- 1: Cuerpos de agua totalmente canalizados.
- 2: Cuerpos de agua parcialmente canalizados.
- 3: Cuerpos de agua sin ningún tramo canalizado (condición totalmente natural).

La evaluación del estado de canalización se realizó por medio de imágenes satelitales de SAS Planet y Google Earth, identificando tramos de encauzamiento artificial, además de fotografías en noticias.

Cantidad de cámaras (CM):

Esta variable contabiliza únicamente las cámaras activas a la fecha ubicadas dentro de la cuenca, ya sean de medición de nivel o de monitoreo de algún proceso.

Niveles y Pluviómetros

Para las variables descritas a continuación, en sus respectivos eventos extremos, se realizó un conteo (frecuencia) de eventos en escala mensual, para posteriormente obtener un promedio global de ocurrencia por punto, la normalización se realizó a partir de este promedio global.

Sensores de niveles disponibles (N) y eventos de inundación mayor (CIM):

Corresponde al producto entre la cantidad de sensores de nivel instalados en la cuenca y la antigüedad, en años, del sensor más antiguo. El objetivo no era únicamente contabilizar el número de niveles disponibles, sino también tener en cuenta el tiempo de operación de estos, ya que un mayor histórico de datos significa una ventaja para futuros procesos de modelación hidrológica e hidráulica. Para la cantidad de instrumentos de nivel (N) se realizó una normalización logarítmica min-max, para esto se utilizó la siguiente ecuación empírica:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x) - \ln(x_{\text{mín}})}{\ln(x_{\text{máx}}) - \ln(x_{\text{mín}})} \quad (1)$$

Para el procesamiento de los eventos de inundación mayor del nivel se aplicó la siguiente ecuación empírica:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}{\ln(x_{\text{máx}} + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}$$

donde x representa el valor original de la variable, $x_{\text{mín}}$ corresponde al valor mínimo positivo observado en el conjunto de datos, y $x_{\text{máx}}$ es el valor máximo observado. El parámetro de ajuste ϵ se utiliza para manejar la presencia de ceros: si la variable contiene valores nulos, como en el caso de CIM, se adopta $\epsilon = 1$ para emplear $\ln(x + 1)$ y así evitar problemas de cálculo. Esta transformación permite reducir la asimetría de los datos, controlar el efecto de valores extremos y asegurar que los mínimos se escalen a 1,00 y los máximos a 4,00, manteniendo una distribución proporcional entre los valores intermedios.

Pluviómetros disponibles (P) y Eventos de Lluvia Extrema (CEEL):

Esta variable se obtiene multiplicando la cantidad de pluviómetros ubicados a menos de 1 km de distancia de un sensor de nivel por la antigüedad, en años, del pluviómetro más antiguo dentro de ese rango. El propósito es identificar no solo la densidad de pluviómetros en áreas críticas de monitoreo, sino también la calidad temporal de la información disponible. Si el sensor más cercano sobrepasaba el kilómetro de umbral, se penalizaban su peso proporcional a la distancia extra. Para la cantidad de pluviómetros (P) se realizó una normalización logarítmica min-max con la siguiente ecuación empírica:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x) - \ln(x_{\text{mín}})}{\ln(x_{\text{máx}}) - \ln(x_{\text{mín}})} \quad (2)$$

Para el procesamiento de los eventos de lluvia extrema se aplicó la siguiente ecuación empírica como en CIM:

$$x_{\text{norm}} = 1 + 3 \cdot \frac{\ln(x + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}{\ln(x_{\text{máx}} + \epsilon) - \ln(x_{\text{mín}} + \epsilon)}$$

donde x representa el valor original de la variable, $x_{\text{mín}}$ corresponde al valor mínimo positivo observado en el conjunto de datos, y $x_{\text{máx}}$ es el valor máximo observado. El parámetro de ajuste ϵ se utiliza para manejar la presencia de ceros. En este caso para variables sin ceros, como CEEL, se utiliza $\epsilon = 0$, aplicando directamente $\ln(x)$. Esta transformación permite reducir la asimetría de los datos, controlar el efecto de valores extremos y asegurar que los mínimos se escalen a 1,00 y los máximos a 4,00, manteniendo una distribución proporcional entre los valores intermedios.

Movimientos en masa (MM):

Esta variable busca identificar si la cuenca presenta un escenario de multiamenaza, considerando que la ocurrencia previa de movimientos en masa constituye un indicador clave del potencial de aporte sólido a futuros eventos torrenciales. Se asigna un valor de 1 cuando se confirma la existencia de movimientos en masa y 0 cuando no se registran. En los casos donde la calidad o disponibilidad de imágenes satelitales no permite verificar la presencia se asigna un valor de 0.5.

Antecedentes de avenidas torrenciales (AVT):

Esta variable evalúa la existencia de registros históricos que evidencian la ocurrencia de eventos torrenciales en la cuenca, tales como noticias, reportes técnicos, entre otros. Se asigna un valor de 1 cuando la información confirma la ocurrencia previa de estos eventos y 0 cuando no existen antecedentes documentados. La inclusión de esta variable permite priorizar cuencas con historial de actividad torrencial comprobada, ya que este antecedente incrementa la probabilidad de recurrencia.

Lógica (LOG):

Esta variable se relaciona con los aspectos logísticos necesarios para la instalación, operación y mantenimiento de la instrumentación en la cuenca. La accesibilidad se evaluó a partir de la facilidad de ingreso a

la zona fuente y a los tramos de interés, considerando la existencia de vías, caminos o senderos que permitan el transporte de equipos y personal técnico. Adicionalmente, cada cuenca fue valorada por el equipo social de SIATA, teniendo en cuenta factores asociados a las comunidades, aspectos sociales, condiciones de accesibilidad y observaciones complementarias. La valoración se realiza en una escala de 1 a 4, donde valores más altos corresponden a cuencas con mejor acceso, lo que facilita las actividades de instalación.

Área de la cuenca y Longitud (AREA):

Esta variable hace referencia a la extensión superficial total de la cuenca. Su valoración se fundamenta en que cuencas más pequeñas presentan una mayor propensión a generar procesos torrenciales destructivos (Ilinca, 2021), donde la combinación de áreas reducidas y altos valores del índice de Melton se asocia con la ocurrencia de flujos de detritos (DF) o flujos de detritos e inundaciones combinadas (DFD). Por el contrario, cuencas de gran tamaño tienden a disipar la energía del escurrimiento y suelen estar asociadas principalmente a inundaciones (F). En consecuencia, dentro del proceso de priorización se asignan valores más altos a cuencas de menor área y longitud, dado que representan escenarios de mayor amenaza torrencial y, por tanto, requieren una atención prioritaria en términos de monitoreo e instrumentación.

Para los valores de área y longitud, la normalización utilizada se definió de forma empírica a partir de los límites establecidos por Ilinca (2021), con el objetivo de ajustar los valores en una escala [1, 4]. Este procedimiento penaliza principalmente a las cuencas muy grandes, donde predomina el riesgo de inundación, asignándoles valores más bajos dentro de la escala. Los límites definidos fueron: $A_{ideal} = 1,1 \text{ km}^2$, $A_{máx} = 8,2 \text{ km}^2$, $P_{obj,area} = 0,51$, $L_{ideal} = 1,7 \text{ km}$, $L_{máx} = 5,2 \text{ km}$ y $P_{obj,len} = 0,857$. A partir de estos parámetros, los coeficientes de penalización calculados fueron: $\alpha \approx 0,1353$ y $\beta \approx 0,0475$.

$$V_A = 1 + \frac{3}{1 + \alpha \cdot \text{máx}(0, A - A_{ideal})} \quad (3)$$

$$V_L = 1 + \frac{3}{1 + \beta \cdot \text{máx}(0, L - L_{ideal})} \quad (4)$$

$$V_{AHP} = 1 + \frac{3}{1 + \alpha \cdot \text{máx}(0, A - A_{ideal}) + \beta \cdot \text{máx}(0, L - L_{ideal})} \quad (5)$$

Análisis Multicriterio con lógica difusa

Para la asignación de pesos a las variables anteriores, se optó por seguir una metodología de análisis jerárquico con lógica difusa, implementada en pyDecision, desarrollada por Pereira et al. (2024). Este enfoque estructura el proceso de toma de decisiones mediante la combinación del Análisis Jerárquico Analítico (AHP) y la teoría de conjuntos difusos, permitiendo manejar la incertidumbre en los juicios expertos a través de números triangulares difusos. Tras definir una jerarquía de criterios y alternativas, se construye una matriz de comparación por pares donde cada elemento a_{ij} se representa como un número triangular difuso (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) . Para cada alternativa, se calcula el valor sintético difuso siguiendo la ecuación:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^m M_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij}} \quad (6)$$

donde M_{ij} denota la evaluación triangular difusa de la alternativa i respecto al criterio j . Finalmente, los pesos obtenidos se normalizan y permiten priorizar alternativas de manera robusta, integrando tanto información cuantitativa como cualitativa con fundamento matemático sólido y adecuado para su implementación directa en ambientes de incertidumbre. Para evaluar si los pesos obtenidos son consistentes, la librería permite el uso de el índice de Consistencia (Consistency Ratio, CR). En el método AHP es una medida que evalúa la coherencia de las comparaciones pareadas realizadas por el tomador de decisiones. Este índice se calcula como la razón entre el Índice de Consistencia (CI) de la matriz de comparación y un Índice Aleatorio (RI), que representa la consistencia esperada de matrices generadas al azar. Un CR menor o igual al 0.10 indica que las comparaciones son suficientemente consistentes y coherentes, por lo que los resultados del análisis son confiables.

Resultados

A partir de las 11 variables analizadas, se construyó una matriz normalizada de parámetros para el análisis jerárquico, esta se puede visualizar en la Figura 3. Eventualmente, estos valores se usan con los pesos encontrados mediante el análisis AHP con lógica difusa.

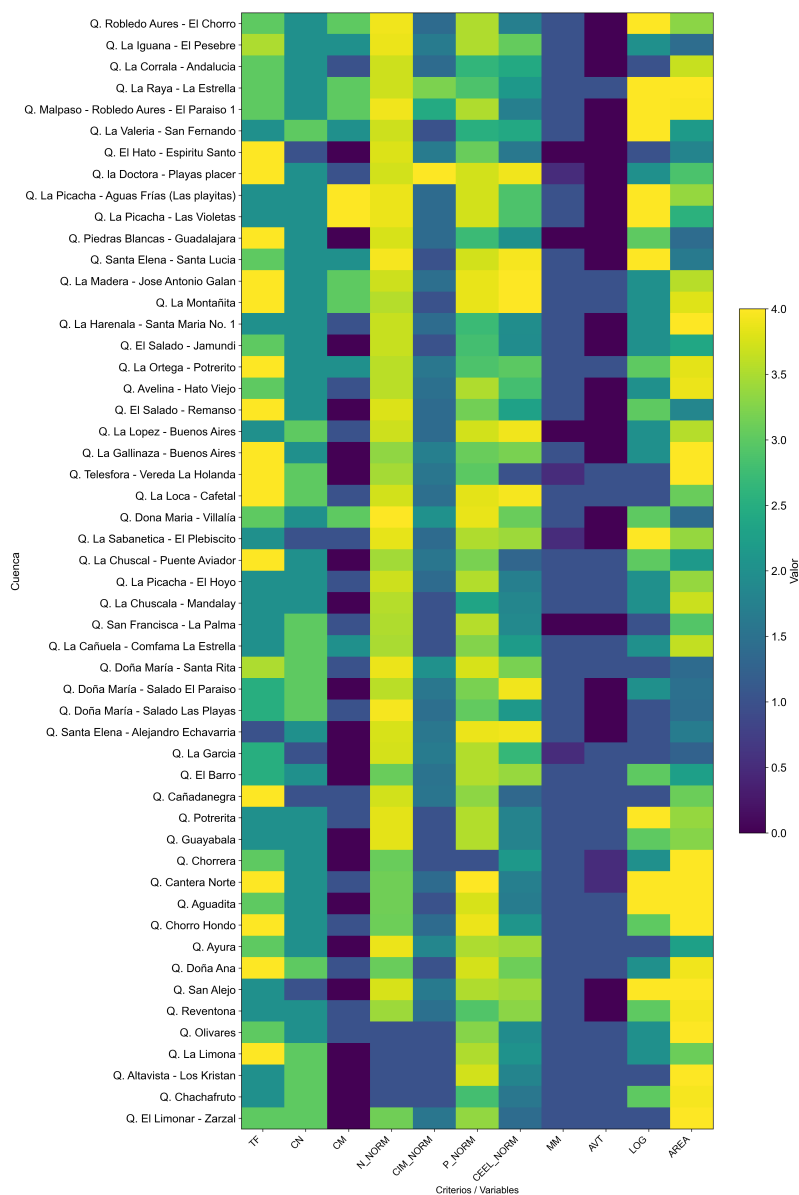


Figura 3. Matriz de variables.

A partir de la matriz de comparación por pares mostrada en la Figura 4, se establecieron las relaciones de importancia relativa entre los criterios evaluados. A partir de esta matriz, mediante el uso de PyDecision, se calcularon los pesos normalizados para cada variable.

Los resultados indican que la mayor influencia corresponde a los eventos de inundación mayor (CIM_NORM), seguidos por los eventos extremos en intensidad y duración de lluvia registrados en pluviómetros cercanos (CEEL_NORM). En contraste, la disponibilidad de cámaras (CM) presentó la menor ponderación.

La Tabla 2 presenta el detalle de los pesos expresados en porcentaje para cada variable. Adicionalmente, se obtuvo un valor de $CR = 0.05$, lo que confirma que la matriz de comparación por pares es consistente

y que los valores establecidos minimizan el sesgo en el proceso de priorización.

	TF	CN	CM	N_NORM	CIM_NORM	P_NORM	CEEL_NORM	MM	AVT	LOG	AREA
TF	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)	(2, 2.5, 3)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
CN	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
CM	(0.33, 0.5, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.33, 0.5, 0.67)
N_NORM	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.5, 0.67)	(0.33, 0.5, 0.67)
CIM_NORM	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)
P_NORM	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
CEEL_NORM	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)
MM	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
AVT	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(0.5, 0.67, 1)	(0.5, 0.67, 1)
LOG	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)
AREA	(1, 1.5, 2)	(1, 1.5, 2)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)

Figura 4. Matriz de números triangulares.

Tabla 2. Pesos normalizados de las variables obtenidos con PyDecision.

Variable	Peso (%)
CIM_NORM	13.4
CEEL_NORM	12.5
LOG	11.7
AREA	11.0
TF	9.5
CN	8.5
P_NORM	8.0
MM	7.5
AVT	7.0
N_NORM	5.7
CM	5.3

Con la asignación de pesos obtenida a partir de la matriz de comparación por pares y teniendo la matriz mencionada en la Figura 3, se realiza el calculo para la priorización. En la Tabla 3 se presentan las 10

primeras cuencas priorizadas resultantes del proceso de selección. Estas cuencas corresponden a aquellas con los puntajes más altos en el análisis multivariado.

Tabla 3. Top 10 de cuencas priorizadas según los puntajes obtenidos en el análisis AHP.

Rank	Cuenca	AHP_Score
1	Q. La Raya - La Estrella	0.7642
2	Q. La Madera - Jose Antonio Galan	0.7268
3	Q. La Montañita	0.7132
4	Q. La Ortega - Potrerito	0.6978
5	Q. Doña Ana	0.6838
6	Q. La Loca - Cafetal	0.6821
7	Q. La Doctora - Playas placer	0.6718
8	Q. Chorro Hondo	0.6635
9	Q. Malpaso - Robledo Aures	0.6630
10	Q. Cantera Norte	0.6552

Además, con el propósito de visualizar de manera integral y dinámica los resultados de la priorización de cuencas, se desarrolló un tablero interactivo en Power BI (Figura 5). En la parte superior izquierda se incluyen los criterios considerados en el análisis multicriterio, mientras que en la sección central se disponen dos mapas dinámicos asociados a las variables con mayor peso en el AHP: eventos extremos de lluvia y eventos de inundación mayor. Estos mapas permiten identificar de forma detallada las cuencas con mayor frecuencia en dichos eventos. Como apoyo visual estático, se incorporó la variable de logística, también relevante en el análisis, junto con el mapa de ranking final, el cual espacializa las cuencas priorizadas según su clasificación en las categorías Top 5, Top 10, Top 20 y Top 52. Finalmente, en la parte derecha del tablero se incluyó un gráfico de barras dinámico, que presenta para cada cuenca los valores obtenidos en cada criterio; al seleccionar una cuenca específica, el tablero realiza un zoom out en los mapas de eventos extremos de lluvia y de inundación mayor, facilitando así una exploración detallada y comparativa de la información.

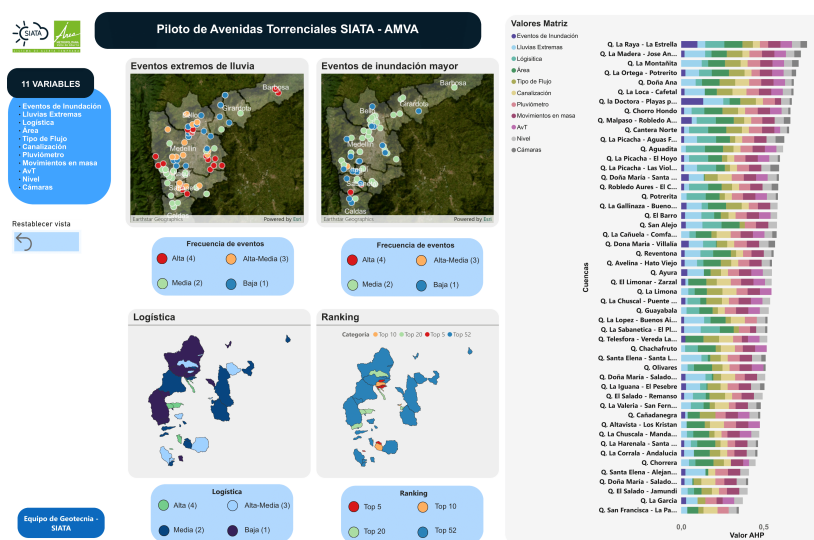


Figura 5. Tablero dinámico en Power BI para la visualización de resultados de priorización de cuencas.

Discusión y conclusiones

Este informe presenta una metodología para la priorización de cuencas en el Valle de Aburrá en el marco del piloto de avenidas torrenciales. Los resultados obtenidos muestran la priorización de 47 cuencas previamente seleccionadas, con base en la existencia de Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC), esquemas de instrumentación para la medición de lluvia y nivel, cámaras de monitoreo de quebradas, además de parámetros morfométricos y criterios logísticos. La metodología planteada constituye la base para la clasificación y selección de cuencas que serán sometidas a modelación hidrológica e hidráulica con el fin de evaluar aspectos relacionados con la exposición y la posible población afectada por flujos torrenciales.

En los resultados preliminares, obtenidos mediante la aplicación de la metodología AHP con lógica difusa y en una reunión con el equipo Social se descartó, se estableció un orden de importancia para las cuencas priorizadas. Entre las que mostraron características más críticas se encuentran: La Madera - Jose Antonio Galán, La Montañita, La Raya, La Loca - Cafetal, Chorro Hondo, La Ortega - Potrerito, la Doctora - Playas Placer, Malpaso - Robledo Aures, Cantera Norte y Doña Ana, las cuales se perfilan como posibles candidatas prioritarias para análisis más detallados.

Durante la revisión se identificaron inconsistencias en los shapefiles de las cuencas, los cuales fueron corregidos hidrológicamente, asegurando así resultados más confiables.

Adicionalmente, se elaboró un tablero interactivo en Power BI que permite visualizar de forma dinámica las variables priorizadas, en especial los eventos extremos de lluvia y de inundación mayor, así como la logística y el ranking final de cuencas. Esta herramienta facilita la interpretación de resultados y su comunicación a los tomadores de decisión.

WP1.2.5

Modelación de Avenidas Torrenciales

Metodología

Las avenidas torrenciales representan uno de los procesos gravitacionales más destructivos, resultado de la combinación entre la morfología del terreno, la disponibilidad y tipo de materiales movilizables (tanto en las laderas como en los cauces) y las condiciones hidrometeorológicas que favorecen su desencadenamiento (Iverson, 1997; Hungr et al., 2005). La mayoría de las veces, los deslizamientos de tierra actúan como el mecanismo desencadenante principal, ya que movilizan volúmenes significativos de material que pueden transformarse en flujos de lodo o escombros bajo condiciones de alta saturación (Takahashi, 2014; Páez Pedraza, 2025). Estos eventos suelen originarse por lluvias cortas y muy intensas o por precipitaciones moderadas y prolongadas que reducen progresivamente la cohesión de los materiales superficiales (Páez Pedraza, 2025; Chen et al., 2014). Por ello, la evaluación detallada de la amenaza por deslizamientos constituye un paso fundamental en la modelación de avenidas torrenciales, ya que permite estimar la magnitud del volumen potencialmente movilizable y comprender los procesos que conducen desde la inestabilidad inicial hasta la propagación del flujo y su posterior depositación. En esta fase, se busca identificar las zonas fuente, es decir, los sectores del terreno donde pueden generarse o acumularse volúmenes significativos de material susceptible de ser removido.

Posteriormente, la modelación del tránsito permite simular el desplazamiento del flujo a lo largo de la red de drenaje, considerando la morfología del terreno, la pendiente y la energía potencial disponible (Iverson, 1997; Major and Iverson, 1999). Finalmente, la fase de depositación representa la pérdida progresiva de energía y el emplazamiento del material transportado, lo cual posibilita estimar las áreas de acumulación y las posibles zonas de impacto. Este enfoque secuencial —de generación, propagación y depositación— constituye la base para la evaluación integral de la amenaza torrencial, al vincular los procesos de remoción en masa con la dinámica del flujo en el cauce y permitir la identificación de las zonas más críticas para la planificación y reducción del riesgo en las cuencas estudiadas.

Disponibilidad de sedimentos

Un aspecto relevante, aunque no siempre determinante, en el desarrollo de avenidas torrenciales es el aporte de sedimentos al flujo, ya que este factor puede condicionar si un flujo de escombros logra consolidarse en una cuenca. Según Cañón et al. (2021), dichos sedimentos pueden provenir de deslizamientos en las laderas o vertientes, de la erosión superficial de las mismas, o bien de la remoción del lecho y las márgenes del drenaje. Para cuantificar los aportes derivados de procesos de inestabilidad asociados a movimientos en masa, resulta fundamental la investigación en Estabilidad de Laderas, en la cual se han aplicado modelos como SHALSTAB y TRIGRS (para mayor información consultar el Anexo técnico: Modelación de movimientos en masa asociados al WP1.2.4 Modelación de movimientos en masa húmedos), que permiten aproximarse a la delimitación de zonas fuente dentro de cada cuenca.

Modelación del tránsito de las avenidas torrenciales

La modelación del tránsito de avenidas torrenciales puede abordarse desde diferentes enfoques, entre los que se destacan los empíricos, hidrodinámicos y de flujo de masa, cada uno con distintos niveles de complejidad y requerimientos de información. Para una priorización inicial de las áreas susceptibles, se recurrirá al modelo empírico Flow-R, aplicado en las cinco primeras cuencas del ranking. Este modelo, por su simplicidad en los datos de entrada y su eficiencia para identificar zonas potencialmente afectadas, constituye un criterio adicional de gran peso para la selección de la cuenca piloto a instrumentar.

Modelación empírica Flow-R, acrónimo de *Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale*, es una herramienta diseñada para evaluar la susceptibilidad espacial a procesos gravitacionales. Combina algoritmos de dirección de flujo con funciones de persistencia para generar mapas de susceptibilidad espacial y estimar la distancia máxima de recorrido de los flujos, basándose en leyes de fricción simplificadas (Horton et al., 2013). Esta metodología permite realizar análisis precisos y adaptables en función de las condiciones específicas del terreno.

El modelo utiliza como base el algoritmo de dirección de flujo de Holmgren (Holmgren, 1994) y su versión modificada (Horton et al., 2013), que ajusta la altura de la celda central mediante un factor dh . Para este análisis, se adopta un valor de $dh = 0,5$, lo que permite ajustar la propagación del flujo en función de las características locales. Este enfoque mejora la precisión en la representación de la divergencia del flujo, controlada mediante el exponente x del modelo, que en este caso se fija en $x = 1$. Ambos parámetros, x y dh , han sido calibrados específicamente para las condiciones topográficas y geomorfológicas del Valle de Aburrá, asegurando que los resultados reflejen con mayor exactitud la dinámica del flujo en esta región.

Las funciones de persistencia utilizadas en Flow-R asignan pesos diferenciados a las celdas vecinas para modelar la propagación del flujo (Gamma, 2000). Estas funciones priorizan la celda frontal con el peso más alto, mientras que asignan valores decrecientes a las celdas ubicadas a 45, 90 y 135°, y excluyen completamente a las celdas opuestas a 180° para evitar propagaciones hacia atrás. Entre las opciones disponibles, la función Gamma se emplea de manera predominante, ya que es la más utilizada y recomendada por los autores debido a su balance entre simplicidad y precisión. Por último, el control del alcance y distancia máxima recorrida por el flujo en el modelo se basa en el ángulo máximo de viaje o ángulo de alcance (Corominas, 1996; Heim, 1932). Para este análisis se usa un ángulo de 10°.

Resultados

Disponibilidad de sedimentos

Con el fin de evaluar los aportes potenciales de material inestable, se aplicaron los modelos de estabilidad de ladera (SHALSTAB y TRIGRS) en las cinco cuencas con mayor priorización en el ranking: La Raya, La Madera, Montañita, La Ortega y Doña Ana. La ejecución de estos modelos permite identificar y delimitar las principales zonas fuente de sedimentos en cada cuenca, aportando uno de los insumos para la modelación del tránsito de las avenidas torrenciales.

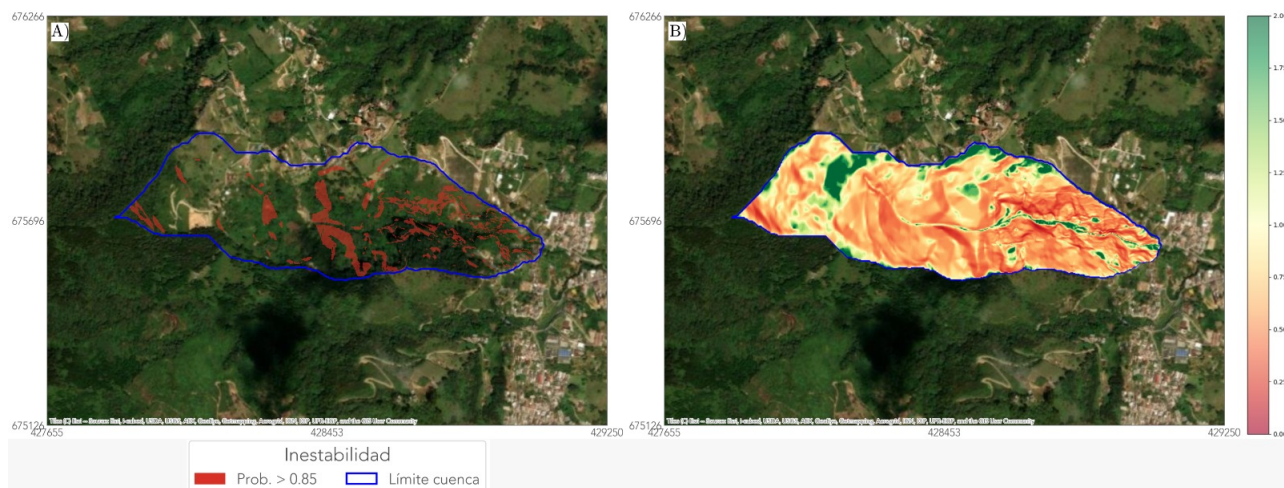


Figura 6. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca La Raya

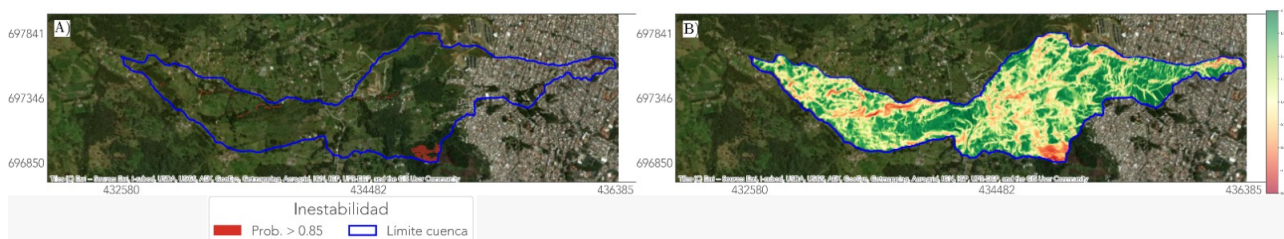


Figura 7. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca La Madera



Figura 8. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca Montañita

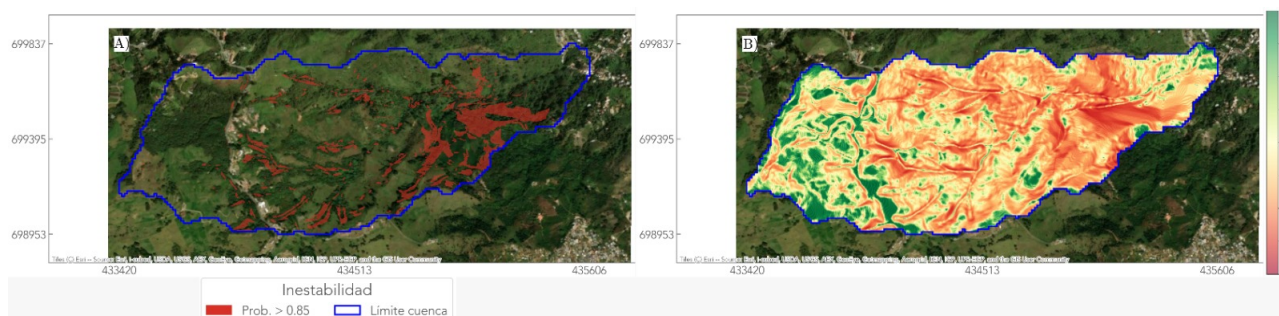


Figura 9. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca La Ortega

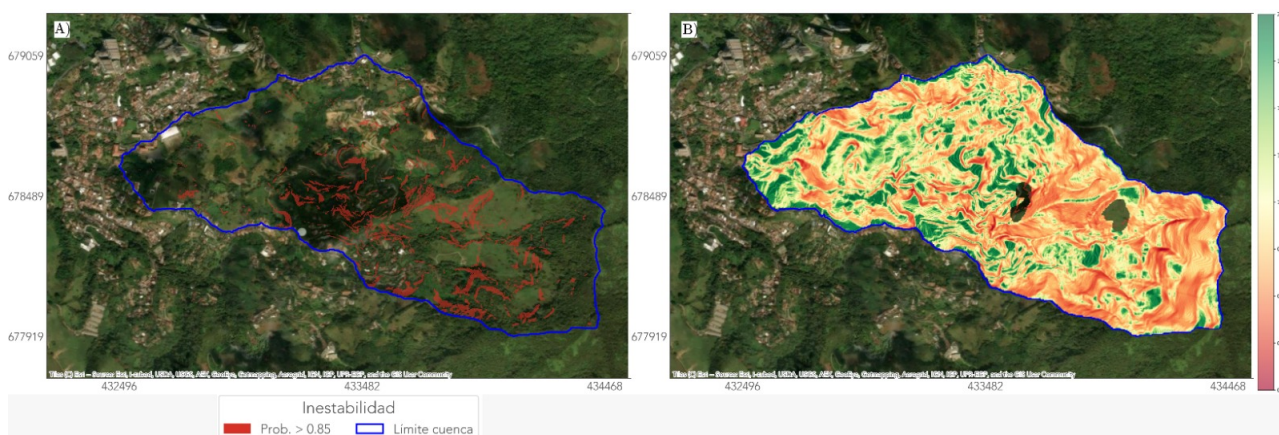


Figura 10. Zonas fuentes modeladas con: a) SHALSTAB y b) TRIGRS para la cuenca Doña Ana

En las Figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se presentan los resultados obtenidos con los modelos SHALSTAB y TRIGRS para las cuencas priorizadas. En cada panel (A) se muestra la zonificación de inestabilidad generada con SHALSTAB, donde se resaltan en color rojo las áreas con probabilidad de inestabilidad superior al 85 %, consideradas como zonas fuente potenciales de sedimentos. En cada panel (B) se observa la salida de TRIGRS, expresada en términos del factor de seguridad (FS); en este caso, aquellas áreas con $FS < 1$ son clasificadas como inestables, mientras que valores superiores indican condiciones más estables, de acuerdo con los criterios de estabilidad ampliamente aceptados en la literatura geotécnica (Medinaceli Tórrez, 2024). La comparación de ambas modelaciones muestra una coincidencia en la identificación de sectores críticos dentro de las cuencas; sin embargo, se resalta que en las cuencas La Madera y Montañita se identifican menores extensiones de zonas potencialmente inestables, lo que sugiere una menor disponibilidad de material susceptible de ser movilizado hacia el cauce principal en comparación con las demás cuencas priorizadas.

Discusión y conclusiones

La aplicación de los modelos de estabilidad SHALSTAB y TRIGRS tuvo como finalidad identificar y delimitar las zonas potencialmente inestables dentro de las cuencas priorizadas, con el propósito de estimar la disponibilidad de material susceptible de ser movilizado en un eventual evento torrencial. Estos

modelos constituyen una etapa previa esencial para la modelación del tránsito, ya que permiten reconocer las áreas fuente que podrían aportar sedimentos al cauce principal y, por tanto, condicionan la magnitud y el comportamiento del flujo. En términos generales, SHALSTAB concentró las áreas con probabilidad de inestabilidad superior al 85 % sobre laderas medias y altas, mientras que TRIGRS delimitó con mayor detalle los sectores con $FS < 1$.

A nivel comparativo, La Raya, La Ortega y Doña Ana presentan mayores extensiones de inestabilidad, por lo que se infiere una mayor disponibilidad de material susceptible de ser movilizado hacia el cauce principal. En contraste, La Madera y Montañita muestran áreas más acotadas de inestabilidad, lo que sugiere un menor aporte potencial. Estas diferencias son relevantes ya que se cuenta con una idea previa de la dinámica de la cuenca.

Finalmente, los resultados deben interpretarse a la luz de sus supuestos y fuentes de incertidumbre: los umbrales adoptados (85 % y $FS < 1$), parámetros hidráulicos y precipitación utilizados en la estabilidad transitoria.

WP1.2.5

Diseño de Sensores

Metodología

El desarrollo de esta etapa busca la evaluación de tecnologías y dispositivos para la implementación de un sistema de monitoreo y alerta en tiempo real basándose en una revisión y análisis del estado del arte sobre sistemas de alerta temprana para avenidas torrenciales

En un inicio se realizó una búsqueda sistemática de literatura científica y técnica orientada a identificar las metodologías y tecnologías utilizadas para la detección y monitoreo de avenidas torrenciales. En esta búsqueda se analizaron aspectos como:

- Tipo y principios de funcionamiento de los sensores utilizados (sísmicos, infrasónicos, hidrometeorológicos, ópticos, entre otros).
- Estrategias de adquisición y transmisión de datos (modos continuo y evento, envío de datos etc).
- Algoritmos y criterios para detección temprana (basados en umbrales, energía espectral, correlación multisensorial, etc.).
- Configuración espacial y operativa de las redes de monitoreo (estaciones, alimentación, comunicación).

En este análisis bibliográfico se observó una predominancia de soluciones enfocadas en el procesamiento de señales mecánicas generadas por el transito de una avenida torrencial; las cuales son capturadas por diferentes tipos de sensores, como sismómetros (Dietze et al. (2022); Hürlimann et al. (2019)), sensores de infrasonido (Schimmel and Hübl (2016); Hürlimann et al. (2019)), geófonos (Schimmel and Hübl (2016); Dietze et al. (2022); Arattano et al. (2014); Hürlimann et al. (2019)), y acelerómetros (Chmiel et al. (2022); Liu and Wei (2024)). De igual manera la mayoría de autores y estaciones incorporan sensores meteorológicos como pluviómetros, sensores de humedad del suelo, potencial de agua, además de la utilización de cámaras de video, sensores de nivel del agua, entre otros (Hürlimann et al. (2019)). De estas, las variables sismológicas tuvieron mayor predominancia a la hora de generar la alerta por avenida torrencial, gracias a permiten implementar diferentes estrategias de procesamiento para la detección del fenómeno,

como umbrales de energía espectral (Wei and Liu (2020); Liu and Wei (2024)), umbrales de amplitud (Wei and Liu (2020)) o modelos de clasificación con machine learning (ML) (Chmiel et al. (2021)).

En paralelo a la revisión bibliográfica se llevó a cabo un análisis de diferentes sensores de vibraciones mecánicas que estaban a disposición de SIATA, como unidades de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés) y sistemas sísmicos compuestos por geófonos (RaspberryShake). Las IMUs son dispositivos que detectan la orientación, velocidad y movimiento de un objeto en tiempo real, a través de la combinación de sensores como acelerómetros, giroscopios o magnetómetros en un solo módulo. Por su parte, los geófonos constituyen transductores electromecánicos diseñados específicamente para registrar vibraciones del suelo y ondas sísmicas; su principio operativo se fundamenta en la inducción electromagnética generada por el desplazamiento relativo entre una masa móvil y una bobina en presencia de un campo magnético.

Para el análisis de los IMUs se estudiaron 3 modelos diferentes: gama alta (HWT907), gama media (WT901C) y gama baja (MCU-6050). Uno de los parámetros analizados de estos sensores fue su estabilidad temporal y susceptibilidad al ruido ambiente, teniendo como referencia los valores definidos por el fabricante. Para estos análisis se tomaron un conjunto de datos de estos sensores sometidos a condiciones controladas (Ausencia de perturbaciones externas y en estado estacionario) por un periodo de 8 meses, tomando muestras cada minuto. A este conjunto de datos se les realizó un filtrado de eventos atípicos (Regiones con amplitudes desfasadas de su valor estacionario) para luego calcular su desviación estándar y media temporal, esta última con el objetivo de establecer la presencia de upsets en las medidas.

Luego de estos análisis, se decidió buscar en la literatura acelerómetros con características necesarias para la detección del fenómeno estudiado (ancho de banda, densidad de ruido espectral o resolución). Para este proceso se analizó un registro capturado por una Raspberry Shake posicionada en la vereda Potrerito el día 25 de Junio del 2021, donde, según información de la base de datos geohazard se desarrolló un evento de avenida torrencial cerca de la Raspberry Shake R23F9 a disposición de SIATA [REF DOC Sebas]. Con este registro se realizó el cálculo de la tasa de ruido en la señal (SNR por sus siglas en inglés), donde, definió si la señal captada por cada acelerómetro o IMU podría superar un umbral de por lo menos 10 dB, valor por medio del cual se ha evidenciado una detección acertada de avenidas torrenciales (Liu and Wei (2024)).

De igual manera, se realizó un análisis del SNR de la señal respecto al evento sísmico del día 21 de septiembre de 2025, con el objetivo de evaluar el comportamiento respecto a un evento con mayor magnitud; para este proceso se tomó el registro de la estación R134D a disposición de SIATA.

Para el análisis de la Raspberry Shake 1D (RS1D), se estudiaron aspectos relacionados con el formato de los datos adquiridos, consumo energético, protocolo de comunicación o adquisición de los datos en tiempo real, mediante la implementación de bibliotecas como ObsPy o a través de protocolos de transmisión implementados en el sistema.

Para la caracterización del consumo eléctrico del RS1D se implementó un ensayo experimental en el que el dispositivo fue alimentado mediante una fuente de voltaje regulada con medidor de corriente integrado, registrándose la intensidad consumida con una frecuencia de muestreo de 1 Hz durante un lapso de aproximadamente 120 s. El procedimiento se ejecutó en dos escenarios: (i) operación en estado basal, limitado al procesamiento nativo del sistema, y (ii) ejecución de un programa de carga intensiva, constituido por un bucle infinito diseñado para forzar un uso máximo de CPU y memoria del microcontrolador.

En relación con el formato de los datos, se contó con registros provenientes de diferentes estaciones RS1D instaladas en la red de SIATA en distintos puntos del valle de Aburrá. El análisis se orientó inicialmente a la apertura de los archivos a través de ObsPy, con el fin de interpretar la estructura de los registros y poder implementar transformaciones en las señales, tales como la velocidad de oscilación y su representación en el dominio frecuencial.

Finalmente, la exploración del acceso en tiempo real a los datos incluyó el ingreso manual al RS1D mediante protocolo SSH, donde se examinó la estructura de almacenamiento y captura de los registros. Posteriormente, se estableció la conexión de un computador externo al sistema, mediante el protocolo de adquisición de datos en tiempo real seedlink, lo que permitió obtener la señal con la mínima latencia posible impuesta por las capacidades del hardware y el protocolo de transmisión.

De manera complementaria, y para la síntesis de la información asociada a cada sensor estudiado se elaboró una matriz comparativa y una matriz de decisión, en donde se consideraron aspectos relevantes para el problema de estudio, como: precio, ruido, resolución, entre otros. Estos análisis se dieron para cada uno de los sensores entregados por SIATA y para los sensores encontrados en la literatura.

Resultados

■ Análisis acelerómetros:

Teniendo en consideración los datos analizados de los IMUs HWT9073, WT901C y MCU-6050 se observó una alta estabilidad en la señal medida, tanto para la aceleración como para la velocidad angular, presentando una desviación estándar promedio (sobre x,y,z) para el sensor WT901C de $0,0055m/s^2$ en su aceleración, y de $6,6 \times 10^{-5}^\circ/s$ para la velocidad angular; luego, para el sensor HWT9073 una desviación estándar promedio para la aceleración de $0,0018m/s^2$ y para la velocidad de $0,0022^\circ/s$ y finalmente para el MCU-6050 de $0,022m/s^2$ en su aceleración y $0,087^\circ/s$.

Por otra parte, se observó la presencia de upsets en las señales medidas (considerando $0m/s^2$ como valor teórico para x, y y $9,8m/s^2$ para z); aunque estos valores no son significativos en el comportamiento o la naturaleza del fenómeno, para problemas donde la exactitud en la medida es importante es necesario realizar un proceso de calibración de estas magnitudes.

Luego de estos análisis, se realizó una búsqueda de acelerómetros en la literatura, donde, se seleccionaron los acelerómetros ADLX355 y AXO®305 por sus capacidades para la detección de micro vibraciones (basados en información de los fabricantes), o incluso, en su implementación en sistemas de detección de avenidas torrenciales (Liu and Wei (2024)). Luego de esta selección, se sintetizó la información mas relevante de cada sensor teniendo en consideración el problema estudiado (Tablas 4, 5 y 6), con el objetivo de realizar una matriz de decisión para la selección de los elementos mas idóneos en el desarrollo del proyecto (Tabla 7). Esta selección se basó en una ponderación de diferentes atributos de los sensores, en donde las métricas utilizadas se estructuraron en función a información de los fabricantes y opiniones de expertos (Tabla 8).

Por otra parte, se realizó un análisis de sensibilidad de los sistemas para la detección de vibraciones mecánicas asociadas a avenidas torrenciales, detección de sismos o detección de micro vibraciones del suelo, para ello se definió un umbral límite para cada sistema basado en sus niveles de ruido, en particular, alrededor de la densidad espectral de ruido. Este análisis, se realizó para los sensores MCU-6050, ADXL355, AXO®305 y WT901C, ya que para el sensor HWT9073 no se reportan datos sobre sus niveles de ruido más allá de la deriva por temperatura.

Teniendo en consideración que la densidad de ruido espectral es la medida del ruido en la señal por unidad de ancho de banda, se calculó la señal de ruido para cada sensor, en función a su ancho de banda, donde se obtuvo una señal de ruido para el sensor MCU-6050 ajustando el ancho de banda a 100 Hz de $\pm 39,2 \times 10^{-3} m/s^2$, para el ADXL355 en un rango de 100 Hz de $\pm 2,2 \times 10^{-3} m/s^2$, para el AXO®305 de $\pm 1 \times 10^{-3} m/s^2$ y para el WT901C de $\pm 7,4 \times 10^{-3} m/s^2$. Luego, se realizó una comparación de este nivel de ruido respecto a una señal captada por un geófono en condiciones estacionarias, la cual se puede observar en la Figura 11.

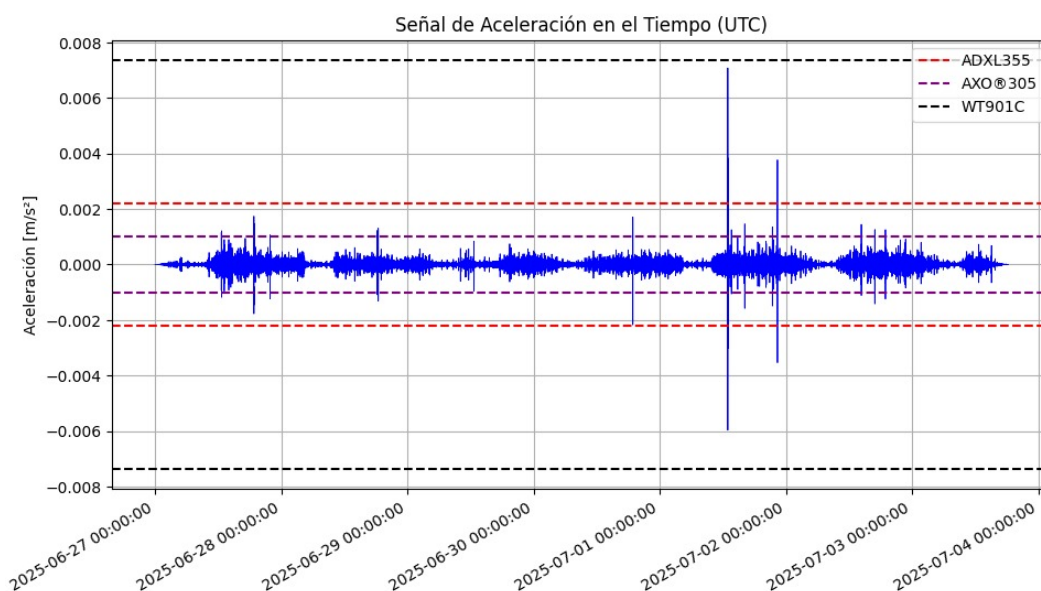


Figura 11. Comparación señal de geófono vs nivel de ruido de sensores

En la figura 11 no se graficó el nivel de ruido del MCU-6050 ya que presenta un orden de magnitud más que el resto de señales, limitando la visualización. Luego, se puede observar que si bien sensores como el ADXL355 o el AXO®305 presentan valores mínimos de ruido, se evidencia una gran diferencia en términos de sensibilidad entre los acelerómetros o IMUs y los geófonos, factor que puede limitar la captación de micro vibraciones asociadas a avenidas torrenciales.

Finalmente, el SNR de cada sensor para el evento capturado por el sistema R23F9 asociado a una avenida torrencial se calculó como se enseña en la ecuación 7,

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{seal}}{A_{ruido}} \right). \quad (7)$$

Lo que dio como resultado un SNR_{dB} para el sensor MCU-6050 de $-51,8dB$, para el sensor ADXL355 de $-26,88dB$, para el sensor AXO®305 de $-20dB$ y para el sensor WT901C de $-37,3dB$. Los valores negativos indican que la señal captada por el geófono es absorbida por el nivel de ruido de los sensores (ver Figura 12).

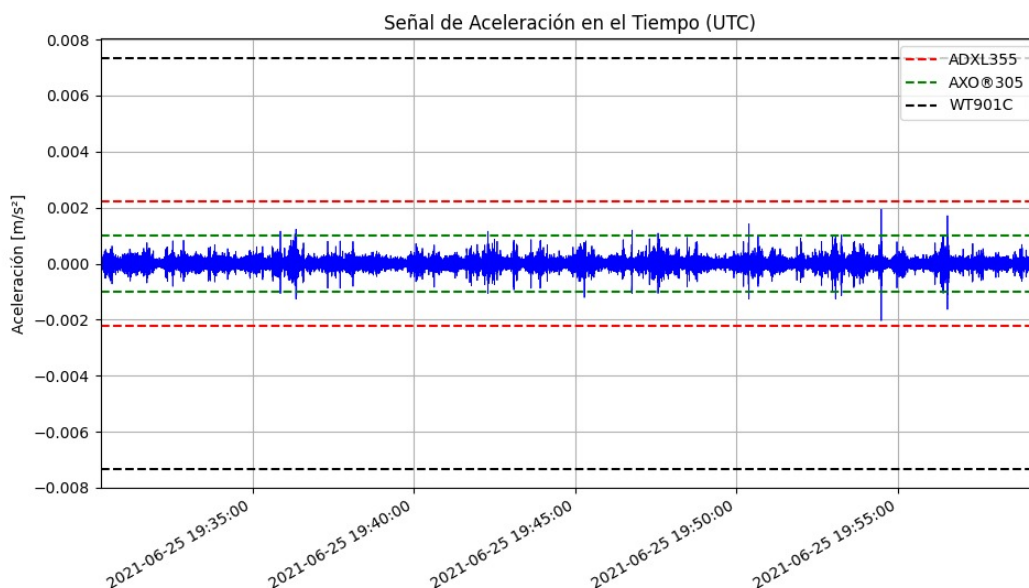


Figura 12. Señal de evento de avenida torrencial captada por un geófono [REF Sebas] y niveles rms de ruido de acelerómetros e IMU

Luego, los valores del SNR_{dB} para el evento del sismo del día 21 de septiembre del 2025 fueron de $0,17dB$ para el sensor MCU-6050, de $25,1dB$ para el ADXL355, de $32dB$ para el AXO®305 y de $14,7dB$ para el WT901C (ver Figura 13). Estos valores indican que para un evento de alto impacto como un sismo los sensores ADXL355, AXO®305 y WT901C presentan una relación mayor a $10dB$ respecto a su señal de ruido, presentando un mejor comportamiento los sensores ADXL355 y el AXO®305.

■ Análisis Raspberry Shake RS1D:

En primera instancia, se descargaron varios archivos provenientes del servidor NAZCA, los cuales corresponden a diferentes Raspberry Shake instaladas a lo largo del Valle de Aburrá. Estos archivos fueron abiertos utilizando la librería ObsPy, dado que toda la información generada por las tarjetas Shake se encuentra codificada en el formato MiniSEED. Una vez realizado este proceso de decodificación, fue posible visualizar el comportamiento de los datos captados por el geófono en condiciones estacionarias como se muestra en la figura ?? que corresponde a las muestras por una semana de una raspberry shake posicionada en el municipio de Girardora.

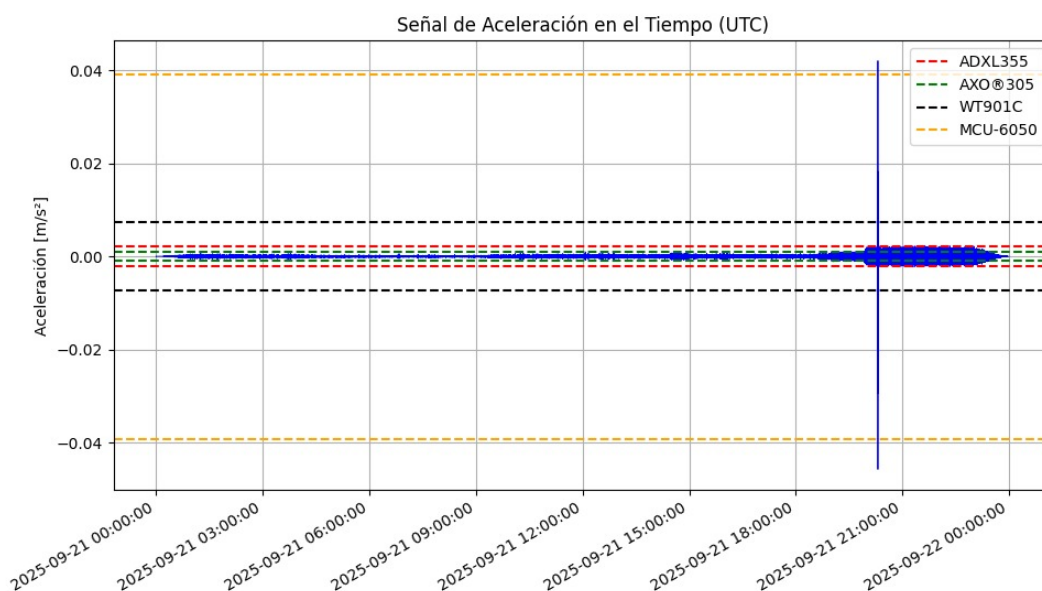


Figura 13. Señal de evento de sismo captada por el geófono R134D de SIATA y niveles rms de ruido de acelerómetros e IMU

Posterior a este análisis, se procedió a establecer la comunicación del RS1D con un computador. Se identificó que, para una conexión local, es necesario utilizar un cable Ethernet y asignar manualmente una dirección IP; de lo contrario, se debe identificar la IP que el RS1D tenga asignada en ese momento. Una vez establecida la conexión, es posible acceder mediante el protocolo SSH, lo que permite revisar la estructura de almacenamiento de los datos. Sin embargo, al consultar el archivo correspondiente al día actual se presenta la limitación de que no es posible visualizar los datos en tiempo real, ya que solo se actualizan una vez se llena completamente el buffer.

Para lograr la comunicación en tiempo real con la Raspberry Shake, los fabricantes proponen utilizar el protocolo SeedLink, en particular la herramienta slinktool, que permite recibir los conteos del geófono con una latencia de entre 1 y 7 segundos, dependiendo de la versión del dispositivo. slinktool es una herramienta ampliamente utilizada en sismología para la transmisión y recepción de flujos de datos sísmicos.

Inicialmente, se empleó el software SWARM (Figura 15a), una aplicación de monitoreo en tiempo real muy usada en sismología para la visualización de datos sísmicos. Posteriormente, se desarrolló un programa en Python que replica este proceso (Figura 15b). Esta última implementación abre la posibilidad de procesar las señales directamente en Python, lo que permite, por ejemplo, calcular parámetros derivados como la aceleración o la velocidad de la señal de acuerdo con las necesidades del análisis.

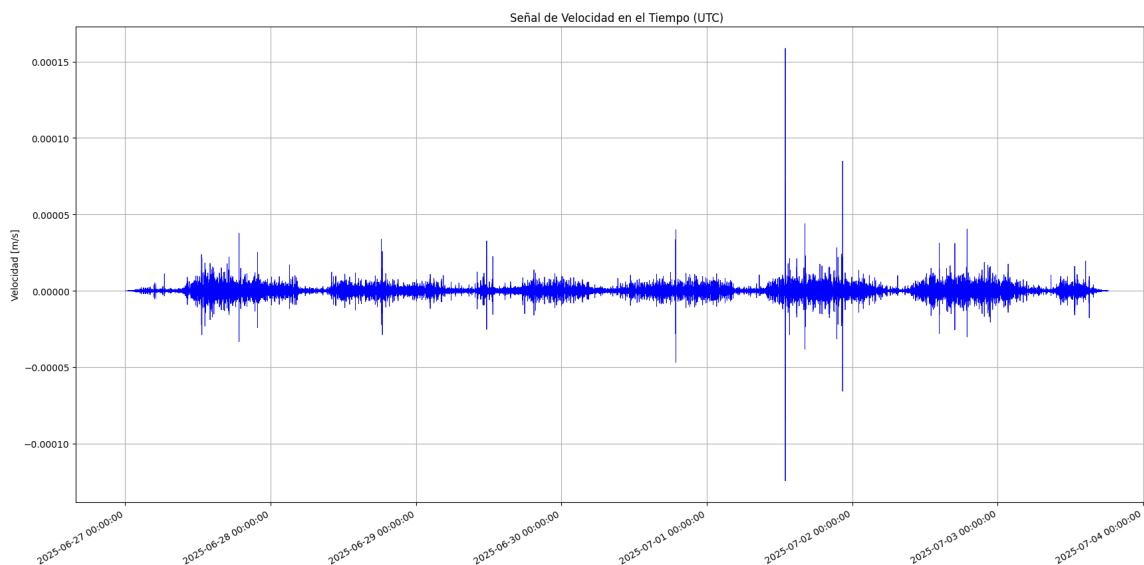


Figura 14. Calculo de la velocidad obtenida por un RS1D ubicada en Girardota

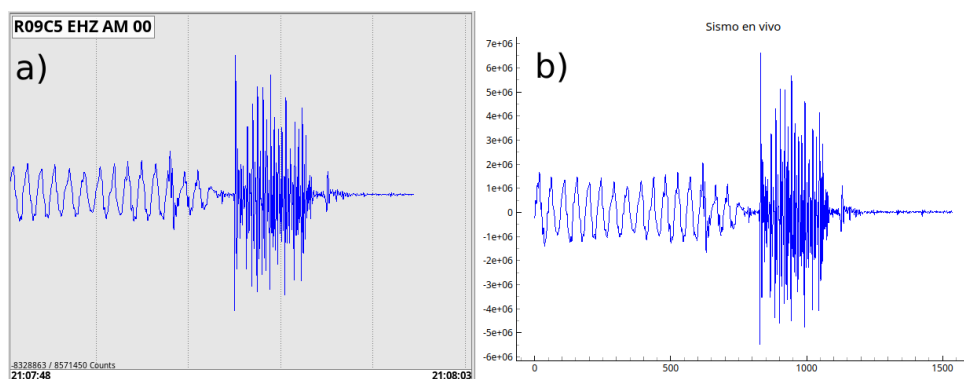


Figura 15. Medicion hecha por un RS1D conectada mediante Seedlink a) en SWARM b) usando Obspy

Al comparar el comportamiento entre SWARM y el programa desarrollado en Python, se observa que ambos presentan resultados equivalentes, lo que confirma que la implementación en Python funciona de manera correcta. Además, la latencia registrada fue prácticamente idéntica en ambas herramientas, lo que respalda la validez y eficiencia del desarrollo propio.

En el apartado de caracterización del consumo eléctrico estático y bajo condiciones de alta demanda computacional del RS1D, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 16.

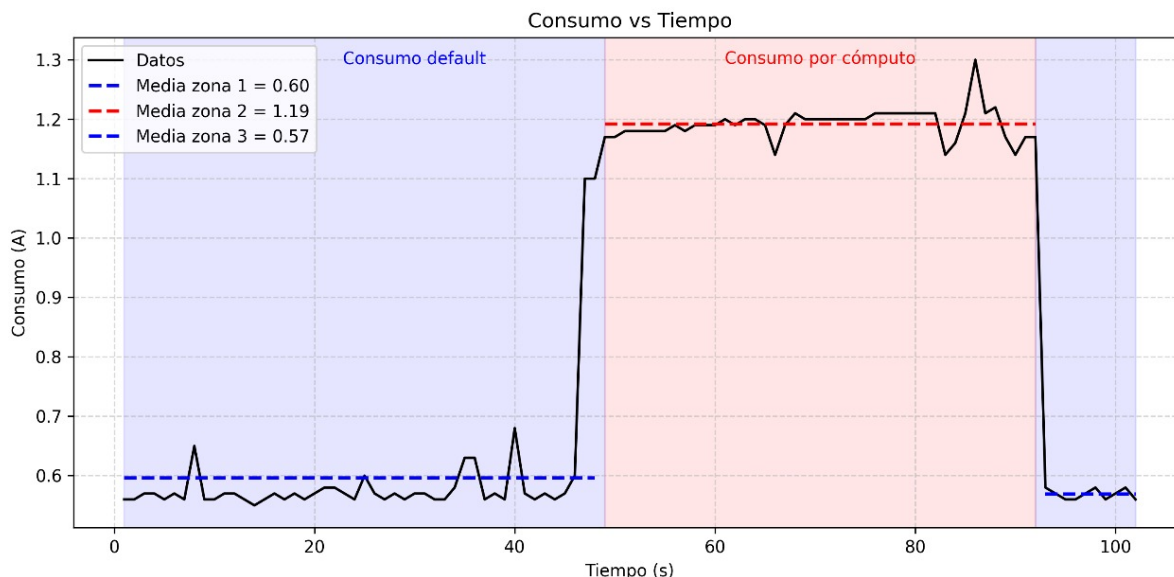


Figura 16. Consumo eléctrico en estado estático y bajo alta demanda computacional en un RS1D.

A partir de este experimento se determinó que el consumo eléctrico estático del RS1D es de aproximadamente 600 mA, mientras que, al ejecutar un programa de alta carga computacional, el consumo aumenta a cerca de 1.2 A. Es importante señalar que este valor puede variar en función de la temperatura del procesador, ya que se evidenció que la corriente incrementaba gradualmente durante la ejecución del experimento, aunque con una tendencia a estabilizarse progresivamente a medida que avanzaba la prueba.

Por último, con esta información y la que se reporta en la literatura de otros sistemas que integran Geófonos para la detección de ondas sísmicas, específicamente, se realizaron dos matrices comparativas, la primera de datos generales de los sensores como se observa en la tabla 9, mientras que la segunda están los datos técnicos asociados a los sensores integrados, tal como se muestra en la tabla 10.

Tabla 4. IMUs y acelerómetros seleccionados para el análisis

Link	Sensor	Fabricante	Precio [\$]	Protocolo de comunicación	Protección	Consumo
HWT9073	HWT9073	WitMotion	\$439	RS485 o CAN	IP68	12mA
WT901C	WT901C	WitMotion	\$51,48	TTL	NO	11,5mA
MPU-6050	MPU-6050	DFRobot	\$12,9	I2C	NO	3,9mA
ADXL355	ADXL355	Analog Devices	\$44,81	SPI, I2C, y UART	NO	0,2mA
Axo®305	Axo®305	Tronics	Requiere cotización	SPI	NO	25mA

Tabla 5. Características electrónicas de IMUs y acelerómetros

Sensor	Variables	Resolución	Precisión	Drift	Ancho de banda
HWT9073	Aceleración	3,9 10^{-6} (g/LSB) (20 BITS) Resolución real: $\pm 24,5 \text{ cm/s}^2$	NAN	Drift estático: $\pm 0.025 \text{ g}$ Drift por temperatura: $\pm 0.0001 \text{ g/}^\circ\text{C}$	5-256Hz
	Giroscopio	Ejes XY 0.061 ($^\circ/\text{s}$)/(LSB)	NAN	Drift estático: $\pm 0.5 \text{ }^\circ/\text{s}$ Drift por temperatura: $\pm 0.005 \text{ }^\circ/\text{s}$ 0.015 ($^\circ/\text{s}$)/ $^\circ\text{C}$	
		0.000055 ($^\circ/\text{s}$)/(LSB)	NAN	Resolución: 0.000055 ($^\circ/\text{s}$)/(LSB) Drift estático: $\pm 1^\circ/\text{s}$ Drift por temperatura: $\pm 5 \text{ }^\circ/\text{s}$ / $^\circ\text{C}$	
	Magnetometro	8.333nT/LSB	NAN	NAN	NAN
	Angulo	0.0055 $^\circ$	X,Y: 0.001 $^\circ$. Z: 0.1 $^\circ$	Drift por temperatura: 0.5 $^\circ/\text{s}$ / $^\circ\text{C}$	
WT901C	Aceleración	0.0005 (g/LSB) (16BITS)	0.01g	Estabilidad: 0.005g 0.75 1mg-rms Drift por temperatura: $\pm 0.00015 \text{ g/}^\circ\text{C}$	5-256Hz
	Giroscopio	XY Ejes 0.061 ($^\circ/\text{s}$)/(LSB)	NAN	Estabilidad: 0.05 $^\circ/\text{s}$ Drift por temperatura: $\pm 0.0015 \text{ }^\circ/\text{s}$ 0.015 g/ $^\circ\text{C}$	
	Magnetometro	6.67 nT/LSB	NAN	NAN	NAN
	Angulo	0.0055 $^\circ$	X,Y: 0.2 $^\circ$. Z: 1 $^\circ$ (con calibración magnetica) y 0.5 $^\circ$ (presencia de error integral acumulativo)	Drift por temperatura: $\pm 0.5 \text{ }^\circ/\text{s}$ 1 g/ $^\circ\text{C}$	

Tabla 6. Características electrónicas de IMUs y acelerómetros

Sensor	Variables	Resolución	Precisión	Drift	Ancho de banda
MPU-6050	Aceleración	16384 LSB/g @ ± 2 g; 8192 @ ± 4 g; 4096 @ ± 8 g; 2048 @ ± 16 g (16 BITS)	NAN	Drift por temperatura $\pm 0.02\%/^{\circ}\text{C}$ (a $\pm 2\text{g}$ full-scal) Ruido de densidad espectral: $400\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	5-256Hz
	Giroscopio	Sensibilidad: $\pm 3\%$ 131 LSB/ $(^{\circ}/\text{s})$ @ $\pm 250^{\circ}/\text{s}$; 65.5 @ $\pm 500^{\circ}/\text{s}$; 32.8 @ $\pm 1000^{\circ}/\text{s}$; 16.4 @ $\pm 2000^{\circ}/\text{s}$	NAN	Drift estático: $\pm 20^{\circ}/\text{s}$ Drift por temperatura: $\pm 2\%$	
ADXL355	Aceleración	256000 (g/LSB) (20 BITS)	NAN	Ruido de densidad espectral: $22.5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Drift por temperatura : 0.00015 g/ $(^{\circ}\text{C})$. Cross-Ejes Sensibilidad: $\leq 1\%$. Temporal drift: X,Y Ejes= ± 0.002 Z Ejes= ± 0.003	Configurable desde 0.977-1000 Hz hasta 0.0095-10
Axo®305	Aceleración	1000000 (g/LSB) (24 BITS)	NAN	Ruido de densidad espectral: $10\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. Drift por temperatura : 0.0005 g/ $(^{\circ}\text{C})$. Temporal drift: $3\mu\text{g}$	120Hz

Tabla 7. Matriz de decisión de los acelerómetros

Sensor	Parameter	Puntuación
HWT9073	Consumo	4,3
	Resolución (Precisión)	4,7
	Signal drift	4,7
	Precio	3,5
	Precisión Giro	4
	Usado en literatura	0
	Total	3,53
WT901C	Power	4,3
	Resolución (Precisión)	4
	Signal drift	4,7
	Precio	4,4
	Precisión Giro	4
	Usado en literatura	0
	Total	3,57
MPU-6050	Power	4,7
	Resolución (Precisión)	4
	Signal drift	3,5
	Precio	4,9
	Precisión Giro	3,5
	Usado en literatura	0
	Total	3,43
ADXL355	Power	5
	Resolución (Precisión)	4,7
	Signal drift	4,7
	Precio	4,5
	Precisión Giro	0
	Usado en literatura	5
	Total	4
Axo®305	Power	4
	Resolución (Precisión)	5
	Signal drift	5
	Precio	0
	Precisión Giro	0
	Usado en literatura	0
	Total	2,33

Tabla 8. Criterios para la calificación los acelerómetros

Descripción	Criterio
Consumo	5: Menor a 1 mA
	0: Mayor que 100 mA
Resolución (Precisión)	5: ADC 24 Bits
	0: ADC 8 Bits
Signal Drift	5: Es de 0,001 %/°C
	0 : Es de 0,1 %/°C
Precio	5: Menor a 10 \$
	0: Mayor que 1000\$
Precisión Giro	5: Ruido de la señal ≤ 0.0005 °/s
	0: Ruido de la señal 100 °/s
Usado en la literatura	5: Ha sido usado y es útil
	0: No ha sido usado

Tabla 9. Sistemas accesibles de sismología con Geófonos

Link	Sensor	Fabricante	Precio [\$]	Protocolo de comunicación	Protección	Consumo
RS1D	Raspberry shake 1D (RS1D)	Raspberry	294,99 o 584,99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP 67 a 834,99 \$	0,550 A default - 1.2 A ejecutando un programa pesado
RS3D	Raspberry shake 3D (RS3D)	Raspberry	954,99 o 1134,99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP 67 a 1404,99 \$	0,550 A default
RS4D	Raspberry shake 4D (RS4D)	Raspberry	604,99 o 784,99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP67 a 1054,99 \$	0,550 A default
RS&BOOM	RS&BOOM	Raspberry	794,99 o 934,99 con la raspberry	Seedlink, SeisComP	IP 67 a 1254,99 \$	0,550 A default
Anyshake	AnyShake	SensePlex	730 (No incluye microcontrolador)	SeedLink, raw TCP stream	No aplica	0,05 A (No incluye microcontrolador)
Grillo Pulse	Grillo Pulse	Grillo	699	Seedlink, SeisComP	Opcional IP 67	0,4 A

Tabla 10. Datos técnicos para los sensores integrados en los sistemas de sismología accesibles

Sensor	Sensores integrados	Referencia	Rango de medición	Precisión	Ancho de banda	Frecuencia natural [Hz]	Tolerancia	Distorsión	Tasa de muestreo
RS1D	Geófono	RGI-20DX	No aplica	No aplica	0,7 Hz a 44 Hz	4,5	5 %	<0,2 %	100
RS3D	Geófono x,y,z	3 Sunfull PS-4.5B	No aplica	No aplica	0,7-39	4,5	10 %	<0,3 %	100
RS4D	Geófono	RGI-20DX	No aplica	No aplica	0,7 a 44 Hz	4,5	5 %	<0,2 %	100
	Acelerómetro	sensor ±2g 3 ejes	±2g	10 %	0,1 Hz a 44 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	
RS&-BOOM	Microbar	MEMS	No aplica	10 %	1 Hz to 44 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	100
	Geófono	RGI-20DX	No aplica	No aplica	0,7 Hz to 44 Hz	4,5	5 %	<0,2 %	
Any-Shake	Geófonos x,y,z	3 LGT 20D4.5	No aplica	No aplica	0,7 Hz a 39 Hz	4,5	10 %	<0,3 %	50 - 250
	Acelerómetro	LSM6DS C	±2g	1 %	1 Hz a 400 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	
Grillo Pulse	Geófono	No específica	No aplica	No aplica	1 Hz a 100 Hz	4,5	No específica	No aplica	31 - 125
	Acelerómetro	No específica	No específica	No específica	1 Hz a 125 Hz	No aplica	No aplica	No aplica	

Tabla 11. Criterios para la evaluación de los sistemas que integran geófonos

Descripción	Criterios
Consumo eléctrico	5: Menor a 500 mA 0: Mayor a 1 A
Tasa de muestro máxima	5: 200 0: 50
Precio	5: Menor a 500 \$ 0: Mayor que 1000\$
Tolerancia del geófono	5: Menor o igual a 0,2 % 0 : Mayor o igual a 0,4 %
Precisión (Acel)	5: Menor o igual a 10 % 0: Mayor o igual 20 % o no posee acelerómetro
Uso en la literatura	5: Ha sido utilizado y es útil 0: No ha sido usado o no es útil

Tabla 12. Matriz de decisión de los sistemas que integran geófonos

Sensor	Parámetro	Puntuación
RS1D	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	5
	Tolerancia del geófono	5
	Precisión (Acel)	0
	Uso en la literatura	5
	Total	4,425
RS3D	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	1
	Tolerancia del geófono	3
	Precisión (Acel)	0
	Uso en la literatura	5
	Total	2,925
RS4D	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	4
	Tolerancia del geófono	3,5
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	5
	Total	3,8
RS&BOOM	Consumo	4,7
	Max taza de muestreo	3
	Precio	2
	Tolerancia del geófono	3,5
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	5
	Total	3,3
AnyShake	Consumo	5
	Max taza de muestreo	5
	Precio	2,5
	Tolerancia del geófono	3
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	0
	Total	3,875
Grillo Pulse	Consumo	5
	Max taza de muestreo	3,3
	Precio	3
	Tolerancia del geófono	0
	Precisión (Acel)	4
	Uso en la literatura	0
	Total	2,825

Discusión y conclusiones

Si bien en esta etapa preliminar se han presentado evaluaciones de diferentes sensores que podrían resultar útiles para el desarrollo del proyecto, la selección definitiva de los dispositivos que conformarán el sistema de alerta temprana aún está pendiente de revisión por parte de los asesores. Hasta el momento, se cuenta con una revisión de la literatura y un análisis que han permitido identificar de manera preliminar algunos sensores con mayor potencial.

Sensores como el ADXL355 y el AXO®305 si bien son sensores con un bajo nivel de ruido son sensores que basados en los datos de una estación de geófono de un evento de avenida torrencial no son capaces de detectar el fenómeno. Cabe resaltar que estos datos son de una estación que no estaba posicionada en el epicentro del evento, por esto, resulta necesario realizar un análisis mas completo de la intensidad de ruido captado por un geófono en una avenida torrencial, donde el sistema de medición este situado en una posición estratégica para su captación, esto, ya que según la literatura, sensores como el ADXL355 son implementados para la detección de avenidas torrenciales.

En el caso particular de los geófonos, se consideraron soluciones que integran no solo el sensor, sino también un sistema de adquisición, amplificación y filtrado de la señal. Bajo este criterio, se evaluaron dispositivos como AnyShake y Raspberry Shake. Estos últimos presentan una ventaja adicional —no contemplada inicialmente como criterio de selección— relacionada con la amplia comunidad y el ecosistema de soporte que los acompaña. No obstante, su principal limitación radica en el elevado consumo energético en comparación con AnyShake, lo cual implica mayores requerimientos y costos en el sistema de telemetría asociado (paneles solares, baterías, entre otros).

Otra consideración relevante respecto a los sistemas Raspberry Shake es que, de fábrica, el acceso a la señal cruda del geófono se encuentra restringido. Esto obliga a que el dispositivo dependa del uso de la Raspberry Pi como microcontrolador y, debido a la arquitectura y a los protocolos implementados tanto en la tarjeta Shake como en el sistema operativo de Raspberry Shake, se generan limitaciones que impiden acceder a la información con una latencia inferior a un segundo. Como alternativa, se propone explorar el uso del protocolo UDP, con el fin de evaluar si es posible lograr un acceso de menor latencia a la información sensada en futuras etapas del proyecto.

Referencias

- Arattano, M., Abancó, C., Coviello, V., and Hürlimann, M. (2014). Processing the ground vibration signal produced by debris flows: the methods of amplitude and impulses compared. *Computers Geosciences*, 73:17–27.
- Aristizábal, E., Arango Carmona, M. I., and García López, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1):242–258.
- Cañón, A. M. R., Reyes, A. A., Alejandra, M. M., Lucía, M. P. G., Viviana, R. P. S., Steve, M. C. M., Felipe, R. F. L., Ángel, P. S. M., Eduardo, C. C., Nicolás, R. P., et al. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.
- Chen, X., Zhang, L. M., and Chang, D. S. (2014). Mechanisms and modeling of rainfall-induced shallow landslides. *Engineering Geology*, 176:54–65.
- Chmiel, M., Godano, M., Piantini, M., Brigode, P., Gimbert, F., Bakker, M., Courboux, F., Ampuero, J.-P., Rivet, D., Sladen, A., et al. (2022). Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with storm alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5):1541–1558.
- Chmiel, M., Walter, F., Wenner, M., Zhang, Z., McArdell, B. W., and Hibert, C. (2021). Machine learning improves debris flow warning. *Geophysical Research Letters*, 48(3):e2020GL090874.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. <https://doi.org/10.1139/t96-005>, 33(2):260–271.
- Dietze, M., Hoffmann, T., Bell, R., Schrott, L., and Hovius, N. (2022). A seismic approach to flood detection and characterization in upland catchments. *Geophysical Research Letters*, 49(20):e2022GL100170. e2022GL100170 2022GL100170.
- Gamma, P. (2000). *dfwalk-Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung*. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern, Switzerland.
- Heim, A. (1932). *Bergsturz und menschenleben*. Number 20. Fretz & Wasmuth.
- Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4):327–334.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., and Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4):869–885.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., and Hutchinson, J. N. (2005). *A review of the classification of landslides of the flow type*, volume 11.

- Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hübl, J., Miyata, S., Smith, J. B., and Yin, H.-Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199:102981.
- Ilinca, V. (2021). Using morphometrics to distinguish between debris flow, debris flood and flood (southern carpathians, romania). *Catena*, 197:104982.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3):245–296.
- Liu, K. and Wei, S. (2024). Real-time debris flow monitoring and automated warning system. *Journal of Mountain Science*, 21(12):4050–4061.
- Major, J. J. and Iverson, R. M. (1999). Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins. *Geological Society of America Bulletin*, 111(10):1424–1434.
- Medinaceli Tórrez, R. (2024). Análisis probabilístico de estabilidad de taludes en roca: aplicación de métodos de confiabilidad y ecuaciones de estados límite para falla plana. In *Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)*, pages 1–8, La Serena, Chile. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). Open-access conference paper.
- Pereira, V., Basilio, M. P., and Santos, C. H. T. (2024). Enhancing decision analysis with a large language model: pydecision a comprehensive library of mcda methods in python. *arXiv preprint arXiv:2404.06370*. Available at: <https://arxiv.org/abs/2404.06370>.
- Páez Pedraza, J. P. (2025). Modelado de flujos de lodo y escombros como herramienta de evaluación de riesgos. *Ingeniería y Universidad*, 29.
- Schimmel, A. and Hübl, J. (2016). Automatic detection of debris flows and debris floods based on a combination of infrasound and seismic signals. *Landslides*, 13(5):1181–1196.
- Servicio Geológico Colombiano and Pontificia Universidad Javeriana (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.
- Takahashi, T. (2014). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Wei, S.-C. and Liu, K.-F. (2020). Automatic debris flow detection using geophones. *Landslides*, 17(2):349–359.