

Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la actividad sísmica como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima.

Ana Gabriela González Yaruro  
Andrés Felipe Padilla Gutiérrez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director  
Joaquín Andrés Valencia Ortiz  
Geólogo M.Sc

Codirector  
Leonardo Palmera Sánchez  
Geólogo M.Sc

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Geología  
Bucaramanga  
2023

### **Dedicatoria**

*Cubre la memoria de tu cara con la máscara de la que serás y asusta a la niña que fuiste.*

***Alejandra Pizarnik***

A mi mamá y a mis abuelas.

A mis amigas y colegas.

A mis profesoras y a todas las mujeres en la ciencia.

***Ana Gabriela Gonzalez Yaruro***

*No se trata de cambiar el mundo. Se trata de hacer nuestro mejor esfuerzo antes de partir de este mundo... tal y como es. Se trata de respetar la voluntad de los demás, y creer en la tuya*

***The Boss en "Metal Gear Solid III"***

A quienes no nos acompañan,

a quienes sus pensamientos les arrebataron el ayer, el hoy, y el mañana,

a sus madres y familias.

***Andrés Felipe Padilla Gutiérrez***

### **Agradecimientos**

Quiero agradecer a mi familia por el amor con el que me han criado. A mi mamá por su fe y guía en mi vida. A mi papá por la asesoría en el análisis estadístico de la investigación. A mi hermano por la cámara y palabras de apoyo. A Gary por la compañía, a pesar de su espíritu indomable.

A Yudy, Dani, Valentina R, Silvia, Angie L, Valentina C, Felipe y Luis por el cariño, las risas y la confianza durante todos estos años. A Lars por conocerme y a Angie S por no dejar de escucharme, aun cuando se cambió de carrera. Ha sido un honor crecer a su lado.

Agradezco a Andrés por creer en mí, a Diego por ser mi pilar y a Diego por ser mi hijo. Gracias a Lorena por comprenderme y a Ronald por nuestras charlas y comentarios con el proyecto. También, quiero agradecerle a Angie U por la ayuda con los conceptos vulcanológicos y estructurales de la tesis. A Karol, Karen, Kevin, Inti, Mago, Dana, Checho, Eduardo, Sara, Sergio, Camilo y Jesús les doy las gracias por el cariño y la amistad desinteresada. A todos los amigos y compañeros que me dejó la geología, por todas las veces en que odié el camino que escogí para mí y me arrastraron a terminarlo. Ya no imagino una vida sin ustedes.

A los profesores que me tuvieron paciencia y a los que no tanto, muchas gracias.

A la biblioteca de la UIS y al club de lectura por ser mi lugar seguro. Al profesor Jesús Álvarez, he seguido escribiendo, corrigiendo, pausando y volviendo a escribir. Igualmente, agradezco a Gloria Paulina, Stanley Grossman, los capuchos y a Marisol de Pasos por Ingeniería por su apoyo en mi formación académica. También, un agradecimiento especial a la música pop, al restaurante Los Juanes y “limonada infinita”, la tienda de Don Victor, al ACEGE por lo que fue, a los combos saludables de la UIS y a Metrolínea, que en paz descanse.

Finalmente, quiero agradecerle a la mariposa que con su aleteo creó el tornado que ha sido la geología en mi vida. Gracias al profesor Luis E Cruz, por tomarse el tiempo de recibir en su oficina y hablarle de paleontología, dinosaurios y fósiles a una niña de 10 años.

*Ana Gabriela Gonzalez Yaruro*

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por confiar ciegamente en cada una de las decisiones que he tomado en mi vida. A mi mamá por ser mi polo a tierra y soporte a lo largo de este camino. A mi hermana que siempre estuvo para apoyarme y extenderme su mano sin importar la situación. A mi padre por enseñarme que la constancia, el sacrificio y el esfuerzo, son las mayores virtudes en nuestra familia. A Angela por el amor, paciencia, y cariño, me ha hecho más sensible y una mejor persona.

A Ringo, Rocco, Hiko, Tony, y Pipo, a ustedes, que han sido mis compañeros de vida, mis amigos incondicionales, me han enseñado lo que es el verdadero amor, la lealtad y la amistad, siempre con una sonrisa y una pata de apoyo.

A Ana Gabriela, que confió en mí y me brindó una amistad invaluable. A Jesús por sus apuntes y observaciones al inicio de este proyecto. A Jerry, Diego, Lorena, Karol, Ronald, Dana, Kevin, Karen, Mago, Inti, Angie, Camilín, Eduardo, Sergio, Sara y Checho por su amistad, las vivencias y enseñanzas durante este proceso, a ustedes y a todos los compañeros con los que coincidí en la vida universitaria quiero agradecerles.

A los deportes, el anime, la tecnología, los jueguitos de pc, que me llevaron a conocer personas con habilidades increíbles y me ayudaron a superar los desafíos de la vida académica, gracias por forjar a la persona que soy hoy.

A todos y todo aquello que formó parte de este camino

Gracias totales.

***Andrés Felipe Padilla Gutiérrez***

De manera conjunta queremos agradecer al profesor Joaquín por confiar en nosotros y en el proyecto, por su sabiduría, guía, y amabilidad; aún desde la distancia y diferencia horaria, sentimos su compromiso y cariño con nosotros, siendo un ejemplo de profesional y una excelente persona, muy cálida y humana. También, le damos gracias al profe Leo, por su asesoramiento y palabras de apoyo, por darnos su confianza y ser un mentor en nuestras vidas. Nos sentimos orgullosos de haber podido colaborar con ustedes y de lo que logramos juntos.

Le damos gracias a la Universidad Industrial de Santander, por ser nuestro segundo hogar y formarnos como seres humanos integrales, a la Escuela de Geología por el apoyo y personas que nos permitió conocer. Igualmente, le damos gracias a Marthica, Rosita y César por su paciencia y ayuda con la comunidad estudiantil. Finalmente, le agradecemos a la Alcaldía, Secretaría de Planeación, Cuerpo de Bomberos y Hospital del municipio de Herveo por su colaboración, del mismo modo a la comunidad del lugar, por su calidez y amabilidad, así como a la Federación Nacional de Cafeteros y al Volcán Cerro Bravo.

***Ana y Andrés***

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	12
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Justificación.....	14
3. Objetivos.....	18
3.1 Objetivo General.....	18
3.2 Objetivos Específicos.....	18
4. Marco de referencia.....	19
4.1 Localización.....	19
4.2 Contexto Geológico.....	21
4.3 Marco tectónico.....	23
4.4 Geomorfología.....	24
4.5 Marco teórico.....	25
5. Estado del arte.....	27
6. Metodología.....	30
6.1. Procedimiento.....	30
6.1.1. Fase 1. Adquisición de información.....	30
6.1.2. Fase 2. Tratamiento de datos.....	31
6.1.3. Fase 3. Calculo probabilidad temporal detonantes.....	32
6.1.4. Fase 4. Análisis y resultados.....	33
6.2. Métodos.....	33
7. Resultados.....	35
7.1 Inventario de movimientos en masa, registro pluviométrico y catálogo de sismicidad.....	35
7.2. Caracterización detonante precipitación.....	37
7.3. Caracterización detonante sismo.....	44
8. Discusión.....	47
9. Conclusiones.....	52
10. Recomendaciones.....	54
Referencias Bibliográficas.....	55

**Lista de Figuras**

	<b>pág.</b>
Figura 1. <i>Mapa de localización del área de estudio (Herveo, Tolima)</i> .....	21
Figura 2. <i>Geología del municipio de Herveo, Tolima</i> .....	22
Figura 3. <i>Evolución del estudio de amenaza por movimientos en masa y sus detonantes</i> .....	29
Figura 4. <i>Esquema metodológico del trabajo de investigación</i> .....	32
Figura 5. <i>Métodos utilizados en el cálculo de la probabilidad temporal de los detonantes lluvia y sismo</i> .....	35
Figura 6. <i>Mapa de localización estaciones pluviométricas e inventario morfodinámico</i> .....	37
Figura 7. <i>Cálculo de la probabilidad de excedencia de las precipitaciones</i> .....	44
Figura 8. <i>Productividad sísmica</i> .....	46
Figura 9. <i>Distribución de Poisson para sismos</i> .....	47

**Lista de Tablas**

**pág**

Tabla 1 *Correlación entre detonantes precipitación y sismo*..... 51

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarse en el repositorio de la Biblioteca.

Apéndice A. Inventario de Movimientos en Masa

Apéndice B. Caracterización Detonante Precipitación

## Glosario

**Amenaza:** evento físico o condición peligrosa de origen natural, o inducido por la acción humana de manera accidental, capaz de causar pérdida de vidas o lesiones, así como también daños y pérdidas en los bienes y la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

**Caída:** separación de una masa de roca o suelo desde un talud empinado, que desciende a través del aire, generalmente en caída libre.

**Deslizamiento:** movimiento ladero abajo de una masa de suelo o roca.

**Flujo:** movimientos que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco.

**Movimiento en masa:** movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad.

**Período de retorno:** intervalo de tiempo promedio en que se espera la ocurrencia de un evento de cierta magnitud.

**Probabilidad temporal:** frecuencia de ocurrencia de los movimientos en masa en términos de probabilidad empírica o por correlación con los valores críticos de los detonantes

**Reptación:** movimientos lentos del terreno donde no se distingue una superficie de falla.

**Resiliencia:** capacidad de un sistema o comunidad ante una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz.

**Riesgo:** posibles pérdidas que puede ocasionar un desastre en términos de vidas, daños a bienes y servicios, que podrían ocurrir en una comunidad o sociedad particular en un período específico de tiempo en el futuro.

**Volcamiento:** rotación hacia delante de una masa de roca o suelo en una ladera, alrededor de un pivote o eje, por debajo del centro de gravedad de la masa que se desplaza.

**Vulnerabilidad:** características y circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos negativos de una amenaza

## Resumen

**Título:** Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la actividad sísmica como desencadenantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima\*<sup>1\*</sup>

**Autor:** Ana Gabriela González Yaruro y Andrés Felipe Padilla Gutiérrez<sup>2\*\*</sup>

**Palabras Clave:** Movimientos en masa, Precipitaciones, Sismos, Detonantes, Gestión del riesgo, Herveo

### Descripción:

Para la ocurrencia de movimientos en masa se discretizan elementos que influyen en la activación de estos procesos como factores detonantes, donde se ha encontrado que las precipitaciones y los sismos tienen una alta influencia en desencadenar este tipo de eventos. Estos aspectos sumados a factores como la ubicación geográfica y características geotectónicas, geomorfológicas e hidrometeorológicas, hacen para el municipio de Herveo tener unas condiciones de amenaza a los movimientos en masa, por lo que existe una necesidad inminente de prevenir y mitigar la naturaleza de estos eventos. Analizar los detonantes precipitación y sismo, desde un enfoque probabilístico, es una buena alternativa para entender la ocurrencia de estos eventos e identificar zonas expuestas ante este fenómeno. De esta manera, la presente investigación adaptó los lineamientos establecidos en la *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25:000* del Servicio Geológico Colombiano con el fin de calcular la probabilidad temporal de las precipitaciones y la relación temporal-espacial de los sismos como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima.

Se recopiló información de bases de datos libres, para así poder aplicar métodos estadísticos y evaluar el comportamiento de lluvia y sismos en la zona; pudiendo definir su influencia como detonantes, a partir de un umbral regional para las lluvias antecedentes, su respectiva probabilidad de excedencia y periodo de retorno mediante una distribución de Poisson. En la sismicidad, la probabilidad de ocurrencia se estableció con un modelo de Poisson, así como con la correlación entre catálogo sísmico e inventario de movimientos en masa. Concluyendo, se encontró que existe una probabilidad de exceder los umbrales de lluvias propuestos en un periodo de retorno de 5 años y se planteó un umbral aproximado de magnitud  $M_w=4.7$  para la ocurrencia de un evento, encontrando una interacción entre los dos detonantes en la generación de un deslizamiento de tierra en el casco urbano de Herveo.

---

<sup>1\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>2\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa académico. Director: Joaquín Andrés Valencia. Geólogo M.Sc. Codirector: Leonardo Palmera Sánchez. Geólogo M.Sc

### Abstract

**Title:** Calculation of the temporal probability of rainfall and temporal-spatial relationship of seismic activity as triggers of mass movements in the municipality of Herveo, Tolima. <sup>3\*</sup>

**Author(s):** Ana Gabriela González Yaruro y Andrés Felipe Padilla Gutiérrez<sup>4\*\*</sup>

**Key Words:** Mass movements, Precipitations, Earthquakes, Triggers, Risk management, Herveo

#### Description:

For the occurrence of mass movements, elements that influence the activation of these processes are discretized as triggering factors, where it has been found that rainfall and earthquakes have a high influence in triggering this type of events. These aspects added to factors such as geographic location and geotectonic, geomorphological and hydrometeorological characteristics, make the municipality of Herveo have conditions of threat to mass movements, so there is an imminent need to prevent and mitigate the nature of these events. Analyzing precipitation and seismic triggers from a probabilistic approach is a good alternative to understand the occurrence of these events and identify areas exposed to this phenomenon. Thus, this research adapted the guidelines established in the Methodological Guide for the Zoning of Threats due to Mass Movements Scale 1:25:000 of the Colombian Geological Service in order to calculate the temporal probability of precipitation and the temporal-spatial relationship of earthquakes as triggers of mass movements in the municipality of Herveo, Tolima.

Information was compiled from free databases, in order to apply statistical methods and evaluate the behavior of rainfall and earthquakes in the area; being able to define their influence as triggers, based on a regional threshold for antecedent rainfall, their respective probability of exceedance and return period by means of a Poisson distribution. In seismicity, the probability of occurrence was established with a Poisson model, as well as with the correlation between seismic catalog and mass movement inventory. In conclusion, it was found that there is a probability of exceeding the proposed rainfall thresholds in a 5-year return period and an approximate threshold of magnitude  $M_w=4.7$  was proposed for the occurrence of an event, finding an interaction between the two triggers in the generation of a landslide in the urban area of Herveo.

---

<sup>3\*</sup> Degree Work

<sup>4\*\*</sup> Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Academic program. Director: Joaquín Andrés Valencia. Geologist M.Sc. Co-director: Leonardo Palmera Sánchez. Geologist M.Sc

## Introducción

Dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa, la caracterización de los factores detonantes que estén incidiendo en la estabilidad de las laderas es de vital importancia. Para la región Andina, se ha encontrado que las precipitaciones intensas y la actividad sísmica, representan el principal aporte para desencadenar movimientos en masa, siendo un foco de amenaza activa para diversos elementos expuestos, que incluyen vías, cultivos, animales, edificaciones, personas, entre otros (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas [PMA:GCA], 2007).

Los estudios enfocados a la caracterización de elementos detonantes de movimientos en masa expresan la incidencia y recurrencia de dichos elementos a través del tiempo en términos de probabilidades temporales, las cuales permiten establecer períodos de retorno o probabilidades de excedencia que cuantifiquen la magnitud y frecuencia de estos fenómenos (Aristizabal-Giraldo *et al.*, 2010; Corominas *et al.*, 2014). De esta manera, se facilita la elaboración e implementación de planes de gestión del riesgo dentro del ordenamiento territorial, ya que se tiene un conocimiento más preciso de la amenaza a partir de la comprensión de sus detonantes.

La presente investigación busca calcular la probabilidad temporal y la relación espacio temporal de las precipitaciones y sismos, respectivamente, como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima, adaptando los parámetros establecidos en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25:000 del Servicio Geológico Colombiano (Rodríguez *et al.*, 2017).

## 1. Planteamiento del problema

Las amenazas geológicas representan un escenario de riesgo para las personas a nivel global. Durante el período 1998-2018 se reportaron 1.2 millones de víctimas fatales y más de 3.3 billones de dólares en pérdidas directas relacionadas a la ocurrencia de desastres naturales, donde a futuro se estima un incremento en su frecuencia y severidad como consecuencia del cambio climático (González, 2021).

La ocurrencia de estos eventos está determinada, principalmente, por la interacción entre placas tectónicas y la presencia de puntos calientes localizados, generando zonas de mayor actividad sísmica y vulcanismo, como se evidencia en el Cinturón de Fuego del Pacífico (Organization of American States [OAS], 1991), así como por la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, la cual genera altos regímenes lluviosos; donde se ha encontrado que esta configuración geológica e hidrometeorológica, sumada a condiciones de vulnerabilidad debido a factores socioeconómicos, políticos y culturales, hacen de regiones como América Latina y Asia las más afectadas por desastres naturales a escala global (Quesada, 2017).

Las amenazas geológicas en muchos casos no pueden prevenirse o el tiempo de reacción ante estas es mínimo. Ritchie *et al.*, (2014) atribuye la ejecución de planes de gestión del riesgo a nivel global, como uno de los principales factores en disminuir la tendencia de muertes anuales e impacto provocados por fenómenos naturales, demostrando que, a principios del siglo XX, se registró un promedio de 400.000-500.000 víctimas fatales por año, y desde la década del 2000, ha decrecido a un promedio menor de 100.000. Por lo tanto, la poca inversión en el conocimiento de las geoamenazas y la falta de creación de políticas gubernamentales enfocadas a mejorar la resiliencia de las comunidades, se consideran las principales causas de que fenómenos naturales,

terminen convirtiéndose en eventos catastróficos, evidenciado en casos como el terremoto-tsunami del océano Índico en 2004 y el terremoto de Haití en 2010 (Stasha, 2021).

De no priorizarse la gestión del riesgo en los planes de desarrollo globales, se espera que el cambio climático aumente la incidencia de estos fenómenos, principalmente los de tipo hidrometeorológico, como inundaciones, huracanes y movimientos en masa (Guterres, 2008). En el caso de Colombia, el panorama para los próximos años indica un aumento en la intensidad de la temporada invernal (Fenómeno de La Niña), generando condiciones de vulnerabilidad en la población, lo cual se evidenció en el transcurso de 2022, con un saldo de 90.684 familias afectadas, 981 viviendas destruidas, así como 949 movimientos en masa, 70 avenidas torrenciales y 553 inundaciones detonadas por las altas precipitaciones (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD], 2022).

Debido a esto, existe una necesidad inmediata en profundizar el conocimiento de las geoamenazas desde la gestión del riesgo, en el caso de la zona de estudio (Herveo, Tolima), las condiciones hidrometeorológicas y geológicas del lugar propician la ocurrencia de movimientos en masa. Por lo tanto, este municipio requiere de estudios que permitan identificar los factores detonantes para este tipo de amenaza, con el fin de establecer medidas direccionadas hacia su prevención y mitigación.

## **2. Justificación**

El crecimiento poblacional y la expansión urbana ocurridos durante el último siglo fueron los antecedentes necesarios para introducir la gestión del riesgo dentro de la planeación del desarrollo económico, político y social de las naciones, ya que, reconocer las amenazas como

aquellos fenómenos naturales con potencial destructivo sobre un territorio se vuelven elementos de primer orden dentro de los planes de ordenamiento territorial (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2014). A partir de esto, se permitió la creación de medidas de prevención y mitigación enfocadas a reducir las condiciones de vulnerabilidad de una población. Ejemplo del impacto de estas condiciones de exposición al riesgo, se pueden observar en la región de Latinoamérica y del caribe, donde se registraron durante el período de 1972-2010 un total de 1.737 desastres, de los cuales 1.392 fueron de origen climatológico, 227 de origen geológico y 118 de origen biológico, provocando un saldo de 498.030 víctimas fatales (Bello, 2017).

Partiendo de la necesidad de una identificación temprana de las amenazas, se han creado políticas a nivel mundial enfocadas a orientar la gestión del riesgo. Entre las más recientes se encuentra el Marco Sendai, un documento guía internacional elaborado con el propósito de facilitar la implementación gubernamental de medidas que permitan mejorar la preparación y respuesta ante catástrofes, desde la inversión para fortalecer la gobernanza y resiliencia de los países (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres [UNISDR], 2015). En este punto cabe destacar la importancia de incluir el análisis de los factores condicionantes y detonantes de amenazas, puesto que permitirá el desarrollo de mecanismos preventivos más eficientes ante posibles escenarios de riesgo, siendo este uno de los principales enfoques en la actualidad con respecto a la normativa establecida para tratar esta problemática.

La implementación de la gestión del riesgo en Colombia ha mejorado en la última década con el fortalecimiento de las redes encargadas de la prevención y mitigación de amenazas, la ley 1523 de 2012, por la cual se adoptó la gestión del riesgo como política nacional y creó el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (Departamento Administrativo de la Función

Pública de Colombia [DAFP], 2012). Otro ejemplo es el decreto 1807 de 2014, por el cual se incorporó la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial (DAFP, 2014).

Sin embargo, toda esta consolidación normativa corresponde a una respuesta tardía antes las condiciones geológicas del territorio, donde autores como De la Torre *et al.*, (2001) han identificado características tectónicas variadas, debido a su ubicación sobre el punto de convergencia entre las placas tectónicas Caribe, Nazca y Sudamericana, generando el levantamiento de un sistema orogénico dinámico que se manifiesta mediante sismos, deslizamiento y volcanes, además de, variaciones climatológicas interanuales asociadas al ciclo El Niño y La Niña - Oscilación del Sur que ocasionan períodos de sequías extremas y lluvias extraordinarias respectivamente (Montealegre, 2009).

A causa de estas características geológicas y meteorológicas, se han identificado municipios en condición de vulnerabilidad a lo largo del país, debido a su alta exposición a amenazas naturales, como lo muestra el censo realizado por el DANE en 2018, donde el 87% de la población se encuentra expuesta a eventos de amenaza sísmica intermedia y alta (UNGRD, 2020), mientras que el Departamento Nacional de Planeación (DNP) reporta que para el período 2006-2014 se registraron 21.594 emergencias de origen natural, como inundaciones y deslizamientos, donde 14.853 corresponden a eventos hidrometeorológicos, los cuales incluyen aquellos generados por la acción violenta de fenómenos atmosféricos (DNP, 2015).

Uno de los principales focos de amenaza relacionada a factores geológicos y climatológicos en Colombia corresponden a aquellos municipios asentados sobre la cordillera de los Andes, por ejemplo, la franja central a escala regional presenta una morfología con fuertes pendientes, influenciadas por la ocurrencia de actividad tectónica reciente asociada a trazos del Sistema de Fallas de Romeral, además de la presencia de volcanes históricamente activos, como

el Nevado del Ruiz, los edificios volcánicos del Cerro Bravo y Tolima (González, 2001), de manera que todas estas condiciones geológicas representan escenarios de riesgo para los habitantes de esta región.

Para el caso del municipio de Herveo, Tolima, las condiciones locales han sido descritas por (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS), 1993) como un relieve montañoso relacionado al flanco oriental de la cordillera central, con tres unidades geomorfológicas identificadas (plana, ondulada, montañosa). Sumado a esto, la actividad sísmica asociada a las fallas Palestina, Chapetón-Pericos, Honda, Ibagué y el Sistema de Romeral, también registran actividad desde el período Cuaternario. Por otro lado, la condición climática que se enmarca dentro de los pisos térmicos medio y páramo, que presentan precipitaciones medias anuales entre 2000-2500 mm proporcionan escenarios de inestabilidad de laderas.

El municipio de Herveo, Tolima, según un estudio realizado por el Servicio Geológico Colombiano a escala 1:100.000, presenta una zonificación de amenaza relativa por movimientos en masa alta y muy alta hacia las zonas norte y este de la cabecera municipal respectivamente (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2014). Considerando que las precipitaciones y actividad sísmica están entre los principales factores detonantes de movimientos en masa (Rodríguez *et al.*, 2017), es pertinente analizar los factores desencadenantes de estos eventos en el municipio de Herveo. Se propone estudiar las condiciones tectónicas y climatológicas identificadas, para esclarecer el comportamiento de estos fenómenos y su impacto en la población del municipio, con lo cual se espera que nuestra investigación pueda servir de apoyo en el desarrollo de proyectos de gestión de riesgo a nivel local y nacional, para elaborar estudios detallados que permitan el aumento de la resiliencia en esta población.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Calcular el umbral de probabilidad temporal de las precipitaciones y la actividad sísmica, como detonantes de movimientos en masa presentes en el municipio de Herveo, Tolima, según los parámetros establecidos en la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25.000, del Servicio Geológico Colombiano.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

Recopilar la información relacionada al área de estudio de estaciones pluviométricas, catálogos de sismicidad e inventarios de movimientos en masa, mediante la consulta de bases de datos de uso libre.

Realizar pruebas y ajustes estadísticos paramétricos y no paramétricos para evaluar la consistencia-homogeneidad de los datos registrados de precipitaciones y sismos durante la serie de tiempo definida.

Calcular los umbrales de precipitación 24 horas y lluvias antecedentes (15 días) con su respectiva probabilidad de excedencia.

Correlacionar espacialmente la magnitud, profundidad, distancia epicentral de los eventos sísmicos y valores de aceleración máxima del suelo (PGA), en la ocurrencia de los movimientos en masa registrados en el inventario.

Determinar el periodo de retorno de las precipitaciones y definir la relación espaciotemporal de la actividad sísmica desencadenantes de movimientos en masa en el área de estudio.

## 4. Marco de referencia

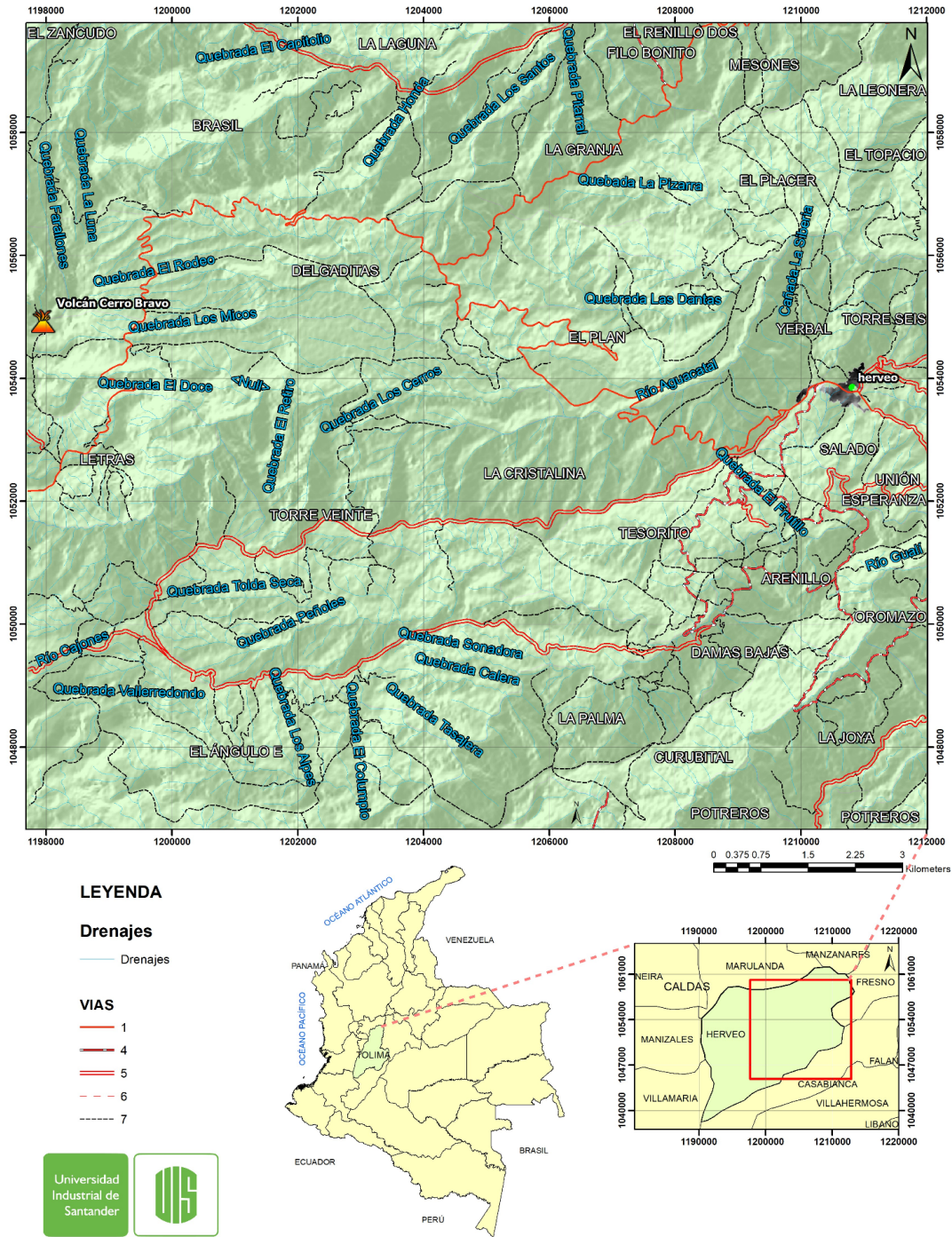
### 4.1 Localización

El área de estudio se localiza a nivel regional sobre la Cordillera Central de Los Andes colombianos, por lo que predominará un relieve montañoso, con volcanes nevados asociados al complejo volcánico Ruiz-Tolima, y condiciones climáticas variables. Localmente, el municipio de Herveo (Figura 1) se ubica al noroccidente del departamento de Tolima, Colombia, presentando los siguientes límites municipales: Hacia el norte con Marulanda, al oriente con Fresno, por el sur con Casabianca y al occidente con Manizales (Ingeominas, 1993). El área total del municipio de Herveo es de 342 km<sup>2</sup>, de los cuales 2.7 Km<sup>2</sup>, pertenecen a la cabecera urbana y 32.2 Km<sup>2</sup> al sector rural (Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres [CMGRD], 2021).

Con respecto al clima e hidrografía de la zona, debido a la presencia de 6 provincias climáticas, se dan variaciones de temperatura entre los 0° a 12° C, hacia las zonas de mayor altitud (2.700 a 4.450 ms.n.m), registrando precipitaciones anuales promedio de 1400 a 2400 mm, mientras que en las regiones con menores altitudes (1550 a 2400 ms.n.m) la temperatura oscila de los 12 ° a 20° C y se reportan precipitaciones anuales de 1800 a 2700 mm, además se ha determinado que el municipio de Herveo hace parte de las cuenca hidrológicas de los ríos Guarínó y Gualí (CMGRD, 2021). En la morfología del terreno, se destaca la presencia del Volcán Cerro Bravo, el cual reposa sobre el Páramos de Letras, a una altura de 4050 ms.n.m, cerca al límite con el departamento de Caldas (Arango-Palacio *et al.*, 2017).

Figura 1

Mapa de localización del área de estudio (Herveo, Tolima)



DATOS TOMADOS DE: IGAC

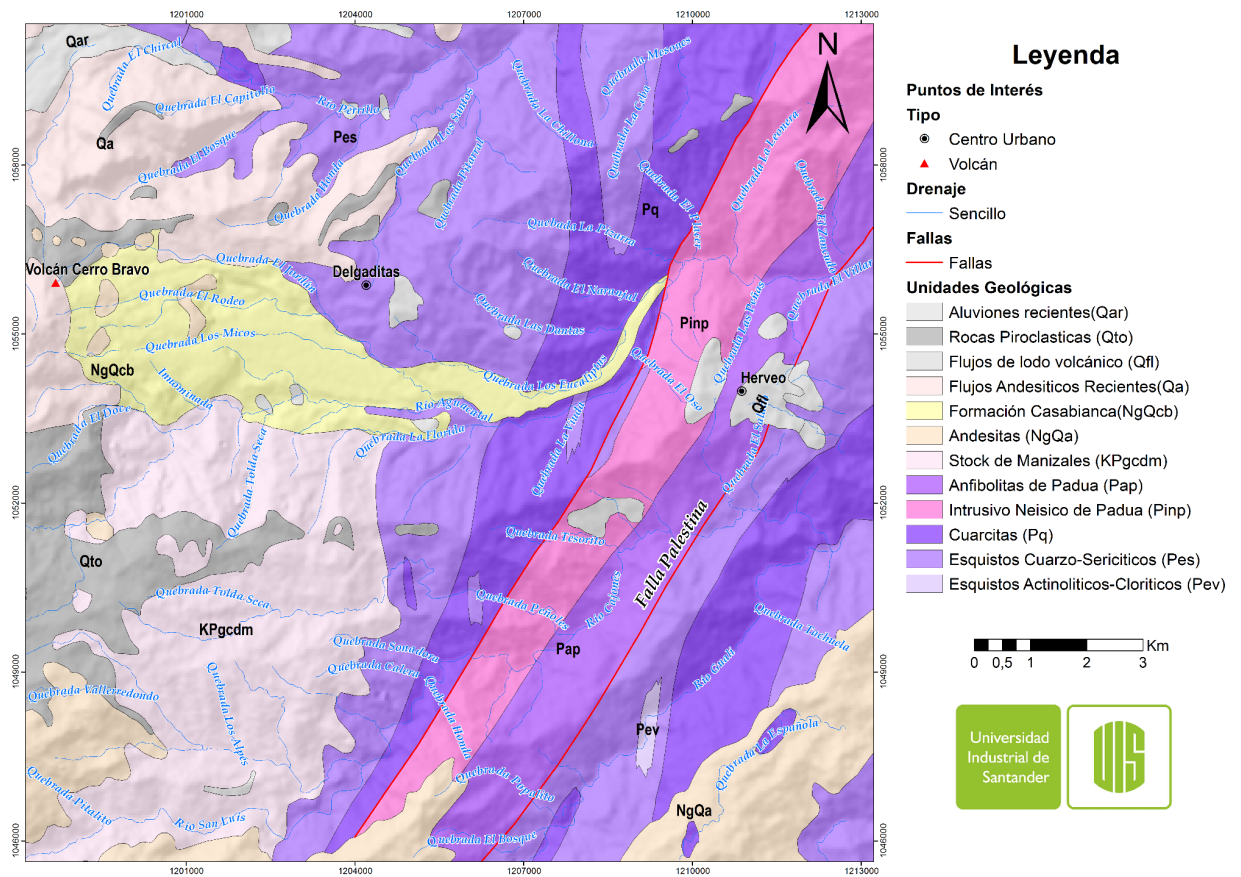
Nota. Localización a nivel departamental y municipal del área de estudio.

### 4.2 Contexto Geológico

Para la región de estudio afloran unidades de la era Paleozoica hasta la Cenozoica, donde se encuentran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, estrechamente relacionadas a los eventos orogénicos de la Cordillera Central, controlada estructuralmente por los sistemas de fallas de Cauca-Romeral y Palestina (Figura 2), así como a la actividad eruptiva asociada al Volcán Cerro Bravo (González, 2001). A continuación, se describen cada una de las unidades litológicas de la más antigua a la más reciente:

**Figura 2**

*Geología del municipio de Herveo, Tolima*



*Nota.* Unidades y fallas geológicas de la zona de estudio. Adaptado de Mosquera *et al.*, 1998.

El **Complejo Cajamarca** consiste en rocas metamórficas de edad Paleozoica, que se han descrito como parte del basamento del Volcán Cerro Bravo (Maya & González, 1995, como se citó en Arango-Palacio *et al.*, 2017). Las unidades se dividieron en 3 grupos definidos por González, (2001) de la siguiente forma: El grupo pelítico incluye los **Esquistos Cuarzo-Sericíticos**, donde la carretera Delgaditas-Herveo es una de las mejores zonas de exposición de esta unidad. El grupo cuarzoso compuesto por una unidad de **Cuarcitas** intercaladas con los esquistos cuarzo-sericíticos, y el grupo básico que incluye la unidad **Esquistos Actinolíticos-Cloríticos**. Estas dos unidades afloran hacia el sureste de la zona de estudio.

El **Intrusivo Néisico de Padua** y la **Anfibolita de Padua** son unidades del Paleozoico tardío, siendo la primera, rocas con una composición tonalítica a granodiorítica, que afloran hacia la carretera de Mesones-Padua y en la cabecera de los ríos Aguacatal y Gualí (González, 2001). La segunda unidad consiste de anfibolitas que afloran al oeste del casco urbano de Herveo (Ingeominas, 1993). Se ha descrito un contacto concordante entre ambas unidades y un contacto fallado entre la Anfibolita de Padua y rocas del Complejo Cajamarca (Camargo, 2007).

Hacia el mesozoico se encuentra el **Stock de Manizales**, de edad Cretácica tardía o Paleoceno (González, 2001; Plazas *et al.*, 2013), (González, 2001), descrita como una tonalita-granodiorita. En el sector de la vereda de Letras, se ha identificado un contacto intrusivo entre esta unidad y rocas del Complejo Cajamarca (Barrero & Vesga, 1976, como se citó en Arango-Palacio *et al.*, 2017).

La **Formación Casabianca** consiste de sedimentitas volcanogénicas del Plioceno superior al Pleistoceno, producto de la actividad de los volcanes Ruiz-Cerro Bravo, así como de tobas líticas y flujos lahárico no diferenciados (Carlos *et al.*, 1990; Ingeominas, 1993). En el

sector de Delgaditas y páramo de Herveo, se encuentra en contacto discordante con esquistos del Complejo Cajamarca (González, 2001).

El material producto de la actividad volcánica ocurrida en la zona se ha diferenciado, según edad y composición de los flujos emitidos, en los siguientes depósitos, descritos por González, (2001):

**Flujos andesíticos** que cubren las unidades ígneas y metamórficas en las zonas aledañas al volcán Cerro Bravo. Los **Flujos piroclásticos** en los sectores de La Plata y Brasil (carretera a Herveo), que incluye **Flujos de lodo volcánico** y material proveniente de depósitos volcanoclásticos. Finalmente, los depósitos de **Rocas piroclásticas**, en algunos cortes de la carretera Letras-Herveo, que son resultado de actividad volcánica cuaternaria, y **Aluviones recientes** descritos como depósitos no consolidados de material aluvial y coluvial del Holoceno.

#### 4.3 Marco tectónico

La configuración tectónica de la Cordillera Central está definida a nivel regional por la subducción de las placas Nazca y Caribe, bajo el borde NW de la placa Suramericana, influyendo en la formación del Cinturón Volcánico de Los Andes (Pinzón *et al.*, 2018). Esta región hace parte del sistema tectónico andino, presentando una tendencia general relacionadas a la falla Cauca-Almaguer y al sistema de fallas de Palestina (Mejía *et al.*, 2012).

Localmente, el municipio de Herveo se asocia con el contexto tectónico del Macizo Ruiz-Tolima, el cual se formó a lo largo del eje de la falla de Palestina (rumbo dextralateral) (Ingeominas, 1993). También, se han establecido fallas locales activas indicadoras de actividad cuaternaria, donde González, (2001) identifica dos grupos: Fallas normales verticales de dirección NS-NE, que cortan la Formación Casabianca y fallas normales de dirección NE, con un trazo principal observable sobre las vías Herveo-Delgaditas y Herveo-Casabianca.

Para el Volcán Cerro Bravo, su ubicación está dada casi paralelamente entre la falla de San Jerónimo y la falla de Palestina, donde esta última se ha relacionado a una fuente sísmica hacia el sector de Fresno, por lo que se ha establecido esta configuración estructural, como la posible causa de sismicidad de carácter tectónico-volcánico y presencia de movimientos en masa en la zona de estudio (Bohórquez *et al.*, 2005; Mejía *et al.*, 2012; Vega, 2016).

#### **4.4 Geomorfología**

Las características tectónicas y geológicas de la región se manifiestan en una morfología variada, definida por el relieve del flanco oriental de la cordillera central. Ingeominas, (1993) ha caracterizado tres unidades geomorfológicas localmente: Una unidad plana, con pendientes menores de 5°. Una segunda unidad ondulada, con pendientes entre 5° y 20°, definida por depósitos volcánicos de caída que suavizaron la topografía existente. Finalmente, la unidad montañosa, con pendientes que varían entre los 35° a 90°, siendo la zona de mayor elevación hacia el sector de Letras, y se ha identificado por presentar la mayor ocurrencia de movimientos en masa. Además, se puede asociar esta unidad con las litologías del Complejo Cajamarca y las rocas ígneas intrusivas, encontrando que la actividad del sistemas de fallas de Romeral genera pendientes inestables en las zonas montañosas, así como una depresión lineal producto del trazo de la falla de Palestina (González, 2001).

El volcán Cerro Bravo se ubica sobre la depresión volcanotectónica de Letras, al oeste del municipio de Herveo, clasificado como un volcán compuesto, de composición andesítica y dacítica, presentando en la actualidad una altura de 4000 ms.n.m (Pinzón *et al.*, 2018), donde se identifican dos estructuras representativas de su historia eruptiva, denominadas Cerro Bravo Antiguo y Cerro Bravo Moderno. La estructura más antigua es del Pleistoceno inferior, mientras que las calderas formadas sobre las estructuras antiguas se han asociado al Cerro Bravo

Moderno, con edad del Holoceno (Thouret *et al.*, 1985). Aunque, otras interpretaciones de su morfología identifican 17 unidades geomorfológicas, que representan los eventos eruptivos ocurridos durante la evolución del edificio volcánico (Arango-Palacio *et al.*, 2017).

#### **4.5 Marco teórico**

Los detonantes de movimientos en masa consisten en estímulos que ocasionan una respuesta casi inmediata en forma de un movimiento, debido al rápido aumento en esfuerzos que afectan la estabilidad de la ladera (Wieczorek, 1996), dichos estímulos pueden ser endógenos o exógenos, dependiendo de los agentes que estén generando el fallo en la superficie (Broms & Wong, 1991), donde se han mencionado las precipitaciones y sismos como los factores detonantes más comunes de movimientos en masa, principalmente de tipo deslizamiento (Zaruba & Vojtech, 1982; Vargas Cuervo, 2000).

Para poder comprender el comportamiento de los factores detonantes de movimientos en masa es necesario expresar en parámetros cuantificables, como magnitud y frecuencia, dichos detonantes, con el fin de calcular la probabilidad de ocurrencia del movimiento en términos de tiempo (Aristizabal-Giraldo *et al.*, 2010). En el caso de la magnitud, esta consiste en la relación entre el volumen de material desplazado, la actividad y velocidad relativa del movimiento (Vargas Cuervo, 2000), mientras que la frecuencia es el número de eventos que suceden en un intervalo de tiempo establecido, y considerando estos dos parámetros, se puede definir el periodo de retorno como el rango de tiempo promedio donde se espera que vuelva a ocurrir un evento de determinada magnitud (Corominas *et al.*, 2014).

La caracterización de los elementos detonantes de movimientos en masa propuestos por el Servicio Geológico Colombiano, en su “*Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25.000*”, define que la probabilidad temporal de ocurrencia

de un movimiento en masa se puede relacionar directamente con la probabilidad de ocurrencia de un detonante (P.ej. precipitación o sismo) con una magnitud suficiente para causarlo (Rodríguez *et al.*, 2017, p.87).

La precipitación es el depósito de agua proveniente de la atmósfera que cae en la superficie terrestre, en forma de lluvia, granizo o nieve (Jaramillo, 2005; Chow *et al.*, 2008), donde la lluvia como detonante de movimientos en masa actúa sobre las laderas disminuyendo sus propiedades mecánicas o aumentando las fuerzas de cuerpo que desestabilizan el talud, debido al incremento de la presión de poros por acción del agua infiltrada (Ramos *et al.*, 2015). Dependiendo de la duración e intensidad de la lluvia será su impacto en la ocurrencia de movimientos en masa, encontrando que lluvias cortas e intensas detonarán movimientos superficiales, mientras que la distribución y variación de la lluvia en períodos largos se relaciona a movimientos profundos (Crosta, 1998; Aleotti, 2004, como se citó en Aristizabal-Giraldo *et al.*, 2010).

Para analizar los dos parámetros de la precipitación (duración e intensidad) con el fin de determinar el detonante del evento, Mayorga, (2003) propuso estudiar la lluvia acumulada o crítica, siendo la resultante de la precipitación acumulada durante los últimos 180 días anteriores a la ocurrencia del movimiento, y la lluvia evento o de corta duración, que consiste en la precipitación en las 24 horas previas al movimiento. Otro autores, como Moreno *et al.*, (2006), establecen 15 días anteriores al evento como rango de tiempo para la lluvia crítica.

Rodríguez *et al.*, (1999) menciona la magnitud de los sismos como parámetro determinante en que se produzca un movimiento en masa, para lo cual se debe definir una magnitud mínima para que ocurra el evento, además de correlacionar la magnitud con el área total afectada por el movimiento, y establecer la distancia máxima entre el epicentro del sismo y

la ocurrencia del movimiento. Para el caso de deslizamientos, caídas y rupturas en suelo, se ha establecido una magnitud de  $M_L= 4.0$  para detonar estos eventos, mientras que, para las avalanchas, se define una magnitud de  $M_S=6.0$  (Rodríguez, 2009).

## 5. Estado del arte

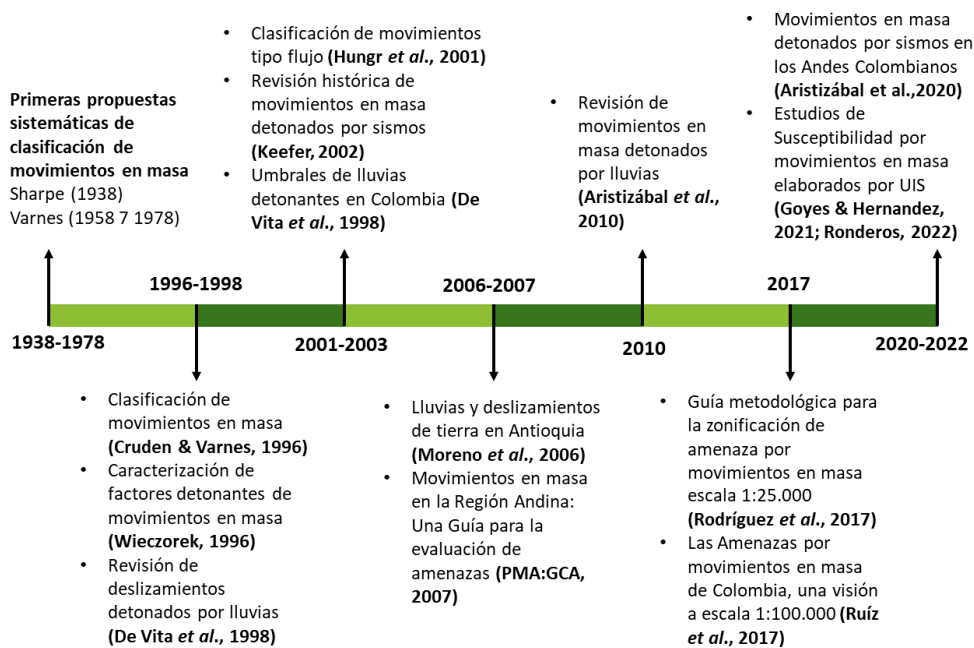
En la construcción de medidas para el control y mitigación de la amenaza por movimientos en masa, la creación de mapas de zonificación es el principal insumo para comprender el riesgo dentro del ordenamiento territorial (PMA:GCA, 2007). Para lograr esto, los estudios de gestión del riesgo partieron de la identificación y clasificación de los distintos tipos de movimientos en masa, en Montero, (2017) se hace una revisión de las clasificaciones propuestas hasta la fecha sobre este tema, partiendo de autores como Sharpe, quien en 1938 desarrolló la primera clasificación sistemática de movimientos en masa conocida en América, así como el aporte de David Varnes en 1958 en la postulación de los 5 tipos básicos de movimientos conocidos actualmente (caída, deslizamiento, propagación lateral, flujo y volcamiento). Sin embargo, la falta de unificación en la terminología utilizada en la clasificación de los movimientos en masa ha dificultado la construcción del conocimiento del riesgo, tema que se ha tratado en las propuestas de clasificación de Cruden & Varnes, (1996) y Hungr *et al.*, (2001).

Además de considerar el tipo de movimiento en masa, en la zonificación de amenaza por este fenómeno es necesario determinar la ocurrencia de estos eventos a partir de sus factores causales, que incluyen condicionantes y detonantes (Montero, 2017), donde autores como Wieczorek, (1996), definieron precipitaciones intensas, derretimiento del hielo, cambios en el nivel de agua, erupciones volcánicas y eventos sísmicos como principales detonantes naturales

de movimientos en masa, así como la influencia de la actividad antropogénica en desencadenar este tipo de eventos. En la caracterización de los factores detonantes, se ha encontrado una alta ocurrencia de movimientos en masa, en especial de tipo deslizamiento, asociados a lluvias, como se muestra en la revisión desarrollada por De Vita *et al.*, (1998) sobre la correlación entre ambos elementos, y en estudios más recientes como el de Aristizábal-Giraldo *et al.*, (2010), mientras que para el factor sismo, Keefer, (2002) publica un revisión histórica sobre el estudio de movimientos en masa desencadenados por actividad sísmica (Figura 3).

**Figura 3**

*Evolución del estudio de amenaza por movimientos en masa y sus detonantes*



*Nota.* Línea de tiempo donde se muestran los autores que han aportado en el estudio de la amenaza por movimientos en masa y sus detonantes.

En Colombia, la gestión del riesgo por movimientos en masa sigue la directrices de documentos para la evaluación de este tipo de amenazas, como la propuesta por el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas (PMA:GCA, 2007), donde se adaptaron las clasificaciones y terminologías de la lengua inglesa sobre el tema, al contexto regional de los Andes. Esto permitió la publicación de las guías metodológicas para la zonificación de amenaza por movimientos en masa en escala 1:100.000 y 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano (Ruiz *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2017), donde se incluyen los métodos necesarios para analizar los factores detonantes dentro de la caracterización de amenaza en las escalas mencionadas.

Estudios enfocados en el análisis del detonante precipitación, en el contexto geológico, tectónico, hidrológico y climatológico de Colombia, se pueden encontrar en Mayorga, (2003), quien determinó los umbrales de lluvias detonantes de movimientos en masa para cuatro regiones del país y Moreno *et al.*, (2006), donde mencionan la ocurrencia de deslizamientos desencadenados por lluvias en el departamento de Antioquia.

En la bibliografía disponible para sismos se destaca el trabajo de Aristizábal-Giraldo *et al.*, (2020), en el cual se analizan los movimientos en masa detonados por sismos en la región de los Andes. En los últimos años, se han implementado nuevas metodologías al estudio de la gestión del riesgo dentro del contexto geológico del país, por ejemplo, se han aplicado modelos de redes neuronales en la caracterización de la susceptibilidad por movimientos en masa (Valencia & Martínez, 2018).

Los aportes de la Universidad Industrial de Santander en investigación sobre la gestión del riesgo por amenaza a movimientos en masa se han enfocado en la caracterización y zonificación de susceptibilidad, aplicando métodos estadísticos (pesos de evidencia) como se

observa en Goyes & Hernandez, (2021) y Ronderos, (2022). Sin embargo, estudios enfocados al análisis de lluvias y sismos detonantes de movimientos en masa aplicando métodos probabilísticos, como el realizado por Valencia & Martínez-Graña, (2023), no han sido realizados hasta el momento en el área de estudio a la escala propuesta.

## 6. Metodología

### 6.1. Procedimiento

El proyecto fue realizado bajo los lineamientos establecidos en la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25:000 del Servicio Geológico Colombiano, adaptando la metodología de caracterización de la amenaza propuesta en (Rodríguez *et al.*, 2017) para el estudio de lluvia y sismos como detonantes de movimientos en masa en el área de estudio. La Figura 4 presenta las fases y respectivas actividades con las que se desarrolló la investigación.

#### 6.1.1. Fase 1. Adquisición de información

Consulta bibliográfica de antecedentes en estudios geológicos, hidrográficos, tectónicos y aplicados a zonificación de amenaza por movimientos en masa en el municipio de Herveo. Los datos adquiridos para el análisis de factores detonantes se obtuvieron de las siguientes fuentes:

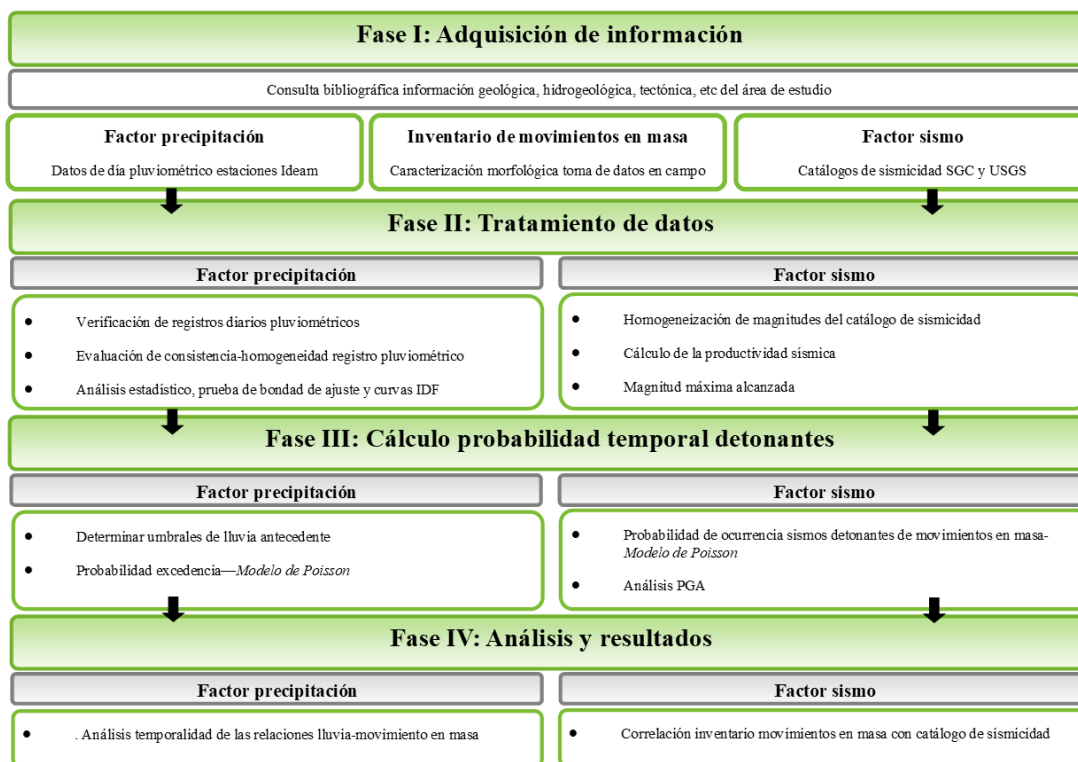
**Detonante precipitación.** Datos de día pluviométrico registrados en las estaciones meteorológicas disponibles en el geoportal del Ideam, (2022).

**Detonante sismo.** Eventos registrados en catálogos de sismicidad del SGC (2022) y Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS] (2022).

**Inventario de movimientos en masa.** Inventario de movimientos en masa para el municipio de Herveo presentado por Castillo & Quintero, (2023), del cual se apoyó en la caracterización morfológica de los movimientos mediante la toma de datos en campo.

**Figura 4**

*Esquema metodológico del trabajo de investigación*



*Nota.* Actividades correspondientes a cada una de las fases del trabajo de investigación.

**6.1.2. Fase 2. Tratamiento de datos**

**Detonante precipitación.** Verificación de registros diarios de estaciones pluviométricas. En caso de presentar datos faltantes menores al 10% del total de registros dentro de la serie de tiempo propuesta, se hace un relleno de datos mediante el método de razones promedio (Unesco

Rostlac [Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe], 1982).

Evaluación de consistencia y homogeneidad del registro pluviométrico aplicando los métodos de prueba de datos dudosos-*outliers* (consistencia) (Chow *et al.*, 2008), curvas de doble masa (homogeneidad) (Montealegre, 1990) e histograma de precipitación máxima 24 horas (Alperin, 2013).

Análisis estadístico de la temporalidad de las lluvias por medio del cálculo de los periodos de retorno de eventos extremos utilizando la distribución Normal, Log-Normal y Gumbel (Montealegre, 1990; Chow *et al.*, 2008). Posteriormente se aplica la prueba de bondad (Chi cuadrado) para determinar cuál distribución presenta el mejor ajuste (Alperin, 2013). Con la distribución definida, se calculan las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de cada estación pluviométrica utilizando el método de Vargas & Díaz-Granados, (1998).

**Detonante sismo.** Homogeneización de magnitudes del catálogo de sismicidad según método establecido en Arcila *et al.*, (2018). El análisis estadístico del registro de sismicidad se realiza con el cálculo de la productividad sísmica y de la magnitud máxima alcanzada (Gutenberg & Richter, 1956; Aki, 1965; Campos-Aranda, 2016).

### **6.1.3. Fase 3. Calculo probabilidad temporal detonantes**

**Detonante precipitación.** Determinar los umbrales de lluvias antecedentes (24 horas y 15 días) detonantes de movimientos en masa y su probabilidad de excedencia para un periodo de retorno determinado, a través de un modelo de probabilidad de Poisson (Jaiswal & van Westen, 2009; Rodríguez *et al.*, 2017).

**Detonante sismo.** Calcular la probabilidad de ocurrencia de sismos detonantes de movimientos en masa por medio de un modelo de distribución de Poisson (Crovelli, 2000;

Rodríguez *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2019; Valencia & Martínez-Graña, 2023). Conjunto a la estimación probabilística, se realiza un análisis de la influencia de la aceleración máxima del suelo (PGA) en la generación de movimientos en masa para la zona de estudio (SGC, 2010; Arcila *et al.*, 2018).

#### **6.1.4. Fase 4. Análisis y resultados**

**Detonante precipitación.** Análisis del comportamiento temporal de las relaciones lluvia-movimiento en masa a partir de los resultados obtenidos de los umbrales de lluvia, su probabilidad de excedencia y período de retorno (Rodríguez *et al.*, 2017).

**Detonante sismo.** Correlación de inventario de movimientos en masa con catálogo de sismicidad para definir la magnitud de los sismos detonantes de movimientos en el área de estudio, con respecto a los resultados obtenidos de la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de este tipo y los valores PGA (Rodríguez *et al.*, 2017; Ortiz & Martínez-Graña, 2023).

## **6.2. Métodos**

El fundamento matemático de los métodos mencionados en el apartado de procedimiento se presenta en la Figura 5, donde se divide según cada factor detonante (precipitación y sismo), las ecuaciones, funciones, fórmulas y expresiones matemáticas/estadísticas necesarias para calcular la probabilidad temporal de los factores estudiados. También, se hace referencia a la bibliografía consultada para cada uno de los métodos utilizados.

Figura 5

Métodos utilizados en el cálculo de la probabilidad temporal de los detonantes lluvia y sismo

MÉTODOS UTILIZADOS EN EL CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD TEMPORAL			
Precipitación			
<p><b>Método razones promedio (Unesco Rostlac, 1982)</b></p> $P_X = \frac{\overline{P_X}}{3} \left[ \frac{P_A}{\overline{P_A}} + \frac{P_B}{\overline{P_B}} + \frac{P_C}{\overline{P_C}} \right]$	<p><math>P_A, P_B, P_C, P_X</math> Precipitación en las estaciones A,B,C durante el período que falta en X</p> $\overline{P_A}, \overline{P_B}, \overline{P_C}, \overline{P_X}$ <p>Promedio de precipitación anual registrada en A,B,C y X de un período común</p>	<p><b>Prueba de datos dudosos -outliers (Chow et al., 2008)</b></p> <p>Sy= Desviación estándar muestra y= media Kn= Coeficiente para un tamaño de muestras n</p>	<p><b>Ecuación datos dudosos altos (YH)</b></p> $Y_H = \bar{y} + K_n * S_y$ <p><b>Ecuación datos dudosos bajos (YL)</b></p> $Y_L = \bar{y} - K_n * S_y$
<p><b>Curvas doble masa (Montealegre, 1990)</b></p> $Pa = (ma/mo)Po$ <p>Pa= Precipitación ajustada Po= Precipitación observada ma=Pendiente al cual los registros son ajustados mo= Pendiente en el tiempo en que Po fue observado</p>		<p><b>Histograma Pmáx 24 horas (Alperin, 2013)</b></p> <p>Rango (R)= dato mayor valor - dato menor valor Número de clases (K)= √ Número de datos (n)</p>	
<b>Análisis Estadístico: Distribuciones (Montealegre, 1990; Chow et al., 2008)</b>			
<p><b>Normal</b></p> $f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \quad -\infty \leq z \leq \infty$ <p>Función de densidad de probabilidad</p>	<p><b>Log-Normal</b></p> $f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad x > 0$ <p>Donde y=logx</p>	<p><b>Gumbel</b></p> $P = e^{-e^{-y}} \text{ donde } y = \alpha(x - U)$ <p>X;U son parámetros</p>	
<p><b>Prueba de bondad de ajuste Chi cuadrado (Alperin, 2013)</b></p> $\chi_c^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(fo-fe)^2}{fe}$ <p>fo=frecuencia observada; fe= frecuencia teórica; k= número de categorías</p>	<p><b>Curvas IDF (Vargas &amp; Díaz-Granados, 1998)</b></p> <p>a,b,c,d,e,f son constantes definidas para la región Andina</p>	$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT^f$ <p>M: prom valor máx anual precipitación diaria N: Número de día con lluvia al año N PT: Precipitación media anual</p>	
<p><b>Probabilidad de excedencia-Modelo de Poisson (Jaiswal &amp; Van westen (2009); Rodríguez et al., 2017)</b></p>	$P[N(t) \geq 1] = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\mu}\right)$	<p>μ : Intervalo promedio de ocurrencia t: tiempo</p>	
Sismos			
<p><b>Homogeneización de magnitudes (Arcila et al., 2018)</b></p> <p><math>Mw(2.9 &lt; ML \leq 6.1) = 0.958ML + 0.1(\sigma = 0.50)</math>  <math>Mw(3.6 &lt; mb \leq 5.7) = 0.954mb + 0.42(\sigma = 0.28)</math>  <math>Mw(3.6 &lt; Ms \leq 6.1) = 0.689Ms + 1.93(\sigma = 0.20)</math>  <math>Mw(6.1 &lt; Ms \leq 8.9) = 0.928Ms + 0.474(\sigma = 0.18)</math></p>	<p><b>Magnitud máxima Alcanzada (Gutenberg &amp; Richter, 1956)</b></p> <p>Años para ocurrencia de un evento de magnitud M: 1/N Eventos de magnitud M en un año (N): <math>10^{-(\log(N))}</math></p>		
<p><b>Regresión lineal: mínimos cuadrados (Aki, 1965)</b></p> $\beta = \frac{1}{\bar{m} - m_{min}} \text{ donde } \beta = b \ln(10)$ <p><math>\bar{m}</math>: magnitud promedio mmin: magnitud mínima en el catálogo b: número de sismos de diferente magnitud</p>	<p><b>Productividad sísmica (Gutenberg &amp; Richter, 1956)</b></p> $\log(N) = a - bM$ <p>Log(N): Productividad sísmica a,b: radio entre los sismos de mayor y/o menos magnitud M: magnitud</p>	<p><b>Probabilidad de ocurrencia sismos detonantes de movimientos en masa-Modelo de Poisson (Crovelli, 2000; Rodríguez et al., 2017; Wu et al., 2019; Valencia &amp; Martínez-Graña, 2023)</b></p> $P_{\tau_m} = 1 - e^{-t/\tau}$ <p><math>P_{\tau_m}</math>: Probabilidad de ocurrencia de un evento de magnitud M en un periodo de tiempo determinado t: Número de eventos de magnitud M (Gutenberg &amp; Richter) T: Tiempo evaluado para una magnitud M</p>	

Nota. Cuadro de síntesis de expresiones matemáticas utilizadas en el proyecto.

## 7. Resultados

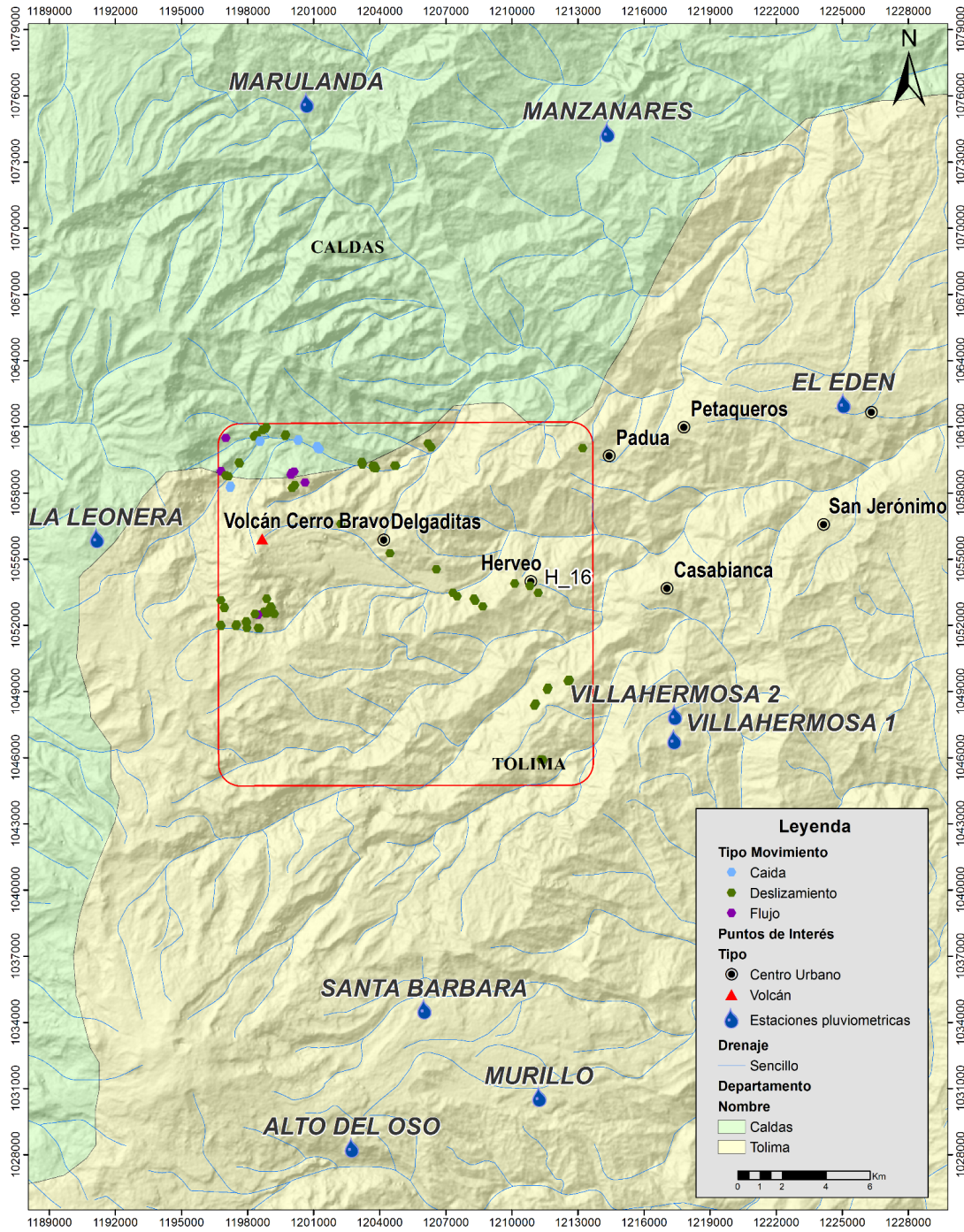
### 7.1 Inventario de movimientos en masa, registro pluviométrico y catálogo de sismicidad

El inventario de movimientos en masa utilizado en esta investigación fue adaptado de Castillo & Quintero, (2023), donde se registraron un total de 291 procesos morfodinámicos para un sector del municipio de Herveo, del cual se aportó en la caracterización morfológica de los movimientos mediante la toma de datos en campo según los parámetros establecidos en el *Formato Modificado para Inventario de Movimientos en Masa* (PMA:GCA, 2007). Para poder establecer una correlación entre la ocurrencia de movimientos en masa con un detonante, es necesario disponer de la localización y fechas con un rango de precisión diaria de los eventos registrados (Rodríguez *et al.*, 2017). Por lo tanto, el inventario fue filtrado para cumplir con estas condiciones (Figura 6), dejando un total de 54 movimientos en masa (Apéndice A), que fueron clasificados según la metodología de Cruden & Varnes, (1996) en 5 caídas de detritos, 7 flujos de detritos y 42 deslizamientos (31 deslizamientos traslacionales planares, 1 deslizamiento traslacional en cuña y 10 deslizamientos de suelo no clasificados).

El registro de precipitaciones fue adquirido de 9 estaciones meteorológicas (La Leonera, El Edén, Murillo, Alto del Oso, Manzanares, Marulanda, Santa Bárbara, Villahermosa-1 y Villahermosa-2, (Figura 6) disponibles en el portal de datos del Ideam. Para la elección de las estaciones se consideró que contaran con datos de día pluviométrico en una serie de tiempo considerable y consistente, que a partir de la información obtenida fue definida para una ventana de tiempo de 47 años (1975-2021).

**Figura 6**

*Mapa de localización estaciones pluviométricas e inventario morfodinámico*



*Nota.* Localización geográfica de las estaciones pluviométricas en el área de estudio.

El catálogo de sismicidad se recopiló de los registros de sismos presentes en las bases de datos del SGC y USGS. Ambas consultas fueron filtradas considerando una distancia epicentral radial de 200 km entre la zona de estudio y los sismos, así como una profundidad en un rango de 0-50 km para el hipocentro de los eventos, por su influencia en detonar movimientos en masa superficiales (Rodríguez *et al.*, 1999; Keefer, 2002).

El registro obtenido de la información del Servicio Geológico Colombiano para los datos recientes fue de 743 sismos, con datos de magnitud en  $M_l$ ,  $M_s$  y  $M_w$ , para el periodo de registro de 1993 a 2021, mientras que el registro histórico de esta fuente incluye 13 eventos que cubren un rango de tiempo de 1644 a 1988. En el caso de los datos del Servicio Geológico de Estados Unidos, se encontraron 167 sismos reportados, de magnitudes  $M_l$ ,  $M_b$ ,  $M_s$  y  $M_w$ , para la información registrada en el rango de tiempo entre 1923 a 2021. La homogeneización de magnitudes a  $M_w$ , unificación de catálogos y definición de sismos recientes e históricos será tratado en el apartado de caracterización del detonante sismo.

## **7.2. Caracterización detonante precipitación**

Para calcular la probabilidad temporal del factor precipitación se inició con la verificación del registro de día pluviométrico obtenido de las 9 estaciones meteorológicas, evaluando la total cobertura de los 47 años definidos como serie de tiempo y en caso de que la estación tuviera datos faltantes, se procedió a verificar que estos no superaran el 10% del total del período evaluado (De Silva *et al.*, 2007).

De las 9 estaciones consultadas, se encontró que cuatro contaban con un registro anual consecutivo (El Edén, Murillo, Villahermosa 2 y Marulanda), mientras que las cinco restantes (La Leonera, Villahermosa 1, Alto del Oso, Manzanares y Santa Bárbara) presentaron datos faltantes, aunque, estos fueron menores al 10%, por lo que se procedió al relleno de datos. Uno

de los métodos para el relleno de datos faltantes hidrológicos en una serie de tiempo es el promedio aritmético (De Silva *et al.*, 2007; Chow *et al.*, 2008). Sin embargo, este no considera las condiciones orográficas en la ubicación de las estaciones, lo cual es un factor que influye en la variabilidad del registro pluviométrico (Singh, 1992), de modo que se utilizó el método de razones promedio (Unesco Rostlac, 1982), aplicado en zonas montañosas, donde se asigna un peso a cada estación cercana y con altura semejante a la estación a rellenar, de esta manera se calcularon los datos del período faltante, siguiendo la ecuación presentada en la Figura 5, para las estaciones de La Leonera, Villahermosa 1, Alto del Oso y Santa Bárbara.

Con el registro pluviométrico completo, se evaluó la consistencia y homogeneidad de los datos. Para esto, existen diversos métodos cuantitativos, que pueden clasificarse en pruebas paramétricas y no paramétricas. Las primeras consisten de métodos desarrollados en suposiciones, por ejemplo la normalidad (distribución normal) e independencia de las series de tiempo, mientras que las no paramétricas no consideran ninguna suposición en cuanto a la distribución de probabilidad (Castro & Escobar, 2010; Mirabbasi *et al.*, 2020). Para tener un análisis más completo se aplicaron ambos tipos de pruebas a los datos (Kocsis *et al.*, 2017; Totaro *et al.*, 2019), siendo la prueba paramétrica el análisis de consistencia y las pruebas no paramétricas el análisis de homogeneidad (Bateman, 2007; Valencia & Martínez-Graña, 2023).

Una estación es consistente cuando no hay cambios en la cantidad de error sistemático asociado al registro de datos (Dahmen & Hall, 1990). Para analizar la consistencia de las estaciones se utilizó la prueba de datos dudosos-*outliers* (Figura 5) en el sentido de Chow *et al.*, (2008), con la que se identificó a nivel general un registro consistente en las estaciones, encontrando solo datos atípicos para un año puntual en algunas (**El Edén: 2013; Murillo: 2012; Alto del Oso: 2012; Manzanares: 1979; Marulanda: 1988; Santa Barbara: 2012**), que al ser

ajustados, demuestran que no afectan de manera representativa la consistencia de los registros (Apéndice B Figura A).

Una estación se considera homogénea cuando no hay cambios repentinos en su media (Thorn, 1966; Rospigliosi, 2018), siendo el método de curvas doble masa uno de los más utilizados, ya que permite comparar la serie de estudio con el registro pluviométrico de una serie patrón/referencia que no presenta cambios en su tendencia (Montealegre, 1990; Bateman, 2007; Castro & Escobar, 2010). Al aplicar el método de curvas doble masa (Figura 5), se encontró que la estación Villahermosa 2 presentó el registro más homogéneo, por lo que fue utilizada como serie de referencia. En general, las estaciones presentan una tendencia homogénea (Apéndice B Figura B), sin embargo, las estaciones Alto del Oso y Santa Bárbara presentaron un ligero cambio de tendencia hacia el registro de 2011-2012 y la estación Marulanda en 1987, lo cual no es un indicador lo suficientemente considerable para definir a estas estaciones como heterogéneas. Aun así, se optó por ajustar sus pendientes (Apéndice B Figura C).

El segundo método utilizado para la valoración de la homogeneidad en las estaciones consistió en un análisis exploratorio gráfico a partir de un histograma de la precipitación máxima 24 horas de cada estación, el cual facilita el análisis de tendencias e identificación de datos extremos para un periodo registrado (Alperin, 2013; Castro & Escobar, 2010). Al elaborar el histograma para cada una de las estaciones se encontró lo siguiente (Apéndice B, Figura D): En los datos predomina una tendencia a mantenerse simétricos alrededor del promedio, es decir un comportamiento gaussiano, del que se pudo interpretar a partir de las frecuencias, que el intervalo de 25-35 mm es la precipitación máxima de mayor recurrencia y precipitaciones mayores a 70-80 mm se pueden interpretar como valores extremos, donde el registro máximo encontrado fue de 150 mm en la estación El Edén. También, se calcularon los coeficientes de

variación, que es la razón entre desviación estándar y promedio de los datos (Alperin, 2013, p. 25), encontrando que la estación con mayor dispersión fue El Edén (61%) y la de menor variabilidad La Leonera (44%). El resto de estaciones tuvieron coeficientes de variación dentro de este rango, lo cual es una dispersión considerable, no obstante, se debe recordar que los datos hidrológicos son bastante sensibles y variables a través del tiempo (Singh, 1992), por lo que no se asocia este resultado a una heterogeneidad en la calidad de la información.

Con la consistencia y homogeneidad de los datos evaluados, se procedió a realizar el análisis estadístico de la temporalidad de las lluvias con el cálculo de los periodos de retorno ( $T_r$ ) de eventos extremos, por ende se utilizaron las distribuciones Normal, Log-Normal y Gumbel (Thorn, 1966; Montealegre, 1990; Chow *et al.*, 2008), para evaluar la precipitación máxima en un  $T_r = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500$  años (Apéndice B, Tabla A).

Luego, se valoró cuál distribución daba el mejor ajuste para cada estación mediante la prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado, esta permite determinar si un conjunto de datos puede modelarse con una distribución teórica a partir del cálculo de frecuencias de los valores observados y de los valores esperados, para un número determinado de intervalos (Chachero, 2012; Alperin, 2013). Aplicando la ecuación de Chi-Cuadrado descrita en la Figura 5 en cada estación, se encontró que la distribución con el mejor ajuste fue la distribución de Gumbel (Murillo, Alto del Oso, Manzanares, Marulanda y Santa Bárbara) (Apéndice B, Tabla B).

El análisis estadístico de la lluvia culmina con la construcción de las Curvas IDF, las cuales fueron generadas con las descripciones realizadas por Vargas & Díaz-Granados (1998). Al elaborar las curvas (Apéndice B, Figura E), se obtuvo que la estación Manzanares presenta los mayores registros de intensidad en los primeros 5 minutos: 45.99 mm/h ( $t_r = 500$  años), 33.87 mm/h ( $t_r = 100$  años) y 29.69 mm/h ( $t_r = 50$  años), seguido de la estación Villahermosa 1 con

resultados de 43.85 mm/h ( $tr=500$  años), 32.29 mm/h ( $tr=100$  años) y 28.21 mm/h ( $tr=50$  años), siendo estas dos estaciones las únicas en presentar valores mayores a 40 mm/h para un período de retorno de 500 años en los primeros 5 minutos. Aunque la estación El Edén tuvo resultados menores a los previamente mencionados, su intensidad también fue considerablemente superior al de las demás en los 5 minutos iniciales: 39.43 mm/h ( $tr=500$  años), 29.04 mm/h ( $tr=100$  años) y 25.45 mm/h ( $tr=50$  años).

En la misma duración, el resto de las estaciones exhibieron resultados de intensidad en los siguientes rangos:  $30 \text{ mm/h} \leq \text{mm/h} < 35$  para un periodo de retorno de 500 años;  $22 \text{ mm/h} \leq \text{mm/h} < 30$  para el período de retorno de 100 años y  $\text{mm/h} < 22$  para el período de retorno de 50 años. La estación con los valores más bajos de intensidad fue Alto del Oso: 30.58 mm/h ( $tr=500$  años), 22.52 mm/h ( $tr=100$  años) y 19.74 mm/h ( $tr=50$  años).

Con el fin de corroborar los resultados del análisis estadístico, se utilizó el método de ponderación inverso a la distancia (IDW), el cual interpola los datos cercanos registrados de una muestra, asignándole un mayor peso a los valores próximos y menos a los distantes (Santos, 2014; Caloiero *et al.*, 2021). Tomando los valores de precipitación máxima total registrados en cada estación, se llevó a cabo la interpolación utilizando el software QGIS, identificando que la región NE-E de la zona de estudio concentra las precipitaciones de mayor valor, adquiridos por las estaciones pluviométricas El Edén (150 mm), Manzanares (148.2 mm) y Villahermosa 1 (130 mm), mientras que en el costado S-SW, disminuyen los valores de precipitación máxima, como se muestra en las estaciones Alto del Oso (102.18 mm), Santa Barbara (99.64 mm), Murillo (98 mm) y La Leonera (90.04 mm), siendo esta última la de menor valor registrado.

Considerando los resultados obtenidos del análisis estadístico de la precipitación, se procede a calcular la probabilidad temporal de las precipitaciones, que para la presente

investigación se definió como la probabilidad anual de excedencia de los umbrales de lluvias definidos para los registros 24 horas y 15 días antecedentes en un período de retorno determinado (Rodríguez *et al.*, 2017; Valencia & Martínez-Graña, 2023).

Los umbrales fueron definidos al evaluar la precipitación espacial (Unesco Rostlac 1982, p. 36) de cada estación mediante los polígonos de Thiessen, el cual asigna una ponderación diferencial a cada estación, generando una distribución espacial (Chow *et al.*, 2008; Íñiguez Covarrubias *et al.*, 2011; Aragón-Hernández *et al.*, 2019) que permite identificar cuáles movimientos están dentro del área de influencia de determinada estación. Aplicando este método, se encontró que 42 movimientos están dentro del área de influencia de la estación La Leonera y los 12 movimientos restantes en la estación Villahermosa 1.

Con las dos estaciones seleccionadas, se analizan las lluvias 24 horas y 15 días antecedentes para cada uno de los movimientos y se calculan los umbrales de lluvia a partir del método de caja y bigotes (Alperin, 2013; Valencia & Martínez-Graña, 2023). Dada la falta de homogeneidad en los resultados obtenidos para cada estación, se definieron los umbrales de lluvias a partir de los datos agrupados de la estación La Leonera y Villahermosa 1. También, se encontró que el umbral 24 horas no era representativo o no describe un patrón conciso para la ocurrencia de movimientos en masa, en su lugar se consideraron las lluvias de 3 días antecedentes (Guzzetti *et al.*, 2007), obteniendo un umbral de 45.5 mm y para el umbral 15 días antecedentes se tuvo 176.1 mm como resultado.

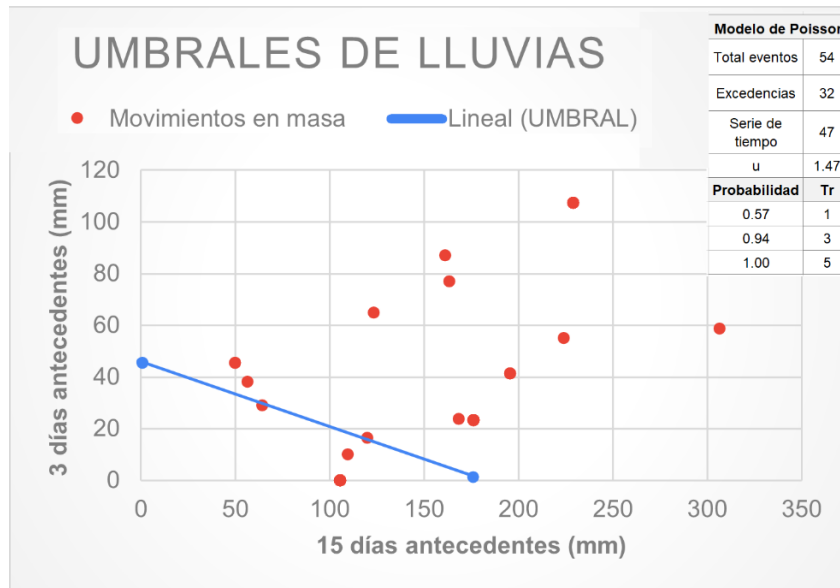
Se esclarece la importancia del registro 24 horas, ya que este define de forma coherente la acción del detonante para el movimiento en masa. La falta de una concordancia entre la fecha del evento y la lluvia registrada puede estar más asociada a factores en la toma del registro de

precipitación o la carencia de estaciones meteorológicas dentro de la región de estudio (Valencia & Martínez-Graña, 2023).

Al establecer una relación entre ambos umbrales, se calcularon los eventos excedentes en el inventario, encontrando que de los 54 movimientos en masa considerados, 32 excedían el umbral definido. Con esta relación, se aplicó un modelo de Poisson en un periodo de 47 años (Jaiswal & van Westen, 2009; Rodríguez *et al.*, 2017) para calcular la probabilidad de excedencia en un periodo de retorno determinado (Figura 7), de esta manera se halló que para un  $Tr= 5$  años, hay una probabilidad del 100% de generarse un evento.

**Figura 7**

*Cálculo de la probabilidad de excedencia de las precipitaciones*



*Nota.* Relación umbrales de lluvias antecedentes, excedencias y distribución de Poisson.

Con los resultados obtenidos de la caracterización del detonante precipitación, se puede establecer un comportamiento temporal de las lluvias de Herveo. Los umbrales de lluvias

detonantes de movimientos en masa planteados fueron de 3 días antecedentes (45.5 mm) y 15 días antecedentes (176.1 mm), correlacionando estos resultados con las distribuciones calculadas, los umbrales podrán excederse con alta probabilidad de que se genere al menos un evento para un período de retorno de 5 años. Según los resultados de las curvas IDF y distribución espacial de la lluvia, se espera una mayor ocurrencia de movimientos hacia las zonas donde se ubican las estaciones Manzanares, Villahermosa 1 y El Edén.

### 7.3. Caracterización detonante sismo

El análisis de la actividad sísmica como detonante de movimientos en masa se llevó a cabo desde una aproximación estadística, relacionando la distribución espacial de los movimientos en masa con parámetros sísmicos, que incluyen magnitudes, distancias e intensidades mínimas para su ocurrencia (Rodríguez *et al.*, 2017), por lo tanto, los resultados de esta caracterización estarán expresados en una relación temporal-espacial.

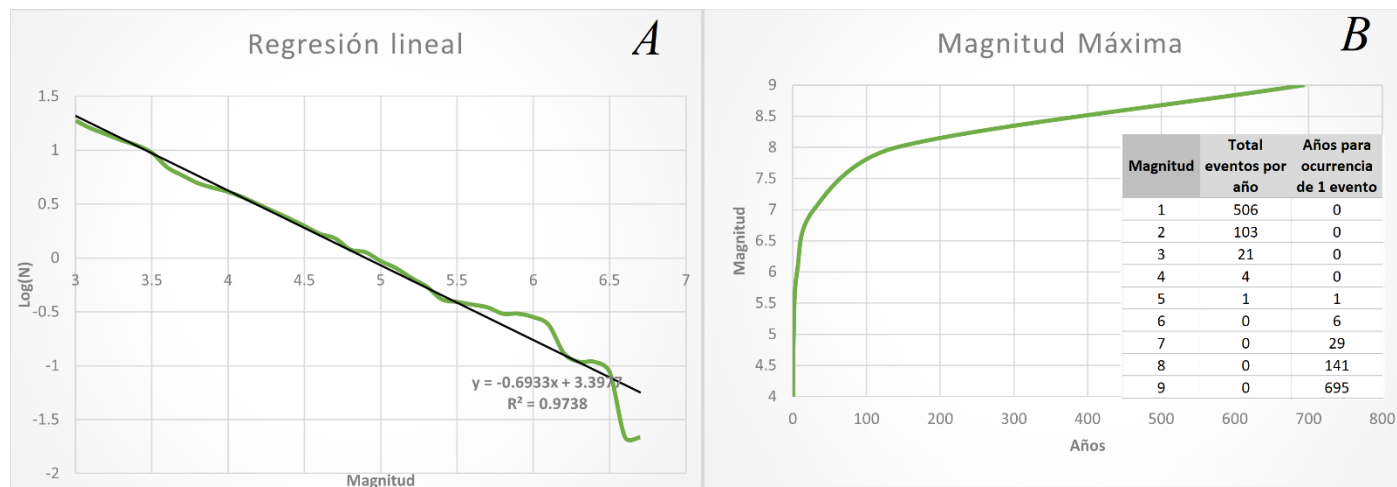
El catálogo de sismicidad es el insumo de partida para el análisis, por tal motivo se hace la homogeneización de magnitudes registradas en los catálogos del SGC y USGS a  $M_w$ , utilizando el estudio de Arcila *et al.*, (2018) (Figura 5). Con las magnitudes unificadas, se hace la integración de ambos catálogos, encontrando que el catálogo histórico incluye 37 eventos sísmicos entre 1644 a 1990, con una magnitud mínima de 2.3 y una máxima de 6.7, mientras que el catálogo de sismicidad reciente cuenta con 886 registros para el periodo 1993-2021, magnitud mínima de 1.9 y máxima de 6.4.

La productividad sísmica, tomando la relación de la ley de Gutenberg & Richter (1956), estima la recurrencia de sismos de una magnitud determinada en una ventana de tiempo definida. Para cuantificar correctamente la productividad, solo se consideraron los sismos históricos de  $M_w \geq 5$ , por consiguiente, los datos de sismicidad reciente empleados fueron de  $1.9 \leq M_w < 5$ . De

esta manera, el cálculo de los parámetros a y b (Figura 5) se llevó a cabo utilizando una regresión lineal (Figura 8a) con el método de mínimos cuadrados (Aki, 1965) y así se logró definir la siguiente ecuación para la productividad sísmica del área de estudio:  $\text{Log}(N) = 3.3977 - 0.6933M$ , donde los resultados para cada magnitud evaluada y la magnitud máxima ( $M_w \geq 4$ ) se presentan en la Figura 8b.

**Figura 8**

*Productividad sísmica*



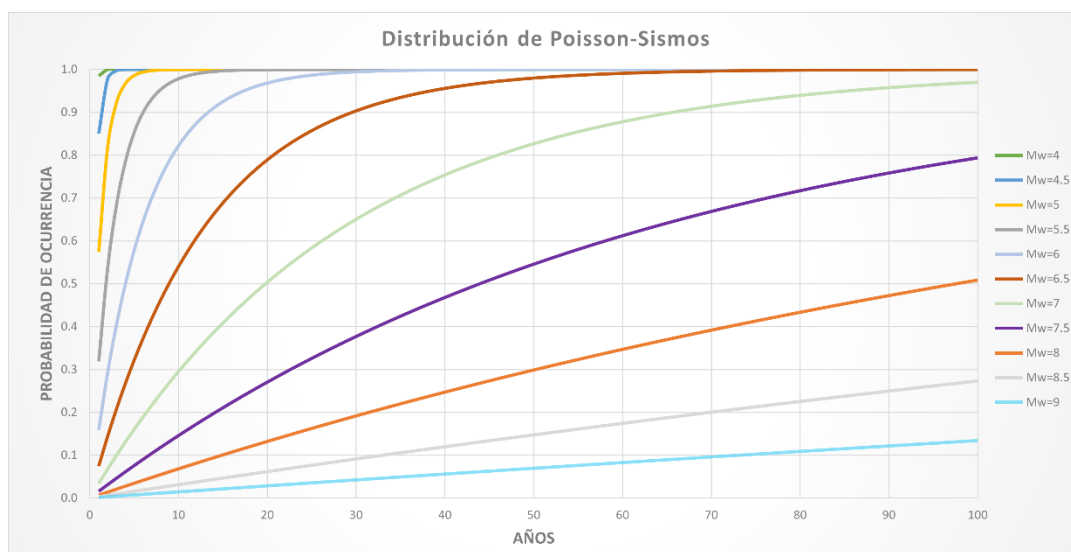
*Nota. A) Regresión lineal - B) Magnitud máxima y resultados productividad sísmica*

Con la productividad sísmica, se calculó la probabilidad de ocurrencia de sismos detonantes de movimientos en masa ( $M_w \geq 4$ ) (Keefer, 2002), mediante un modelo de distribución de Poisson (Crovelli, 2000; Rodríguez *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2019; Valencia & Martínez-Graña, 2023), cuyos resultados se presentan en la Figura 9. Complementariamente, se evaluaron los valores de aceleración pico del suelo (PGA) descritos en el *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para un período de retorno de 475 años* (SGC, 2010) en la zona de estudio,

para el cual se ha asignado un valor 150-200 cm/s<sup>2</sup>. Según Fonseca *et al.*, (2014), estos valores de aceleración pico del suelo son indicadores de una amenaza media a baja por factor sismicidad en el municipio de Herveo.

**Figura 9**

*Distribución de Poisson para sismos*



*Nota. Probabilidad de ocurrencia de sismos  $M_w \geq 4$  en 100 años*

Finalmente, se hizo una correlación entre los eventos del inventario de movimientos en masa y el catálogo de sismicidad. Se consideran solo los sismos de magnitud  $M_w \geq 4$  y con una diferencia diaria entre sismo y movimiento de no más de un mes (30 días) (Valencia & Martínez-Graña, 2023). De los 54 movimientos en masa solo se pudo establecer una correlación. Esta fue entre el deslizamiento de tierra (H\_16) con fecha del 13 de mayo de 1999 y el sismo registrado el mismo día de  $M_w = 4.7$ , profundidad de 33 km y una distancia epicentral de 142 km. Si bien, no es suficiente información para definir un umbral de magnitud preciso para la

ocurrencia de movimientos en masa, al relacionarlo con los resultados de productividad sísmica y valores PGA, se puede identificar que el umbral mínimo de  $M_w = 4$  propuesto en Keefer (2002) para desencadenar un evento es concordante a la sismicidad de Herveo, por lo que el valor de  $M_w = 4.7$  puede ser una buena aproximación para la estimación de la magnitud mínima de la actividad sísmica como detonante en el área de estudio.

## 8. Discusión

En el estudio de amenaza por movimientos en masa, se ha recalcado la importancia de la zonificación de la probabilidad-susceptibilidad del terreno a verse afectado por estos fenómenos, partiendo de la importancia de comprender los eventos históricos, para interpretar futuras ocurrencias (Riaño, 2023). Sin embargo, la predicción precisa de futuros movimientos sigue siendo uno de los mayores retos en la gestión del riesgo de desastres (Corominas & Moya, 2008; Aristizabal-Giraldo *et al.*, 2010), debido a múltiples factores, como pueden ser la falta de insumos, como un inventario de movimientos, y limitaciones en la información disponible de sus detonantes (Rodríguez *et al.*, 2017).

Para atender la necesidad de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa por parte de los entes encargados de la planeación y ordenamiento del territorio, se han creado diversas metodologías bajo distintos enfoques, entre ellos, interpretaciones heurísticas, estadísticas y recientemente, basadas en modelos físicos (Bordoni *et al.*, 2019; Marín *et al.*, 2021; Riaño, 2023). Independiente de la metodología utilizada, se ha demostrado la eficacia de la caracterización de los factores detonantes, principalmente de lluvia y

sismos, dentro de los estudios de amenaza y creación de sistemas de alerta temprana ante movimientos en masa (Corominas & Moya, 2008; Aristizábal *et al.*, 2013; Guzzetti *et al.*, 2020).

La relación entre la magnitud-frecuencia de los deslizamientos es la base de la evaluación cuantitativa del riesgo, donde es imposible llevar a cabo este tipo de estudios sin determinar la probabilidad de ocurrencia, expresada en frecuencias anuales de un evento para una magnitud en específico o en la probabilidad de excedencia anual de un umbral establecido (Corominas *et al.*, 2014). Los resultados de esta investigación aplicaron esta última aproximación de la probabilidad de ocurrencia para caracterizar el detonante precipitación, haciendo uso de métodos estadísticos que permitieron definir umbrales de lluvias, que al ser excedidos pueden generar la ocurrencia de un movimiento en masa, recalando que exceder el umbral no implica necesariamente que se dará un evento, ya que pueden intervenir otros factores condicionantes y detonantes al mismo tiempo (Valencia & Martínez-Graña, 2023).

La principal limitación del análisis estadístico de la precipitación como detonante de movimientos en masa está dada por el acceso a fuentes de información con precisión diaria y calidad del registro pluviométrico, la cual afecta directamente los umbrales que se propongan para una determinada zona, donde modelos físicos, basados en parámetros hidráulicos y geotécnicos, han demostrado ser una buena alternativa efectiva en representar el comportamiento de las lluvias detonantes (Bordoni *et al.*, 2019; Marín *et al.*, 2021). No obstante, estos modelos pueden llegar a ser poco prácticos en estudios con áreas de gran extensión, aún más en zonas de difícil acceso, ya sea por las condiciones topográficas del terreno o temas de orden público, demostrando que una caracterización probabilística mediante el uso de métodos estadísticos es una herramienta valiosa y de bajo costo dentro de los estudios de amenaza para la planeación y ordenamiento del territorio (Aristizabal-Giraldo *et al.*, 2010; Corominas *et al.*, 2014).

El comportamiento temporal de las lluvias de Herveo se puede expresar a partir de los umbrales definidos, los cuales pertenecen al tipo que considera las condiciones antecedentes (Aristizabal-Giraldo *et al.*, 2010), en este caso, la lluvia de 3 y 15 días antecedentes. Considerar el umbral de 3 días previos (Kim *et al.*, 1991) y no el de 24 horas, es un indicador de que los movimientos en masa del área de estudio podrían estar llegando al fallo debido a las lluvias acumuladas, siendo estas las más significativas en la ocurrencia de deslizamientos (Mayorga, 2003). También, se aclara que los umbrales son de carácter regional, los cuales son útiles al representar las condiciones climáticas, meteorológicas y fisiográficas de una zona en común, generalmente de cientos a miles de Km<sup>2</sup> (Guzzetti *et al.*, 2007), donde se ha demostrado su eficacia en la caracterización de lluvias como detonantes y en estudios de evaluación cuantitativa del riesgo (Reichenbach *et al.*, 1998; Vaz *et al.*, 2018). Por otro lado, se destacan los resultados de las curvas IDF, ya que son un insumo necesario en el estudio de caudales máximos, en especial para el diseño de obras hidráulicas e infraestructuras, que pueden ser aplicadas al control y mitigación del riesgo (Mejia, 2017; Grajales-Cardona & Carvajal-Serna, 2019), en especial, por los reportes donde se estima un aumento en la frecuencia e intensidad de las lluvias por efectos de cambio climático, incidiendo en una mayor ocurrencia de eventos extremos para finales de este siglo (Intergovernmental Panel On Climate Change, 2013, 2023).

Para la actividad sísmica, al igual que en la precipitación, se han creado diversas metodologías con el propósito de definir los sismos como causales de movimientos en masa, principalmente bajo enfoques estadísticos, físicos o una combinación de ambos (Aristizabal-Giraldo *et al.*, 2020). A pesar de esto, los estudios de sismicidad detonante de movimientos en masa siguen presentando un alto grado de incertidumbre, principalmente por la

calidad del inventario de eventos y las particularidades geoambientales de cada zona de estudio (Rodríguez *et al.*, 2017; LaHusen *et al.*, 2020).

La relación temporal-espacial propuesta para la zona de estudio es una aproximación para comprender el comportamiento sísmico del sector, desde su productividad, con el fin de establecer relaciones con la distribución espacial de eventos detonados por sismos, en este caso planteando un umbral mínimo ( $M_w \geq 4.7$ ) para la ocurrencia de movimientos en masa. A pesar de ser una estimación, tiene un alto grado de aplicabilidad en la evaluación y reducción de amenaza por movimientos en masa (Fan *et al.*, 2018).

Finalmente, la interacción entre factores detonantes, especialmente precipitación y sismos, en la ocurrencia de movimientos en masa se ha estudiado desde varias perspectivas, entre ellas, el uso de correlaciones entre inventarios de movimientos detonados por ambos factores de manera independiente y el análisis de eventos ocasionados por precipitaciones considerando y descartando la influencia de sismos (Malamud *et al.*, 2004; Marc *et al.*, 2019). Sin embargo, los problemas de la caracterización individual de cada detonante permanecen al momento de establecer una relación entre ambos, en especial la unificación de susceptibilidades entre los dos factores (Zhang *et al.*, 2019).

La relación entre ambos detonantes para la zona de estudio se pudo analizar a partir de la correlación encontrada entre el deslizamiento de tierra (H\_16) del 13 de mayo de 1999 y el sismo registrado el mismo día de  $M_w = 4.7$ , con las lluvias acumuladas de los 15 días antecedentes y posteriores al movimiento (Valencia & Martínez-Graña, 2023). Al hacer esta evaluación (Tabla 1), se encontró que solo el umbral de 3 días antecedentes propuesto (45.5 mm) fue excedido, destacando que esto se dio desde la ocurrencia de la lluvia 24 horas previa, lo cual es un

indicador de la influencia conjunta de ambos detonantes en generar el fallo de la ladera (Martino *et al.*, 2022).

También, es importante considerar los condicionantes del sector donde se dio el evento y su relación con los factores detonantes. En este caso, el casco urbano de Herveo se ubica sobre depósitos provenientes de flujos de lodo volcánico, con una alta influencia de una posible actividad sismogénica de la falla Palestina (González, 2001; Bohórquez *et al.*, 2005), donde se ha encontrado que el material piroclástico se satura fácilmente durante lluvias intensas, favoreciendo su desplazamiento (Fuentes, 2015) y siendo susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa por la acción de lluvias críticas prolongadas, sismos y la acción simultánea de ambos detonantes (Rodríguez *et al.*, 2017; Kameda *et al.*, 2019; Valencia & Martínez-Graña, 2023). Por lo tanto, no se descarta la acción e interacción de la lluvia y sismos en desencadenar movimientos en masa de manera simultánea en el municipio de Herveo, Tolima, sin embargo, no se cuenta con la suficiente información para profundizar en esta relación.

**Tabla 1**

*Correlación entre detonantes precipitación y sismo*

Fecha movimiento	Tipo movimiento	Ubicación geográfica	Fecha sismo	Mw	Profundidad (km)	Distancia (km)	Lluvias antecedentes			Lluvias posteriores		
							24 h	3 días	15 días	24 h	3 días	15 días
13/5/1999	Deslizamiento	Herveo Sur del Casco Urbano - B. La Punta	13/5/1999	4.7	33	142	83.1	87	161.1	0	0.2	56.3

*Nota. Relación entre sismo y lluvias antecedentes y posteriores a la fecha del movimiento*

## 9. Conclusiones

Para el municipio de Herveo se hallaron 9 estaciones pluviométricas consistentes para una ventana de tiempo de 47 años (1975 a 2021). En el caso de la sismicidad, se pudieron definir dos catálogos: uno de registros históricos (1644-1990) y uno de datos recientes (1993-2021), mientras que del inventario de movimientos en masa del área de estudio se encontró que, de 291 procesos morfodinámicos inventariados para un sector de Herveo, solo 54 cuentan con una precisión diaria de su registro, predominando la ocurrencia de deslizamientos, principalmente de tipo traslacional planar, en el área de estudio.

Se encontró que las estaciones evaluadas contaban con un registro homogéneo y consistente, donde la presencia de datos atípicos y variaciones en la homogeneidad de algunas estaciones se pudo asociar a fallos en el registro, períodos de precipitaciones extremas y a la misma variabilidad de la lluvia en la zona. De esta manera, se identificó que las precipitaciones de mayor intensidad se han registrado en la estación Manzanares y el valor de precipitación máxima anual más alto en toda la serie de tiempo evaluada se encuentra en la estación El Edén. En cuanto a los sismos, fue posible unificar las magnitudes de los catálogos a magnitud de momento y definir la productividad sísmica, encontrando una ocurrencia anual de 4 sismos  $M_w=4$  y una magnitud máxima histórica de  $M_w= 6.7$  con  $Tr=18$  años y una magnitud máxima calculada de  $M_w=9$  con  $Tr=695$  años.

Se definió un umbral regional de 45.5 mm para las lluvias de 3 día antecedentes y de 176.1 mm para 15 días antecedentes, con una probabilidad de excedencia del 100% para un período de retorno de 5 años, reflejado también en los resultados propuestos en la distribución de

Gumbel, esperando que las zonas con mayor ocurrencia de movimientos en masa sean las del área de influencia de las estaciones Manzanares, Villahermosa 1 y el Edén.

En el caso de la sismicidad, la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 4 es del 100% para un período de retorno menor a dos años. Además, los valores PGA evaluados para la zona de estudio fueron indicadores de una amenaza por sismicidad media a baja para el municipio de Herveo.

El periodo de retorno de 5 años para las lluvias excedentes de los umbrales definidos no implica que necesariamente se dé una recurrencia de eventos detonados por lluvias con esta temporalidad, ya que los umbrales propuestos fueron regionales y localmente pueden estar influyendo factores condicionantes de cada sector del municipio, así como la acción de otros detonantes. La relación temporal-espacial de los sismos detonantes de movimientos en masa para la zona de estudio se planteó con un umbral aproximado de magnitud  $M_w=4.7$  para la ocurrencia de un evento, donde se pudo identificar una interacción entre los dos detonantes en la ocurrencia de un deslizamiento de tierra, pero esta condición no excluye la relación planteada por Keefer para los sismos de magnitud de 4. Según los resultados encontrados para cada detonante analizado, se considera que las áreas con mayor probabilidad de afectación por movimientos en masa se ubiquen hacia el NE-E de la zona de estudio, específicamente en el casco urbano de Herveo, así como en las veredas *Topacio*, *Yerbal* y *Cedral*.

## **10. Recomendaciones**

Se recomienda realizar una mayor implementación de las estaciones meteorológicas para el municipio de Herveo, con el fin de tener una mayor cobertura y registro de información, para así dar precisión en la elaboración de futuros estudios ambientales. Del mismo modo, se invita a las entidades correspondientes, de actualizar las bases de datos relacionadas a inventarios de movimientos en masa, preferiblemente llevando un registro con sus respectivas fechas y ubicación de los eventos dentro de la jurisdicción del municipio, para así mejorar la zonificación de amenaza por movimientos en masa, el desarrollo de proyectos de prevención y mitigación del riesgo, así como la elaboración de sistemas de alerta temprana.

Además, se recomienda incorporar los resultados de la investigación al esquema de ordenamiento territorial (EOT) del municipio de Herveo, ya que la metodología aplicada es válida para este tipo de proyectos, según lo expuesto en el Decreto 1807 de 2014. Se considera que las recomendaciones mencionadas se pueden replicar para zonas del país que cuenten con problemáticas, condiciones y limitaciones similares a las identificadas en este estudio.

### Referencias Bibliográficas

- Aki, K. (1965). Maximum Likelihood Estimate of  $b$  in the Formula  $\log_{10}N=a-bm$  and Its Confidence Limits. *Bulletin of Earthquake Research*, 43, 237-239.
- Alperin, M. (2013). *Introducción al análisis estadístico de datos geológicos*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP). <https://doi.org/10.35537/10915/34221>
- Aragón-Hernández, J. L., Aguilar-Martínez, G. A., Velázquez-Ríos, U., Jiménez-Magaña, M. R. y Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, XX(2), 01-15.
- Arango-Palacio, E., Robayo Jara, C. F. y Chica Martínez, P. A. (2017). *Caracterización geomorfológica y morfometría del Volcán Cerro Bravo, Tolima-Colombia* (Tesis de especialización) Universidad de Manizales. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3457>
- Arcila, M. M., Montejo, J. S., Eraso, J. F., Valcárcel, J. A., Mora, M. G., Díaz, F. J., García, J., Pagani, M. y Viganò, D. (2018). *Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia*. Servicio Geológico Colombiano (SGC) – Grupo de Amenaza Sísmica. Fundación Global Earthquake Model (GEM). [https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/656\\_19ModeloNalAmenSismparaColombia/Documento/Pdf/ModeloNacionaldeAmenazaSismicaparaColombia.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/656_19ModeloNalAmenSismparaColombia/Documento/Pdf/ModeloNacionaldeAmenazaSismicaparaColombia.pdf)
- Aristizábal, E., Gamboa, M. y Leoz, F. J. (2013). *Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el Valle de Aburrá, Colombia*.

<https://repository.eia.edu.co/entities/publication/4ec9864c-819e-4bee-ab68-6ddd9b8b51db>

- Aristizábal-Giraldo, E. V., Cardona, F. J. G., Aristizábal, E. F. G. y Martínez, J. C. G. (2020). Análisis de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo en los Andes colombianos, caso de estudio: Barbosa (Antioquia). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), Article 2. <https://doi.org/10.18359/rcin.4304>
- Aristizabal-Giraldo, E. V., Martínez, H. y Upegui, J. I. V. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 34(131), 209-228.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos.
- Bello, O. D. (2017). Desastres, crecimiento económico y respuesta fiscal en los países de América Latina y el Caribe, 1972-2010. *Revista de la CEPAL*, 2017(121), 7-30. <https://doi.org/10.18356/c6cea963-es>
- Bohórquez, O. P., Monsalve, M. L., Velandia, F., Gil, F. y Mora, H. (2005). Marco Tectónico De La Cadena Volcánica Más Septentrional De La Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Geología*, 27(1), 55-79.
- Bordoni, M., Corradini, B., Lucchelli, L., Valentino, R., Bittelli, M., Vivaldi, V. y Meisina, C. (2019). Empirical and Physically Based Thresholds for the Occurrence of Shallow Landslides in a Prone Area of Northern Italian Apennines. *Water*, 11(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/w11122653>
- Broms, B. B. y Wong, K. S. (1991). Landslides. En H.-Y. Fang (Ed.), *Foundation Engineering Handbook* (pp. 410-446). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3928-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3928-5_11)

- Caloiero, T., Pellicone, G., Modica, G., y Guagliardi, I. (2021). Comparative Analysis of Different Spatial Interpolation Methods Applied to Monthly Rainfall as Support for Landscape Management. *Applied Sciences*, 11(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/app11209566>
- Camargo, G. A. (2007). Ejemplos De Rocas Y Zonas De Falla En Los Andes Colombianos. *Boletín de Geología*, 29(1), 41-49.
- Campos-Aranda, D. F. (2016). *Una aplicación hidrológica de la regresión lineal múltiple ponderada*. Tecnología y Ciencias del Agua.
- Carlos, A., Borrero, P. y Naranjo, J. L. H. (1990). Casabianca formation: A Colombian example of volcanism-induced aggradation in a fluvial basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 253-267. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90091-S](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90091-S)
- Castillo, K. L. y Quintero, A. M. (2023). *Análisis multitemporal de los movimientos en masa y descripción morfométrica para un sector del municipio de Herveo, Tolima a escala 1:25.000*. (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander.
- Castro, L. M. y Escobar, Y. C. (2010). *Análisis de Tendencia y Homogeneidad de Series Climatológicas*. 9.
- Chachero, M. J. (2012). Estudio de precipitaciones en la ciudad de Trelew, análisis estadístico y ecuación de lluvia. *Cuadernos del CURIHAM*, 18, 23-37. <https://doi.org/10.35305/curiham.v18i0.47>
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (2008). *Applied hydrology* ([Nachdr.], internat. ed. 1988). McGraw-Hill.

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2014). *Manual para la Evaluación de Desastres*. Naciones Unidas.  
<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/35894>
- Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. (2021). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres Herveo, Tolima* (p. 97).  
[https://www.cortolima.gov.co/images/Gestion\\_riesgo\\_PMGRD/2022/PMGRD\\_HERVEO.pdf](https://www.cortolima.gov.co/images/Gestion_riesgo_PMGRD/2022/PMGRD_HERVEO.pdf)
- Corominas, J. y Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102(3), 193-213.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.018>
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.-P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. y Smith, J. T. (2014). *Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Crovelli, R. A. (2000). Probability models for estimation of number and costs of landslides. En *Open-File Report (2000-249)*. U.S. Geological Survey,. <https://doi.org/10.3133/ofr00249>
- Cruden, D. y Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. Special Report - *National Research Council, Transportation Research Board*, 247, 36-57.
- Dahmen, E. R., y Hall, M. J. (1990). *Screening of hydrological data: Tests for stationarity and relative consistency*. ILRI.

- De la Torre, L. S., Gómez, C. E., Ordóñez, N., Ceballos, J. L., Euscátegui, C., Martínez, N., Sánchez, R., Maldonado, N., Pérez, S., Gaitán, J., Chávez, L., Chamorro, C., Flórez, A. y Mantilla, G. (2001). *Los suelos :estabilidad, productividad y degradación*. 228-277.
- De Silva, R., Dayawansa, N. D. K. y Ratnasiri, M. (2007). A comparison of methods used in estimating missing rainfall data. *Journal of Agricultural Sciences*, 3. <https://doi.org/10.4038/jas.v3i2.8107>
- De Vita, P., Reichenbach, P., Bathurst, J. C., Borga, M., Crosta, G., Crozier, M., Glade, T., Guzzetti, F., Hansen, A. y Wasowski, J. (1998). Rainfall-triggered landslides: A reference list. *Environmental Geology*, 35(2), 219-233. <https://doi.org/10.1007/s002540050308>
- Departamento Administrativo de la Función Pública de Colombia (DAFP). (2012). *Ley 1523 de 2012*. Función pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Departamento Administrativo de la Función Pública de Colombia (DAFP). (2014). *Decreto 1807 de 2014*. Función pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2015). *3.181 muertos y 12,3 millones de afectados: Las cifras de desastres naturales entre 2006 y 2014*. Departamento Nacional de Planeación. <https://www.dnp.gov.co:443/Paginas/3-181-muertos,-21-594-emergencias-y-12,3-millones-de-afectados-las-cifras-de-los-desastres-naturales-entre-2006-y-2014-.aspx>
- Fan, X., Domènech, G., Scaringi, G., Huang, R., Xu, Q., Hales, T., Dai, L., Yang, Q. y Francis, O. (2018). Spatio-temporal evolution of mass wasting after the 2008 Mw 7.9 Wenchuan

- earthquake revealed by a detailed multi-temporal inventory. *Landslides*, 15. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1054-5>
- Fonseca, H. A., Pérez, D. C., Corredor, J. A., Gonzales, E. J., García, L. E., Penagos, D. A., y Pérez, J. A. (2014). *Memoria Explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa Escala 1:100.000 Plancha 206 – Manizales*. Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Fuentes, D. P. (2015). *Lahares secundarios: Análisis de parámetros físicos en depósitos piroclásticos y su relación con los mecanismos generadores*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132970>
- González, F. A. I. (2021). Algunas reflexiones sobre el concepto de desastre natural. Espaço e Economia. *Revista brasileira de geografia econômica*, 22, Article 22. <https://doi.org/10.4000/espacoeconomia.21037>
- González, H. (2001). *Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz* (p. 93) [Memoria Explicativa]. Ingeominas. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020081/documento/pdf/0101200811101000.pdf>
- Goyes, P. y Hernandez, A. (2021). Doble evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa basada en redes neuronales artificiales y pesos de evidencia. *Boletín de Geología*, 43(1), Article 1. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n1-2021009>
- Grajales-Cardona, D. y Carvajal-Serna, L. F. (2019). Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia no estacionarias para la cuenca del río Medellín. *DYNA*, 86(208), 321-328.
- Gutenberg, B. y Richter, C. F. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (Second paper). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46(2), Article 2.

- Guterres, A. (2008). *Cambio climático, desastres naturales y desplazamiento humano: La perspectiva del ACNUR* (p. 13). Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados. <https://www.unhcr.org/497891022.pdf>
- Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M. y Melillo, M. (2020). Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Reviews*, 200, 102973. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102973>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. y Stark, C. (2007). *Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe. Meteorology and Atmospheric Physics*, 98, 239-267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J. y Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(3), 221-238. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>
- Ideam -Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies. (2022). Geoportal—IDEAM [Portal de datos]. *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS) (Ed.). (1993). *Estudio geológico—Geotécnico e identificación de amenazas geológicas en 20 cabeceras municipales del departamento del Tolima—Herveo*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS). [https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=13318&shelfbrowse\\_itemnumber=13222](https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=13318&shelfbrowse_itemnumber=13222)
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis: summary for policymakers, a report of working group I of the IPCC:*

*technical summary, a report accepted by working group I of the IPCC but not approved in detail: and frequently asked questions: part of the working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (T. Stocker & D. Qin, Eds.). WMO, UNEP.

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Íñiguez Covarrubias, M., Ojeda Bustamante, W., Díaz Delgado, C., Mamadou Bâ, K. y Mercado Escalante, R. (2011). Análisis metodológico de la distribución espacial de la precipitación y la estimación media diaria. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(1), 57-69.

Jaiswal, P. y van Westen, C. J. (2009). Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. *Geomorphology*, 112(1), 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.008>

Jaramillo, A. (2005). *Clima Andino y Café en Colombia* (1era ed.). Federación Nacional de Cafeteros de Colombia- Centro Nacional de Investigaciones de Café. <https://isbn.cloud/9789589772607/clima-andino-y-cafe-en-colombia/>

Kameda, J., Kamiya, H., Masumoto, H., Morisaki, T., Hiratsuka, T. y Inaoi, C. (2019). Fluidized landslides triggered by the liquefaction of subsurface volcanic deposits during the 2018 Iburi–Tobu earthquake, Hokkaido. *Scientific Reports*, 9(1), 13119. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48820-y>

Keefer, D. K. (2002). Investigating Landslides Caused by Earthquakes – A Historical Review. *Surveys in Geophysics*, 23(6), 473-510. <https://doi.org/10.1023/A:1021274710840>

- Kim, S. K., Hong, W. P. y Kim, Y. M. (1991). *Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea*. Landslides, Bell DH Ed, 6.
- Kocsis, T., Kovács-Székely, I. y Anda, A. (2017). Comparison of parametric and non-parametric time-series analysis methods on a long-term meteorological data set. *Central European Geology*, 60(3), 316-332. <https://doi.org/10.1556/24.60.2017.011>
- LaHusen, S. R., Duvall, A. R., Booth, A. M., Grant, A., Mishkin, B. A., Montgomery, D. R., Struble, W., Roering, J. J. y Wartman, J. (2020). Rainfall triggers more deep-seated landslides than Cascadia earthquakes in the Oregon Coast Range, USA. *Science Advances*, 6(38), eaba6790. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba6790>
- Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F. y Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711. <https://doi.org/10.1002/esp.1064>
- Marc, O., Behling, R., Andermann, C., Turowski, J. M., Illien, L., Roessner, S. y Hovius, N. (2019). Long-term erosion of the Nepal Himalayas by bedrock landsliding: The role of monsoons, earthquakes and giant landslides. *Earth Surface Dynamics*, 7(1), 107-128. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-107-2019>
- Marín, R. J., Velásquez, M. F., García, E. F., Alvioli, M. y Aristizábal, E. (2021). *Assessing two methods to define rainfall intensity and duration 1 thresholds for shallow landslides in data-scarce catchments of the 2 Colombian Andean Mountains 3*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Assessing-two-methods-to-define-rainfall-intensity-Mar%C3%ADn-Vel%C3%A1squez/ca0a1240e486a763911df30b9cf3ea98bbc907d2>
- Martino, S., Marmoni, G. M., Fiorucci, M., Ceci, A. F., Discenza, M. E., Rouhi, J. y Tedoradze, D. (2022). Role of Antecedent Rainfall in the Earthquake-Triggered Shallow Landslides

- Involving Unsaturated Slope Covers. *Applied Sciences*, 12(6), Article 6.  
<https://doi.org/10.3390/app12062917>
- Mayorga, R. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7, 157-168.
- Mejía, B. S. (2017). *Estimación de curva IDF a partir de lluvias máximas en 24 horas en el Departamento del Atlántico* [Tesis de Pregrado].
- Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A. y Cramer, T. (2012). Análisis Estructural Al Noreste Del Volcán Nevado Del Ruíz, Colombia – Aporte a La Exploración Geotérmica. *Boletín de Geología*, 34(1), 27-41.
- Mirabbasi, R., Ahmadi, F. y Jhajharia, D. (2020). Comparison of parametric and non-parametric methods for trend identification in groundwater levels in Sirjan plain aquifer, Iran. *Hydrology Research*, 51(6), 1455-1477. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.041>
- Montealegre, J. E. (1990). *Técnicas estadísticas y aplicadas en el manejo de datos hidrológicos y meteorológicos*. Ideam.  
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/009198/009198.pdf>
- Montealegre, J. E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala* (p. 54) [Informe final]. IDEAM.
- Montero, J. (2017). *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. En Libros del Servicio Geológico Colombiano. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585978218>

- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D. y Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, 3(5), Article 5.
- Mosquera, D., Marín, P., Vesga, C. y González, H. (1998). *Geología de la plancha 206-Manizales* [Plancha geológica]. Ingeominas. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020081/mapa/pdf/0101200811300002.pdf>
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) (Ed.). (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Naciones Unidas. [https://www.unisdr.org/files/43291\\_spanishsendaiframeforasterri.pdf](https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeforasterri.pdf)
- Organization of American States (OAS). (1991). *Chapter 11- Geologic Hazards*. En *Primer on Natural Hazard Management in Integrated Regional Development planning* (pp. 11-1). <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea66e/ch11.htm>
- Pinzón, C., Echeverri, J. F., Murcia, H. y Schonwalder-Ángel, D. (2018). Petrogénesis y condiciones de cristalización del domo intracratérico del volcán Cerro Bravo, Colombia. *Boletín de Geología*, 40(3), Article 3. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018004>
- Plazas, J., Zuluaga, C. y López Isaza, J. (2013). *Condiciones de emplazamiento, mineralogía y geoquímica de la Tonalita-Granodiorita de Manizales, Caldas*. En XIV Congreso Colombiano de Geología, Primer Simposio de Exploradores -31 Jul—2 ago—2013. Sociedad Colombiana de Geología.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas (PMA:GCA). (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas* (4ta ed.). Publicación Geológica Multinacional.

- Quesada, A. (2017). Los estudios de riesgos naturales y antrópicos a través de cuatro décadas en la revista geográfica de América Central (1974-2015). *Revista Geográfica de América Central*, 1(58), 17-45. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.58-1.1>
- Ramos, A. M., Trujillo-Vela, M. G. y Prada S, L. F. (2015). Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras y proyectos*, 18, 63-75. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132015000200006>
- Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P. y Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy). *Environmental Geology*, 35, 146-158. <https://doi.org/10.1007/s002540050301>
- Riaño, A. F. (2023). *Desarrollo de un sistema de alertas tempranas por movimientos en masa basado en inteligencia artificial para el departamento de Cundinamarca, Colombia* (Tesis de maestría). Universidad de Los Andes.
- Ritchie, H., Rosado, P. y Roser, M. (2014). *Natural Disasters. Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/natural-disasters>
- Rodríguez, C., Boomer, J. y Chandler, R., J. (1999). Earthquake-induced landslides: 1980–1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(5), 325-346. <https://doi.org/10.1016/S0267-7261%2899%2900012-3>
- Rodríguez, E. A., Ramírez, J. H. S., Cordon, J. L. C., González, G. A. T., Bello, E. M., Hernández, K. C. R., Marín, E. C., Guerra, J. A. C. y Peña, G. L. R. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. En Libros del Servicio Geológico Colombiano. Libros del Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>

- Rodríguez, M. J. G. (2009). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. Universidad de Alcalá.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=253397>
- Ronderos, A. F. (2022). *Zonificación de la susceptibilidad por movimientos a escala 1:25.000 para la cuenca del Río Frío parte alta, municipio de Floridablanca, Santander* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander.  
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/10193>
- Rospigliosi, R. (2018). *Métodos de completación de datos hidrológicos faltantes* (Tesis de Pregrado). Universidad José Carlos Mariátegui.  
[http://repositorio.ujcm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12819/680/Richard\\_trabajosuficiencia\\_titulo\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ujcm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12819/680/Richard_trabajosuficiencia_titulo_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ruiz, G. L., Alarcón, S. del R. N., Cordon, J. L. C., Rodríguez, C. A. G., Hernández, K. C. R., Holguín, B. L. C., González, G. A. T. y Cerón, R. P. (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000*. En Libros del Servicio Geológico Colombiano. Libros del Servicio Geológico Colombiano.  
<https://doi.org/10.32685/9789589952887>
- Santos, J. M. R. (2014). *Aplicación de métodos de interpolación para el cálculo de precipitación por modelamiento geoestadístico y análisis espacial para el departamento de Cundinamarca*. (Tesis de especialización). Universidad Militar Nueva Granada.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2010). *Mapa Nacional de Amenaza Sísmica Periodo de Retorno 475 años. Escala 1:1.500.000*. Versión año 2010 [Mapa de Amenaza].  
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B6/21001100024431/Mapa/pdf/2105244311300001.pdf>

- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2014). *Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100.000 plancha 206 Manizales* (Eds.). Servicio Geológico Colombiano (SGC).
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2022). *Catálogo Sismicidad*. <http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/index.php>
- Singh, V. P. (1992). *Elementary Hydrology*. Prentice Hall.
- Stasha, S. (2021). *Natural Disaster Statistics (2021 Update) | Policy Advice*. Policy Advice. <https://policyadvice.net/insurance/insights/natural-disaster-statistics/>
- Thorn, H. C. S. (1966). *Some methods of climatological analysis*. World Meteorological Organization, 199.
- Thouret, J. C., Murcia Leal, L. A., Salinas Echeverri, R. y Vatin-Perignon, N. (1985). *Aspectos volcano-estructurales y dinamismo eruptivo reciente de los volcanes Cerro Bravo y Nevado del Tolima, Cordillera Central de Colombia* (Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS), Ed.). Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS).
- Totaro, V., Gioia, A. y Iacobellis, V. (2019). Power of parametric and non-parametric tests for trend detection in annual maximum series [Preprint]. *Engineering Hydrology/Stochastic approaches*. <https://doi.org/10.5194/hess-2019-363>
- Unesco Rostlac [Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe]. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Unesco*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000051960>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). *Colombia, un país con múltiples amenazas geológicas, pero ¿por qué sucede esto?, en la UNGRD se lo*

- explicamos*. Portal Gestión del Riesgo.  
<http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Colombia-un-pais-con-multiples-amenazas-geologicas-pero-por-que-sucede-esto-en-la-UNGRD-se-lo-explicamos.aspx>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2022). *UNGRD activa plan de respuesta ante inicio de segunda Temporada de Lluvias del año con influencia del fenómeno de La Niña*. Portal Gestión del Riesgo.  
<http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2022/UNGRD-activa-plan-de-respuesta-ante-inicio-de-segunda-Temporada-de-Lluvias-del-ano-con-influencia-del-fenomeno-de-La-Nina.aspx>
- United States Geological Survey [USGS]. (2022). *Search Earthquake Catalog*.  
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Valencia, J. A. y Martínez-Graña, A. M. (2023). Calculation of precipitation and seismicity thresholds as triggers for mass movements in the region of Bucaramanga, Colombia. *Ecological Indicators*, 152, 110355. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110355>
- Valencia, J. y Martínez-Graña, A. (2018). A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(01), 1106-1128. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1513083>
- Vargas Cuervo, G. (2000). Criterios para la clasificación y descripción de movimientos en masa. *Boletín de Geología*, 22(37), Article 37.
- Vargas, R. y Díaz-Granados, M. (1998). *Curvas Sintéticas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, 187-200.
- Vaz, T., Zêzere, J. L., Pereira, S., Oliveira, S. C., Garcia, R. A. C. y Quaresma, I. (2018). Regional rainfall thresholds for landslide occurrence using a centenary database. *Natural*

- Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), 1037-1054.  
<https://doi.org/10.5194/nhess-18-1037-2018>
- Vega, E. J. (2016). *Módulo de visualización epicentral de sismos volcano-tectónicos en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales* [Universidad de Manizales].  
<https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2549>
- Wieczorek, G. F. (1996). *Landslides: Investigation and mitigation. Chapter 4- Landslide triggering mechanisms*. Transportation Research Board Special Report, 247.  
<https://trid.trb.org/view/462502>
- Wu, M.-H., Wang, J. P. y Ku, K.-W. (2019). Earthquake, Poisson and Weibull distributions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 526, 121001.  
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.04.237>
- Zaruba, Q. y Vojtech, M. (1982). *Landslides and their Control*. Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-09618-4>
- Zhang, J., van Westen, C. J., Tanyas, H., Mavrouli, O., Ge, Y., Bajrachary, S., Gurung, D. R., Dhital, M. R. y Khanal, N. R. (2019). How size and trigger matter: Analyzing rainfall- and earthquake-triggered landslide inventories and their causal relation in the Koshi River basin, central Himalaya. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(8), 1789-1805. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1789-2019>