

# Modelado de precipitaciones para evaluación del detonante lluvia en los movimientos en masa en el municipio de Santa María, Boyacá, periodo 2010-2019

## Rainfall modeling for evaluation of the rainfall trigger in mass movements in the municipality of Santa María, Boyacá, period 2010-2019

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.18.2.2022.11>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 26/09/2021. Fecha de Aceptación: 23/05/2022.

**Michael Esteban Moreno Arroyave** 

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, D.C. (Colombia)  
est.michael.moreno@unimilitar.edu.co

**Elsa Adriana Cárdenas Quiroga** 

Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, D.C. (Colombia)  
elsa.cardenas@unimilitar.edu.co

Para citar este artículo:

M. Moreno Arroyave & E. Cárdenas Quiroga, “Modelado de precipitaciones para evaluación del detonante lluvia en los movimientos en masa en el municipio de Santa María, Boyacá, periodo 2010-2019”, *INGE CUC*, vol. 18, no. 2, pp. 143–158. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.18.2.2022.11>

### Resumen

**Introducción**— En Colombia, asociados a los periodos de intensas precipitaciones se presentan frecuentemente movimientos en masa. Siendo estos procesos, uno de los fenómenos que más causa pérdidas económicas a nivel mundial, se hace necesario estudiar y modelar las precipitaciones, para establecer su relación con la inestabilidad, mediante el uso de herramientas SIG y software especializado para tal fin.

**Objetivo**— Modelar las precipitaciones correspondientes al periodo comprendido años 2010-2019, para el municipio de Santa María en el departamento de Boyacá, con el fin de determinar el efecto de la lluvia como detonante de los movimientos en masa presentados durante ese tiempo. El estudio se centró en la generación del modelo hidrológico de precipitaciones entre los años 2010-2019, para el municipio de Santa María, con el fin de determinar el efecto de la lluvia como detonante de los movimientos en masa presentados durante ese tiempo.

**Metodología**— Las lluvias, son capaces de facilitar el desplazamiento de material, bien por la reducción de la resistencia o el incremento en la presión de poros. En este documento se presenta un modelo de precipitaciones elaborado a partir de herramientas SIG, un análisis cuantitativo multitemporal y un método de distribución probabilístico del factor detonante precipitaciones, para determinar periodos de excedencia y no excedencia del umbral de lluvia.

**Resultados**— A partir de los modelos de precipitación para el periodo 2010-2019 y su correlación con el inventario de movimientos en masa se pudo evidenciar la relación entre el detonante lluvia y los movimientos en masa.

**Conclusiones**— Se evidencia dentro de la zona de estudio la incidencia de las precipitaciones y factores climáticos en el incremento de posibilidad ocurrencia de movimientos en masa. El modelo generado puede ser un insumo para la generación del mapa de amenaza y la gestión de riesgo municipal.

**Palabras clave**— Procesos morfodinámicos; lluvias; SIG; factor desencadenante; modelo, probabilidad

### Abstract

**Introduction**— In Colombia, periods of intense rainfall are frequently associated with landslides. Since these processes are one of the phenomena that cause the most economic losses worldwide, it is necessary to study and model rainfall to establish its relationship with instability, using GIS tools and specialized software for this purpose.

**Objective**— Model the precipitation corresponding to the period from 2010 to 2019, for the municipality of Santa María in the department of Boyacá, in order to determine the effect of rainfall as a trigger of the mass movements presented during that time. The object of the study focused on the generation of the hydrological model of rainfall between the years 2010-2019, for the municipality of Santa María, to determine the effect of rain as a trigger for the mass movements presented during that time.

**Methodology**— Rainfall can facilitate the displacement of material, either by reducing resistance or increasing pore pressure. This paper presents a rainfall model developed from GIS tools, a quantitative multitemporal analysis and a probabilistic distribution method of the precipitation triggering factor, to determine periods of exceedance and non-exceedance of the rainfall threshold.

**Results**— From the rainfall models for the period 2010-2019 and their correlation with the mass movement inventory, the relationship between the rainfall trigger and landslides could be evidenced.

**Conclusions**— It is evident within the study area the incidence of precipitation and climatic factors in the increased possibility of occurrence of landslides. The model generated can be an input for the generation of the hazard map and municipal risk management.

**Keywords**— Morphodynamic processes; rains; GIS; trigger factor; model; probability

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano que se ha experimentado a escala mundial durante los últimos años, así como el cambio climático que ha transformado los patrones de precipitación [1], son la causa del incremento en la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos; los cuales han generado importantes pérdidas económicas. Dentro de dichos fenómenos, los movimientos en masa se han convertido en una de las amenazas más frecuentes, causando un gran número de muertes y daños a la infraestructura en todo el mundo.

De acuerdo con las proyecciones presentadas en el *Índice Municipal para la Gestión de Riesgos* [2], en Colombia, alrededor del 90% de los desastres están asociados a eventos hidrometeorológicos, entre los que se cuentan los movimientos en masa, los cuales causan alrededor del 74% del total de las pérdidas económicas, con importantes afectaciones sobre la infraestructura y sobre la población concentrada dentro de la región Andina del país.

El departamento de Boyacá es uno de los más afectados por este tipo de eventos. El SGC indica que la categoría de susceptibilidad más frecuente en el departamento de Boyacá es la media de 61%, mientras que la susceptibilidad alta está distribuida de manera homogénea en el resto del departamento, representando un 36% [3]. En cuanto a la amenaza, el 17.29% del área del departamento está clasificada como muy alta, mientras que el 46.62% corresponde al área clasificada como de amenaza alta, y por último la amenaza media, corresponde aproximadamente al 35.81% del área total del departamento. Para el municipio de Santa María, ubicado al sur del departamento, según el SGC, 70.331.309.18 km<sup>2</sup> están en la categoría de amenaza muy alta, otros 28.638.441.75 km<sup>2</sup> en la categoría de amenaza alta y unos 1.030.249.05 km<sup>2</sup> en amenaza media [3].

Las causas de los movimientos en masa son diversas [4], e incluyen factores geológicos y geomorfológicos, así como las actividades humanas, pero de todos los factores involucrados en estos eventos, son las precipitaciones los mecanismos detonantes más efectivos debido a la disminución de resistencia que experimenta el material así como por el incremento en la presión de poros. El detonante de la lluvia ha sido estudiado empleando diferentes métodos, algunos de ellos de tipo estadísticos, otros físicos basados en patrones geotécnicos e hidrológicos, y los que se han enfocado en la definición de umbrales críticos, los cuales relacionan de manera directa duración, intensidad y magnitud de las precipitaciones con la ocurrencia de movimientos en masa.

Teniendo en cuenta que las precipitaciones en Colombia son consideradas el principal detonante de los movimientos en masa relacionadas con altos índices de variabilidad climática, en este documento se presentan los resultados del modelo de precipitación generado para el municipio de Santa María en el departamento de Boyacá a partir de datos de precipitaciones promedio diarias multianuales, para el periodo de tiempo comprendido entre 2010-2019, con el fin de utilizar esta información como insumo en la evaluación de amenaza por movimientos en masa para el municipio. De igual manera, se genera un análisis multitemporal de distribución probabilística que permita determinar máximas precipitaciones esperadas definiendo con ello períodos de excedencia y no excedencia del umbral de lluvia con una probabilidad temporal del evento o periodo de retorno dado.

Lo anterior, con el objeto de modelar las precipitaciones correspondientes al periodo comprendido entre los años 2010-2019, para el municipio de Santa María en Boyacá, con el fin de determinar el efecto de la lluvia como detonante de los movimientos en masa presentados durante ese tiempo.

## II. REVISIÓN LITERARIA

De acuerdo con conceptos básicos [5], un movimiento en masa es el desplazamiento de material ladera abajo influenciado por la gravedad dependiendo de su ángulo de inclinación y de su grado de saturación, así como también el marco geo ambiental. Los movimientos en masa son considerados fenómenos naturales, no obstante, en muchos casos son el resultado acumulativo de factores tanto antrópicos como climatológicos, sísmicos, topográficos, de cobertura vegetal entre otros, lo cual los ubica no solo como de carácter natural, sino más bien un conjunto de comportamientos que desencadenan un suceso.

En Colombia se han adelantado algunos estudios acerca de la precipitación como factor detonante de los movimientos en masa. Dentro de los trabajos más relevantes está el del ITC (Países Bajos) [6], en el cual se presenta una comparación entre las ventajas y limitaciones de la aplicación de modelos hidrológicos, modelos de estabilidad de laderas de equilibrio límite y los SIG a la zonificación del riesgo de deslizamiento.

Para el CNR-IRPI y el DIBEST (Italia) las fallas geológicas en taludes son generadas a partir de factores predisponentes como condiciones geo estructurales y morfológicas, características geotécnicas, entre otras [7]. De igual manera, el uso de un modelo geotécnico e hidrológico se centra en el seguimiento del movimiento del suelo estableciendo rangos de profundidad del suelo entre 3 m - 30 m y las medidas del desplazamiento.

En estudios desarrollados en Portugal se ha aplicado un modelo de respuesta transitoria distribuido generando un análisis de estabilidad de taludes, unificando análisis de estabilidad de taludes infinita con el método de Richards para infiltración del agua vertical en estado saturado y no saturado [8]. La comprobación del modelo se realizó en dos escalas, como primer escala se escogió un talud ubicado en el Valle del río Quente en las isla de Azores, y la segunda para una escala de cuenca, usando como referente el inventario de movimientos en masa de la zona y generalizando los parámetros del suelo. Los resultados obtenidos para la escala de talud fueron muy precisos, lo que permitió predecir el tiempo de ocurrencia del evento. Para la escala de cuenca los resultados fueron conservativos, aun así el modelo predijo la totalidad de eventos reportados y georreferenciados.

En la NTU y la KNU (China) los investigadores indican que la inclusión de datos de lluvia transitorios, tales como duración e intensidad horaria en modelos físicos con el objeto de identificar el pronóstico de movimientos en masa, representando los aspectos a mejorar en futuras investigaciones, siendo la resolución espacial de la lluvia dada al generar la interpolación de subconjuntos de datos obtenidos una de las deficiencias en la gran mayoría de modelos, lo cual gracias a nuevos avances como uso de radares y nuevas tecnologías han permitido obtener mejores resultados y simulaciones con mayor nivel de detalle y exactitud [9].

En otros estudios realizados por el ITC sobre la cuenca del río Chinchiná en Manizales (Colombia), el análisis revela que movimientos superficiales caracterizados por su pequeño espesor de 0.3 m - 3 m son detonados por precipitaciones diarias superiores a los 70 mm, mientras que movimientos profundos son detonados por precipitaciones acumuladas sobre los 200 mm en 25 días, combinados con lluvias diarias [10]. De igual forma, para la UCLA y la UC (USA), los movimientos en masa superficiales están asociados con el desarrollo de presiones de poros positivas mientras movimientos más profundos están asociados a pérdida de presión de poros en el suelo [11].

En la ciudad de Buenos Aires (Argentina), la generación de un modelo de precipitaciones utilizado en la determinación de la influencia de escorrentía sobre una subcuenca agrícola, demostró la predicción aceptable del caudal máximo, el volumen de escurrimiento y el tiempo al pico en función de los datos históricos de crecidas disponibles para el año 2012 [12]. Estos resultados demuestran la importancia de contar con valores de CN calibrados *in situ*.

Para el estudio efectuado en la cuenca del río Samborombón (Buenos Aires, Argentina), se generó una modelación de precipitación-escorrentía en donde la cuenca fue dividida en subcuencas, asignándole valores de área, precipitación, evapotranspiración y pendiente [13]. El caudal máximo simulado ocurrió un día posterior al de la máxima precipitación, comparable con los caudales registrados. Para el modelado de precipitaciones se utilizó el software HEC-HMS [28], lo cual hizo posible la obtención de hidrogramas de la cuenca, permitiendo simular potenciales escenarios climáticos, y de este modo intentar predecir el posible comportamiento hidrológico a escala de cuenca.

Los SIG en la actualidad se han convertido en un conjunto de poderosas herramientas para recopilación, almacenamiento, recuperación, transformación, análisis y muestreo de datos espaciales, que gracias al uso de distribuciones espaciales en formato ráster, permiten crear modelos determinísticos, los cuales son una de las principales formas de obtener mapas de amenaza por movimientos en masa, cuyo objeto es mostrar la probabilidad de que un evento ocurra en un espacio y tiempo determinado [14].



En cuanto al uso de modelados de infiltración de lluvia, el modelo HYSWASOR empleado por investigadores de HGL y WUR (Países Bajos-USA) utilizaron elementos finitos para simular variaciones en la cabeza de presión en cortos periodos de tiempo, como es el caso de las tormentas, o largos periodos de tiempo con lluvias intensas por meses [15]. Las variaciones de cabezas de presión son medidas desde 300 mm, 500 mm, 1000 mm y 2000 mm, con lo que se predice épocas de humedad tropical y sequías en la zona.

Así mismo, la ITC propone un método para determinar la probabilidad temporal de la ocurrencia de un movimiento en masa superficial con espesor inferior a los 3 m, con lo que se utilizó la probabilidad de excedencia de un umbral de lluvia crítico derivado del modelo de probabilidad de Poisson y la probabilidad de excedencia de un movimiento en masa de acuerdo con un umbral de lluvia determinado [16]. Los umbrales de lluvia establecidos se fundamentaron en la relación de la lluvia antecedente de 15 días con la lluvia diaria presentada en la zona estudiada.

En Italia se estudian los efectos del flujo de agua lateral y normal en la generación de los movimientos en masa y su relación directa con las condiciones de humedad del suelo así como los antecedentes, la intensidad y duración de la lluvia, utilizando un modelo hidrológico distribuido llamado GEOtop, cuyos resultados sugieren condiciones de humedad antecedente, baja intensidad y larga duración de lluvias, aumentando el efecto de flujo de agua lateral, presentando limitaciones en el modelo [17].

De los modelos hidrológicos de tipo dinámico más utilizados se encuentra el presentado por el USGS (USA) en donde se considera un régimen de flujo transitorio y suelo parcialmente saturado requiriendo insumos de intensidad-duración de precipitaciones y una característica de difusividad hidráulica [18]. En el modelo la capacidad de infiltración varía de acuerdo con la duración de la lluvia y para evitar cabezas de presión no reales hace uso de la corrección por línea beta.

Los investigadores del UNSA (Argentina) efectuaron una modelación hidrológica con herramientas SIG para el Valle de Lerma en la región de Salta (Argentina) mediante la aplicación de tres metodologías: interpolación de datos de estaciones hidrometeorológicas, análisis y correlación de datos de temperaturas del suelo a partir de imágenes satelitales y la correlación de variables climatológicas y topográficas entre sí, observándose la incidencia de la temperatura en el balance hídrico, generando una regresión polinomial inversa simple con la altitud y correcciones de ajuste con las variables de orientación, latitud y uso del NDVI [19].

El Método Natural Neighbor o herramienta de interpolación de vecino natural ubicada en las herramientas 3D del Analyst del software ArcGIS utiliza solo un subconjunto de muestras que rodean a un punto de consulta [20]. Una de las limitaciones del método de Thiessen está en que la ponderación es fija, independientemente de la variabilidad temporal y espacial de la tormenta, por lo que el método de las isoyetas mejora esta limitación al generar isoyetas para cada tormenta .

### III. METODOLOGÍA

#### A. Localización y caracterización

Para el proyecto se tomó como caso de estudio el municipio de Santa María el cual se localiza en el Sureste de la provincia de Neira y al sur oriente del departamento de Boyacá, en la región Andina de la república de Colombia sobre la cordillera Oriental en un área caracterizada por la frecuente actividad sísmica y la presencia de rocas muy fracturadas, condiciones que favorecen la generación de movimientos en masa.

El casco urbano de Santa María se encuentra situado a los 04°51'48" de latitud Norte y 73°16'04" de longitud Oeste, con una altura sobre el nivel del mar de 850 m.s.n.m, ubicado a 160 km de Tunja, la capital del departamento, como se observa en la Fig. 1. Santa María cuenta con una extensión territorial de 326.44 km<sup>2</sup> de extensión total, que se distribuyen en 0.890 km<sup>2</sup> que conforman el área urbana del municipio y 325.55 km<sup>2</sup> que constituye el área rural [21].

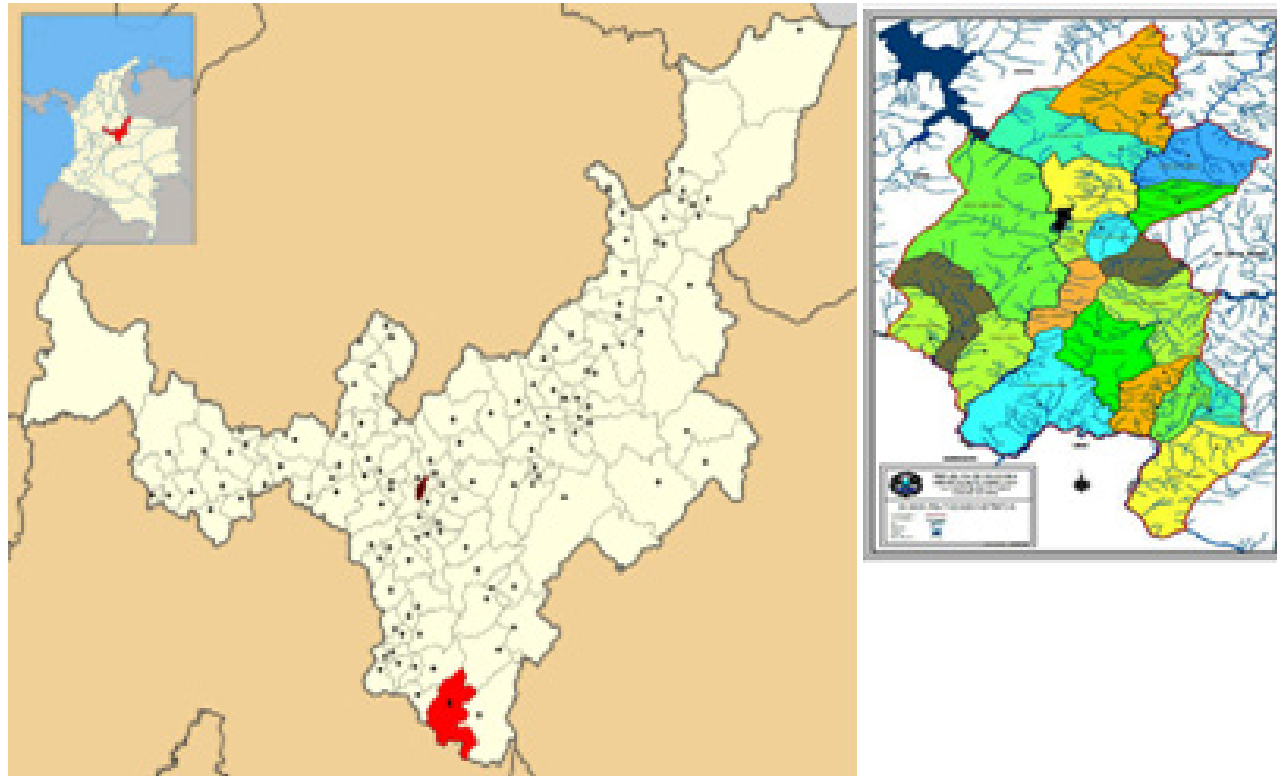


Fig. 1. Mapa de localización Municipio Santa María (Boyacá, Colombia).  
Fuente: Plan de Ordenamiento territorial

En el municipio de Santa María se presentan gran cantidad de microcuencas, subcuencas y cuencas, lo que implica un considerable volumen de agua, debido a altos niveles de precipitaciones. La red de drenajes del municipio comprende las cuencas de los ríos Batá, Guavio, Bocachico, Tunjita, Lengupá, afluentes del río Upía y las quebradas La Esmeralda y Chamizo, que aportan sus aguas al embalse la Esmeralda [22]. Esta cantidad de drenajes puede causar una acumulación progresiva de agua que puede saturar el material debido a las propiedades de suelos presentes o la escorrentía superficial puede favorecer procesos de erosión de diferente intensidad ya sea por escurrimiento, cárcavamiento, fenómenos de remoción en masa y reptación sobre planos de ladera.

Otro de los aspectos a considerar en relación con la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, es el uso de suelo de la zona, la cual, de acuerdo con el Plan Ambiental y el Plan de Desarrollo del municipio, está dedicado principalmente a actividades agropecuarias (zonas de cultivo, principalmente yuca y plátano), ganaderas con crías de ganado porcino y bovino y actividades de explotación minera [21]-[23]. Muchas zonas de uso ganadero han sido expandidas a lugares de alta montaña destruyendo el bosque y desviando la regularidad de los cauces de agua que nacen o circulan por estos terrenos, así como también la implementación de nuevos cultivos en zonas de altas pendientes, mayores del 25%, provocan recurrentes procesos erosivos los cuales junto con la acumulación de factores detonantes como el agua, facilitan los movimientos en masa. En efecto, usos de suelo derivado de las actividades antrópicas como la explotación minera en la cuenca baja del río, crecimiento de zonas de cultivo, deforestación y otros, han desencadenado alteraciones sobre las propiedades intrínsecas del suelo, limitando las zonas protectoras con suficiente cobertura vegetal que actualmente tiene el municipio.

En el municipio se presenta un régimen de precipitación de largas temporadas de lluvia y otras cortas relativamente secas. La temporada lluviosa se inicia en el mes de abril y se prolonga hasta finales de noviembre; su máxima intensidad se presenta entre mayo y julio donde son presentados movimientos en masa en gran parte del municipio [24]. Debido a la saturación del suelo y a la escasa existencia de sistemas de drenaje especialmente para las aguas lluvias las cuales en periodo lluvioso actúan como factor detonante en la generación de fenómenos de remoción en masa.



### B. Geología

En la zona de estudio afloran rocas sedimentarias de la edad Paleozoica y el Cretácico inferior, intensamente tectonizadas. Morfológicamente se presentan laderas escarpadas con acumulación de materiales de derrubio, lo cual favorece los procesos de erosión de diferentes grados de complejidad. Las principales unidades y estructuras geológicas se muestran en la Fig. 2.

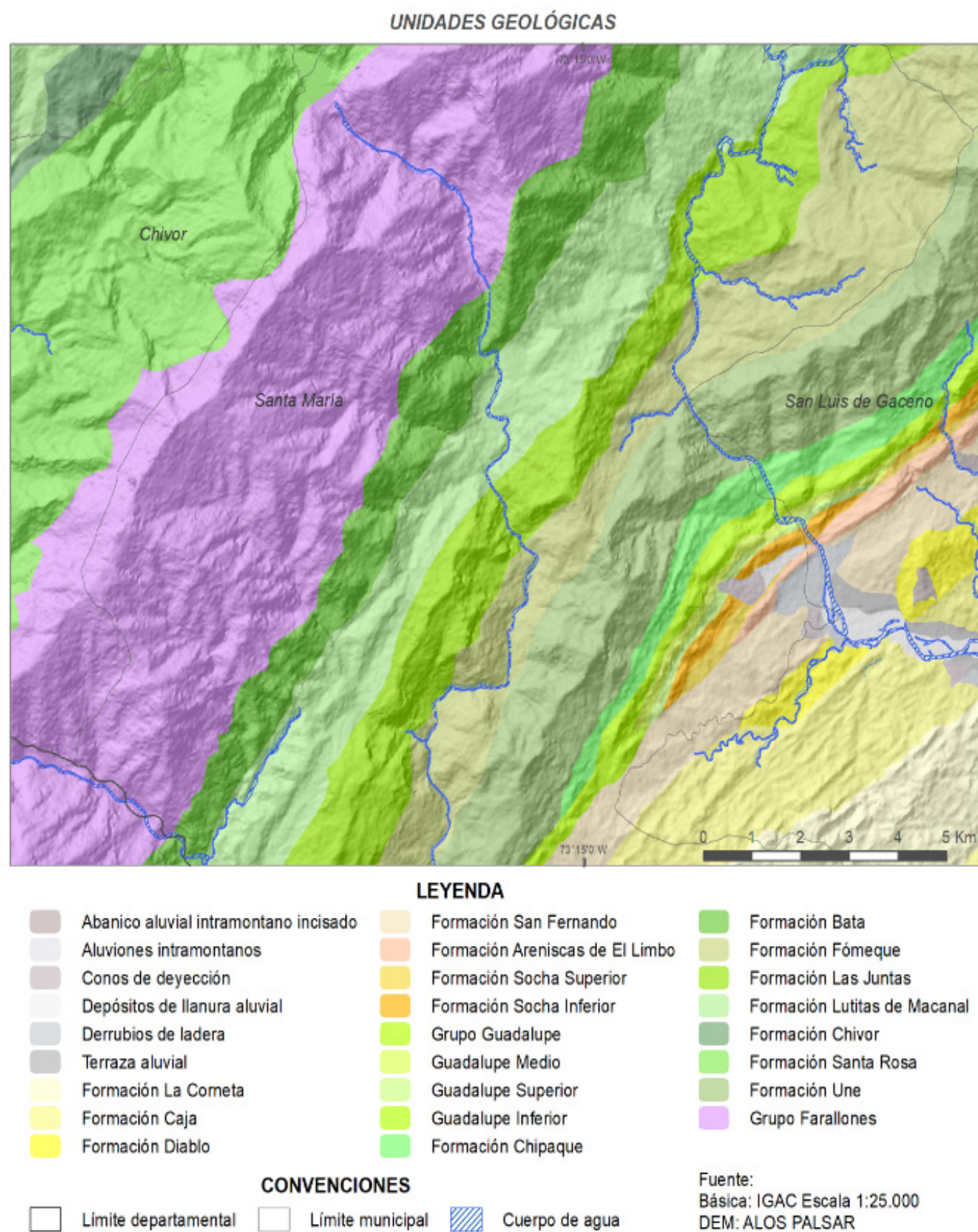


Fig. 2. Unidades geológicas de la zona de estudio.  
Fuente: Autores.

La geología de la zona se distribuye de la siguiente manera [24]:

- Formación de Lutitas de Macanal (Kilm) compuesta por lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas, areniscas y bolsones de yeso, con un espesor total de 2935 m.
- Depósitos Coluviales (Qc) los cuales ocupan pequeñas áreas en todo el municipio.
- Formación areniscas de Las Juntas (Kiaj) consistente en dos niveles arenosos separados por un nivel lutíticos.

- Formación Bata (b1b) compuesta en el inferior por conglomerado matriz soportado, en la parte media arenitas cuarzosas de color verde oliva a negro, grano muy fino a medio, en capas tabulares y canaliformes. En la parte superior lodolitas de cuarzo de color negro, fosilíferas, compactas, moscovíticas, intercaladas con arenitas.
- Formación Santa Rosa (b1s), la cual en la base presenta conglomerados que cambian rápidamente de espesor con arenitas de cuarzo y limolitas con bivalvos. En la parte media, arcillolitas oscuras con capas delgadas y láminas de rocas evaporíticas intercaladas. En la parte superior sucesión de arcillolitas y lodolitas oscuras, con bivalvos y amonites.
- Grupo Farallones (Dcf), que es una sucesión sedimentaria, predominantemente silici-clástica, con arenitas, limolitas y lodolitas muy compactadas, de coloración gris, roja o verde; en el río Chivor muestra niveles calcáreos importantes.

En cuanto a la geología estructural, el sector es afectado por la presencia de tres fallas pertenecientes al sistema de fallas del Borde Llanero, la falla de Santa María, la falla de Lengupá y la falla de Tesalia, las cuales le confieren a las unidades geológicas involucradas una disposición N30-40°E, como secciones continuas limitadas por fallas.

#### 1) *Falla de Santa Maria*

Se trata de una falla de tipo inverso con alto grado de buzamiento que atraviesa la zona de estudio en sentido SW-NE. Pone en contacto rocas de la Formación Batá con las rocas de la Formación Macanal generando en el área afectada una amplia deformación [25].

#### 2) *Falla de Lengupá*

Esta estructura es paralela al trazo de la falla de Santa María también de tipo inverso con alto ángulo de buzamiento. La Falla de Lengupá orienta verticalmente las capas de arenitas de la Formación Las Juntas y genera repliegues en las rocas de la Formación Macanal [26].

#### 3) *Falla de Tesalia*

Se extiende en sentido suroccidente - nororiente y se divide en tres ramales denominados: Tesalia W, Tesalia E y Tesalia E1. Se trata de fallas inversas convergencia al oriente y componente de deslizamiento tanto en rumbo como en buzamiento. En la zona se ha evidenciado que estas fallas cortan unidades jóvenes [27].

### *C. Materiales y métodos*

Las características geológico-geotécnicas del área de estudio crean un escenario favorable para la ocurrencia de eventos de remoción en masa por lo que la información aportada en este tipo de estudios puede ser utilizada en la implementación de SAT, con el fin de mitigar los efectos de este tipo de eventos.

Con el fin de crear el modelo de precipitaciones, se seleccionaron las 10 estaciones más cercanas a la zona de estudio, con esta información de precipitación diaria proporcionada por bases de datos del IDEAM [29], se realizó un procesamiento de los datos, para obtener precipitación promedio diaria y precipitación máxima diaria en cada estación. Posteriormente, se generaron los datos de precipitaciones mensuales multianuales, para el periodo comprendido entre 2010-2019, se consultó la información correspondiente al inventario de movimientos en masa del SGC entre los años 1970-2019, con el fin de establecer una correlación entre la ocurrencia de los movimientos en masa y las precipitaciones. La información empleada en la generación del modelado de precipitaciones fue de tipo secundario extraída de fuentes oficiales como el IDEAM [29], el SGC [25], el SIMMA [24], entre otros, debido a que no fue posible realizar verificaciones en campo, por las restricciones asociadas a la pandemia. Posteriormente se efectuó el modelado de precipitaciones empleando el software ArcGIS [20], permitiendo realizar un análisis cuantitativo multitemporal con el método de distribución probabilístico obteniendo periodos de excedencia y no excedencia de los umbrales de lluvia dados en el área de estudio, así como la probabilidad temporal del evento. La síntesis del procedimiento llevado a cabo se puede observar en el diagrama a continuación (Fig. 3).



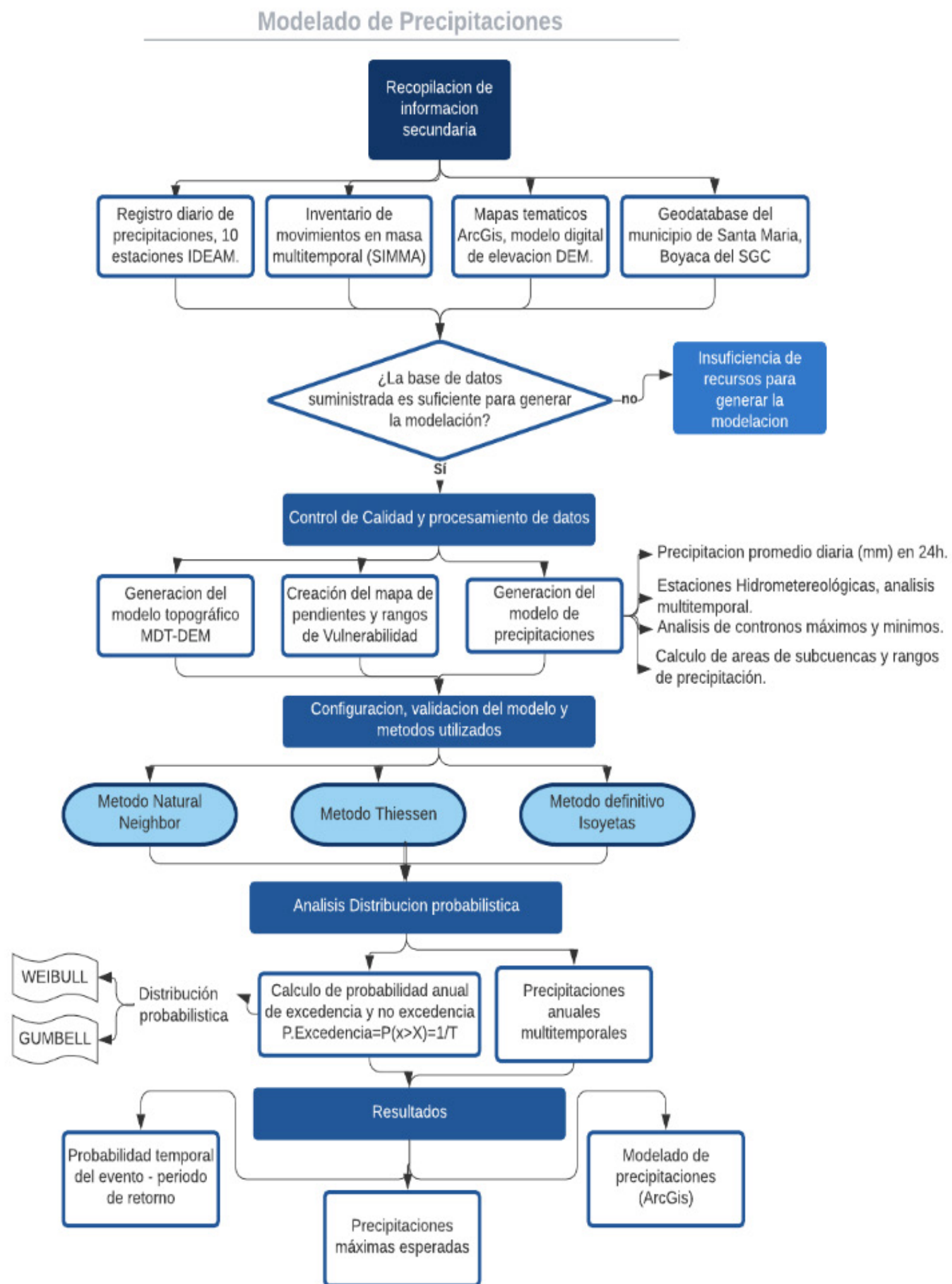


Fig. 3. Flujograma Metodología Modelado de precipitación.  
Fuente: Autores.

Como primer insumo se presenta a continuación las diferentes estaciones utilizadas con el análisis correspondiente a precipitación promedio y máximas precipitaciones diarias de la zona de estudio (mm en 24h), periodo 2010-2019, como se observa en [Tabla 1](#).



TABLA 1.

DATOS DE PRECIPITACIONES PROMEDIO Y MÁXIMAS DIARIAS DE ESTACIONES.

Estación	Código	N [m]	E[m]	Z [m]	Prec_Prom [mm]	Prec_Max [mm]
Nazareth	35070170	2081030.49	4977829.23	400	10.744	1170
Piedra Campana	35080080	2095070.96	4974056.11	450	8.077	173
Santa Maria	35070180	2095114.85	4971543.52	850	9.989	190
Altomuceno	35080110	2111066.13	4971343.43	2250	8.766	120.6
Chivor	35070190	2097947.33	4959354.78	1850	7.952	120
Ins. Agrícola Macanal	35075040	2107668.14	4964899.40	1300	6.357	103.2
Pomarrosos Los	35070520	2102924.82	4961172.24	1780	6.922	116.5
Quebrada Honda	35070130	2105003.51	4965870.88	1200	6.696	110
San Luis De Gaceno	35080070	2090581.56	4981172.61	400	10.614	177.8
Gachala	35060090	2076319.57	4942028.45	1733	6.230	133.3

Fuente: Autores.

Para la generación del modelo de precipitaciones se compararon diferentes métodos con el fin de seleccionar el más apropiado de acuerdo con el nivel de suavizado, detalle y área a cubrir, por lo que el método de isoyetas desarrollado con la información secundaria procesada genera la más amplia y detallada interpolación de subconjuntos de datos por lo cual cumple con lo requerido para la modelación. A continuación se presentarán los métodos usados para el modelado de precipitaciones por método de Neighbor y el método de polígonos de Thiessen, y se justifica la razón por la cual no se considera como modelo definitivo.

1) *Método Natural Neighbor o herramienta de interpolación de vecino natural*

Se utiliza solo un subconjunto de muestras que rodean a un punto de consulta, lo que limita su alcance. El mapa genera buena resolución pero no cubre toda el área de estudio, por lo cual su suavizado no garantiza fiabilidad en el proceso de ejecución, no obstante, presenta rangos de precipitación similares al resultado final de modelado (Fig. 4).

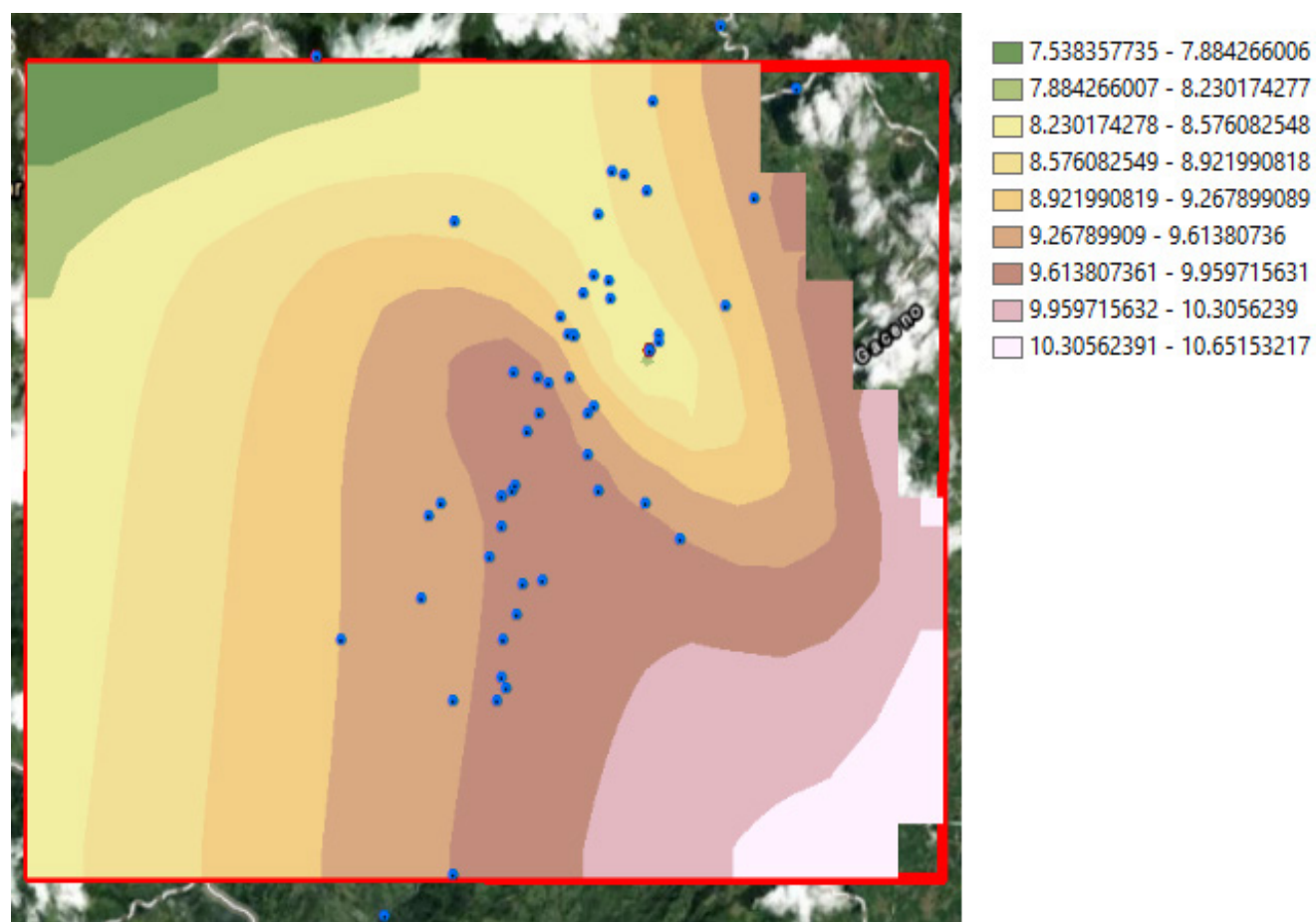


Fig. 4. Simulación por método Natural Neighbor.

Fuente: Autores.

2) Método Thiessen

Asigna una ponderación diferencial a cada estación, generando una distribución espacial no uniforme pero asumiendo una variación lineal entre estaciones [25]. Una de las limitaciones del método de Thiessen está en que la ponderación es fija, independientemente de la variabilidad temporal y espacial de la tormenta, por lo que el método de las isoyetas mejora esta limitación al generar isoyetas para cada tormenta. Esta metodología no es del todo exacta debido a que en las fronteras de los polígonos se desconoce con exactitud los rangos de precipitación como se observa en la Fig. 5. Para la creación de modelación por el método de “Polígono de Thiessen” (1) se tiene la Tabla 2:

$$P = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i X_i \rightarrow \frac{A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + \dots + A_n X_n}{A_T} \quad (1)$$

Donde:

- $P =$  Precipitación media de la cuenca.
- $n =$  Número de estaciones dentro de la cuenca.
- $X_i =$  Precipitación de la estación  $i$ .
- $A_T =$  Área total de la cuenca.
- $A_i =$  Area de influencia parcial del polígono de Thiessen.

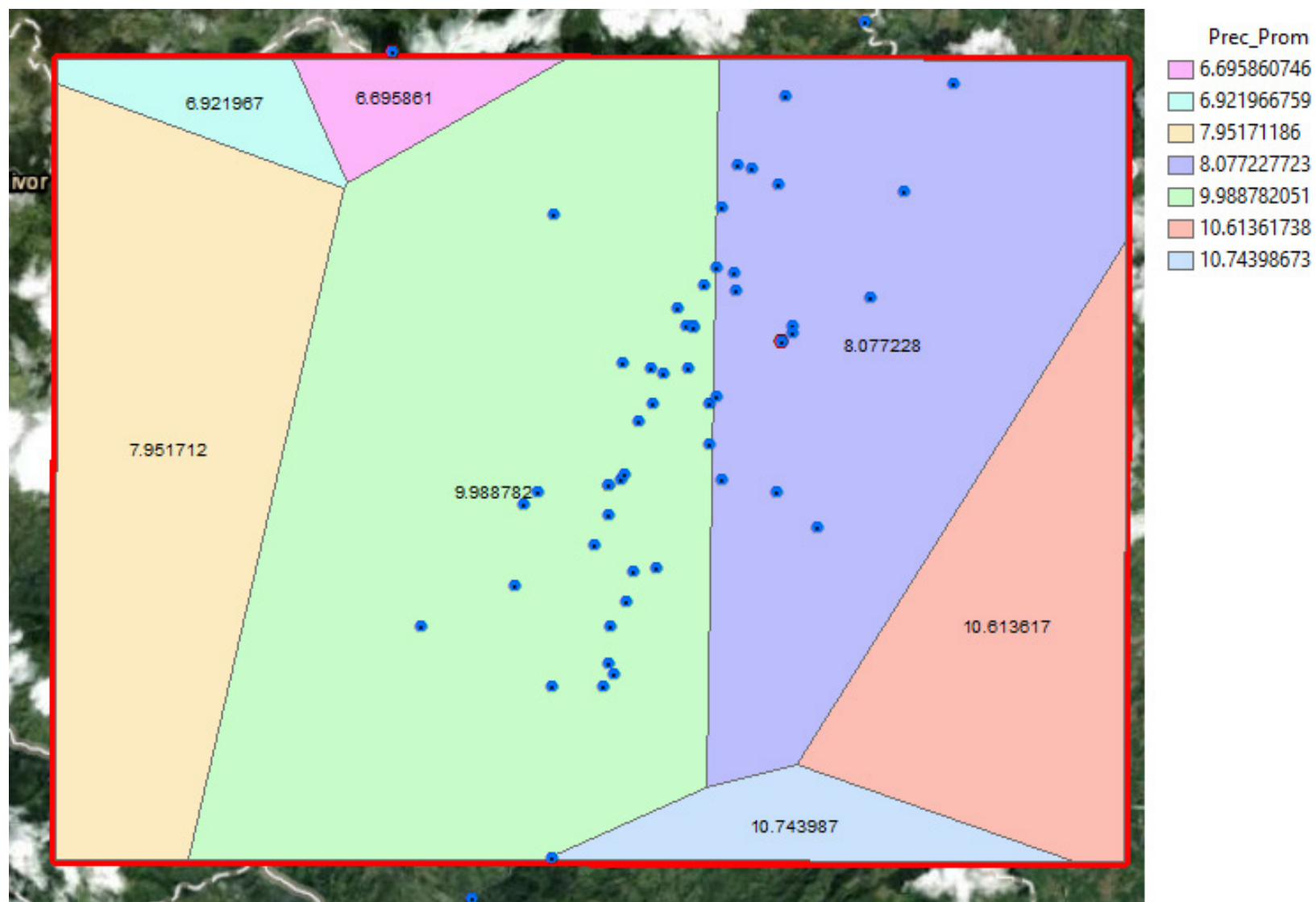


Fig. 5. Simulación por método de Polígono de Thiessen.  
Fuente: Autores.

TABLA 2.

PROCESAMIENTO DE DATOS ESTACIONES, ANÁLISIS MÉTODO DE THIESEN.

Estación	Código	Z (m)	Prec_Prom (mm)	Prec_Max (mm)	Area (Ha)	Prec* Area
Santa Maria	35070180	850	9.988782	190	11 464.7974	114 519.362
Los Pomarrosos	35070520	1780	6.921967	116.5	671.790146	4 650.10906
Chivor	35070190	1850	7.951712	120	5 442.48599	43 277.0804
San Luis Degaceno	35080070	400	10.613617	177.8	3 654.14993	38 783.7492
Quebrada Honda	35070130	1200	6.695861	110	591.581329	3 961.1462
Piedra Campana	35080080	450	8.077228	173	7 180.62774	57 999.5654
Nazareth	35070170	400	10.743987	1 170	941.230048	10 112.5632
			Total		29946.6626	273 303.576
			Precipitación media		9.126345053	

Fuente: Autores.

## IV. RESULTADOS

Con los registros de precipitaciones diarias durante el periodo 2010-2019 de las 10 estaciones meteorológicas escogidas, se determinó la precipitación promedio y máximas precipitaciones diarias así como también precipitaciones mensuales multianuales como se detalla en la metodología planteada lo que permitió generar un modelado de precipitaciones por interpolación geoestadística para una zona de estudio con longitudes de 15 km por 20 km y un área total de 300 km<sup>2</sup> circundante al municipio de Santa María, Boyacá (Tabla 3).

TABLA 3.

DETERMINACIÓN DE LLUVIAS ACUMULADAS MENSUALES - ESTACIÓN SANTA MARÍA.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2010	0.8	73.2	361	490.8	780.3	533.8	586.9	371.6	274.7	357.3	379.5	389.5
2011	22.1	64.2	185.5	393.2	809.9	480.5	383.3	485.1	611	422.8	399	425.3
2012	84.8	105.5	465.1	723	593.8	569	719.1	549.4	289.1	341.3	356.2	297.8
2013	36.6	230.2	280.6	460	667.1	335.5	674.7	572.9	439.9	368.9	466.4	347
2014	21.3	52.7	173.1	655.2	440.7	644.9	717.4	380.9	354.4	319.9	279	292.6
2015	175.7	27.2	88	472.6	403.3	732.1	674.4	490.2	385.3	388.7	503.8	223
2016	49.5	27.5	171	843.5	619.3	635.8	448	640.5	594.1	532.6	348.7	290
2017	59.1	73.3	303.2	271.6	506.4	599.6	534.9	327.5	527.2	404.3	228.3	97
2018	120.7	18.7	288.6	541.9	665.6	700.3	745.1	630.7	428.4	343.4	324.3	56.3
2019	17	71.5	160.3	302.9	583.4	699.7	702.2	691.6	514	505.1	272.6	167.2
Suma	587.6	744	2 476.4	5 154.7	6 069.8	5 931.2	6 186	5 140.4	4 418.1	3 984.3	3 558.4	2 585.7
Promedio	58.76	74.4	247.64	515.47	606.38	593.12	618.6	514.04	441.81	398.43	355.84	256.57

Fuente: Autores.

## A. Análisis distribución probabilística

De acuerdo con los procedimientos de la metodología para el cálculo de la distribución probabilística de Weibull y Gumbel, se generó un análisis de precipitaciones mensuales multianuales, dando como resultado los rangos de máximas precipitaciones mensuales- anuales o conocido como los umbrales de precipitación para la estación de Santa María evidenciados en la Tabla 4.



**TABLA 4.**  
DETERMINACIÓN DE LLUVIAS ACUMULADAS ANUALES, MÁXIMA PRECIPITACIÓN MENSUAL - ESTACIÓN SANTA MARÍA.

Año	No. Lluvias (Días)	Anual (mm)	Prep. Maxima (mm)
2010	257	4 599.4	780.3
2011	261	4 681.9	809.9
2012	266	5 094.1	723
2013	255	4 879.8	674.7
2014	246	4 332.1	717.4
2015	241	4 564.3	732.1
2016	253	5 200.5	843.5
2017	240	3 932.4	599.6
2018	249	4 864.6	745.1
2019	246	4 687.5	702.2

Fuente: Autores.

Al haberse aplicado la metodología de análisis probabilístico Weibull, teniendo definidas las máximas precipitaciones mensuales- anuales, los datos fueron organizados de mayor a menor. Posterior a ello, se asignó el número de orden equivalente al número total de datos ( $n$ ).

Con la probabilidad de excedencia se tiene como resultado la función  $F(X)$ , equivalente al 100% de la probabilidad menos la probabilidad de excedencia calculada, así (2):

$$F(x) = 1 - P(x > X) \quad (2)$$

Finalmente, se calcula la  $X$  de Gumbel o la precipitación máxima esperada en un periodo de retorno  $T = 25$  años, con las siguientes ecuaciones (3)(4)(5)(6) (Tabla 5):

$$F(X) = P(x \leq X) = e^{-e^{-\frac{f(x)-\mu}{\alpha}}} \quad (3)$$

$$F(X) = -\ln(-\ln \ln(F(x))) * \alpha + \mu \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{Sx}{Sn} \quad (5)$$

$$\mu = x(\text{media}) - (yn * \alpha) \quad (6)$$

Donde:

$Sx$  es la desviación estándar.

$Sn$  y  $Yn$  son factores de frecuencia e intervalos de confianza para la distribución de Gumbel en función del número de datos  $n$  (10).

**TABLA 5.**  
DATOS DE ENTRADA ANÁLISIS PROBABILÍSTICO GUMBEL - ESTACIÓN SANTA MARÍA.

Desviación estándar ( $Sx$ )	69.116919
$Sn$	0.9496
$a$	72.785298
Media	732.78
$Yn$	0.49521
	696.73599
No. Datos	10

Fuente: Autores.

Con el análisis probabilístico efectuado según la metodología se obtuvieron como resultados las precipitaciones máximas esperadas y la máxima precipitación probable para un periodo de retorno dado a 25 años, como se observa en la [Tabla 6](#).

**TABLA 6.**  
RESULTADOS ANÁLISIS PROBABILÍSTICO WEIBULL-GUMBEL Y PRECIPITACIONES MÁXIMAS ESPERADAS-  
ESTACIÓN SANTA MARÍA.

	Weibull	# Orden	P > x	F(x)	X (Gumbel)	P > x(25años)
2010	843.5	1	0.091	0.909	867.826471	0.04
2011	809.9	2	0.182	0.818	813.635735	F(x)
2012	780.3	3	0.273	0.727	780.022614	0.96
2013	745.1	4	0.364	0.636	754.535235	X (Gumbel)
2014	732.1	5	0.455	0.545	733.176041	929.542261
2015	723	6	0.545	0.455	714.03538	
2016	717.4	7	0.636	0.364	695.896477	
2017	702.2	8	0.727	0.273	677.679888	
2018	674.7	9	0.818	0.182	657.911052	
2019	599.6	10	0.909	0.091	633.078599	

Fuente: Autores.

### B. Probabilidad de excedencia y no excedencia

La probabilidad de excedencia o probabilidad de ocurrencia se define como la probabilidad que un evento para este caso de tipo hidrológico sea excedido o por lo menos igualado donde  $T$  es el periodo de retorno definido a 25 años, calculandose así (7)(8):

$$P. Excedencia = P(x > X) \tag{7}$$

$$P.E = \frac{1}{T} \tag{8}$$

De la ecuación 7 se tiene como resultado una probabilidad de excedencia equivalente al 4% y por consiguiente una probabilidad de no excedencia equivalente al 100% de la probabilidad menos la probabilidad de excedencia, siendo 96% la probabilidad de que no se presenten eventos hidrológicos por encima de la precipitación máxima calculada en 25 años de periodo de retorno equivalente a 929.54 mm/mes.

### C. Comparativo Distribución probabilística

En la [Fig. 6](#) se observa la correlación de datos por distribución Weibull y distribución Gumbel así como también máximas precipitaciones esperadas en la Estación de Santa María; este proceso finalmente se repite en las otras dos estaciones seleccionadas como las más próximas al municipio con sus respectivos valores de precipitación registrados. Como resultado final es posible observar que, para un periodo de retorno equivalente a 25 años se tiene una probabilidad de no excedencia del 96% y probabilidad de excedencia del 4%, lo que permite inferir que a un menor periodo de retorno es posible que la probabilidad de excedencia sea mayor, esto debido a que se comportan de forma inversamente proporcional. De igual manera con los resultados obtenidos se identificó que en entre 2010 y 2019 los periodos con mayor concentración e intensidad de lluvia se dan en los meses de mayo-junio-julio, así como también se observan periodos de bajas precipitaciones en los meses de enero y febrero.

Se pudo determinar también, que la mayoría de los deslizamientos producidos por factor detonante de lluvia se presentan en temporadas regulares de mayo a julio.

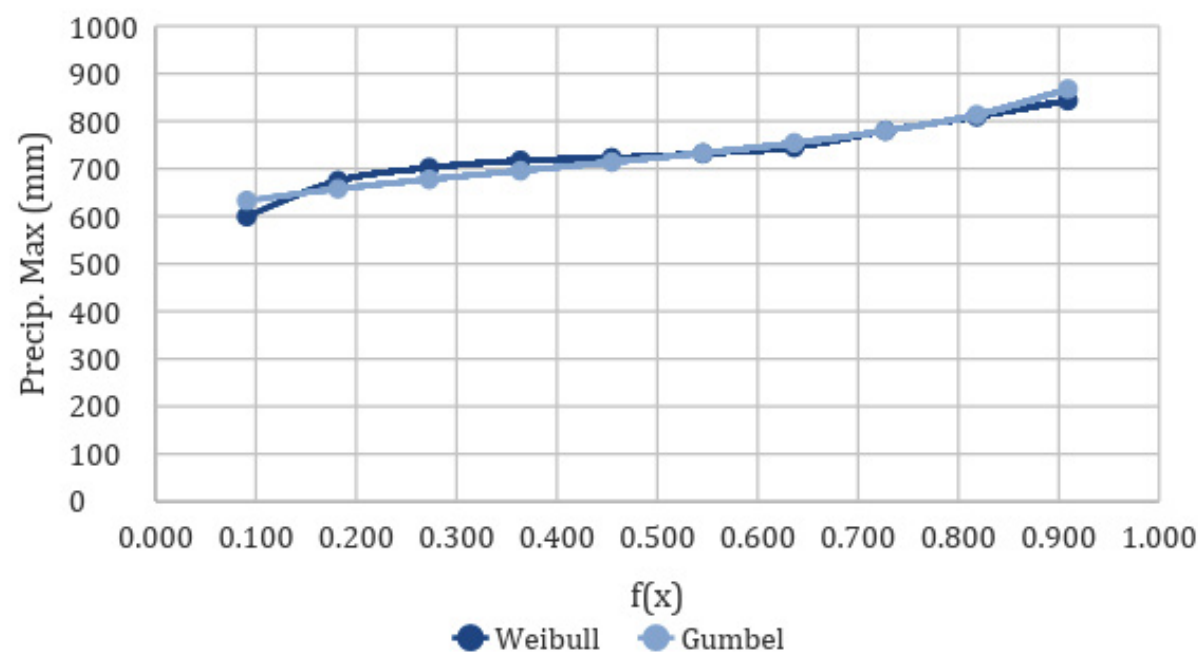


Fig. 6. Gráfica del Cálculo Distribución probabilística para modelación de precipitaciones.  
Fuente: Autores.

#### D. Modelado de precipitaciones

Los valores de precipitaciones máximas esperadas, para un periodo de retorno de 25 años, se calcularon a partir de una distribución Weibull y Gumbel Tipo I – Extremo para el periodo de análisis (2010-2019) y se especializó con ArcGIS, utilizando el método de interpolación IDW como se observa en la Fig. 7.

Finalmente, se seleccionó el método “Isoyetas” debido al suavizado que genera y al nivel de detalle proporcionado, para usarse como insumo en el análisis de la amenaza por movimientos en masa. En la modelación se presentan las precipitaciones promedio de la zona con rangos de precipitación de mínimos y máximos contornos (Fig. 7), cuyo resultado permite observar la correlación directa existente entre los movimientos en masa (puntos azules) y las áreas de más altas precipitaciones del modelo para el periodo 2010-2019.

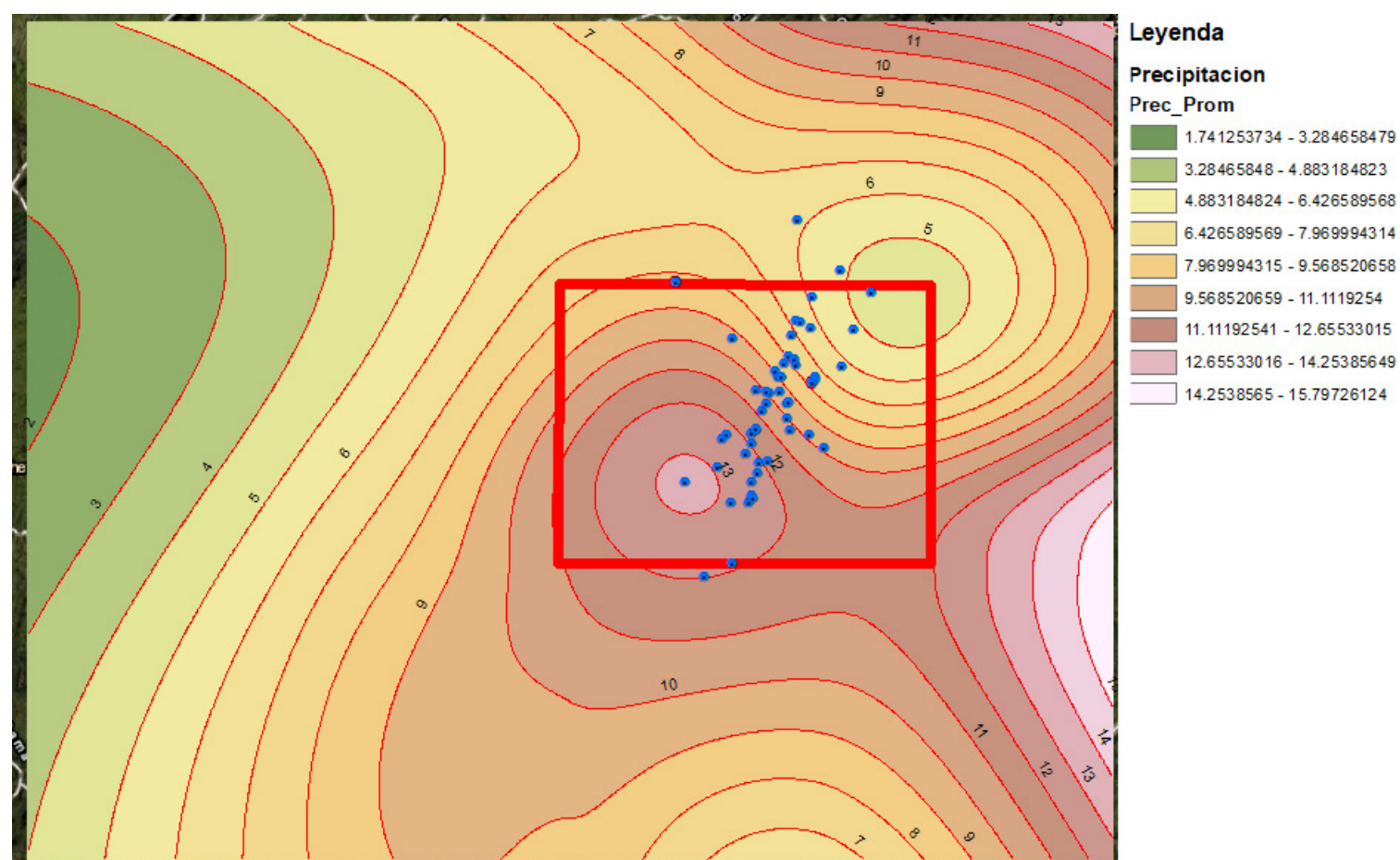


Fig. 7. Modelado de precipitaciones con análisis multitemporal.  
Fuente: Autores.



De igual forma y partiendo de la hipótesis planteada por McGill [26], en donde se indica que a mayor lluvia diaria máxima como antecedente al evento, mayor es la probabilidad de ser detonado un movimiento en masa y, de acuerdo con el análisis efectuado, se pudo establecer que realmente existe una correlación directa entre los niveles de precipitación y la ocurrencia de movimientos en masa en la zona.

#### V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con la presente investigación constituyen un insumo para la elaboración del mapa de amenazas de movimientos en masa para el sector de Santa María (Boyacá, Colombia), el cual puede ser utilizado como una herramienta para la toma de decisiones en cuanto a la gestión del riesgo a nivel municipal.

Se evidencia dentro de la zona de estudio una alta incidencia de precipitaciones incrementando la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa, los cuales se presentan regularmente en las temporadas más altas de pluviosidad registradas en los meses de mayo a julio respectivamente.

Los modelos de precipitaciones generados a partir del procesamiento de la base de datos de precipitaciones medias diarias y mensuales multianuales así como el inventario de movimientos en masa geolocalizados en la zona de estudio, hicieron posible la correlación entre estos, con lo que se concluye que la ocurrencia de la mayoría de los eventos presentados muestran una marcada relación directa con las máximas precipitaciones esperadas espaciotemporalmente, esto quiere decir que tanto la mayoría de eventos como acumulado de precipitaciones antes y después del suceso fueron presentados cerca o sobre la ubicación del evento así como también en los periodos de máxima intensidad de lluvia de mayo a septiembre en el periodo evaluado de 2010-2019.

#### FINANCIAMIENTO

Artículo de investigación científica derivado del proyecto de investigación “*Identificación de zonas asociadas a procesos de remoción en masa a través de análisis de percepción remota*”, Código INV ING 3190, financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la UMNG. Año de inicio: marzo 2020. Año de finalización: septiembre 2021.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones de la UMNG quien financió el proyecto de investigación INV ING 3190.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Vandromme, Y. Thiery, S. Bernardie & O. Sedan, “ALICE (Assessment of Landslides Induced by Climatic Events): A single tool to integrate shallow and deep landslides for susceptibility and hazard assessment,” *Geomorph*, vol. 367, pp. 1–48, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107307>
- [2] *Índice Municipal para la Gestión de Riesgos*, DNP, 2019. Disponible en <https://www.dnp.gov.co/programas/ambiente/gestion-del-riesgo/Paginas/gestion-del-riesgo.aspx>
- [3] *Mapa de Amenaza por movimientos en masa*, SGC, 2019. Disponible en [http://geoportal.sgc.gov.co/Flexviewer/Amenaza\\_Movimiento\\_Remocion\\_Masa/](http://geoportal.sgc.gov.co/Flexviewer/Amenaza_Movimiento_Remocion_Masa/)
- [4] E. Aristizabal, H. Martínez y J. Vélez, “Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias”, *Rev Acad Colomb Cienc*, vol. 34, no. 131, pp. 209–227, Jun. 2010. Recuperado de [https://www.acefyn.com/revista/Vol\\_34/131/209-227.pdf](https://www.acefyn.com/revista/Vol_34/131/209-227.pdf)
- [5] E. Rodríguez, J. Sandoval, J. Chaparro, G. Trejos, E. Bello, K. Ramírez, E. Castro, J. Castro y G. Ruiz, *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. BO, CO: SGC, 2017. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>
- [6] M. Terlien, *Modeling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides*, ENS, NL: ITC, 1996.
- [7] G. Gullà, L. Aceto, L. Antronico, L. Borrelli, R. Coscarelli & F. Perri, “A smart geotechnical model in emergency conditions: A case study of a medium-deep landslide in Southern Italy,” *Eng Geol*, vol. 234, pp. 138–152, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.01.008>
- [8] P. Amaral, R. Marques, G. Queiroz, J. Zezere & F. Marques, “Distributed transient response modeling of rainfall triggered shallow landslides for susceptibility assessment in Ribeira Quente valley (S. Miguel Island, Azores),” in J. Malet, A. Remaître, T. Bogaard, L. Van Beek, S. Jong, *Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*, SXB, FR: CERIG, 2009, pp. 89–94. Available: <http://hdl.handle.net/10451/39473>

- [9] S.-H. Chiang & K.-T. Chang, “Application of radar data to modeling rainfall-induced landslides,” *Geomorph.*, vol. 103, no. 3, pp. 299–309, Feb. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.06.012>
- [10] C. J. Van Westen, I. C. Van Duren, H. M. G. Kruse & M. T. J. Terlien, *GISSIZ : training package for Geographic Information Systems in slope instability zonation: Part 1. theory Part 2. exercises*. ENS, NL: ITC, 1994.
- [11] B. Collins & D. Znidarcic, “Stability analyses of rainfall induced landslides,” *J. Geotech Geoenviron Eng.*, vol. 130, no. 4, pp. 362–371, Mar. 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(362))
- [12] J. Mozo, M. Varni, M. Ares y C. Chagas, “Modelado hidrológico de la precipitación-escorrentía en una microcuenca agrícola del Partido de Azul, Buenos Aires”, *Cienc. Suelo*, vol. 38, no. 1, pp. 121–132. Ene. 2020. Disponible en <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/484>
- [13] G. Borzi, M. Delgado, M. del Blanco, L. Santucci y E. Carol, “Generación de un modelo de precipitación-escorrentía en la cuenca del río samborombón”, presentado en *VI Congreso Bianual Proimca*, PRODECA, BHI, AR, 6-8 Sept. 2017. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/118275>
- [14] D. Varnes, *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. PAR, FR: UN, 1984.
- [15] C. Dirksen, J. Kool, P. Koorevaar & M. Van Genuchten, “HYSWASOR-Simulation Model of Hysteretic Water and Solute Transport in the Root Zone,” in D. Russo & G. Dagan, *Water Flow and Solute Transport in Soils*, NY, USA: Springer, 1993, pp. 99–122. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-77947-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-77947-3_8)
- [16] P. Jaiswal & C. J. Van Westen, “Rainfall Based temporal probability for landslide initiation along transportation routes in Southern India”, in J. Malet, A. Remaître, T. Bogaard, L. Van Beek, S. Jong, *Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*, SXB, FR: CERIG, 2009, pp. 139–143.
- [17] C. Lanni, R. Rigon, E. Cordan & A. Tarantino, “Analysis of the effect of normal and lateral subsurface water flow on the triggering of shallow landslides with a distributed hydrological model”, in J. Malet, A. Remaître, T. Bogaard, L. Van Beek, S. Jong, *Landslide Processes: from geomorphologic mapping to dynamic modeling*, SXB, FR: CERIG, 2009, pp. 157–162.
- [18] R. Iverson, “Landslide triggering by rain infiltration”, *Water Resour Res*, vol. 36, no. 7, pp. 1897–1910, Jul. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- [19] S. Belmonte y V. Núñez, “Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG”, *GeoFocus*, no. 6, pp. 15–27, May. 2006. Disponible en <https://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/98>
- [20] ArcGIS. (version 10.8.2). ESRI Colombia. [Online]. Disponible en <https://www.arcgis.com/index.html>
- [21] Municipio de Santa María, *Plan de desarrollo del municipio de Santa María, Boyaca, vigencia 2004-2007*. Municipio de Santa María: Alcaldía Municipal. Recuperado de [http://webanterior.corpochivor.gov.co/sites/default/files/attach/pot\\_santamaria.pdf](http://webanterior.corpochivor.gov.co/sites/default/files/attach/pot_santamaria.pdf)
- [22] Municipio de Santa María, *Análisis de situación de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud, municipio de Santa María Boyacá 2021*. Municipio de Santa María: Gobernación de Boyacá, 2021. Recuperado de [https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis2021/asis\\_santa\\_maria\\_2021.pdf](https://www.boyaca.gov.co/SecSalud/images/Documentos/asis2021/asis_santa_maria_2021.pdf)
- [23] Corpochivor, *Plan ambiental para el municipio de Santa María Boyacá*. Garagoa: Corpochivor, 1996. Recuperado de <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/907/9SANTA%20MARIA.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] SIMMA, *Sistema de Información de Movimientos en Masa*, SGC, 2020. Disponible en <http://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>
- [25] SGC, *Geología de la Plancha No. 229 Gachalá*. BO, CO: Minminas, 2013. Recuperado de <https://recordcenter.sgc.gov.co/B14/23008010024664/Documento/pdf/2105246641101000.pdf>
- [26] C. Damant, G. L. Austin, A. Bellon & R. S. Broughton, “Errors in the Thiessen technique for estimating areal rain amounts using weather radar data,” *J Hydrol*, vol. 62, pp. 81–94, Apr. 1983. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90095-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90095-1)
- [27] SGC, *Anexo E: Amenaza por detonante clima*, Bucaramanga: UIS, 2017. Recuperado de [http://recordcenter.sgc.gov.co/B21/AmeMM137ElCocuy/Documento/Pdf/Anexo\\_E.pdf](http://recordcenter.sgc.gov.co/B21/AmeMM137ElCocuy/Documento/Pdf/Anexo_E.pdf)
- [28] HEC-HMS (version 4.10). Usace. [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- [29] *Tiempo y clima*, IDEAM, 2002. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/precipitacion-diaria-milímetros>

**Michael Esteban Moreno Arroyave.** Ingeniero civil egresado de la Universidad Militar Nueva Granada (Colombia). Presenta capacidades para el desenvolvimiento en las diferentes ramas de la ingeniería, egresado del colegio Nuestra Señora de Fátima como técnico-énfasis en Asistencia administrativa y manejos contables. Su campo de interés de investigación fue la geotecnia e hidrología. <https://orcid.org/0000-0001-7459-8445>

**Elsa Adriana Cárdenas Quiroga.** Geóloga egresada de la Universidad de Caldas (Colombia). Especialista en Docencia universitaria de la Universidad Militar Nueva Granada (Colombia). Magíster en Gestión Ambiental de la Universidad Javeriana (Colombia). Docente e investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada. <https://orcid.org/0000-0002-8587-4625>