



Universidad del
Rosario

Cuantificación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa en Colombia: Uso de Sensores Remotos en la Evaluación de la Precipitación Antecedente como Detonante.

Jairo Andrés Salazar Rojas

Universidad del Rosario
Facultad de Jurisprudencia
Bogotá D.C., Colombia
2022

Cuantificación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa en Colombia: Uso de Sensores Remotos en la Evaluación de la Precipitación Antecedente como Detonante.

Jairo Andrés Salazar Rojas
Ingeniero Forestal

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Derecho y Gestión Ambiental

Director:

Ph.D. Benjamín Quesada

Codirector:

Ph.D. Nicola Clerici

Universidad del Rosario
Facultad de Jurisprudencia
Bogotá D.C., Colombia

2022

Agradecimientos

A la facultad de jurisprudencia de la Universidad del Rosario y al programa de maestría en derecho y gestión ambiental, en especial a su directora la profesora Lina Muñoz Ávila, por permitirme desarrollar esta investigación en modalidad de tesis, por su dedicación, guía y apoyo constante durante este proceso.

A los directores, profesores Benjamín Quesada y Nicola Clerici de la facultad de Ciencias Naturales de la Universidad del Rosario, por sus constantes aportes durante el desarrollo de esta investigación, su disposición e interés permanente a la resolución de inquietudes y el tiempo dedicado a la retroalimentación desde sus campos de conocimiento en climatología y sensores remotos.

Resumen

En el desarrollo de esta investigación se diseñó e implementó una metodología para la cuantificación del riesgo de ocurrencia de deslizamientos a partir de la información de precipitación antecedente obtenida por sensores remotos (CHIRPS V2.0) y el uso del Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000, en conjunto con el Inventario Nacional de Movimientos en Masa. Esta investigación se dividió en cinco etapas; i) la primera etapa consistió en la construcción de la climatología de la precipitación con los valores reportados diariamente por CHIRPS V2.0 con información de 1980 a 2020, ii) depuración del Inventario Nacional de movimientos en Masa, en donde se seleccionaron los eventos más representativos a través de múltiples criterios iii) definición de regiones de representatividad del fenómeno de deslizamientos, iv) el análisis de la precipitación antecedente para 15, 30, 60, 90 y 120 días a partir de los eventos seleccionados y por último v) la definición el modelo de riesgo para la definición de zonas con exceso de precipitación antecedente susceptible de fenómenos de deslizamientos. El resultado final del modelo se presenta como un archivo raster de resolución de 5 km x 5 km con un desempeño general del 53% de capacidad de identificación de zonas con eventos de deslizamientos, alcanzando valores de, inclusive, el 68% para la identificación en el segundo semestre del año.

Palabras clave: Deslizamientos, Precipitación, CHIRPS V2.0, Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa, Inventario Nacional de Movimientos en Masa.

Abstract

On this research, a methodology was designed and implemented for the evaluation of the risk of landslide occurrence based on antecedent precipitation information obtained by remote sensors (CHIRPS V2.0) and the use of the Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa scale 1:100.000 (Hazards by landslides map) by Disasters Management Institution from Colombia and the Inventario Nacional de Movimientos en Masa (Landslides database) from Colombian Geological Service. This research was divided into five stages; i) the first stage consisted in the construction of the precipitation climatology with the values reported daily by CHIRPS V2.0 with information from 1980 to 2020, ii) selection of most important events from the landslides database, through multiple criteria iii) definition of representative regions of the landslide, iv) analysis of antecedent precipitation for 15, 30, 60, 90 and 120 days from the selected events and finally v) definition the risk model for the definition of areas with excess antecedent precipitation susceptible to landslide. The final result of the model is presented as a 5 km x 5 km resolution raster file with a general performance of 53% capacity to identify areas with landslide events, reaching values of, inclusive, 68% for the identification in the second half of the year.

Keywords: Landslides, Precipitation, CHIRPS V2.0, Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa, Inventario Nacional de Movimientos en Masa.

Contenido

	Pág.
1. Objetivos.....	22
1.1 Objetivo General	22
1.2 Objetivos Específicos	22
2. Marco Teórico.....	23
2.1 Deslizamientos de Tierra o Fenómenos de Remoción en Masa.	23
2.1.1 Desprendimientos de Roca.....	23
2.1.2 Volcamientos.....	24
2.1.3 Deslizamientos de Traslación.	24
2.1.4 Deslizamientos de Rotación.....	24
2.1.5 Flujo.....	25
2.1.6 Desprendimiento Lateral.....	25
2.1.7 Complejos.....	25
2.2 Factores que influyen en los Deslizamientos de Tierra o Fenómenos de Remoción en Masa.....	26
2.2.1 Causas Naturales: Agua.	27
2.2.2 Causas Naturales: Actividad Sísmica.	28
2.2.3 Causas Naturales: Actividad Volcánica.....	28
2.2.4 Causas Antrópicas: Actividades Humanas.....	28
2.3 Estudios Sobre Deslizamientos de Tierra en Colombia.	29
2.4 Gestión del Riesgo de Desastres, Marco Legal en Colombia.	48
3. Materiales y Métodos	54
3.1 Materiales.....	54
3.1.1 CHIRPS V2.0.....	55
3.1.1.1 Antecedentes.....	55

3.1.1.2	Insumos CHIRPS V2.0.....	55
3.1.1.3	Características CHIRPS V2.0.....	57
3.1.2	Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000	59
3.1.2.1	Antecedentes.....	59
3.1.2.2	Mapa Nacional Escala 1:100.000.....	65
▪	Variable Geológica.....	67
▪	Variable Geomorfológica.....	67
▪	Variable Suelos/Edáfica.....	67
▪	Variable Cobertura de la Tierra.....	67
▪	Detonante Climático.....	72
▪	Detonante Sismo.....	72
3.1.3	Inventario Nacional de Movimientos en Masa.....	76
3.2	Métodos.....	79
3.2.1	Funciones de Distribución: Probabilidad y Probabilidad Acumulada.....	79
3.2.2	Asociación Lineal de Variables, Coeficientes de Correlación; Pearson, Spearman y Kendall.....	81
3.2.2.1	Coeficiente de Correlación de Pearson.....	81
3.2.2.2	Coeficiente de Correlación de Spearman.....	82
3.2.2.1	Coeficiente de Correlación de Kendall.....	83
3.2.3	Comparaciones de Dos Muestras a Partir de Funciones de Distribución Acumulada: Kolmogorov – Smirnov y Prueba de Diferencia Máxima.....	84
3.2.3.1	Prueba Kolmogorov – Smirnov (KS).....	84
3.2.3.1	Prueba de Diferencia Máxima (DM).....	85
3.2.4	Medidas de Similitud: Coseno Similitud o Similitud.....	87
4.	Metodología.....	88
4.1	Climatología CHIRPS V2.0. (ETAPA I).....	89
4.2	Depuración del Inventario Nacional de Movimientos en Masa del SGC (ETAPA II).....	91
4.3	Definición de Regiones de Análisis; Precipitación CHIRPS V2.0 y Número de Eventos del Inventario nacional de Movimientos en Masa Filtrado (Etapa III).....	96
4.4	Análisis de Registros de Precipitación Antecedente (Etapa IV).....	101
4.5	Definición y Evaluación del Modelo de Pronóstico (Etapa V).....	101
5.	Resultados.....	103

5.1	Deslizamientos de Tierra en Colombia.....	103
5.1.1	Comportamiento Anual de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020. 104	
5.1.2	Comportamiento Anual de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020 a Nivel Departamental y Municipal.	105
5.1.3	Comportamiento Mensual de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020 y su Relación con la Climatología.....	108
5.1.4	El Impacto de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020.....	112
5.2	Resultados Climatología CHIRPS V2.0.(ETAPA I).	116
5.3	Resultados Depuración del Inventario Nacional de Movimientos en Masa del SGC (ETAPA II).....	118
5.4	Análisis de Precipitación Antecedente.....	128
5.5	Modelo de Evaluación del Riesgo a Movimientos en Masa a Partir de la Precipitación Antecedente.	141
5.6	Evaluación de Resultados.....	150
6.	Conclusiones y Recomendaciones.....	157
6.1	Conclusiones.....	157
6.2	Recomendaciones.....	159
7.	Bibliografía	163

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1. a) Desprendimientos de Roca, b) Volcamientos, c) Deslizamiento de Traslación, d) Deslizamiento de Rotación, e) Flujo y f) Desprendimiento Lateral. (de Blasio, 2011).....	26
Figura 2-2. Regionalización del territorio nacional con base en los umbrales de la lluvia acumulada (Mayorga Márquez, 2003).....	30
Figura 2-3. Umbrales de la lluvia detonante que caracterizan las cuatro regiones (Mayorga Márquez, 2003).....	31
Figura 2-4. Lluvia Acumulada de 1 día contra Lluvia Acumulada Antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la Lluvia Acumulada de 1 día. Las líneas oscuras representan los umbrales máximos y mínimos de lluvia ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa (puntos rojos). En el cuadro superior derecho se presenta el porcentaje con respecto al número total de movimientos en masa que se encuentran dentro del umbral. (Aristizábal et al., 2011)	32
Figura 2-5. Tabla de escala de calificación de la intensidad de un	33
Figura 2-6. Distribución departamental de los deslizamientos registrados por grados de intensidad, para el periodo 1978 - 2007.(Martínez Ardila et al., 2010).....	34
Figura 2-7. Relación entre la precipitación y la ocurrencia de deslizamientos en los seis departamentos con mayor número de registros, para el período 1978-2007 (Martínez Ardila et al., 2010).....	35
Figura 2-8. Ubicación y clasificación de los umbrales de lluvia recopilados de la literatura en función de la escala climática de Köppen.(Ramos Cañon et al., 2015)	36
Figura 2-9. Clasificación de escala de umbrales según el área de estudio. (Ramos Cañon et al., 2015).....	39
Figura 2-10. Estadísticas de la sistematización de la base de datos de los artículos por tipos umbrales de lluvia.(Ramos Cañon et al., 2015)	40
Figura 2-11. Escala espacial de aplicabilidad de umbrales. (Ramos Cañon et al., 2015).....	40
Figura 2-12. Densidad de eventos de deslizamientos versus densidad poblacional por ciudad y región (Aristizábal & Sánchez, 2020)	41

Figura 2-13. Distribución espacial de la precipitación media anual en Colombia 1980 - 2010 (climatología) y la distribución mensual de los deslizamientos por región. (Aristizábal & Sánchez, 2020)	42
Figura 2-14. Cinco eventos de deslizamientos con mayor número de fatalidades en Colombia (Aristizábal & Sánchez, 2020).....	43
Figura 2-15. Ubicación área de interés y distribución geográfica de los movimientos en masa históricos (Aristizábal et al., 2022)	44
Figura 2-16. Curvas de precipitación antecedente 90 días (Aristizábal et al., 2022)	44
Figura 2-17. Representación gráfica de la serie de lluvia acumulada detonante (mm) por día a partir del día de ocurrencia del evento hasta los 90 días anteriores a este (AD color rojo) y de las series de 90 días históricas(AH color negro) (Aristizábal et al., 2022)	45
Figura 2-18. Ejemplos de comportamientos de las curvas AD y AH, así como la relación entre la cantidad de valores de la serie de AD y la cantidad de series de AH que son menores a la serie detonante(Aristizábal et al., 2022).	46
Figura 2-19. Propuesta de umbrales con alerta alta, media y baja a partir de las curvas con AUC>0.5(Aristizábal et al., 2022).....	47
Figura 2-20. Estructura actual del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, conforme la ley 1523 de 2012.	52
Figura 3-1. Esquema general de procesamiento CHIRPS (Funk et al., 2015).....	56
Figura 3-2. Imagen de precipitación en mm/día CHIRPS v 2.0 para el día 2020/03/31...58	
Figura 3-3. Mapa de categorías de amenaza relativa por movimientos en masa en Colombia, escala 1:1.500.000 (Ruiz Peña et al., 2017).	61
Figura 3-4. Mapa Nacional de Movimientos en Masa 1:500.000 (Ruiz Peña et al., 2017).	64
Figura 3-5. Metodología heurística para la elaboración del Mapa Nacional de la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa Escala 1:100,000 (Ruiz Peña et al., 2017).....	66
Figura 3-6. Ponderaciones para Mapa de susceptibilidad (Ruiz Peña et al., 2017).....	66
Figura 3-7. Susceptibilidad variable geológica en Colombia para fenómenos de remoción en masa (Ruiz Peña et al., 2017).	68
Figura 3-8. Susceptibilidad variable geomorfología en Colombia para fenómenos de remoción en masa (Ruiz Peña et al., 2017).....	69
Figura 3-9. Susceptibilidad variable suelos en Colombia para fenómenos de remoción en masa (Ruiz Peña et al., 2017).	70

Figura 3-10. Susceptibilidad variable cobertura de la tierra en Colombia para fenómenos de remoción en masa (Ruiz Peña et al., 2017).....	71
Figura 3-11. Detonante de fenómenos de remoción en masa por clima en Colombia (Ruiz Peña et al., 2017).	73
Figura 3-12. Detonante de fenómenos de remoción en masa por sismo (Ruiz Peña et al., 2017).	74
Figura 3-13. Mapa final integrado de amenaza relativa por movimientos en masa en Colombia (Ruiz Peña et al., 2017).....	75
Figura 3-14. Ventana principal del SIMMA (SGC, 2020).	76
Figura 3-15. Distribución espacial del inventario nacional de movimientos en masa.(datos: SGC, 2020).....	77
Figura 3-16. (izq.) histograma de probabilidad; (der.) barras de probabilidad (Johnson, 2012).	80
Figura 3-17 Representación función de distribución acumulada (Johnson, 2012).	80
Figura 3-18 Diagrama de correlación positiva (izquierda), diagrama de correlación negativa (derecha) (Caridad y Ocerin, 1998).....	81
Figura 3-19 Diagramas de variables sin correlación (Caridad y Ocerin, 1998).	82
Figura 3-20. Aplicación de las pruebas KS y DM sobre evento registrado el 01/05/2017 en Cajamarca (Tolima).....	86
Figura 4-1. Esquema general de la metodología empleada.....	88
Figura 4-2. Extracción de series para construcción de climatologías CHIRPS V2.0	90
Figura 4-3. Número de eventos anuales reportados en el Inventario Nacional de Movimientos en Masa (original) 1981 - 2019.....	91
Figura 4-4. ONI periodo 2000 – 2012, azul periodos La Niña y rojo El Niño (NOAA's, 2021)	92
Figura 4-5. Relación entre el número de eventos del Inventario Nacional de Movimientos en Masa (Original) y la Precipitación Total Anual CHIRPS V2.0.....	92
Figura 4-6. Número de eventos Inventario Nacional de Movimientos en Masa Original y Filtrado anual.	94
Figura 4-7. Relación entre el número de eventos del Inventario Nacional de Movimientos en Masa (Filtrado) y la Precipitación Total Anual CHIRPS V2.0 entre 1981 y 2019.....	95

Figura 4-8. Mapa de densidad, Iteración 1.....	98
Figura 4-9. Mapa de densidad, Iteración 2.....	98
Figura 4-10. Mapa de densidad, Iteración 3.....	98
Figura 4-11. Mapa de densidad, Iteración 4.....	98
Figura 4-12. Mapa de densidad, Iteración 5.....	99
Figura 4-13. Mapa de densidad, Iteración 6.....	99
Figura 4-14. Mapa de densidad, Iteración 7.....	99
Figura 4-15. Mapa de densidad, Iteración 8.....	99
Figura 4-16. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Iteración 2 - Subregión 1.....	100
Figura 4-17. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Iteración 2 - Subregión 2.....	100
Figura 5-1. Comportamiento anual de los deslizamientos de tierra en Colombia, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).	104
Figura 5-2. Distribución espacial de la concentración de eventos de deslizamientos de tierra, discriminados por municipio, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).	107
Figura 5-3. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, a nivel nacional, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).....	108
Figura 5-4. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Bogotá, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología de la precipitación 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).....	109
Figura 5-5. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Manizales, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).	109
Figura 5-6. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Medellín, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).	109
Figura 5-7. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Ibagué, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).	110

Figura 5-8. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Pereira, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).....	110
Figura 5-9. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Armenia, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).....	110
Figura 5-10. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Quibdó, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).....	111
Figura 5-11. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Bucaramanga, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).....	111
Figura 5-12. Comportamiento anual de los reportes de familias y personas afectadas, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).....	113
Figura 5-13. Climatología diaria 1981 - 2019 para los primeros días de cada mes; (a) enero 01, (b) febrero 01, (c) marzo 01, (d) abril 01, (e) mayo 01, (f) junio 01, (g) julio 01, (h) agosto 01, (i) septiembre 01, (j) octubre 01, (k) noviembre 01 y (l) diciembre 01. Precipitación expresada en mm / día.	117
Figura 5-14. Distribución espacial de los eventos registrados en el Inventario Nacional de Movimientos en Masa depurado.	119
Figura 5-15. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Antioquia.	120
Figura 5-16. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Cauca.....	120
Figura 5-17. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Boyacá.	120
Figura 5-18. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Cundinamarca.	121
Figura 5-19. Comportamiento de la precipitación Vs Número de eventos registrados en la iteración 3, subregiones; 1, 2 y 3.....	122
Figura 5-20. Comportamiento de la precipitación Vs número de eventos registrados en la iteración 5, subregiones; 1, 2, 3, 4 y 5.....	124
Figura 5-21. Comportamiento de las métricas de similaridad entre la precipitación Vs número de eventos registrados, para la última subregión de cada iteración.	126
Figura 5-22. Subregiones de densidad de eventos de deslizamientos determinadas para la iteración 5.	126
Figura 5-23. Subregión 5 de densidad de eventos de deslizamientos determinadas para la iteración 5.	127

Figura 5-24. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 15 días anteriores al evento.	129
Figura 5-25. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 30 días anteriores al evento.	130
Figura 5-26. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 60 días anteriores al evento.	131
Figura 5-27. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 90 días anteriores al evento.	132
Figura 5-28. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 120 días anteriores al evento.	133
Figura 5-29. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 120 días.	135
Figura 5-30. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 90 días.	136
Figura 5-31. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 60 días.	137
Figura 5-32. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 30 días.	138
Figura 5-33. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 15 días.	139
Figura 5-34. Diagramas de caja resultados de la prueba DM para 15, 30, 60, 90 y 120 días de precipitación antecedente.	140
Figura 5-35. Diagramas de caja resultados de la prueba Kolmogorov-Smirnov para 15, 30, 60, 90 y 120 días de precipitación antecedente.	140
Figura 5-36. Esquema Operacional para el Cálculo del Modelo de Evaluación del Riesgo a Movimientos en Masa a partir de la Precipitación Antecedente	142
Figura 5-37. Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado.....	143

Figura 5-38. Resultados del cálculo de la prueba DM para el 2020/10/31. a) Prueba DM 15 días de precipitación antecedente, b) Prueba DM 30 días de precipitación antecedente, c) Prueba DM 60 días de precipitación antecedente, d) Prueba DM 90 días de precipitación antecedente y e) Prueba DM 120 días de precipitación antecedente. . 144

Figura 5-39. Reclasificación de resultados de la prueba DM para la identificación de áreas de precipitación crítica del 2020/10/31. a) Reclasificación para 15 días de precipitación antecedente, b) Reclasificación para 30 días de precipitación antecedente, c) Reclasificación para 60 días de precipitación antecedente, d) Reclasificación para 90 días de precipitación antecedente y e) Reclasificación para 120 días de precipitación antecedente. 146

Figura 5-40. Identificación de áreas de precipitación crítica para el 2020/10/31. 147

Figura 5-41. Identificación espacial de zonas de riesgo para el 2020/10/31 a través del análisis del Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado y las zonas de precipitación crítica antecedente para intervalos de 15, 30, 60, 90 y 120 días. 149

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1. Definiciones de tipo de variable de precipitación detonantes de deslizamientos. (Ramos Cañon et al., 2015)	39
Tabla 3-1. Características de las imágenes CHIRPS v2.0 empleadas en esta investigación.	58
Tabla 3-2. Zonificación de la inestabilidad de laderas en Colombia (Ruiz Peña et al., 2017).....	60
Tabla 3-3. Categorías de Amenaza, Mapa Nacional de Movimientos en Masa 1:500.000 (Ruiz Peña et al., 2017).....	63
Tabla 3-4. Atributos inventario nacional de movimientos en masa.	78
Tabla 3-5. Resumen general inventario nacional de movimientos en masa.	78
Tabla 4-1. Comparación Inventario Nacional de Movimientos en Masa Original y Filtrado.	94
Tabla 4-2. Medidas de asociación entre precipitación CHIRPS v2.0 e Inventario Nacional de Movimientos en Masa (Original y Filtrado) entre 1981 y 2019.	95
Tabla 4-3. Iteraciones, subregiones y densidad de eventos del Inventario Nacional de Movimientos en Masa filtrado.	97
Tabla 4-4. Métricas de asociación para la segunda iteración, subregión 1 y 2.	101
Tabla 5-1. Concentración de eventos de deslizamientos de tierra, discriminados por departamento, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).....	105
Tabla 5-2. Concentración de eventos de deslizamientos de tierra, discriminados por municipio, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).....	106
Tabla 5-3. Coeficiente de correlación de Pearson entre los reportes de eventos mensuales de deslizamientos de tierra para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).	112
Tabla 5-4. Comportamiento anual de los reportes de familias y personas afectadas, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).	113
Tabla 5-5. Comportamiento anual de los reportes de afectación sobre viviendas e infraestructura, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).	114

Tabla 5-6. Comportamiento anual de los aportes económicos para la atención e las emergencias, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020, a precios de 2020 (UNGRD, 2022).	115
Tabla 5-7. Distribución departamental de eventos registrados en el Inventario Nacional de Movimientos en Masa filtrado para el periodo 1981 – 2019.	119
Tabla 5-8. Métricas de similaridad; Antioquia, Cauca, Boyacá y Cundinamarca.	121
Tabla 5-9. Cálculo de métricas de similaridad, entre la precipitación Vs número de eventos, por iteración y subregión.	125
Tabla 5-10. Tabla de cálculo precipitación acumulada antecedente y climatológica, pruebas de Kolmogorov- Smirnov y DM para el evento identificado con el código SIMAA 37587, en 120, 90, 60, 30 y 15 días antecedentes.	134
Tabla 5-11. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 120 días.	135
Tabla 5-12. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 90 días.	136
Tabla 5-13. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 60 días.	137
Tabla 5-14. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 30 días.	138
Tabla 5-15. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 15 días.	139
Tabla 5-16. Estadísticas de resumen para los resultados de la prueba DM para los diferentes intervalos de precipitación antecedente.	141
Tabla 5-17. Clasificación de zonas de riesgo a través del análisis del Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado y las zonas de precipitación crítica antecedente para intervalos de 15, 30, 60, 90 y 120 días.	149
Tabla 5-18. Evaluación del modelo propuesto en esta investigación con respecto a emergencias ocurridas en el territorio y atendidas por la UNGRD para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre de 2020(UNGRD, 2022).	154

Tabla 5-19. Categorías de riesgo identificadas por el modelo de riesgo propuesto, con respecto a los a emergencias ocurridas en el territorio y atendidas por la UNGRD para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre de 2020(UNGRD, 2022). 155

Tabla 5-20. Categorías de riesgo identificadas por el modelo de riesgo propuesto, discriminadas mensualmente, con respecto a las emergencias ocurridas en el territorio y atendidas por la UNGRD para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre de 2020(UNGRD, 2022). 155

Introducción

Las complejidades del territorio colombiano a nivel climatológico, ecológico, geológico, en el uso y la cobertura del suelo, aunadas a la fuerte influencia de las marcadas temporadas de precipitación y de fenómenos de variabilidad climática, tales como el fenómeno del Niño o de la Niña, hacen de este un entorno propenso a la ocurrencia de múltiples fenómenos de origen hidrometeorológico que ponen en riesgo ecosistemas, vidas humanas, infraestructura y recursos económicos.

Uno de los fenómenos que año tras año deja su marca implacable en el país y que con mayor frecuencia se presenta en el territorio nacional es el de los movimientos en masa. Son estos los causantes de complejas afectaciones sobre la infraestructura nacional, regional y local que desencadenan graves problemas de comunicación entre diferentes regiones del país, afectan centros poblados, producen la pérdida de vidas humanas y, en ocasiones, son los generadores del desplazamiento de comunidades, con el agravante que su recurrencia y frecuencia en el país es sistemática, es decir que, año tras año se repiten, generalmente en las temporadas de mayores precipitaciones, sin evidenciarse que los impactos de estos fenómenos disminuyan de manera significativa ni que se emitan las alertas tempranas suficientes y confiables que faciliten acciones preventivas en aquellas zonas que potencialmente puedan desarrollar este tipo de fenómenos. Entre 1998 y 2020, según los reportes de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD-, se han atendido 6.834 emergencias relacionadas con deslizamientos de tierra, registrado 240.454 familias afectadas, 1.875 personas fallecidas, 1.895 personas heridas, más de 124.000 viviendas afectadas, 5.522 vías, 358 puentes y 722 centros educativos con daños en su estructura y se han invertido cerca de 110.000 millones de pesos en la atención de cada una de las emergencias (UNGRD, 2022).

Múltiples estudios a nivel nacional e internacional han buscado mejorar la comprensión de estos fenómenos y los agentes generadores de los mismos. En Colombia, la mayoría de estudios coinciden que la precipitación, y su efecto acumulativo antecedente, es el detonante más recurrente y en virtud de esto los análisis planteados sugieren evaluar los valores previos de la precipitación con el fin de determinar un umbral límite a partir del cual la ocurrencia de un deslizamiento sea más probable, sin embargo, los resultados de estos estudios definen estos límites en términos absolutos (expresados en mm acumulados de precipitación) y su extrapolación a otras regiones o áreas diferentes a las zonas de estudio se hace imposible, toda vez que la dinámica cambiante de la precipitación del país impide realizar comparaciones entre regiones con características climáticas diferentes. Por ejemplo, un límite detonante de precipitación acumulada antecedente en la región del piedemonte amazónico es inaplicable en el altiplano cundiboyacense y viceversa.

En la investigación planteada en este documento, se pretende explorar una aproximación al fenómeno de la precipitación antecedente, como detonante de deslizamientos, desde una óptica diferente, partiendo de los siguientes elementos; i) el uso de sensores remotos para el cálculo de climatologías y precipitaciones antecedentes en diferentes intervalos (cuatro intervalos entre 15 y 120 días antecedentes), lo cual permite la obtención de información de precipitación a nivel nacional en celdas de 5km x 5km con cubrimiento nacional completo en intervalos de 24 horas, sin necesidad de emplear registros puntuales en campo de las estaciones meteorológicas, con una distribución espacial de la precipitación más adecuada que las clásicas interpolaciones generadas a partir de puntos de medición, ii) el uso de las funciones de distribución acumulada para determinar la variación de una precipitación antecedente frente a su climatología equivalente y la identificación de umbrales que pueden detonar este tipo de fenómenos en términos relativos y iii) la aplicación de estos umbrales sobre aquellas zonas susceptibles a deslizamientos para la generación de un mapa nacional de condiciones actualizadas a la posible ocurrencia de estos fenómenos.

A continuación se describen los objetivos de investigación, el marco teórico de referencia, los materiales y métodos empleados, los resultados y análisis de los mismos y finalmente las conclusiones y recomendaciones producto de esta investigación.

1. Objetivos

El desarrollo de esta investigación estuvo orientado por los siguientes objetivos:

1.1 Objetivo General

Diseñar e implementar una metodología para la cuantificación del riesgo de ocurrencia de deslizamientos a partir de información antecedente de precipitación, a nivel nacional, empleando información proveniente de sensores remotos que permita la emisión de alertas tempranas.

1.2 Objetivos Específicos

- Identificar la relación entre los registros de movimientos en masa y la precipitación antecedente multitemporal reportada por sensores remotos.
- Diseñar e implementar una metodología para la consulta y evaluación de la precipitación antecedente a los eventos de deslizamiento y la climatología reportada por sensores remotos satelitales que permita la identificación de las áreas de mayor riesgo.
- Conceptualizar e implementar el modelo de riesgo para fenómenos de remoción en masa a partir de la relación entre la precipitación antecedente, la climatología y la susceptibilidad del terreno a los fenómenos de remoción en masa.
- Evaluar los resultados del modelo y la bondad de ajuste a partir de información histórica de ocurrencia

2.Marco Teórico

2.1 Deslizamientos de Tierra o Fenómenos de Remoción en Masa.

En esta investigación el término Deslizamiento de Tierra es equiparable con el término Remoción en Masa, que hacen referencia a “todo movimiento ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad” (Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD, 2017). El origen de estos fenómenos puede obedecer a múltiples factores; de naturaleza geológica, climática, ambiental y/o antrópico, en interacción con el territorio, el paso a condiciones de inestabilidad puede ser disparado por cualquiera de estos factores, en donde el agua actúa como lubricante (Banco Mundial, 2012).

Dentro de estos fenómenos se reconocen siete tipos principales, que se describen a continuación.

2.1.1 Desprendimientos de Roca.

Es el movimiento de material desde una pared rígida o un acantilado. Generalmente involucra volúmenes limitados de material, mayoritariamente rocas. El material cae en masa, moviéndose libremente por acción de la gravedad. El contacto con el terreno se produce especialmente en la última parte de la trayectoria, donde el material se destroza en partes más pequeñas (de Blasio, 2011). Dentro de los mecanismos que normalmente desencadenan estos procesos se encuentra la socavación de taludes por aguas superficiales, el ciclo de congelación y descongelación, actividades humanas tales como

excavaciones durante la construcción y (o) mantenimiento de carreteras, y temblores sísmicos u otras vibraciones intensas (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.1.2 Volcamientos.

Es la rotación de una losa vertical alrededor de un punto de pivote ubicado en la base. El derribo es típico de losas verticales compactas (por lo general, pero no exclusivamente, roca) sobre terrenos blandos y no consolidados. El movimiento puede ser extremadamente lento, durante largos períodos, culminando con una caída catastrófica de la losa (de Blasio, 2011). Normalmente este tipo de deslizamientos obedece a que el material superior es impulsado por la gravedad ejercida pendiente arriba, a veces, por el agua o el hielo que se produce en las grietas; también, vibración, socavación, meteorización diferencial, excavación o erosión de arroyos (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.1.3 Deslizamientos de Traslación.

Un deslizamiento se define como el movimiento de material a lo largo de una superficie de corte. Para un deslizamiento de traslación, esta superficie es plana. La característica de la superficie de corte se conserva de alguna manera y distingue un flujo (de Blasio, 2011). Estos fenómenos pueden ser detonados, principalmente, por precipitaciones intensas, aumento de las aguas subterráneas dentro del deslizamiento debido a lluvia, deshielo, inundación u otra inundación de agua resultante de riego, o fugas de tuberías o perturbaciones relacionadas con el hombre, como socavando, también pueden ser inducidos por terremotos (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.1.4 Deslizamientos de Rotación.

En un deslizamiento de rotación, la superficie de desprendimiento es aproximadamente circular, similar a una cuchara. A diferencia de con deslizamientos de traslación, donde la superficie plana a menudo se origina a partir de una debilidad zona, la forma circular de un deslizamiento rotacional es creada por la falla misma y se deriva de la distribución geométrica del esfuerzo cortante (de Blasio, 2011). Dentro de los principales detonantes de este tipo de fenómenos tenemos las precipitaciones sostenidas e intensas, el deshielo rápido que provoca la saturación de taludes y aumento de los niveles freáticos; descensos

abruptos en los niveles de los ríos posteriores a inundaciones, aumento del nivel del agua subterránea como resultado del llenado de embalses, o cualquier acción que provoque erosión en la base de las laderas, así como los sismos (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.1.5 Flujo.

“Un flujo, en su sentido físico, se define como la deformación continua e irreversible de un material que ocurre en respuesta al estrés aplicado. Así pues, un flujo se caracteriza por un movimiento fluido, en el que se ha perdido la característica de la superficie de desprendimiento. Un deslizamiento puede evolucionar hacia un flujo si la energía y/o el agotamiento son suficientes para deshacer completamente el material” (de Blasio, 2011). Normalmente son ocasionados por un movimiento intenso de agua superficial en pendientes pronunciadas, que moviliza material a través de ella (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.1.6 Desprendimiento Lateral.

Consiste en un movimiento lateral de roca o suelo, a menudo de gran extensión. En el caso de la expansión de rocas, la velocidad suele ser lenta (de una décima de mm a 10 cm por año) y generalmente es causado por material visco plástico profundamente asentado debajo las losas rocosas. Las extensiones de suelo, como las que involucran arcillas rápidas, pueden moverse extremadamente rápido, con una velocidad en el rango de varios metros por segundo (de Blasio, 2011).

2.1.7 Complejos.

Es un nombre genérico que se utiliza cuando un deslizamiento cambia de comportamiento durante el movimiento y puede adoptar las características de cualquiera de ellos mencionados anteriormente (de Blasio, 2011). Gráficamente, los tipos de deslizamientos (2.1.1 – 2.1.6) se exhiben en la Figura 2-1.

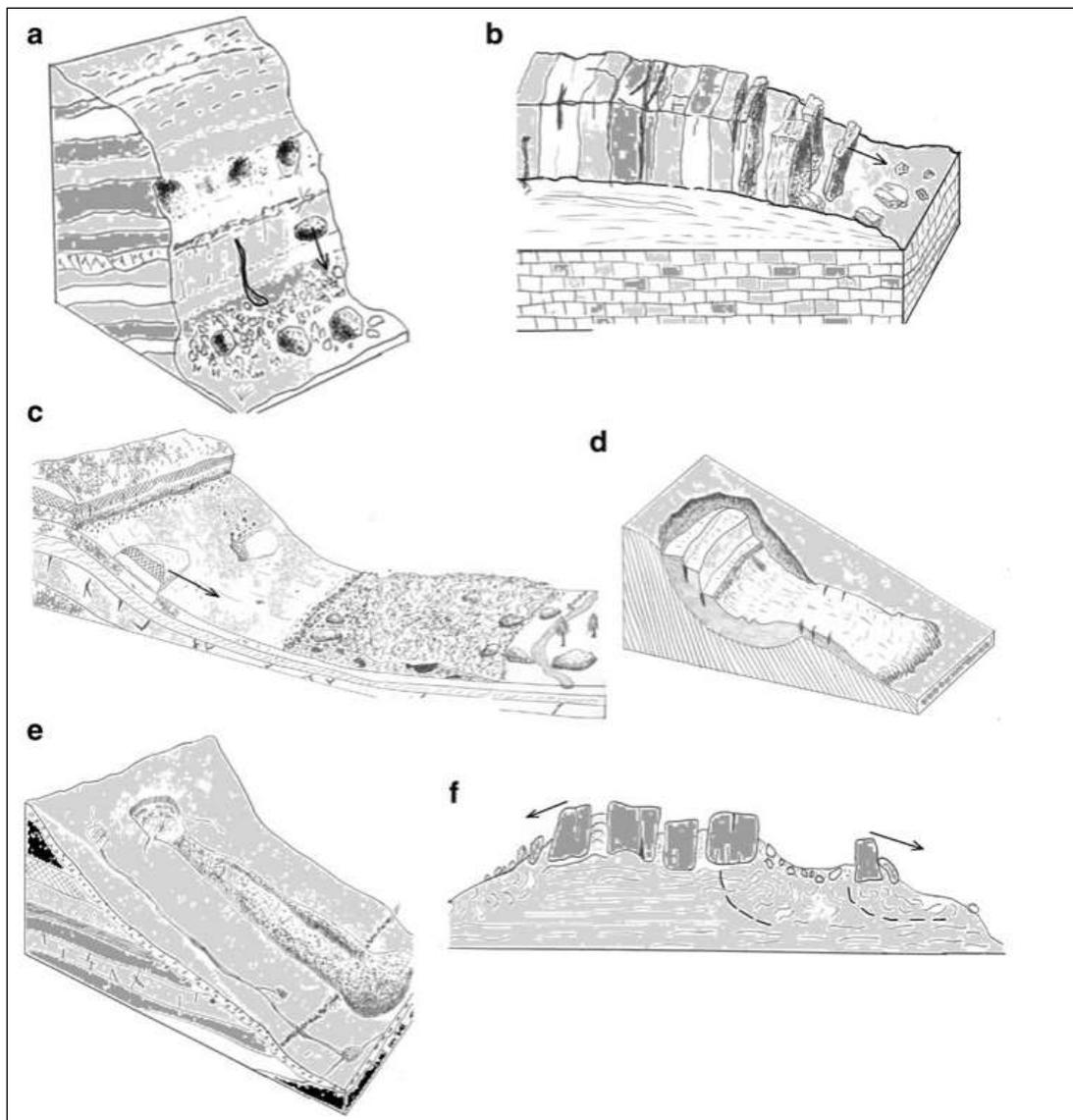


Figura 2-1. a) Desprendimientos de Roca, b) Volcamientos, c) Deslizamiento de Traslación, d) Deslizamiento de Rotación, e) Flujo y f) Desprendimiento Lateral. (de Blasio, 2011)

2.2 Factores que influyen en los Deslizamientos de Tierra o Fenómenos de Remoción en Masa.

Existen, esencialmente, dos causas que originan los deslizamientos de tierra; las naturales y las antrópicas, aunque en múltiples ocasiones estos fenómenos son el resultado de la combinación de ambos factores. Dentro de las causas naturales se identifican los siguientes factores:

2.2.1 Causas Naturales: Agua.

La saturación de agua en las pendientes es la principal causa generadora de deslizamientos, esta condición puede ocurrir por precipitaciones, deshielo, cambios en los niveles freáticos, cambios del nivel de agua superficial o por la influencia de embalses, canales y ríos. Los deslizamientos de tierra y las inundaciones están estrechamente relacionados porque su origen está asociado con la precipitación, una inundación puede causar deslizamientos de tierra erosionando márgenes de arroyos y ríos, así como por saturación de pendientes por aguas superficiales (Highland & Bobrowsky, 2008). Las precipitaciones de alta intensidad en cortos periodos, así como las prolongadas (horas o días) de intensidad moderada, frecuentemente generan deslizamientos de tierra abundantes alrededor del mundo (Rybar, 2018). En América, los ciclones tropicales y El Niño/La Niña (El Niño Southern Oscillation – ENSO) tienen fuerte incidencia como detonantes de deslizamientos a gran escala, así como regionales, por el incremento en las precipitaciones que traen consigo.

La estabilidad de las pendientes es uno de los problemas más comunes dentro de la ingeniería, muchas de las fallas de los suelos localizados en pendientes se atribuyen a la infiltración de la precipitación que incrementa la presión de los poros y/o que favorece la disminución de la succión matricial¹. La succión matricial es crucial para la estabilidad del suelo en pendientes porque su reducción conduce a una disminución en la resistencia al corte de suelos no saturados (Wu et al., 2020).

El agua aumenta la masa del suelo, si se logra infiltrar en la pendiente, y el peso unitario² aumenta con la humedad. De ahí que una cubierta que actúe como paraguas y reduzca la infiltración es recomendable, además de proteger contra la erosión de la pendiente. Otra

¹ El comportamiento de los suelos no saturados está condicionado por la succión del suelo, esta, a su vez, se compone por succión matricial y succión osmótica. La succión osmótica generalmente se ignora y la succión matricial se define como la diferencia entre la presión del aire intersticial y la presión intersticial del agua. En el campo de la ingeniería geotécnica, la presión del aire intersticial se puede considerar igual a la presión atmosférica y por lo tanto se puede ignorar. La succión matricial es necesaria para determinación de la resistencia al corte del suelo no saturado, la permeabilidad de los suelos no saturados y la tensión efectiva estado en zona no saturada (Chiorean, 2017).

² Entendiendo el peso unitario como la densidad del suelo por la gravedad. El valor depende del contenido de agua del suelo, puede variar del estado seco hasta el saturado.

causa, también atribuible al agua, son los flujos de esta dentro de la pendiente que generan fuerzas de escurrimiento en la dirección del flujo que puedan desestabilizar la pendiente al alcanzar gradientes hidráulicos muy por encima de los que puede soportar el suelo (Villalobos, 2016).

2.2.2 Causas Naturales: Actividad Sísmica.

Muchas áreas montañosas, vulnerables a los fenómenos de deslizamientos, también han experimentado tasas moderadas de actividad sísmica. La actividad sísmica en áreas propensas a deslizamientos de tierra aumenta la probabilidad de su ocurrencia debido a la sacudida del suelo, la licuefacción o a la dilatación de los materiales del suelo, favoreciendo una rápida infiltración del agua (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.2.3 Causas Naturales: Actividad Volcánica.

Los deslizamientos producidos por actividad volcánica representan uno de los más devastadores tipos de fenómenos. El calor producido consigue generar deshielo velozmente que puede formar un gran flujo de material que se acelera rápidamente en las laderas de los volcanes. El flujo de escombros puede alcanzar grandes distancias a través de los flancos y afectar estructuras en áreas alrededor de los volcanes. Las estructuras volcánicas son jóvenes y geológicamente inestables, en muchas ocasiones pueden colapsar y causar deslizamientos de rocas, suelo y avalanchas de escombros (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.2.4 Causas Antrópicas: Actividades Humanas.

Poblaciones que se expanden a nuevas tierras y crean barrios, pueblos y ciudades es el principal medio por el cual los seres humanos contribuyen a la ocurrencia de deslizamientos de tierra. Cambios en los patrones de drenaje, desestabilización de pendientes y eliminación total o parcial de la vegetación son factores comunes inducidos por el hombre que pueden originar deslizamientos de tierra. Otros ejemplos incluyen la generación de pendientes abruptas, en obras civiles, socavando el fondo y cargando la

parte superior de la misma. Sin embargo, los deslizamientos de tierra también pueden ocurrir en áreas que alguna vez fueron estables debido a otras actividades tales como: riego, riego de césped, drenaje de embalses (o creación de ellos), tuberías con fugas y excavaciones o nivelaciones inadecuadas en pendientes (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.3 Estudios Sobre Deslizamientos de Tierra en Colombia.

Los estudios para determinar la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos de tierra en Colombia se basan, principalmente, en la identificación de umbrales fijos para la precipitación antecedente a la ocurrencia de los eventos. Tradicionalmente en la literatura las cantidades límite de precipitación que deben caer sobre un área para que comiencen a evidenciarse procesos de inestabilidad se conocen como umbrales de lluvia (Londoño Linares, 2007), y son justamente estos límites de precipitación sobre los cuales se basan la mayoría de investigaciones en esta temática en el país.

Una de las investigaciones referentes en el tema fue la adelantada por Mayorga Márquez (2003), en donde a partir de la zonificación del país en regiones, pretende determinar los umbrales detonantes de deslizamientos a través de la precipitación antecedente en dos escenarios; i) los 180 días antecedentes al evento y ii) las 24 horas anteriores al evento. Para este estudio se emplearon 130 eventos registrados entre 1950 y el año 2000. Para esto, se realizó una regionalización del país a través de la definición de grupos o clústeres homogéneos de eventos sobre el territorio nacional, obteniendo cuatro grupos en donde la precipitación acumulada, precipitación anual, duración y altitud son estadísticamente similares (Figura 2-2). Este tipo de agrupación define regiones climatológica y orográficamente homogéneas así: Un primer grupo, con precipitaciones anuales cercanos a los 300 mm, el segundo grupo con precipitación anual de hasta 660 mm, el tercero con 1154 mm de precipitación anual y el cuarto con 1455 mm anuales. En estas regiones se estima, según el estudio, que la humedad en los suelos es significativa teniendo en cuenta los 70 - 80 días antecedentes al evento y define como umbral detonante de la precipitación, el día del evento, valores iguales o superiores a 18 mm/día. Es decir, se tiene en cuenta la precipitación acumulada de los últimos 70 – 80 días más aquellos valores en las 24 horas anteriores al evento que sean superiores o iguales a 18 mm, este estudio estima que

superando los 40 mm /día en las 24 horas anteriores al evento se alcanza una probabilidad de alta ocurrencia de deslizamientos. Finalmente se obtuvo una serie de curvas por región en las cuales se enfrentan los valores de precipitación antecedente acumulada y la precipitación en 24 horas, anterior al evento, en donde es posible determinar, por región, los umbrales que detonan eventos de deslizamientos (Figura 2-3).

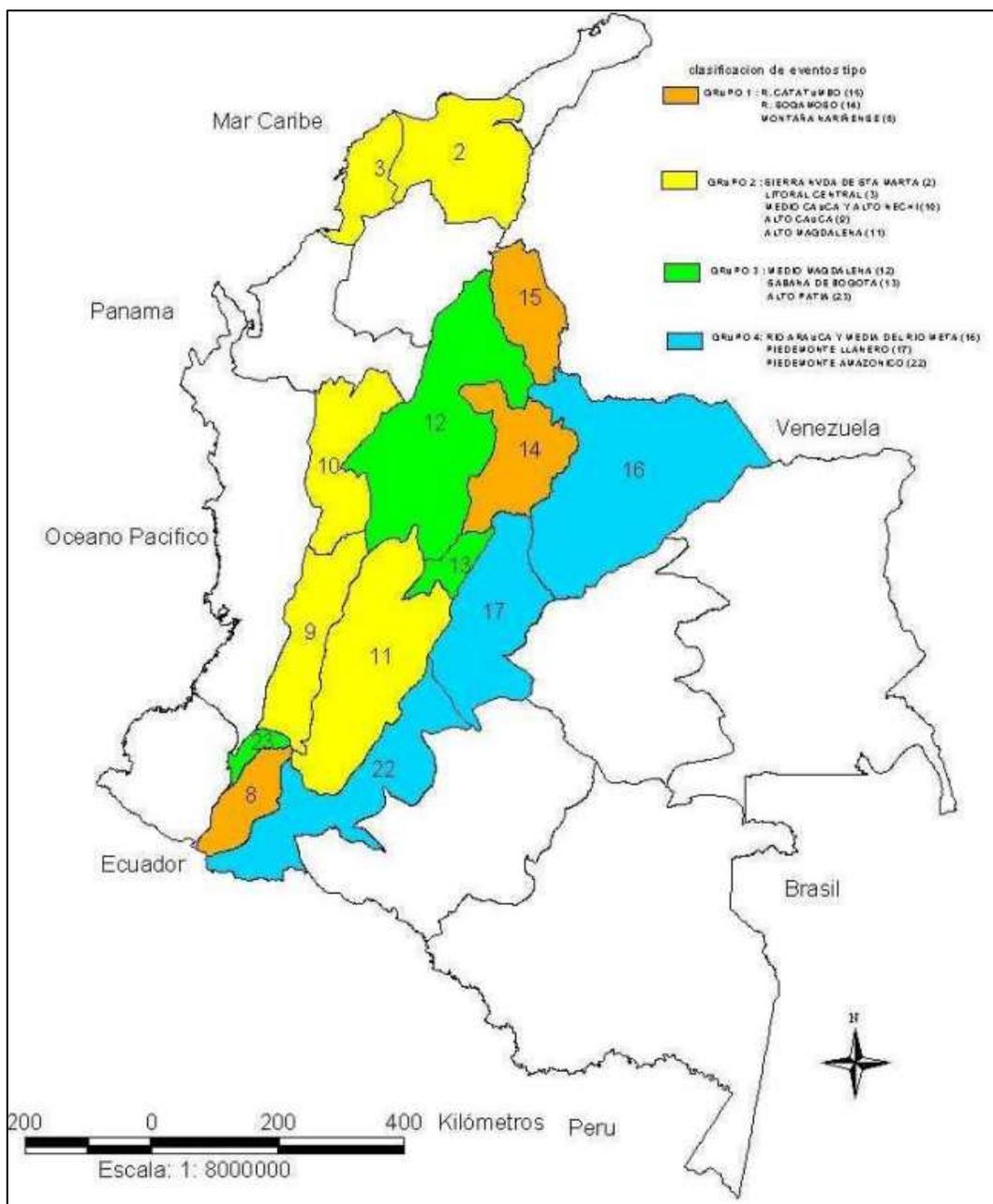


Figura 2-2. Regionalización del territorio nacional con base en los umbrales de la lluvia acumulada (Mayorga Márquez, 2003).

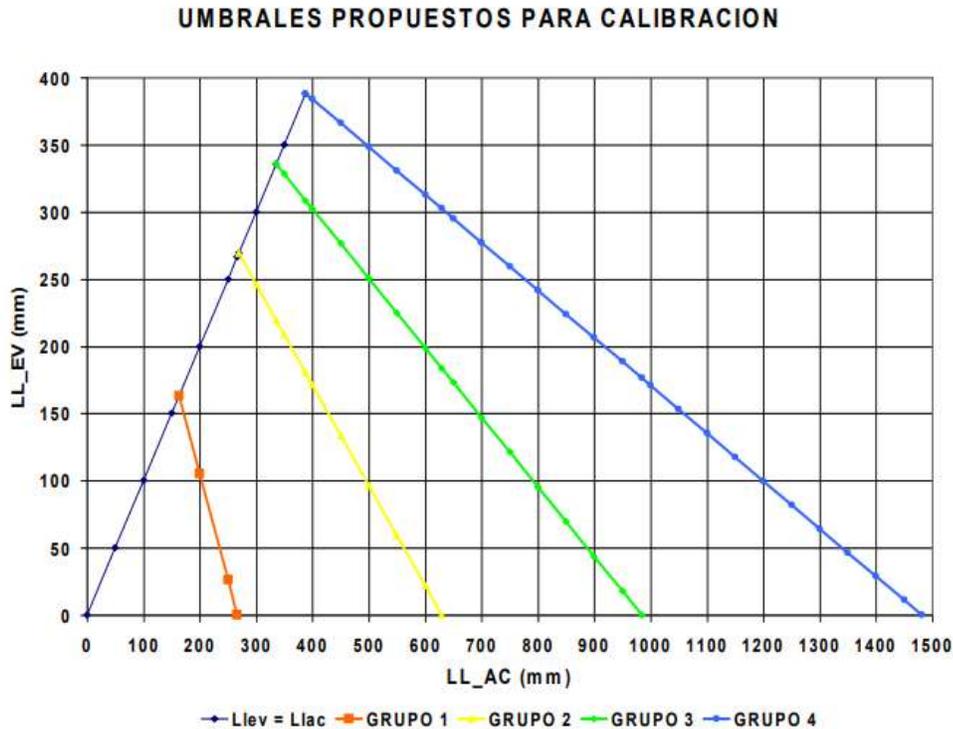


Figura 2-3. Umbrales de la lluvia detonante que caracterizan las cuatro regiones (Mayorga Márquez, 2003)

En 2011, un estudio adelantado por Aristizábal et al. (2011) buscó la determinación de umbrales empíricos de precipitación para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Antioquia – Colombia. En este estudio emplearon registros de precipitación en intervalos de alta frecuencia, 15 minutos, y acumulados de la misma en el corto plazo para 1,3,5 y 7 días y en el largo plazo para 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días, en una serie de eventos identificados para el área de interés, registrados entre 1989 y 2008, de una base de datos proporcionada por la Autoridad Ambiental del Valle de Aburrá en donde se seleccionaron registros que cumplieran las siguientes condiciones; i) eventos detonados por precipitación, ii) eventos georreferenciados y iii) eventos con fecha de su ocurrencia. Finalmente se obtuvieron 408 registros que cumplen con la selección de criterios. Como series de precipitación se emplearon las de la red hidrometeorológica de las Empresas Públicas de Medellín, con información de 15 estaciones con resolución temporal de 15 minutos. Inicialmente se estableció la relación entre la precipitación antecedente de 1 día, con respecto a los acumulados de los 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días acumulados para cada evento, con el fin de determinar la relación entre la precipitación antecedente de un día y

la acumulada de diferentes periodos (Figura 2-4). El proceso se repitió para 3, 5 y 7 días antecedentes contra el mismo número de rezago de días acumulados.

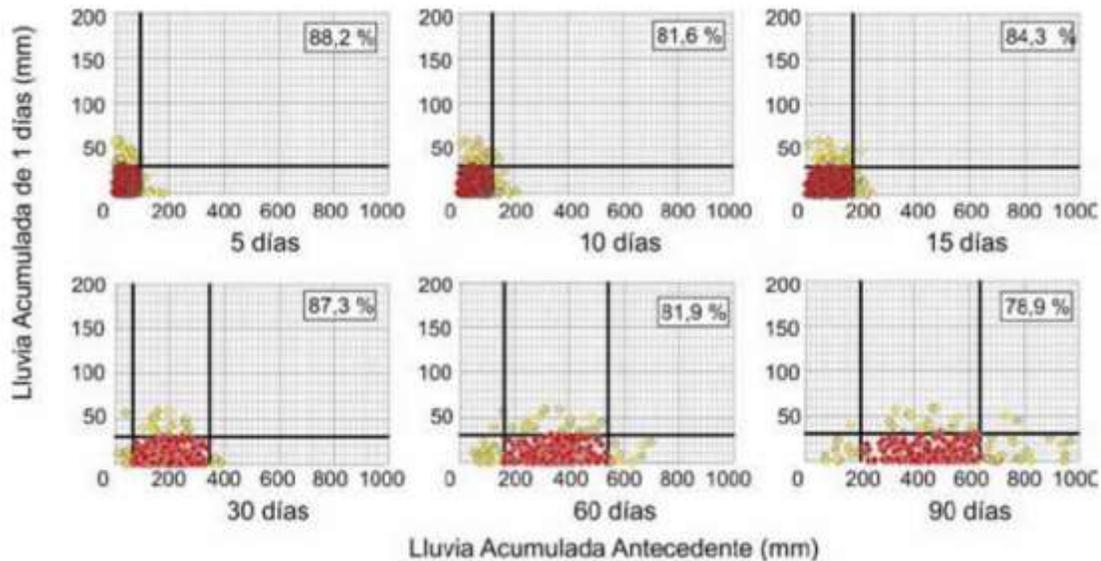


Figura 2-4. Lluvia Acumulada de 1 día contra Lluvia Acumulada Antecedente de 5, 10, 15, 30, 60 y 90 días a la Lluvia Acumulada de 1 día. Las líneas oscuras representan los umbrales máximos y mínimos de lluvia ajustados visualmente, a partir de los cuales se presenta el mayor número de movimientos en masa o hasta el cual ya se han presentado la mayor parte de movimientos en masa (puntos rojos). En el cuadro superior derecho se presenta el porcentaje con respecto al número total de movimientos en masa que se encuentran dentro del umbral. (Aristizábal et al., 2011)

Dentro de esta investigación se concluye que el mayor condicionante para la ocurrencia de movimientos en el área de estudio es la lluvia acumulada antecedente. Los datos indican que los movimientos en masa estudiados ocurrieron para precipitaciones antecedentes acumuladas superiores a los 60 mm en 30 días, 160 mm en 60 días y 200 mm en 90 días.

En el año 2010, en una investigación adelantada por Martínez Ardila et al. (2010), se evaluó la relación de los deslizamientos y la dinámica climática en Colombia, especialmente de la precipitación como detonante de estos eventos. Para este análisis se emplearon los registros de precipitación e inventario de eventos de deslizamientos provenientes del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- para el periodo 1978 – 2007. Cada evento del inventario de movimientos en masa fue catalogado conforme una escala de intensidad propuesta, bajo los siguientes criterios:

INTENSIDAD	CARACTERÍSTICAS
I	- Pérdida local de suelos no agrícolas o de terrenos estériles
II	- Pérdida local de suelos agrícolas o de terrenos de importancia económica o ecológica
III	- Pérdida de cultivos o de terrenos de importancia económica - Daños locales a infraestructuras civiles - Averías menores en vivienda (agrietamientos)
IV	- Destrucción parcial de pequeñas zonas urbanas - Destrucción de instalaciones de tipo social o industrial - Pérdida de grandes extensiones de suelos agrícolas y cultivos - Pérdida de animales domésticos
V	- Pérdida de vidas humanas - Destrucción de viviendas o infraestructuras civiles
VI	- Grandes pérdidas de vidas humanas - Destrucción de grandes zonas urbanas (barrios, pueblos, veredas) - Grandes pérdidas económicas

Figura 2-5. Tabla de escala de calificación de la intensidad de un movimiento en masa. (Martínez Ardila et al., 2010)

El análisis se centra en la distribución de eventos de remoción en masa en función de criterios espaciales (departamento / municipio) y en términos temporales (décadas y mensuales). El análisis de la información de los deslizamientos estudiados en Colombia les permitió concluir que existe una fuerte relación entre la climatología de la precipitación y los deslizamientos, acrecentada durante la presencia de fenómenos de variabilidad climática de gran escala, como el fenómeno El Niño o La Niña. De acuerdo con los resultados encontrados, los departamentos más con mayor frecuencia de deslizamientos, relacionados con las lluvias, son Antioquia, Valle del Cauca, Caldas, Cauca, Santander, Norte de Santander y Cundinamarca (Figura 2-6).

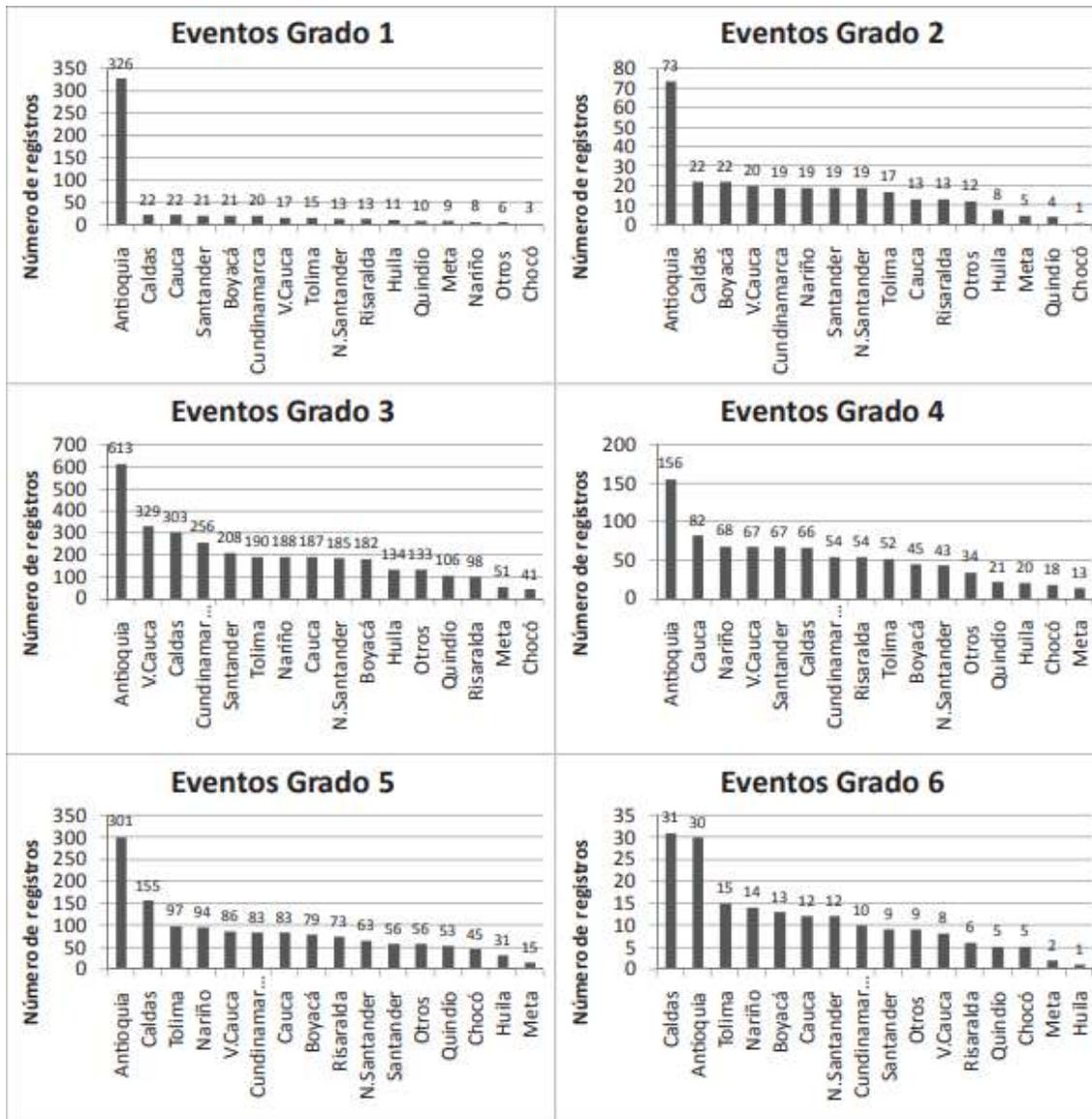


Figura 2-6. Distribución departamental de los deslizamientos registrados por grados de intensidad, para el periodo 1978 - 2007.(Martínez Ardila et al., 2010)

De igual manera, la investigación demostró la relación entre el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical -ZCIT- a lo largo del año y la ocurrencia de deslizamientos. Por ejemplo, los deslizamientos en el sur del país son mas frecuentes en los meses de diciembre y febrero, cuando la ZCIT se encuentra al sur del país y en la medida que sube, entre los meses de abril y mayo la frecuencia de deslizamientos aumenta en la región andina y centro del país y así sucesivamente hasta su retorno nuevamente hacia el sur (Figura 2-7).

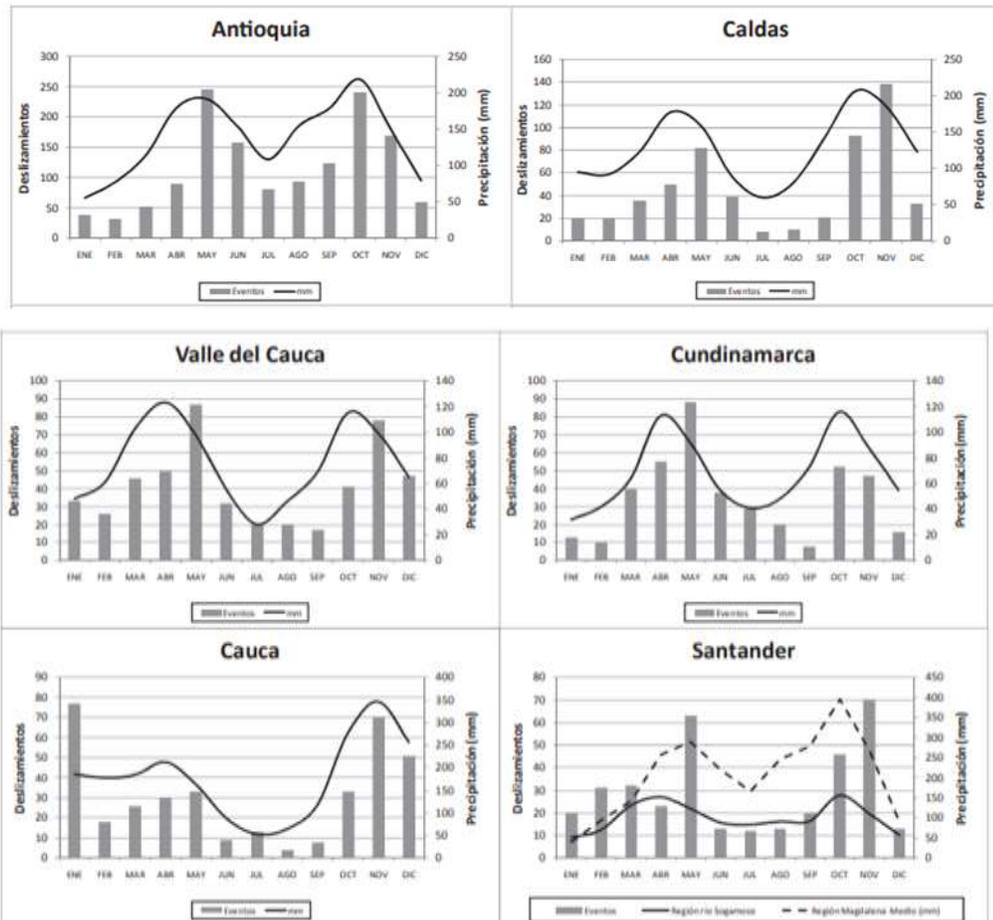


Figura 2-7. Relación entre la precipitación y la ocurrencia de deslizamientos en los seis departamentos con mayor número de registros, para el período 1978-2007 (Martínez Ardila et al., 2010)

En general, esta investigación destaca la fuerte relación existente entre la precipitación y los eventos de deslizamientos, así como su relación con eventos de variabilidad climática.

En 2015, un grupo de investigadores de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá (Ramos Cañón et al., 2015) presentan una recopilación de parámetros relacionados con precipitación que han sido usados en investigaciones para establecer umbrales de lluvia que pueden generar deslizamientos. Analizan los tipos de umbrales propuestos y exhiben las ventajas y dificultades para ser usados como la base sobre un sistema de alertas tempranas de deslizamientos generados por lluvias. Produjeron un listado de 244 funciones que relacionan lluvia y deslizamientos, reportadas por 60 autores alrededor del mundo (Figura 2-8), en donde adicionalmente se incorporó la clasificación climática de Köppen del conjunto de datos empleados en cada estudio.

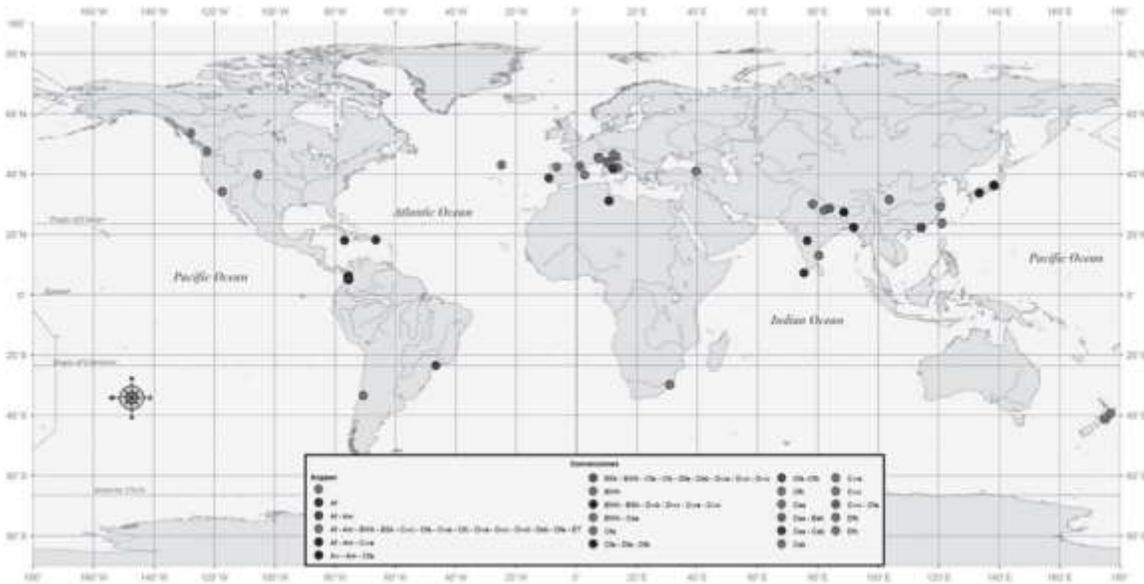


Figura 2-8. Ubicación y clasificación de los umbrales de lluvia recopilados de la literatura en función de la escala climática de Köppen. (Ramos Cañon et al., 2015)

Finalmente fueron tabuladas 32 variables derivadas de precipitación relacionadas con deslizamientos, así:

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
A_d	Lluvia antecedente: lluvia total acumulada medida antes del deslizamiento en un periodo determinado en días.	[mm]
C	Lluvia crítica: cantidad total de lluvia desde el momento de un claro aumento de la intensidad de lluvia para el momento de la activación del primer deslizamiento.	[mm]
E	Evento de lluvia acumulada: lluvia total medida desde el inicio de la precipitación hasta el momento de la falla.	[mm]
R	Lluvia diaria: cantidad total de lluvia para el día del evento de deslizamiento.	[mm]
A_dD	Lluvia antecedente [A_d] - duración de la lluvia [D].	[mm]- [h o d]
A_dN_{30}	Lluvia antecedente [A_d] - número de días de lluvia dentro de los 30 días en cuestión [N_{30}].	[mm]- [d]

$A_d P_{1d}$	<i>Lluvia antecedente [A_d]: precipitación del día precedente y cantidad total de lluvia registrada en día anterior al deslizamiento [P_{1d}].</i>	<i>[mm]- [mm]</i>
$A_d R$	<i>Lluvia antecedente [A_d] - lluvia diaria [R].</i>	<i>[mm]- [mm]</i>
C_{MAPD}	<i>Lluvia normalizada crítica: división de la lluvia crítica [C] entre la precipitación media anual [$C_{MAP} = C/MAP$] - duración de la lluvia [D].</i>	<i>[-] - [h o d]</i>
$DNSR$	<i>Duración de la lluvia [D] - precipitación de tormenta normalizada. Cantidad de eventos de lluvia dividida entre la precipitación media anual [$NSR = NS/MAP$].</i>	<i>[h] - [1/mm]</i>
EA_{30d}	<i>Evento de lluvia acumulativa [E] - lluvia antecedente de 30 días [A_{30d}].</i>	<i>[mm] - [mm]</i>
ED	<i>Evento de lluvia acumulativa [E] - duración de lluvia [D].</i>	<i>[mm] - [h o d]</i>
E_{MAP}	<i>Evento de lluvia acumulativa normalizada. Evento de lluvia acumulada dividida entre la precipitación media anual [$E_{MAP} = E/MAP$].</i>	<i>[-]</i>
E_{MAPD}	<i>Evento de lluvia acumulativa normalizada [E_{MAP}] - duración de la lluvia [D].</i>	<i>[-] - [h o d]</i>
E_{MAPI}	<i>Evento de lluvia acumulativa normalizada [E_{MAP}] - intensidad de la lluvia [I].</i>	<i>[-] - [mm/h]</i>
EP_{1d}	<i>Evento de lluvia acumulativa [E] - precipitación del día precedente. Cantidad total de lluvia registrada en día anterior al deslizamiento [P_{1d}].</i>	<i>[mm] - [mm]</i>
ID	<i>Intensidad de lluvia: división de la intensidad de lluvia [I] entre la precipitación media anual [$I_{MAP} = I/MAP$] - duración de la lluvia [D].</i>	<i>[mm/h] - [h o d]</i>
IE	<i>Intensidad de lluvia [I] - evento de lluvia acumulativa [E].</i>	<i>[mm/h] - [mm]</i>
$I_{MAP} - C_{MAP}$	<i>Intensidad de lluvia normalizada [I_{MAP}] - lluvia crítica normalizada [C_{MAP}].</i>	<i>[1/h] - [-]</i>
I_{MAPD}	<i>Intensidad de lluvia normalizada: división de la intensidad de lluvia entre la precipitación media anual [$I_{MAP} = I/MAP$] - duración de la lluvia [D].</i>	<i>[1/h] - [h o d]</i>

INSR	<i>Intensidad de la lluvia [I] - precipitación de tormenta normalizada. Cantidad de eventos de lluvia dividida entre la precipitación media anual [NSR=NS/MAP].</i>	[mm/h] – [1/mm]
RDN	<i>Días lluviosos normales: relación entre la precipitación media anual y el número medio de días de lluvia en un año [RDN=MAP/N₃₆₅].</i>	[mm/h]
IRDND	<i>Intensidad de lluvia normalizada: división de la intensidad de lluvia [I] entre el número de días lluviosos normales [IRDND=I/RDN]- duración de la lluvia [D].</i>	[mm/h] - [h o d]
L _{CF} ER	<i>Frecuencia acumulada de ocurrencia de deslizamientos: representa la probabilidad acumulada de distintos niveles de actividad de deslizamientos durante un evento de lluvia R [L_{CF}] - Evento de lluvia acumulativa [E] - Lluvia Diaria [R].</i>	[%] – [mm] – [mm]
L _{CF} R	<i>Frecuencia acumulada de ocurrencia de deslizamientos. [L_{CF}] - Lluvia diaria [R].</i>	[%] – [mm]
MA _D EA _d	<i>Valor de discriminación para grandes eventos: una función discriminante para clasificar los eventos de lluvia que activan 10 deslizamientos o más [MA_D] - evento de lluvia acumulativa [E] - lluvia antecedente [A_d].</i>	
MI _D EA _d	<i>Valor de discriminación de evento menor: una función discriminante para clasificar los eventos de lluvia que activan menos de 10 deslizamientos [MI_D] - evento de lluvia acumulativa [E] - lluvia antecedente [A_d].</i>	
L _N E	<i>Número de deslizamientos [L_N] - evento de lluvia acumulativa [E].</i>	[-] – [mm]
L _P RA _d	<i>Probabilidad de ocurrencia de deslizamiento: probabilidad de ocurrencia de deslizamientos dada todas las combinaciones posibles de lluvia diaria [L_P] - lluvia diaria [R] - lluvia antecedente [A_d].</i>	[%]
F _P REA _d	<i>Probabilidad de ocurrencia de falla: probabilidad de falla de un talud en función de un conjunto variables independientes conservadas en el modelo de regresión logística [F_P] - Lluvia diaria [R] - evento de lluvia acumulativa [E]- lluvia antecedente [A_d].</i>	

R_0A_6	<i>Precipitación intradía: precipitación total del día en que se produjo el deslizamiento [R0] - precipitación efectiva antecedente de 6 días antes del deslizamiento [A6d].</i>	$[mm] - [mm]$
RA_dRM_{n0}	<i>Lluvia diaria [R] - lluvia antecedente [A_d] – precipitación regional máxima el día n antes del día de deslizamiento [RM_{n0}].</i>	
$RA_{25}SL$	<i>Lluvia diaria [R] - lluvia antecedente de 25 días del deslizamiento [A₂₅] - nivel de nevadas. Cantidad de precipitación de pequeños cristales de hielo [SL]</i>	$[mm] - [mm] - [mm]$
RI_{RE}	<i>Índice numérico de riesgo por precipitación. Mide la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos [RIR] - Evento de lluvia acumulativa [E]</i>	$[mm] - [mm]$

Tabla 2-1. Definiciones de tipo de variable de precipitación detonantes de deslizamientos. (Ramos Cañon et al., 2015)

Ninguna de las métricas expuestas en la tabla anterior hace referencia al comportamiento de la precipitación acumulada con respecto a su comportamiento climatológico, ni estima la desviación de la precipitación actual con respecto a la climatología. Adicionalmente, esta investigación propone un nivel de escala geográfica que hace referencia a la aplicación de las variables descritas en la Tabla 2-1, así:

Escala	Área
Local	< 1.000 km ²
Regional	1.000 km ² < a < 100.000 km ²
Subcontinental	100.000 km ² < a < 1'000.000 km ²
Continental	1'000.000 km ² < a < 10'000.000 km ²
Global	> 10'000.000 km ²

Figura 2-9. Clasificación de escala de umbrales según el área de estudio. (Ramos Cañon et al., 2015)

El estudio muestra las estadísticas de uso de los distintos umbrales y escalas de trabajo dentro de todas las investigaciones analizadas, así, se obtiene que la relación intensidad-duración (ID) con un 35,2 % de la base de datos analizadas es el umbral de lluvia más frecuentemente empleado, seguido por la lluvia acumulada para varios días (E) con un 9.8%, que resulta ser un parámetro conveniente cuando los pluviómetros no tienen definición a escala horaria ni sub-horaria como para utilizar el parámetro de intensidad-

duración. El total de los umbrales se muestra en la Figura 2-10. En términos de escala espacial, los estudios de tipo local representan el 63% del total de las investigaciones evaluadas, seguidos por regional (16%) y continental (14%), Figura 2-11.

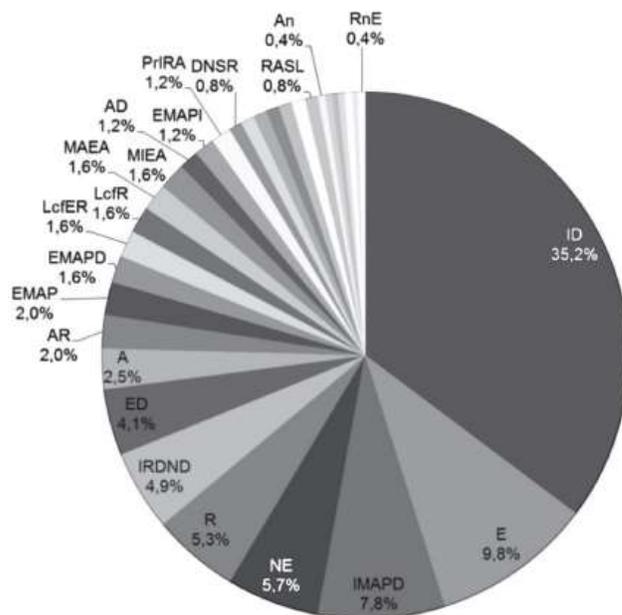


Figura 2-10. Estadísticas de la sistematización de la base de datos de los artículos por tipos umbrales de lluvia. (Ramos Cañon et al., 2015)

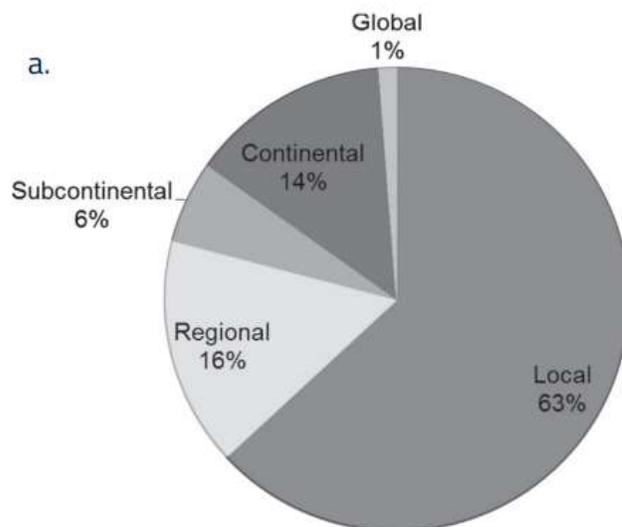


Figura 2-11. Escala espacial de aplicabilidad de umbrales. (Ramos Cañon et al., 2015)

El estudio sugiere que los umbrales deben ser generados en mejor medida para escalas locales, teniendo en cuenta las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de la zona.

Aristizábal y Sánchez (2020) muestran un análisis de los patrones espaciales, temporales y los impactos socioeconómicos de los deslizamientos de tierra en Colombia entre 1900 y 2018, empleando como insumo principal registros históricos de las bases de datos de DesInventar, producida por la corporación OSSO a mediados de los 90's y el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), producido por INGEOMINAS actual servicio Geológico Colombiano. En total, consolidaron 30730 deslizamientos para el periodo de análisis. A nivel nacional, conforme los resultados obtenidos, la región Andina concentra el 93% del total de los eventos reportados, con una densidad media de 0.11 eventos / Km², la región Caribe y Pacífica concentran el 5% y la Amazonía y Orinoquía el 2%. En términos de densidad poblacional, este estudio demuestra que existe una correlación lineal positiva entre dicha variable y le número de eventos registrados en las más importantes ciudades en Colombia, en general, las ciudades de la región Andina tienen una mayor densidad de deslizamientos de tierra que las demás regiones (Figura 2-12).

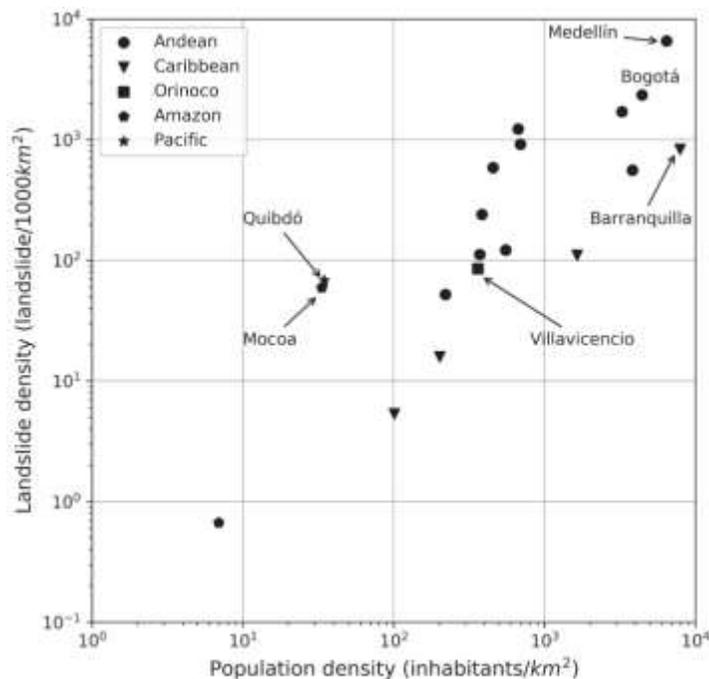


Figura 2-12. Densidad de eventos de deslizamientos versus densidad poblacional por ciudad y región (Aristizábal & Sánchez, 2020)

En la Figura 2-13 se observa el comportamiento mensual de los deslizamientos por región en un ciclo anual típico, empleando la climatología 1980 – 2010 IDEAM. Predominan los patrones de comportamiento unimodales y bimodales de la precipitación y los deslizamientos, la región Andina y Pacífica son las dos regiones con comportamiento bimodal, mientras que las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonía exhiben un comportamiento unimodal. Destaca que en los patrones unimodales los picos de deslizamientos se desfasan entre uno y dos meses con respecto a los picos de las precipitaciones.

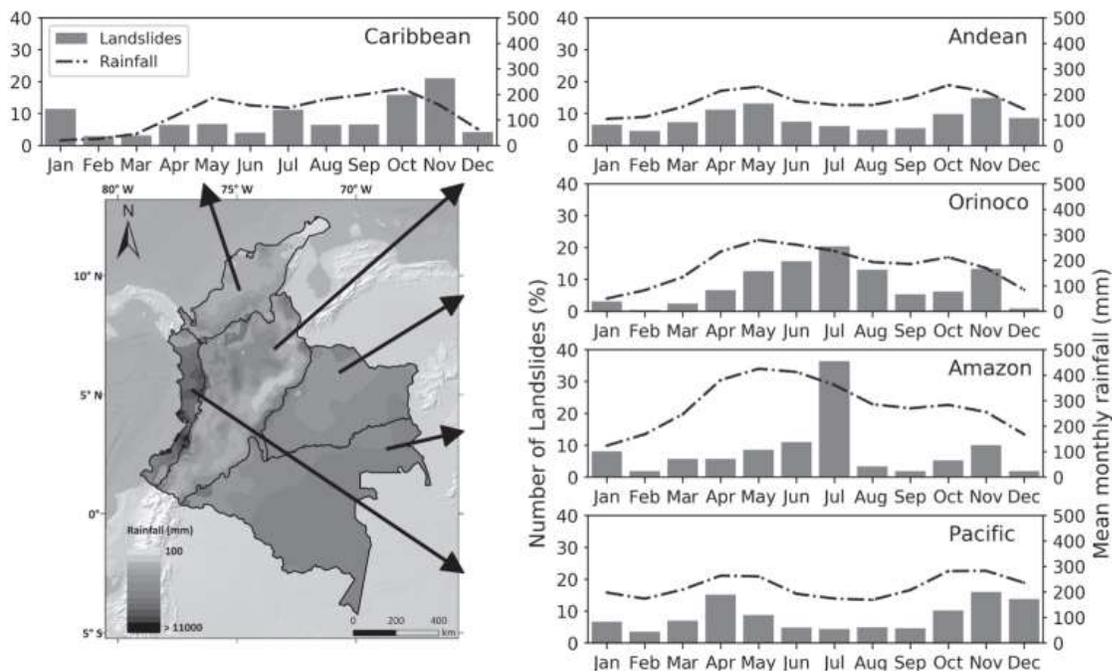


Figura 2-13. Distribución espacial de la precipitación media anual en Colombia 1980 -2010 (climatología) y la distribución mensual de los deslizamientos por región. (Aristizábal & Sánchez, 2020)

Dentro de los mecanismos detonantes de los eventos destaca la precipitación como el agente generador del 87% de los eventos, seguido por la actividad humana (10%) y los sismos el 0.6%, aunque reconocen los autores que la ocurrencia de estos fenómenos obedece a un efecto domino producto de múltiples agentes detonantes.

En el marco de los impactos, el estudio destaca los cinco eventos de mayor repercusión, expresados en términos de fatalidades (Figura 2-14). La avalancha de Armero, en el año de 1985, es de lejos, el evento que mayor número de fatalidades a la fecha en Colombia.

Date	Location	Fatalities	Economic losses (USD)	Trigger	Type
13 November 1985	Armero (Tolima)	23,000	246,056,338	Volcanic activity	Debris flow (lahars)
6 June 1994	Páez (Cauca)	1,100	150,152,358	Earthquake	Debris flow
27 September 1987	Medellín (Antioquia)	500	–	Human activity	Complex slide-mud flow
9 January 1936	Ospina (Nariño)	300	–	Earthquake	Debris flow
20 January 1974	Guayabetal (Cundinamarca)	300	–	Human activity	Debris flow

Figura 2-14. Cinco eventos de deslizamientos con mayor número de fatalidades en Colombia (Aristizábal & Sánchez, 2020).

La investigación da cuenta de un total de 31149 fatalidades entre 1900 y 2018, con pérdidas económicas estimadas de USD 654 millones, concentrados principalmente en las regiones montañosas y más densamente pobladas de Colombia. Mas adelante, en los resultados presentados en este documento, se desarrolla un análisis similar orientado a la evaluación de los registros de atención a emergencias reportados por la UNGRD.

Aristizábal et al (2022), en una nueva investigación, se plantean evaluar series históricas de precipitación para identificar la relación entre ocurrencia de movimientos en masa y la lluvia antecedente como factor detonante, tomando como referencia los 90 días anteriores a partir de la ocurrencia del hecho, con el objetivo de establecer umbrales para la base de un Sistema de Alertas Tempranas. Para esto se basan en registros de información de ocurrencia de eventos de deslizamientos del SIMMA y DesInventar y como fuente de precipitación los archivos de precipitación de CHIRPS diarios en resolución espacial de 25Km². Especialmente, este análisis se centra en el piedemonte Amazónico entre el periodo de 1990 y 2015 (Figura 2-15), en total se obtuvieron 100 registros para el área de interés.

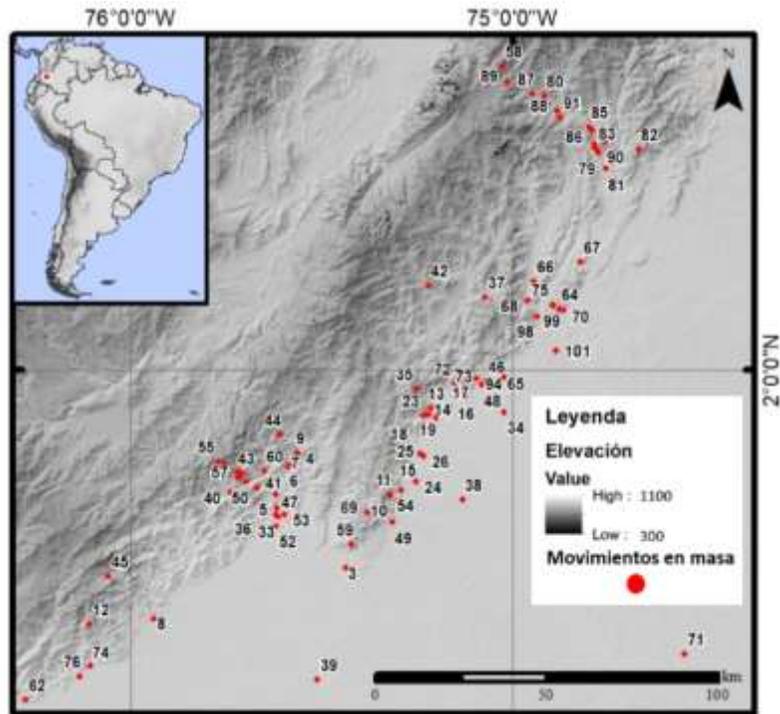


Figura 2-15. Ubicación área de interés y distribución geográfica de los movimientos en masa históricos (Aristizábal et al., 2022)

A partir de la información recolectada, los investigadores se plantearon la construcción de dos gráficas; la primera denominada Lluvia Antecedente acumulada Detonante (AD) y la segunda Lluvia acumulada Antecedente Histórica (AH). La AD se construye teniendo como punto de origen el día del evento y acumulando la precipitación 90 días calendario hacia atrás (Figura 2-16), mientras que la AH se construye acumulando la precipitación en grupos de 90 días para todos los días anteriores a la ocurrencia del movimiento en masa (Figura 2-17).

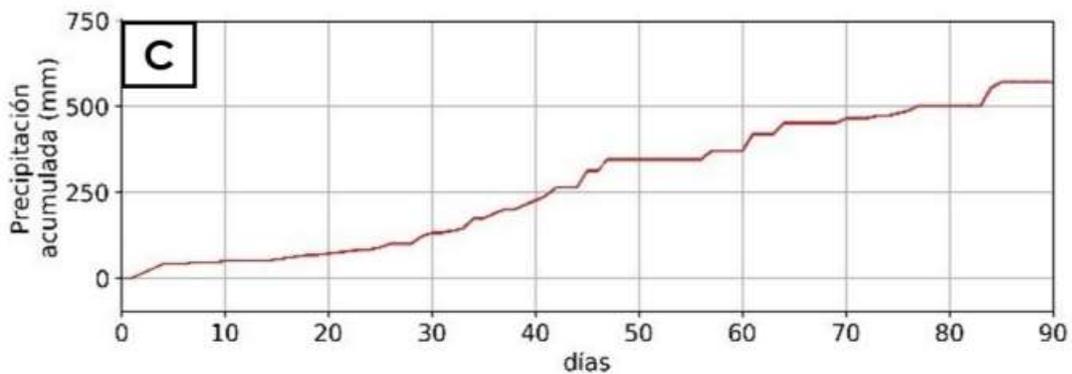


Figura 2-16. Curvas de precipitación antecedente 90 días (Aristizábal et al., 2022)

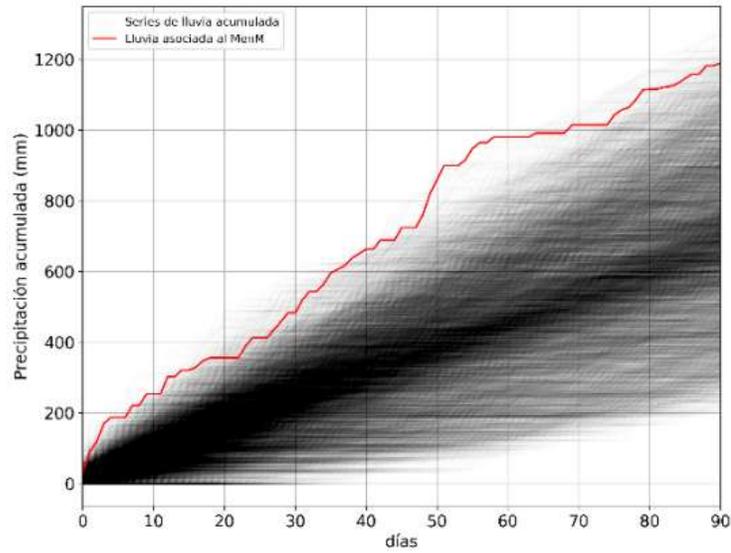


Figura 2-17. Representación gráfica de la serie de lluvia acumulada detonante (mm) por día a partir del día de ocurrencia del evento hasta los 90 días anteriores a este (AD color rojo) y de las series de 90 días históricas(AH color negro) (Aristizábal et al., 2022)

Los investigadores intentaron establecer la relación de las curvas AD y AH, inicialmente esperando que la precipitación AD esté por encima del promedio AH, sin embargo, observaron deslizamientos que muestran comportamiento contrario, evidenciando que las condiciones de lluvia antecedente no fueron extraordinarias en algunos eventos. A partir de esto, calcularon el porcentaje de las curvas AD que cumplen con el criterio de superar en un porcentaje x las series AH. La Figura 2-18 presenta tres ejemplos de la relación que tienen la serie de lluvia acumulada antecedente al evento y sus registros de precipitación histórica. La curva tiene un área bajo ella (AUC) mayor a medida que la proporción de series de lluvia AH se acerca a 1, es decir, cuantas más series de lluvia AH son superadas en un número determinado de veces por la serie acumulada de lluvia AD mayor será el AUC. Por tanto, mayor será la tendencia de las condiciones de precipitación antecedente histórica a verse superadas por las condiciones de lluvia acumulada detonante de los movimientos en masa. Valores de AUC cercanos a 1 significan condiciones de lluvia extremas comparadas con las condiciones históricas.

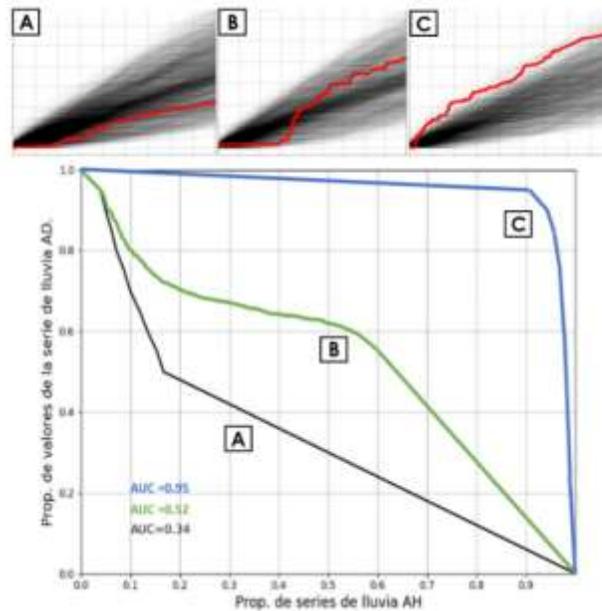


Figura 2-18. Ejemplos de comportamientos de las curvas AD y AH, así como la relación entre la cantidad de valores de la serie de AD y la cantidad de series de AH que son menores a la serie detonante(Aristizábal et al., 2022).

Así las cosas, los resultados para los registros de deslizamientos estudiados indican que; 40% de los eventos $> AUC 50\%$, el 8% $AUC > 90\%$, y el 17% de los casos está en un rango $60\% < AUC < 90\%$. Basados en esos resultados, plantearon unos posibles umbrales para la generación de alertas tempranas (Figura 2-19), así; Nivel crítico para precipitaciones acumuladas superiores a 1000 mm en los últimos 90 días y Nivel Medio para precipitaciones antecedentes entre 500 mm y 1000 mm. Este estudio, finalmente, establece umbrales fijos, expresados en mm, para la posible ocurrencia de deslizamientos a partir de la precipitación antecedente de 90 días en el piedemonte Amazónico.

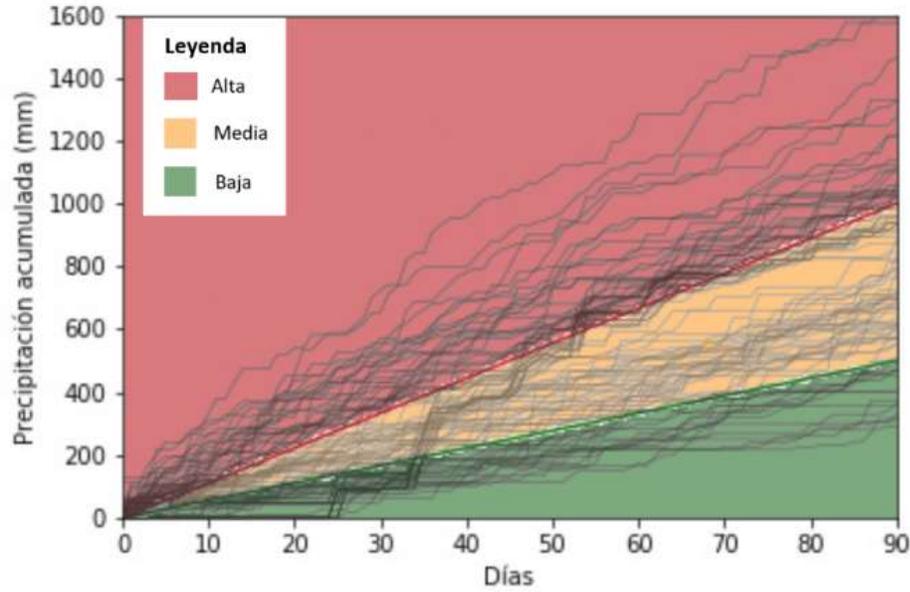


Figura 2-19. Propuesta de umbrales con alerta alta, media y baja a partir de las curvas con $AUC > 0.5$ (Aristizábal et al., 2022)

Finalmente, algunas investigaciones incorporan la precipitación como factor detonante dentro de modelos de mayor complejidad, como el caso de modelos físicos e hidrológicos. Aristizábal et al. (2017), evalúan la influencia de la lluvia antecedente y conductividad hidráulica de los deslizamientos detonados por lluvias utilizando el modelo SHIA_Landslide (Simulación Hidrológica Abierta para deslizamientos detonados por lluvia). Ese mismo año, Peña-Rincón (2017) aborda el problema de estabilidad de taludes, mediante la utilización de un modelo basado físicamente con la ecuación diferencial parcial HSB (Hillslope-Storage Boussinesq) utilizada para evaluar deslizamientos superficiales, tomando información de parámetros geotécnicos, perfil de la ladera y precipitación. Para finalizar, Marín et al. (2019) presentan una metodología que determina umbrales de intensidad y duración de lluvia para la predicción de deslizamientos superficiales, utilizando el modelo físico distribuido TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability análisis).

2.4 Gestión del Riesgo de Desastres, Marco Legal en Colombia.

La ley 1523 de 2012 es el marco legal vigente sobre la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia. Su adopción se da inmediatamente después al impacto del fenómeno de La Niña 2010 – 2011 sobre el territorio nacional, que dejó en evidencia las dificultades del Estado en articular acciones para prever y atender emergencias a gran escala, derivadas, en este caso, por fenómenos de origen natural. A continuación, se expone un breve recorrido por los desarrollos normativos más representativos para la gestión del riesgo de desastres en el país.

La ley 9 de 1979, también conocida como el código sanitario, es una de las primeras referencias legales en la cual se expone, de manera explícita, el concepto de desastres. El título VIII desarrolla este concepto, teniendo como objetivo, entre otros, “tomar las medidas necesarias para prevenir, si fuere posible los desastres o para atenuar sus efectos” (Ley 9 de 1979, 1979). Para esto, se establecen dos instancias encargadas de la gestión de emergencias; i) Comité Nacional de Emergencias y ii) Comités Locales de Emergencias, a nivel departamental, de intendencias, comisarías y municipios (conforme la división administrativa vigente en el país para la fecha), quienes se encargarían de la coordinación de acciones en situaciones de emergencia, siendo el Comité Nacional la máxima autoridad en materia de gestión de riesgos del país. Adicionalmente, insta a las entidades públicas y privadas encargadas de la prestación de servicios públicos a realizar un análisis de vulnerabilidad de la infraestructura destinada para la prestación del servicio, a tomar las medidas de protección aplicables resultado de dicho análisis y al establecimiento de sistemas para el diagnóstico y prevención de riesgos originados por desastres. Esta ley da las bases para el establecimiento de un Sistema Nacional para la Gestión y Prevención de Desastres, que fue reglamentado solo hasta el año de 1988 a través de la Ley 46 y en 1989 a través del Decreto Ley 919.

La Ley 46 de 1988 define los objetivos del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, adopta la definición legal de desastre “como el daño grave o la alteración grave de las condiciones normales de vida en un área geográfica determinada, causadas por fenómenos naturales y por efectos catastróficos de la acción del hombre en forma

accidental, que requiera por ello de la especial atención de los organismos del Estado y de otras entidades de carácter humanitario o de servicio social” (Ley 46 de 1988, 1988) y establece la obligatoriedad de la formulación de un Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, entre otros temas. Para este fin, otorga facultades extraordinarias al presidente de la república para que en un plazo de seis meses dicte normas, entre otros, sobre el régimen de organización y funciones la Oficina Nacional para la Atención de Desastres, del Comité Nacional, de los Comités Regionales y Locales para la Prevención y Atención de Desastres.

El decreto Ley 919 de 1989 finalmente organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres con el objetivo de “garantizar un manejo oportuno y eficiente de todos los recursos humanos, técnicos, administrativos, y económicos que sean indispensables para la prevención y atención de las situaciones de desastre o calamidad” (Decreto Ley 919 de 1989, 1989), establece los integrantes del sistema y sus funciones, define la obligatoriedad de adopción de un Plan Nacional para la Atención y Prevención de Desastres a cargo de la Oficina Nacional para la Atención de Desastres que “defina las políticas, acciones y programas, tanto de carácter sectorial como del orden nacional, regional y local que se refieran, entre otros, a los siguientes aspectos: a) Las fases de prevención, atención inmediata, reconstrucción y desarrollo en relación con los diferentes tipos de desastres y calamidades públicas; b) Los temas de orden económico, financiero, comunitario, jurídico e institucional; c) La educación, capacitación y participación comunitaria; d) Los sistemas integrados de información y comunicación a nivel nacional, regional y local; e) La coordinación interinstitucional e intersectorial; f) La investigación científica y los estudios técnicos necesarios; g) Los sistemas y procedimientos de control y evaluación de los procesos de prevención y atención” (Decreto Ley 919 de 1989, 1989). Introduce, en su artículo 6, el componente de prevención de desastres en los planes de desarrollo de las entidades territoriales, en donde se identifiquen las zonas de riesgo y posibles afectaciones, así como la adecuada apropiación de recursos para su atención. Establece el régimen de actuación ante situaciones de desastre, el de contratación para la atención de situaciones de emergencia, las condiciones bajo las cuales se da la declaratoria de calamidad pública, entre otros aspectos. Solo hasta este año se establece un sistema de manera integral, organizado, interinstitucional y coordinado, bajo una dirección centralizada.

Los posteriores desarrollos legales en materia ambiental verían incorporados algunos de estos elementos, tal como el caso de la Ley 99 de 1993 que establece como uno de los objetivos generales de la ley “la prevención de desastres será materia de interés colectivo y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento” (Ley 99 de 1993, 1993), así como una de las funciones del recién Creado Ministerio del Medio Ambiente el de “hacer evaluación, seguimiento y control de los factores de riesgo ecológico y de los que puedan incidir en la ocurrencia de desastres naturales y coordinar con las demás autoridades las acciones tendientes a prevenir la emergencia o a impedir la extensión de sus efectos” (Ley 99 de 1993, 1993).

La Ley 388 de 1997, que reglamenta los planes de ordenamiento territorial, es otro de los desarrollos normativos que incorpora las disposiciones tendientes a la prevención de desastres, tiene como uno de sus objetivos “el establecimiento de los mecanismos que permitan al municipio, en ejercicio de su autonomía, promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes” (Ley 388 de 1997, 1997) y dentro de la acción urbanística del ordenamiento territorial establece como una de sus funciones el “localizar las áreas críticas de recuperación y control para la prevención de desastres, así como las áreas con fines de conservación y recuperación paisajística” (Ley 388 de 1997, 1997).

En el año 2011, a través del Decreto Ley 4147, se crea la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres -UNGRD - con el objetivo de “dirigir la implementación de la gestión del riesgo de desastres, atendiendo las políticas de desarrollo sostenible, y coordinar el funcionamiento y el desarrollo continuo del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres –SNPAD-“ (Decreto Ley 4147 de 2011, 2011), debido a la modificación de la estructura orgánica y las funciones del Ministerio del Interior, quien tenía bajo su mando las funciones de gestión del riesgo de desastres. La UNGRD está adscrita al Departamento Administrativo de la Presidencia de la República, con sede central en la ciudad de Bogotá D.C.

De esta manera se llega a la legislación actual, la Ley 1523 del año 2012, en donde se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema

Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. En este marco legal se incorporan una serie de principios orientadores, acuñados de los desarrollos normativos nacionales e internacionales, como Precaución, Sostenibilidad Ambiental, Sistémico, Concurrencia y Oportuna Información, entre otros. Adopta la definición de desastre como “el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del Estado y del sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción” (Ley 1523 de 2012, 2012) y establece el riesgo como la combinación de dos elementos; la amenaza y la vulnerabilidad, definiéndolo como “los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad” (Ley 1523 de 2012, 2012). Estructura el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres bajo dos grandes componentes; i) Componente de orientación y Dirección, conformado por el Consejo Nacional para la Gestión del Riesgo y La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de desastres y ii) Componente de Coordinación Territorial, conformado por los Consejos de Gestión del Riesgo de Desastres a nivel Departamental, Distrital y Municipal. Propone tres instrumentos de planificación para la gestión del riesgo que deben ser armonizados a los diferentes niveles administrativos nacional, departamental, municipal y distrital: i) Plan Nacional para la Gestión del Riesgo, Estrategia Nacional para la Respuesta a Emergencias y Planes Departamentales, Distritales y Municipales de Gestión del Riesgo y Estrategias de Respuesta a Emergencias. En la Figura 2-20 se exhibe, de manera general, la estructura del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres actual.

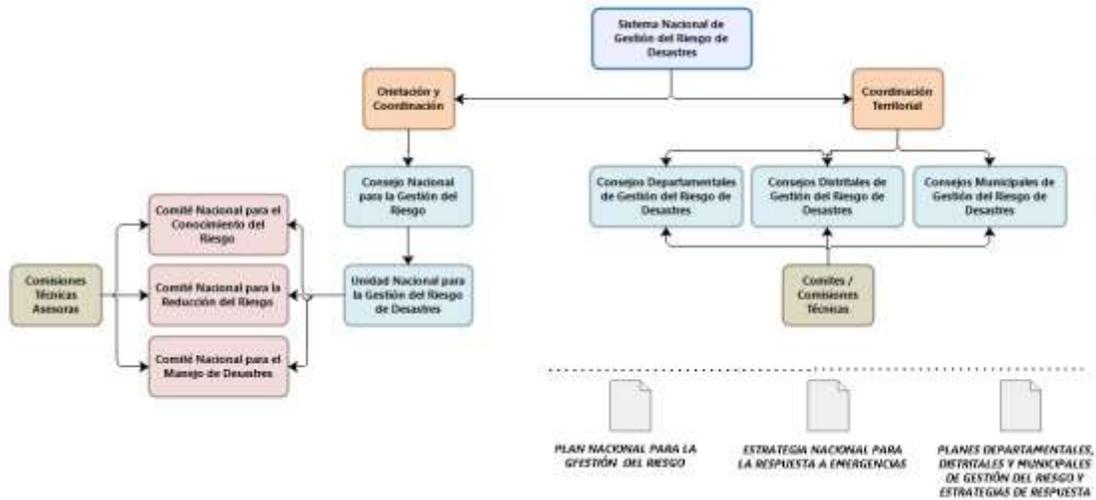


Figura 2-20. Estructura actual del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, conforme la ley 1523 de 2012.

Dentro de las instancias de Orientación y Coordinación se crea el Consejo Nacional para la Gestión del Riesgo, que ejerce las funciones de coordinación del sistema, en cabeza del presidente de la República. Adicionalmente, de la mano de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastre se conforman tres comités nacionales para la Reducción del Riesgo, Conocimiento del Riesgo y Manejo de Desastres.

Dentro de las instancias de Coordinación Territorial se crean los Consejos de Gestión del Riesgo de Desastres en diferentes niveles administrativos, conforme los niveles territoriales de la división administrativa del país; Departamental, Distrital y Municipal.

Finalmente, dentro del componente documental, los denominados instrumentos de planificación, se encuentra el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, que es “el instrumento que define los objetivos, programas, acciones, responsables y presupuestos, mediante las cuales se ejecutan los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y de manejo de desastres, en el marco de la planificación del desarrollo nacional” (Ley 1523 de 2012, 2012), la Estrategia Nacional para la Respuesta a Emergencias “ es el marco de actuación de las entidades del sistema nacional de gestión del riesgo para la reacción y atención de emergencias. Se refiere a todos los aspectos que deben activarse por las entidades en forma individual y colectiva con el propósito de ejecutar la respuesta a emergencias de manera oportuna y efectiva” (Ley 1523 de 2012, 2012) y los Planes Departamentales, Distritales y Municipales de Gestión del Riesgo y Estrategias de Respuesta, “las autoridades departamentales, distritales y municipales

formularán y concertarán con sus respectivos consejos de gestión del riesgo, un plan de gestión del riesgo de desastres y una estrategia para la respuesta a emergencias de su respectiva jurisdicción, en armonía con el plan de gestión del riesgo y la estrategia de respuesta nacionales” (Ley 1523 de 2012, 2012).

3. Materiales y Métodos

3.1 Materiales

Para el desarrollo de esta investigación se emplearon tres insumos principales, a saber: i) información de precipitación acumulada en 24 horas, ii) mapa nacional de amenazas por deslizamientos o fenómenos de remoción en masa y iii) base de datos de localización histórica de ocurrencia de eventos de remoción en masa. El primero, se trata de un conjunto de archivos raster con la distribución espacial y temporal de la precipitación que permiten la obtención de valores acumulados en 24 horas, producto del procesamiento y fusión de información satelital y estaciones en campo; conocido como CHIRPS en su versión 2.0, es producido por la Universidad de California y cuenta con información disponible desde el 1981/01/01 hasta la actualidad, así como una resolución espacial de 5 km. El segundo, el Mapa Nacional de Amenazas por Movimientos en Masa escala 1:100.000, que permite la caracterización del territorio y la cuantificación de la amenaza en cuatro categorías; muy alta, alta, media y baja, producido por el Servicio Geológico Colombiano -SGC-. El tercero, el inventario de eventos históricos de deslizamientos, que incluye la localización geográfica de cada evento (latitud y longitud), así como la fecha de ocurrencia de cada uno, producido por el SGC. A continuación, se detallan cada uno de los insumos.

3.1.1 CHIRPS V2.0.

3.1.1.1 Antecedentes.

Desde 1999 científicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos -USGS- y la Universidad de California, Santa Barbara -UCSB-, apoyados y financiados por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional -USAID-, la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio -NASA-, y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica Administración -NOAA- han estado desarrollando técnicas para la generación de archivos raster de precipitación a nivel mundial. Inicialmente centrado en África, sus investigaciones apoyaron los esfuerzos para el monitoreo de sequías por parte de los sistemas de alerta temprana de hambruna de USAID, combinando modelos de distribución de la precipitación con datos de estación interpolados (Funk et al., 2014)

Posteriormente el USGS y la UCSB generaron el Climate Hazards Precipitation Climatology -CHPClim- con información mensual de precipitación raster de resolución espacial de 0.05° (5 km aproximadamente) para el periodo 1980 – 2009. Combinaron la información proveniente de observaciones de satélites y registros obtenidos por estaciones en campo, con el objetivo de determinar un método que permitiera realizar una aproximación efectiva al comportamiento de la precipitación en el terreno y facilitando las labores de la producción de estimaciones satelitales para aquellas zonas desprovistas de puntos de medición en el terreno (Funk et al., 2014). Esta metodología ha permitido la evolución en un algoritmo que hoy se conoce como Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations -CHIRPS-, actualmente en la versión 2.0, que ha producido estimaciones confiables de precipitación por satélite con información desde 1981 hasta el presente.

3.1.1.2 Insumos CHIRPS V2.0.

Actualmente, el algoritmo de CHIRPS incorpora los siguientes elementos: i) la climatología mensual CHPClim; ii) Observaciones provenientes de satélites de dos centros especializados administrados por la NOAA, el Climate Prediction Center -CPC-, que utiliza

la banda del infrarrojo (resolución temporal de 30 minutos y 4 Km de resolución espacial) y del National Climatic Data Center -NCDC- en la banda del infrarrojo (resolución temporal de 3 horas y resolución espacial de 8 Km); iii) la información de la estimación satelital de precipitación proveniente del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 de la NASA ; iv) modelos atmosféricos de precipitación proveniente de la NOAA Climate Forecast System versión 2 (CFSv2); y v) precipitación en campo proveniente de múltiples agencias meteorológicas nacionales y regionales (Funk et al., 2014). Esta información, en conjunto, permite la obtención de cuadrículas de precipitación con cobertura cuasi global, entre los 180°W - 180°E, 50°N - 50°S (Figura 3-1) (Funk et al., 2015).

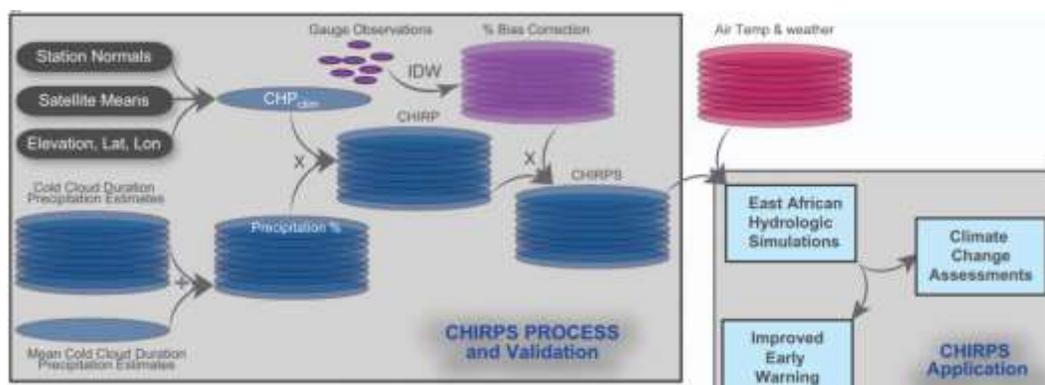


Figura 3-1. Esquema general de procesamiento CHIRPS (Funk et al., 2015).

El acumulado de tiempo estándar para el cálculo del CHIRPS es de 5 días, sin embargo otros periodos de tiempo son calculados a partir de agregación de información (10 días y 1 mes) o desagregación, como los que se producen para periodos de un día (Funk et al., 2015).

En el proceso de asimilación de datos de estaciones en campo, para la generación del CHIRPS, se incorporan registros provenientes de distintos servicios de transmisión de información y de archivos privados; Global Historical Climate Network -GHCN- mensuales y diarios, Global Summary of the Day -GSOD-, Global Telecommunication System -GTS- y Southern African Science Service Centre for Climate Change and Adaptive Land Management -SASSCAL-. La información del GTS se captura de manera diaria; el GHCN, GSOD y SASSCAL de manera mensual. Adicionalmente, muchos registros son entregados por agencias meteorológicas nacionales, principalmente en México, Centro América, Sur América y el África Sub-Sahariano. Actualmente el GHC contiene alrededor de 600

millones de observaciones diarias desde 1981 y otros 600 millones previos a ese año sobre 200.000 localizaciones en el mundo (Funk et al., 2015).

3.1.1.3 Características CHIRPS V2.0.

La información empleada en esta investigación se encuentra disponible vía web para diferentes intervalos de tiempo, dominio espacial y formatos, desde 1981 hasta el presente. La información final de CHIRPS es producida con un rezago de 3 semanas usando toda la información de estaciones disponibles y está servida en agregados en acumulados de un día hasta 3 meses. La mayoría de la información se encuentra en grillas de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ de resolución espacial que presentan tres categorías de cubrimiento; Global (7200 x 7200 pixeles, 180°W a 180°E , 50°N a 50°S), África (1500 x 1600 pixeles, 20°W a 55°E , 40°N a 40°S) y Centro América y el Caribe (720 x 350 pixeles, 93°W a 57°W , 23.5°N a 6°N) (Funk et al., 2015). La información CHIRPS se produce en formatos NetC, GeoTiff y ESRI BIL. Las unidades de medición representan mm en el período de tiempo específico, por ejemplo, mm/día o mm/mes (Funk et al., 2015).

En esta investigación se emplearon archivos raster diarios, de resolución Global en formato GeoTiff. Típicamente, un archivo raster CHIRPS diario luce como se observa en la Figura 3-2; la Tabla 3-1 muestra las características de las imágenes usadas en esta investigación. En total se descargaron 14.336 imágenes comprendidas entre 1981/01/01 y 2020/03/31. La nomenclatura de los archivos CHIRPS v2.0 se describe a continuación:

chirps-v2.0.AAAA.MM.DD.tif

En donde;

Chirps-v2.0= versión de la estimación CHIRPS, actualmente en la 2.0.

AAAA=Año de la información de precipitación de cada imagen.

MM=Mes de la información de precipitación de cada imagen.

DD=Día de la información de precipitación de cada imagen.

tif= Extensión del archivo en formato GeoTif.

VERSIÓN	FORMATO	RESOLUCIÓN TEMPORAL	RESOLUCIÓN ESPACIAL	PIXELES
2.0	GeoTiff	Diaria (24 Horas)	0.05° x 0.05°	7200 x 7200

Tabla 3-1. Características de las imágenes CHIRPS v2.0 empleadas en esta investigación.

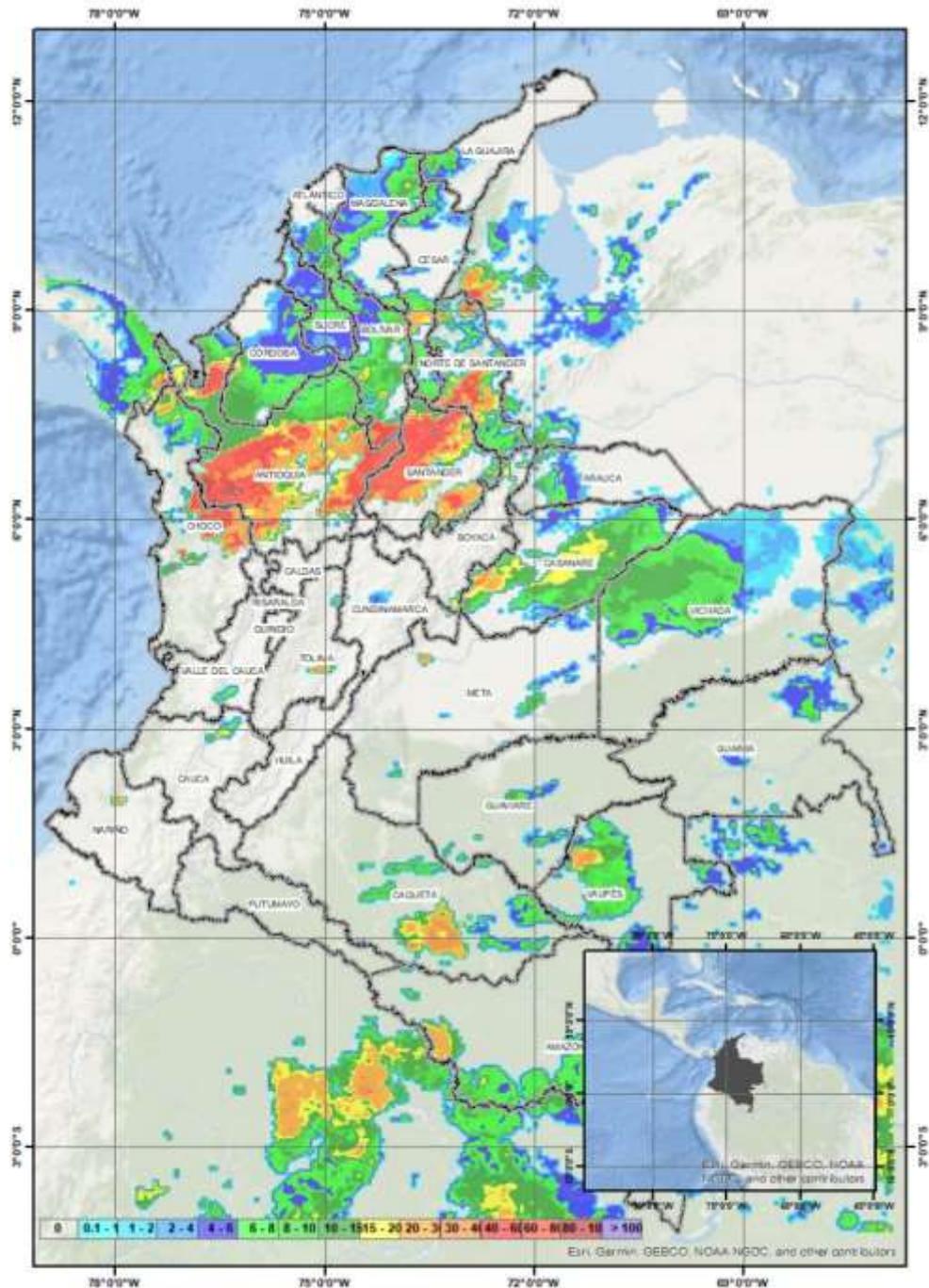


Figura 3-2. Imagen de precipitación en mm/día CHIRPS v 2.0 para el día 2020/03/31.

3.1.2 Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000

La susceptibilidad a los movimientos en masa se entiende como la propensión del terreno a desestabilizarse y depende de las características y propiedades de los materiales que conforman el terreno, rocas y suelos, así como de la cobertura de la tierra. Se considera un factor detonante de un movimiento en masa aquella acción o evento natural o antrópico que es la causa directa e inmediata de este. Entre ellos pueden estar, por ejemplo, los sismos, la lluvia o factores climáticos, la excavación del pie de una ladera y la sobrecarga de esta (Ruiz Peña et al., 2017).

El mapa Nacional de Amenazas por movimientos en Masa representa un elemento fundamental en esta investigación, en conjunto con la precipitación antecedente permiten determinar aquellas zonas de interés por posibles deslizamientos.

3.1.2.1 Antecedentes.

En el año 2001, a una escala 1:1'500.000, se publica el primer mapa nacional de amenaza relativa por fenómenos de erosión y remoción en masa (Figura 3-3), teniendo en cuenta, entre otros, factores relacionados con la densidad, frecuencia y recurrencia de los movimientos en masa, en donde se definen 15 provincias de amenaza relativa (Tabla 3-2), con características particulares de inestabilidad (Ruiz Peña et al., 2017).

<p>Comprende Provincias I-II Amenaza Muy Alta</p>	<p>Vertientes de los ríos Cauca y Patía, de la serranía de Baudó y de la cordillera Oriental, excluido su piedemonte Oriental.</p>	<p>Se asocian en esta categoría formaciones de litología variada de la Provincia I del occidente, con rocas sedimentarias con cobertura coluviales gruesas de oriente. Estas formaciones están afectadas tectónicamente de manera apreciable y en consecuencia las rocas presentan intenso fracturamiento y cizallamiento. Es también común en estas provincias el alto gradiente de las laderas. Se trata, además de las zonas de mas alto desarrollo del país donde la intervención antrópica es más severa.</p>	<p>La mayor concentración y frecuencia de deslizamientos y otros procesos de inestabilidad de taludes y laderas se presenta en las dos provincias consideradas dentro de la categoría de Amenaza Muy Alta. En el occidente, extensas zonas de reptación, erosión intensa, enormes flujos y deslizamientos, algunos de ellos de magnitud regional, con fuerte agradación en el fondo de los valles. En el oriente, los movimientos mas frecuentes corresponden a extensas zonas de reptación y flujos, así como grandes deslizamientos en masa coluviales que superyacen shales cizallados. En estas dos provincias, que representan el 21,7% del territorio montañoso del país, se concentra la mayor densidad y frecuencia de los movimientos, con el 51% de los mas grandes y recurrentes y el 37% de los menores.</p>
--	--	--	--

<p>Comprende Provincias III -IV Amenaza Alta</p>	<p>Fajas de rocas metamórficas que hacen parte de algunos macizos cristalinos de las cordilleras Central y Oriental y la Sierra Nevada de Santa Marta, junto con la zona de piedemonte oriental de la cordillera oriental.</p>	<p>Rocas sedimentarias cristalinas muy fracturadas y cizalladas. Es común en estas provincias el alto gradiente topográfico, el alto grado de fracturamiento de las rocas y la presencia de rocas cizalladas y milonitas en los corredores de faña. Las provincias de amenaza alta corresponden también a zonas de alto desarrollo, sometidas también a fuerte intervención antrópica, pero menos que las dos provincias de amenaza muy alta.</p>	<p>Es esta provincia, los movimientos son también muy frecuentes y recurrentes, pero menos que en las provincias I y II. En las zonas de rocas metamórficas de la provincia III, los movimientos más frecuentes corresponden a las avenidas torrenciales y a los desprendimientos y deslizamientos planares y de cuñas en laderas escarpadas o taludes de excavaciones. Fuerte erosión hídrica concentrada, así como deslizamientos y flujos canalizados de detritos y tierras, afectan las rocas cizalladas, de la provincia IV. Estas provincias corresponden a 9,5% de la zona montañosa, concentran entre el 20% y el 25% de los movimientos mayores y el 10% de los movimientos menores.</p>
<p>Comprende Provincias V – VIII Amenaza Media</p>	<p>Junto con las provincias I al IV, estas provincias cubren las zonas de mayor expresión de relieve. Constituidas por rocas sedimentarias, volcánicas y cristalinas antiguas, cubiertas por depósitos intra-cordilleranos.</p>	<p>Como factores comunes de asociación de las provincias de amenaza Media, predominan en relieve fuerte y la condición débil, inherente o adquirida, de los materiales expuestos: Suelos, saprolitos, rocas de dureza moderada o rocas duras muy fracturadas. Asociado con el alto grado topográfico, se presenta alta torrencialidad en los cauces de montaña y fuerte socavación en el fondo de los valles jóvenes.</p>	<p>En esta provincia se presentan diferentes tipos de proceso: Fuerte erosión hídrica concentrada, y deslizamientos y flujos de detritos y tierras, afectan los depósitos volcánicos y aluviales de la Provincia V y los suelos saprolíticos y lateríticos de la provincia VI. Intenso carcavamiento asociado a deslizamientos superficiales y flujos canalizados de detritos y tierras de moderada magnitud se presentan en la provincia VII. Con menos frecuencia ocurren desprendimientos y deslizamientos estructuralmente controlados, en la provincia VIII. En estas cuatro provincias, la densidad y la recurrencia de los movimientos en menor que en el caso de las provincias anteriores de amenaza Muy Alta y Alta. Corresponde al 20,7% de la zona montañosa y concentra entre el 15% y 20% de los movimientos más grandes. El 32 % de los movimientos menores se presentan en las provincias de Amenaza Media.</p>
<p>Comprende Provincias IX – XI Amenaza Baja</p>	<p>Comprende los altiplanos de Cundinamarca y Boyacá y las zonas cubiertas por depósitos aluviales y rocas sedimentarias del Paleogeno y Neógeno en los litorales del Atlántico y Pacífico, d ellos valles inter-andinos, los bordes de cordillera y extremo oriental del piedemonte Llanero.</p>	<p>Es común para las tres provincias cobijadas en esta categoría, que están constituidas por rocas blandas o depósitos poco consolidados, en regiones de relieve moderado.</p>	<p>Predominan la erosión concentrada y diferencial, los desprendimientos y los deslizamientos rotacionales y traslaciones. Estos movimientos son más bien localizados y asociados casi siempre a las actividades humanas. La frecuencia y el tamaño de los movimientos es menor que en las provincias de categoría Alta y Muy Alta. Las provincias de amenazas Baja cubren el 48,1% del territorio montañoso y, en conjunto, concentran cerca del 10% de los movimientos mayores. En estas provincias, además, se presentan el 21% de los movimientos menores.</p>
<p>Comprende Provincias XII – XV Amenaza Muy Baja</p>	<p>Terrenos montañosos o alomados en la Amazonía y Orinoquía de la Provincia XII; y terrenos suaves de la Orinoquía y Amazonía de las provincias XII y XIV del sur del litroal pacifico corresponde a la provincia XV.</p>	<p>Es común estas provincias corresponden a la región del país más escaso desarrollo.</p>	<p>Las zonas de mayor relieve de la provincia XIII, correspondientes al escudo de Guayana, son susceptibles a erosión diferencial y desprendimientos en eventuales excavaciones; las provincias XIII y XIV son susceptibles a la erosión hídrica, con casos de lubricación en la primera de ellas y en las provincias XV se puede presentar erosión fluvial y marina.</p>

Tabla 3-2. Zonificación de la inestabilidad de laderas en Colombia (Ruiz Peña et al., 2017).

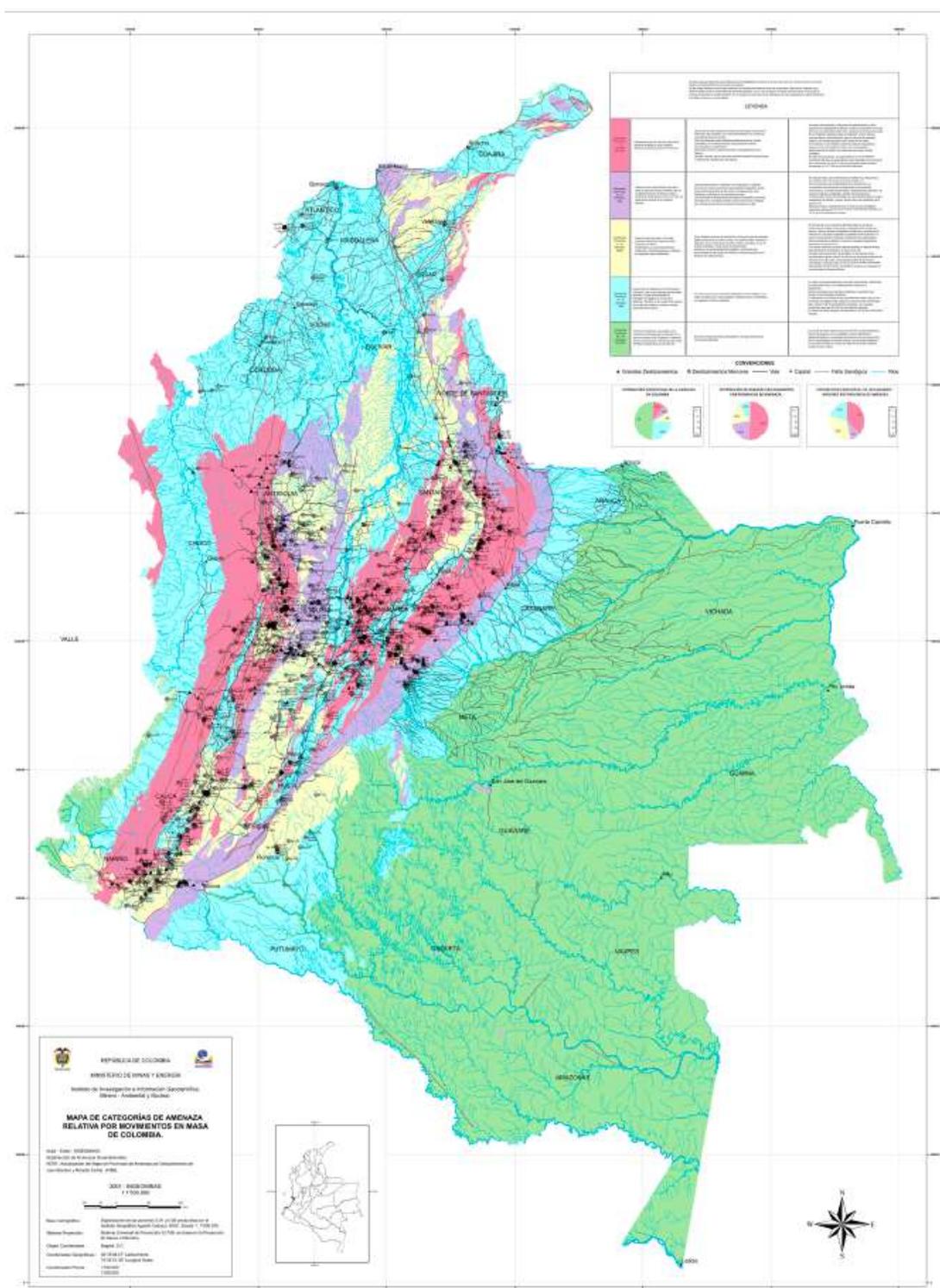


Figura 3-3. Mapa de categorías de amenaza relativa por movimientos en masa en Colombia, escala 1:1.500.000 (Ruiz Peña et al., 2017).

En el año 2010, en convenio con el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales – IDEAM-, se detalló y complementó la información de la escala 1:1'500.000 mediante la elaboración de mapas de susceptibilidad y amenaza relativa a escala 1:500.000 (Ruiz Peña et al., 2017). La zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa se basó a una metodología heurística, que en gran medida respondió a criterios de expertos en un grupo interdisciplinario, el cual se encargó de determinar los pesos ponderados para cada una de las variables involucradas. Se determinaron condiciones intrínsecas (susceptibilidad) a partir de unidades litológicas, suelos, ecosistemas continentales, costeros y marinos y de sistemas morfogénicos, además de las obtenidas del Modelo Digital de Terreno y la presencia o ausencia de movimientos en masa reportados históricamente. Para las condiciones extrínsecas (amenaza relativa) se tuvieron en cuenta las condiciones de precipitación, temperatura y sismicidad (Ruiz et al., 2012). El resultado final permitió la definición de cuatro categorías de amenaza; Muy Alta, Alta, Media y Baja (Tabla 3-3) (Figura 3-4).

AMENAZA	DESCRIPCIÓN
MUY ALTA	Representa el 3% del territorio nacional de los cuales el 2.85% se ubica en la región Andina, es decir, corresponde al 9.6% de la misma. Ocurre en zonas de laderas muy inestables, con alta pendiente y fuerte intervención antrópica. En estas zonas los movimientos en masa y los procesos erosivos son muy frecuentes y numerosos y la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa es muy alta y los movimientos pueden originar la pérdida de vidas humanas, la destrucción total o parcial de viviendas, líneas de infraestructura como acueductos, oleoductos, gasoductos, sistemas de conducción e interconexión de energía eléctrica, caminos, carreteables, vías principales, sistemas de drenaje, canales, así como áreas cultivadas. A causa de la gran magnitud y el tipo de procesos se producen cambios severos en la morfología. En laderas que convergen a corrientes de agua, se pueden ocasionar represamientos y posteriores avalanchas. Se recomienda para estas zonas implantar políticas ambientales que permitan un adecuado manejo de los recursos, orientadas a establecer un equilibrio a corto plazo de la zona de fragilidad en cuanto a estabilidad se refiere.
ALTA	Cubre zonas con laderas inestables y áreas con inestabilidad acentuada por procesos erosivos. Se presenta en el 16% del país, en zonas donde hay también una fuerte intervención antrópica; los movimientos en masa son menos frecuentes y numerosos que en el caso anterior, si bien los procesos pueden originar consecuencias similares. Al igual que en el caso anterior se presentan cambios morfológicos importantes y los lechos de corrientes pueden también taponarse provocando represamientos y avalanchas. Se deben aplicar las mismas políticas y acciones encaminadas a preservar el medio ambiente y reducir los impactos negativos en la economía y la sociedad.
MEDIA	Zonas con laderas sin evidencia de inestabilidad actual y áreas de laderas con inestabilidad generada por procesos erosivos de baja intensidad predominando procesos de reptación. Se recomienda evitar la deforestación y establecer buenas prácticas de uso y manejo del suelo, como la preservación de la cobertura vegetal nativa, especialmente en vertientes de caños y quebradas y en general en zonas de mayor pendiente. Esta categoría de amenaza incluye el 18% del área del territorio colombiano.
BAJA	Representa el 63% del país y corresponde a zonas planas o con laderas de pendientes bajas, muy poco pobladas, en general estables, en donde la posibilidad de generarse inestabilidad del terreno es baja.

Tabla 3-3. Categorías de Amenaza, Mapa Nacional de Movimientos en Masa 1:500.000 (Ruiz Peña et al., 2017)

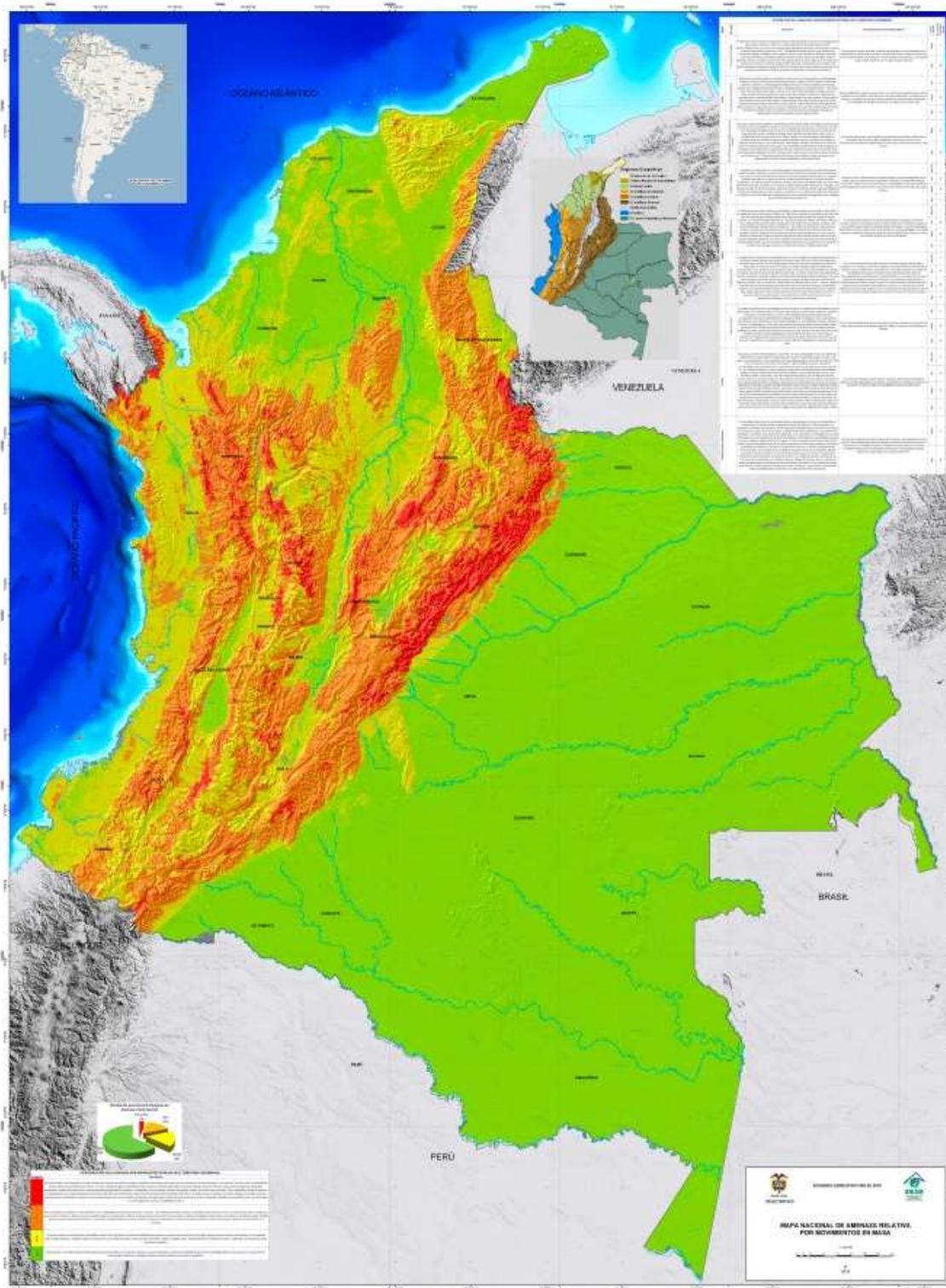


Figura 3-4. Mapa Nacional de Movimientos en Masa 1:500.000 (Ruiz Peña et al., 2017).

3.1.2.2 Mapa Nacional Escala 1:100.000.

Para la construcción del Mapa Nacional escala 1:100.000 se aplicó un método heurístico, procedente a escalas semi-regionales, basado en categorizar y ponderar los factores condicionantes y detonantes de inestabilidad según la influencia esperada de estos en la generación de movimientos en masa. Las categorías de susceptibilidad a los movimientos en masa consisten en dividir una situación compleja en las partes que la componen, arreglando estas partes o variables en un orden jerárquico, asignando valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable y sintetizando los juicios para determinar cuál variable tiene la mayor prioridad y deben actuar bajo la influencia del resultado de la situación. El método heurístico es considerado como indirecto, ya que los resultados se pueden extrapolar a zonas sin movimientos en masa, pero en las cuales se presenta una combinación similar de los factores condicionantes y detonantes. Los factores condicionantes o variables que se tuvieron en cuenta en el modelo de susceptibilidad fueron la geología, la geomorfología, los suelos edáficos y la cobertura de la tierra. Los factores detonantes que se consideraron en la zonificación de la amenaza fueron el clima y el sismo (Ruiz Peña et al., 2017). En la Figura 3-5 se observa el detalle de la metodología empleada. Para el cálculo de la susceptibilidad se emplearon las variables y ponderaciones que se observan en la Figura 3-6.



Figura 3-5. Metodología heurística para la elaboración del Mapa Nacional de la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa Escala 1:100,000 (Ruiz Peña et al., 2017).

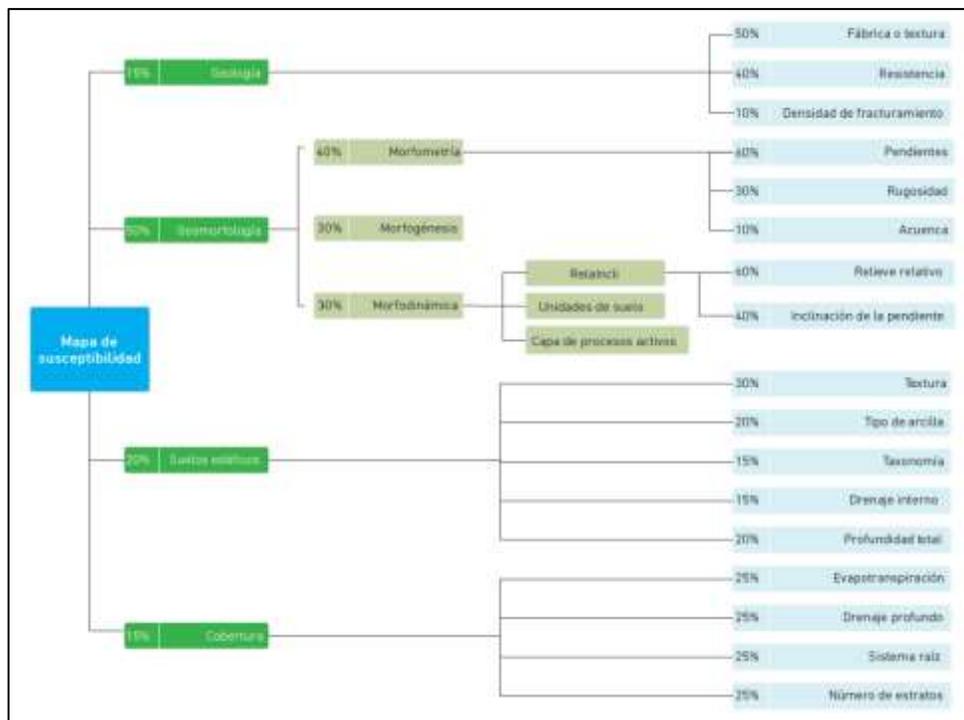


Figura 3-6. Ponderaciones para Mapa de susceptibilidad (Ruiz Peña et al., 2017).

Los factores condicionantes o variables de interés en los movimientos en masa analizados en la construcción del Mapa Nacional se describen a continuación.

▪ **Variable Geológica.**

El componente geológico, con un 15% del peso total en el cálculo en el Mapa Nacional, está conformado por las variables relacionadas con las características litológicas, ponderadas entre ellas, como lo son: Fábrica/textura de las rocas (50%), Resistencia (40%) y Densidad de fracturamiento (10%). La combinación de estas variables ponderadas permitió la generación de un mapa de susceptibilidad de la variable geológica (Figura 3-7).

▪ **Variable Geomorfológica.**

El componente geomorfológico, con un 50% del peso total en el cálculo del Mapa Nacional, está conformado por distintas las variables, ponderadas entre ellas, como lo son: Morfometría (40%), Morfogénesis (30%) y Morfodinámica (30%). La combinación de estas variables ponderadas permitió la generación de un mapa de susceptibilidad de la variable geomorfología (Figura 3-8).

▪ **Variable Suelos/Edáfica.**

El componente suelos, con un 20% del peso total en el cálculo del Mapa Nacional, está conformado por distintas las variables, ponderadas entre ellas, como lo son: Textura (30%), Taxonomía (15%), Drenaje natural (15%), Profundidad (20%) y Tipo de arcilla (20%). La combinación de estas variables ponderadas permitió la generación de un mapa de susceptibilidad de la variable suelos edáficos (Figura 3-9).

▪ **Variable Cobertura de la Tierra.**

El componente cobertura de la tierra, con un 15% del peso total en el cálculo del Mapa Nacional, está conformado por distintas las variables, ponderadas entre ellas, tales como: Profundidad radicular (25%), Drenaje profundo (25%), Evapotranspiración (25%) y Número de estratos (25%). La combinación de estas variables ponderadas permitió la generación de un mapa de susceptibilidad de la variable suelos edáficos (Figura 3-10).

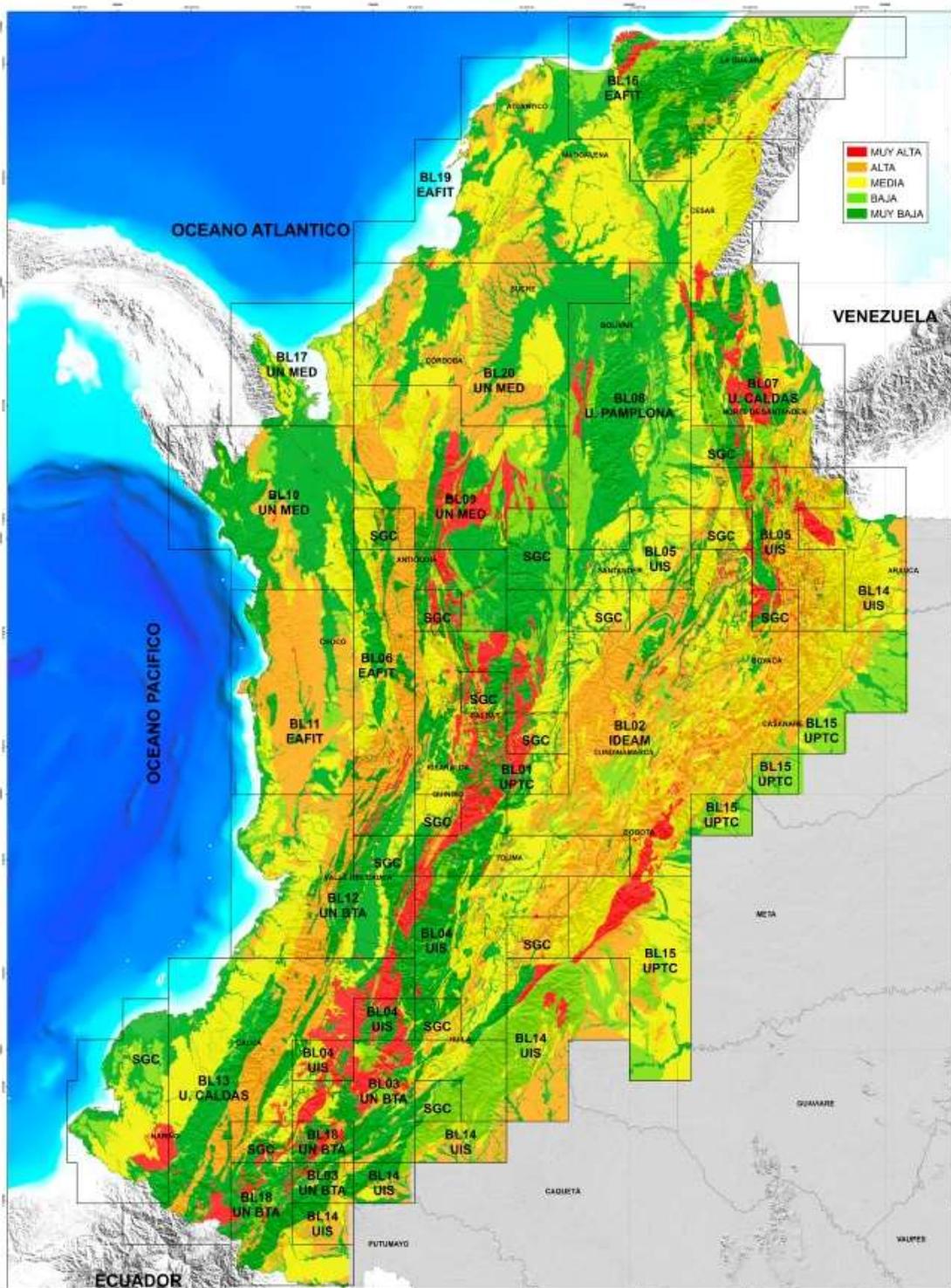


Figura 3-7. Susceptibilidad variable geológica en Colombia para fenómenos de remoción en masa (Ruiz Peña et al., 2017).

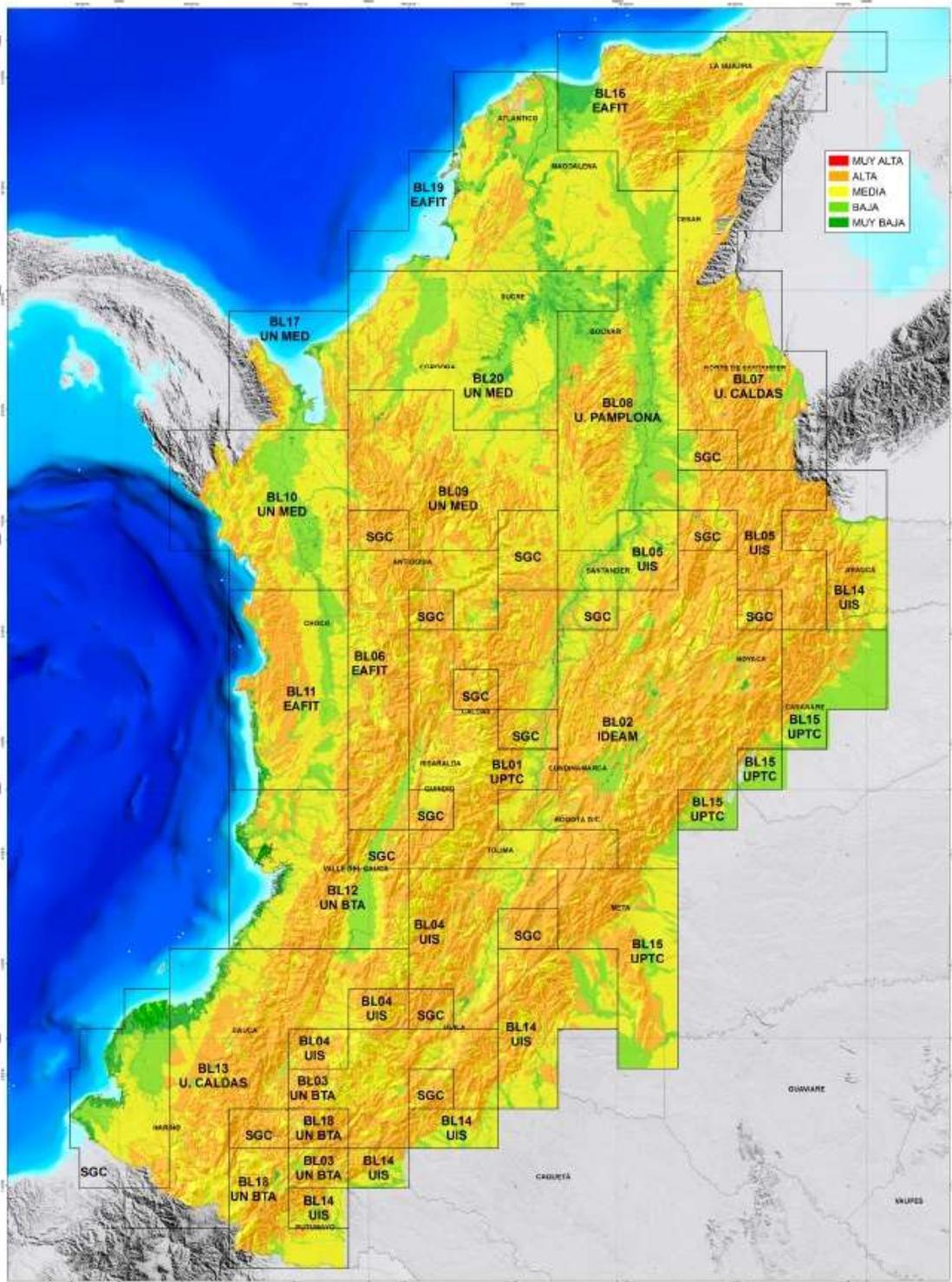


Figura 3-8. Susceptibilidad variable geomorfología en Colombia para fenómenos de remoción en masa (Ruiz Peña et al., 2017).

Adicional a las variables expuestas anteriormente, el SGC realizó el cálculo de los detonantes por clima y sismo, que influyen directamente en la ocurrencia de estos fenómenos.

▪ **Detonante Climático.**

El detonante climático involucró las variables de precipitación y temperatura media anual, con la base climatológica 1987 – 2011. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La precipitación media anual y la temperatura media anual influyen en el contenido de humedad del suelo, es decir, en zonas en donde la precipitación media anual sea alta y la temperatura media anual sea baja, la humedad del suelo será mayor, lo cual contribuiría en mayor medida a la generación de movimientos en masa.
- A mayor valor de lluvia máxima diaria, mayor saturación y probabilidad de movimientos en masa.
- Por lo anterior, a mayor contenido de humedad antecedente en el suelo y mayor valor de lluvia máxima diaria, se incrementa la probabilidad de generarse movimientos en masa (Ruiz Peña et al., 2017).

El detonante por clima se puede observar en la Figura 3-11.

▪ **Detonante Sismo.**

El detonante por sismo involucró la información de presencia de eventos sísmicos en el país, por la confluencia de las placas Suramericana, Nazca y Caribe. El detonante por sismo se puede observar en la Figura 3-12.

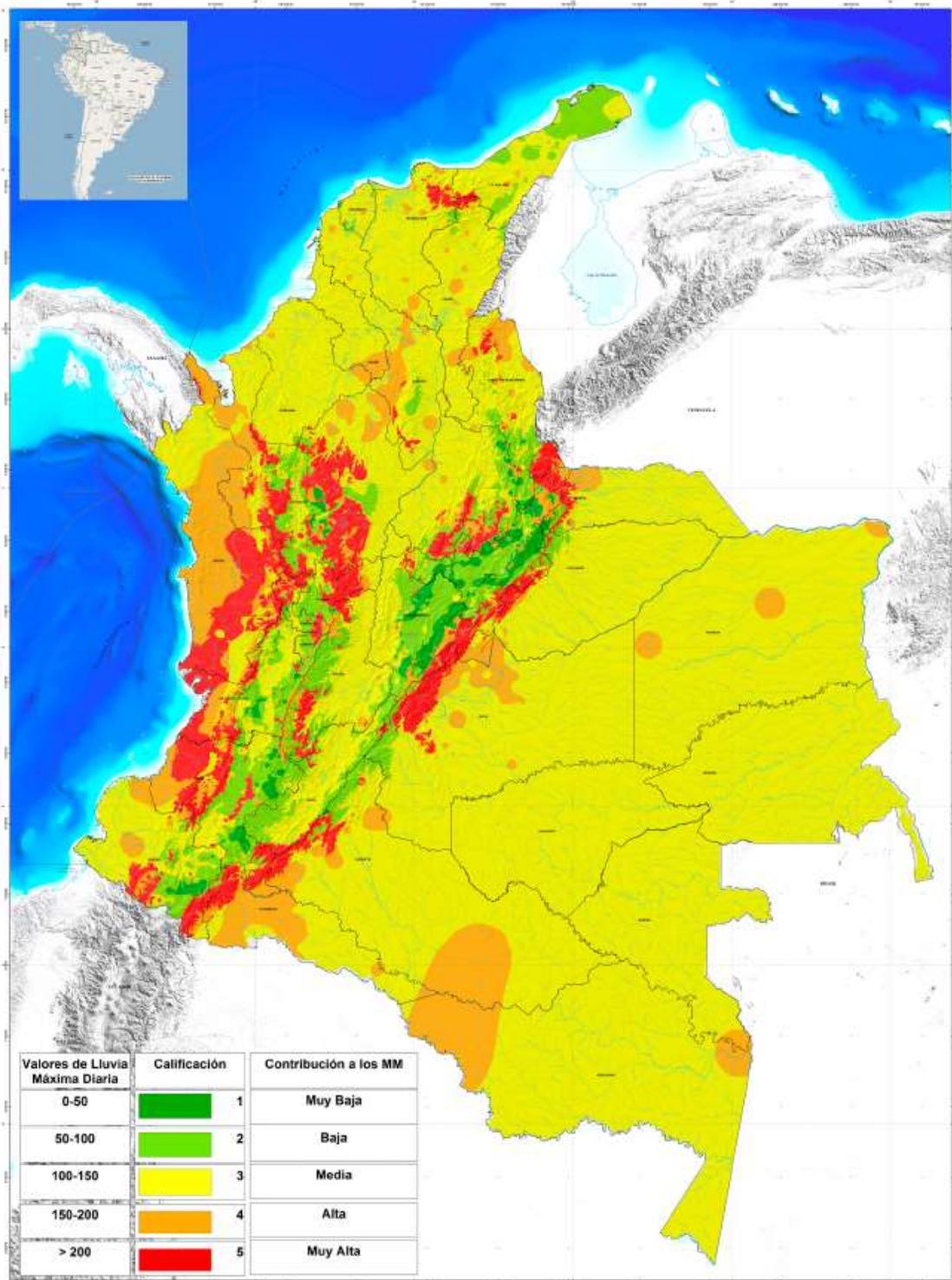


Figura 3-11. Detonante de fenómenos de remoción en masa por clima en Colombia (Ruiz Peña et al., 2017).

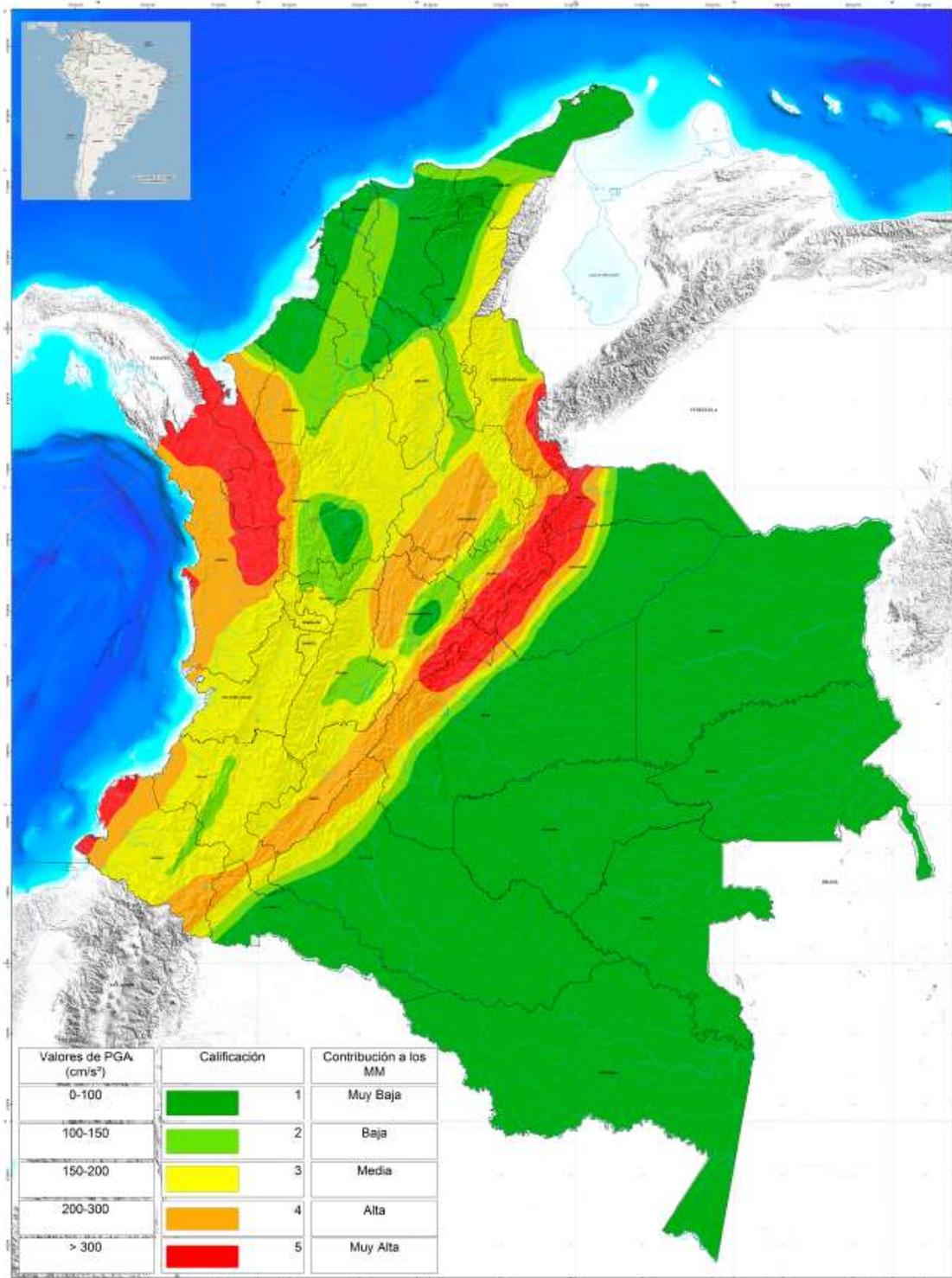


Figura 3-12. Detonante de fenómenos de remoción en masa por sismo (Ruiz Peña et al., 2017).

La combinación de todas las variables y los detonantes permitió la generación del Mapa Nacional (Figura3-13). Este insumo se encuentra disponible en formato raster con resolución espacial de 30.8 m X 30.8 m.

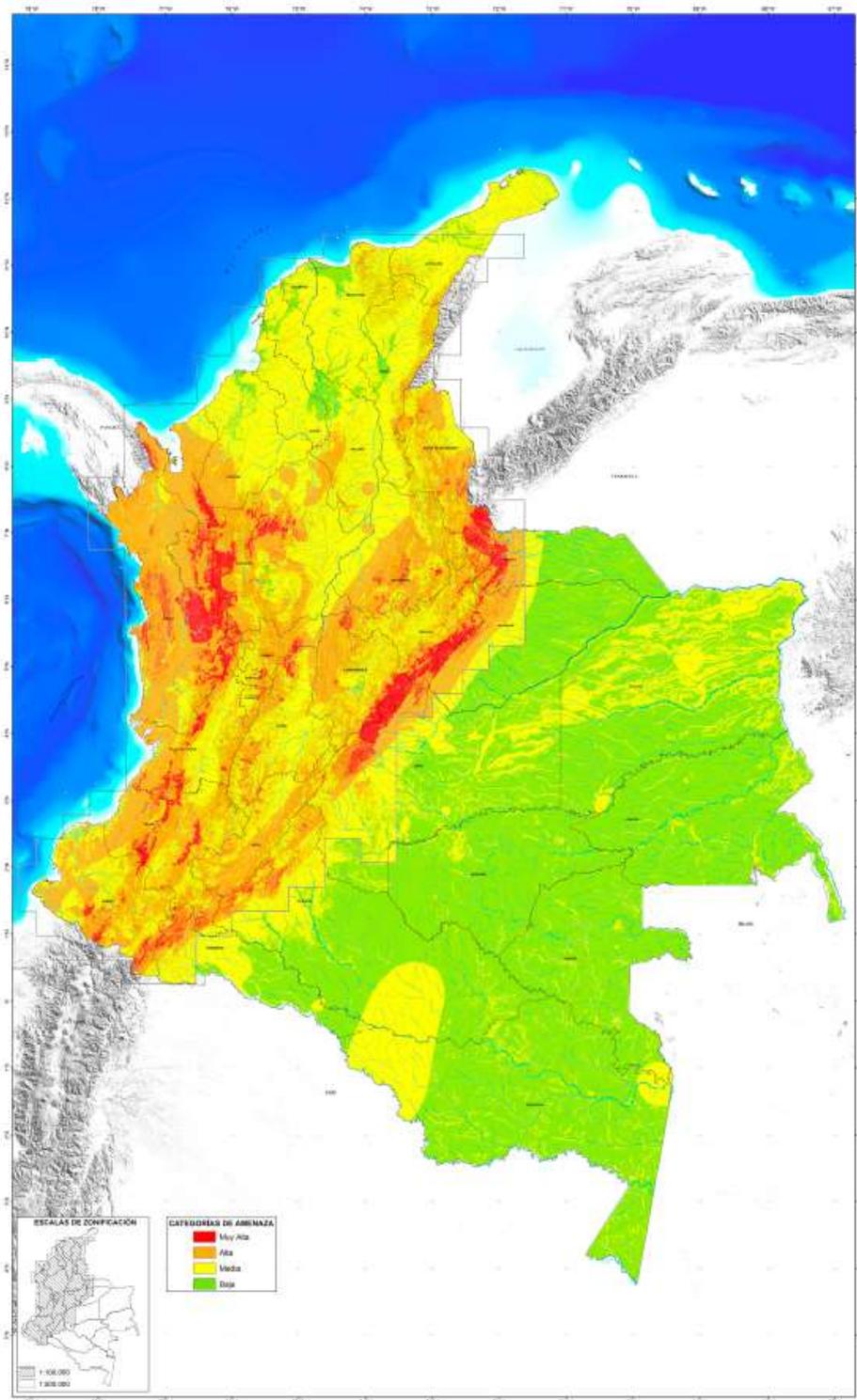


Figura 3-13. Mapa final integrado de amenaza relativa por movimientos en masa en Colombia (Ruiz Peña et al., 2017).

3.1.3 Inventario Nacional de Movimientos en Masa.

La información histórica de ocurrencia movimientos en masa es el tercer insumo empleado en esta investigación. Esta información, en conjunto con la precipitación y los registros de atención a emergencias de la UNGRD, permitió la caracterización de los eventos y la identificación de patrones con respecto a la precipitación antecedente.

El inventario nacional puede ser consultado a través del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) producido por el SGC (Figura 3-14). El SIMMA consolida información referente a este tipo de eventos, se trata de una base de datos con información de la ocurrencia histórica, obtenida a partir de fuentes de información secundaria como: comunicados de prensa, reportes de la Cruz Roja, la Defensa Civil, Bomberos, entre otras (SGC, 2020).



Figura 3-14. Ventana principal del SIMMA (SGC, 2020).

A través del portal puede ser descargada la información en diferentes formatos para su manipulación, en esta investigación la información fue obtenida en formato ESRI Shapefile. Los atributos de esta información se detallan en la Tabla 3-4; la distribución espacial de los eventos se detalla en la Figura 3-15.

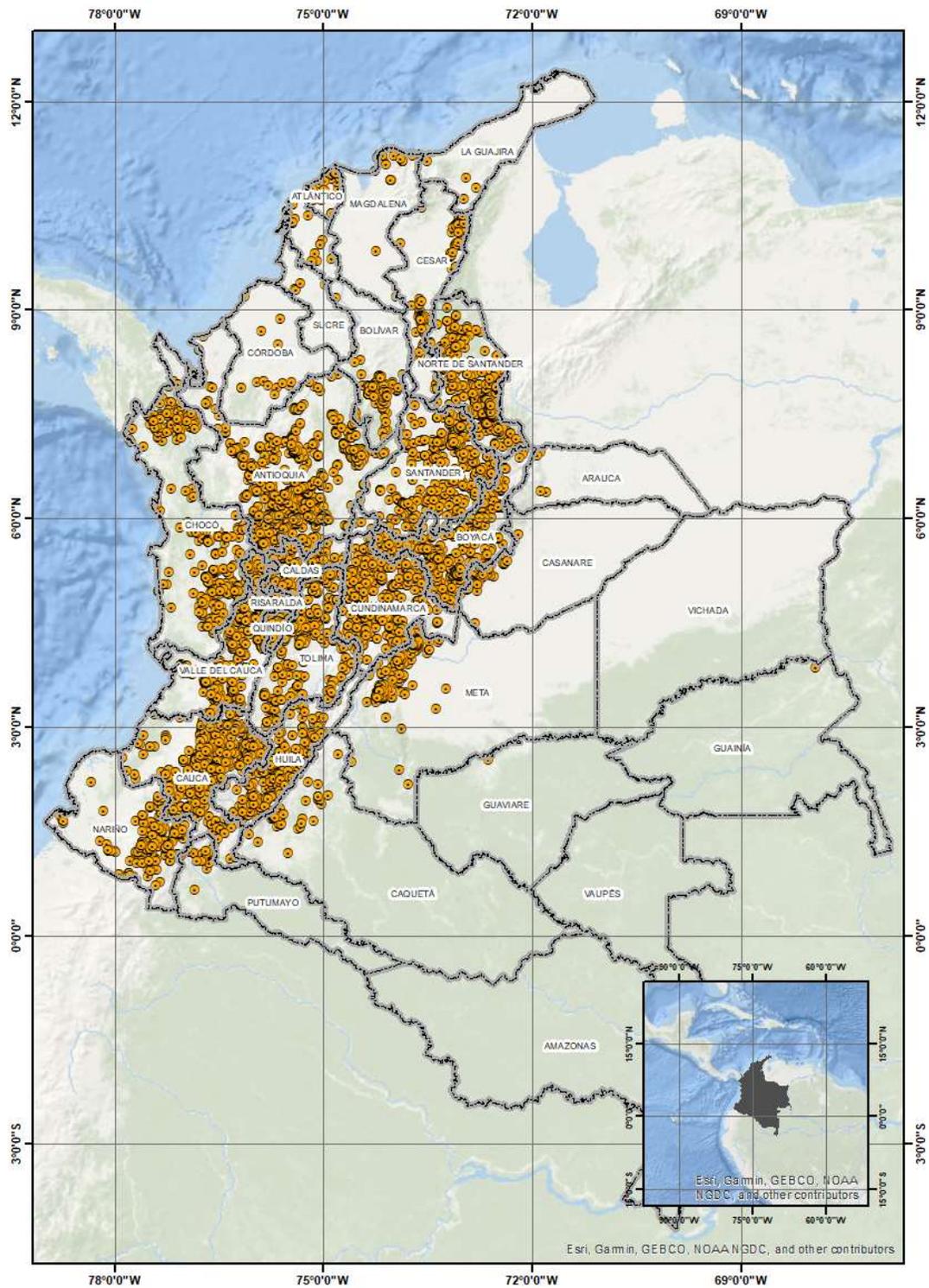


Figura 3-15. Distribución espacial del inventario nacional de movimientos en masa. (datos: SGC, 2020).

ATRIBUTO	DESCRIPCIÓN
<i>Código SIMMA</i>	<i>Código de identificación único del SIMMA.</i>
<i>Tipo de Movimiento</i>	<i>Tipo de movimiento registrado, la totalidad de los registros corresponden a la categoría “Deslizamiento”.</i>
<i>Fecha del Movimiento</i>	<i>Fecha de ocurrencia del evento DD/MM/AAAA.</i>
<i>Departamento</i>	<i>Departamento de ubicación del evento.</i>
<i>Municipio</i>	<i>Municipio de ubicación del evento.</i>

Tabla 3-4. Atributos inventario nacional de movimientos en masa.

El detalle de la información registrada en el inventario nacional de movimientos en masa se resume a continuación:

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
<i>Total de registros</i>	<i>14.864</i>
<i>Fecha Mínima</i>	<i>1492/10/12</i>
<i>Fecha Máxima</i>	<i>2020/05/31</i>
<i>Total Departamentos</i>	<i>29</i>
<i>Total Municipios</i>	<i>769</i>
<i>Departamento Máximo Eventos</i>	<i>Antioquia (4083)</i>
<i>Municipio Máximo de Eventos</i>	<i>Medellín (2017)</i>

Tabla 3-5. Resumen general inventario nacional de movimientos en masa.

La mayor ventaja de este insumo es la posibilidad de la localización puntual de cada uno de los registros. Por el tipo de formato de esta información se incluye la geometría de tipo punto que almacena la latitud y longitud de cada uno de los registros. La principal desventaja de esta información es la imposibilidad de identificar la fuente de la cual proviene cada uno de los registros, por lo cual es normal encontrar múltiples eventos cercanos, o inclusive en la misma localización, relacionados más de una vez para una misma fecha y localización.

En el capítulo Metodología se describe en detalle el proceso de selección de eventos y la depuración del inventario a partir de la información suministrada por la UNGRD.

3.2 Métodos

A continuación, se relacionan los métodos y técnicas empleados en el desarrollo de esta investigación.

3.2.1 Funciones de Distribución: Probabilidad y Probabilidad Acumulada.

La función de distribución de probabilidad $f(x)$ de una variable aleatoria discreta X es una lista de los posibles valores de X junto con sus probabilidades (Johnson, 2012) :

$$f(x) = P[X = x]$$

La distribución de probabilidades siempre satisface las condiciones:

$$f(x) \geq 0 \text{ y } \sum_{\text{toda } x} f(x) = 1$$

A menudo suelen representarse a través de histogramas de probabilidad o de barras de probabilidad (Figura 3-16). Por otra parte, la función de distribución acumulada $F(x)$ es la probabilidad de que el valor de una variable aleatoria X sea menor o igual que x , de manera específica (Johnson, 2012):

$$F(x) = P[X \leq x] \text{ para toda } -\infty < x < \infty$$

Suele representarse como un conjunto de barras con saltos en x (Figura 3-17).

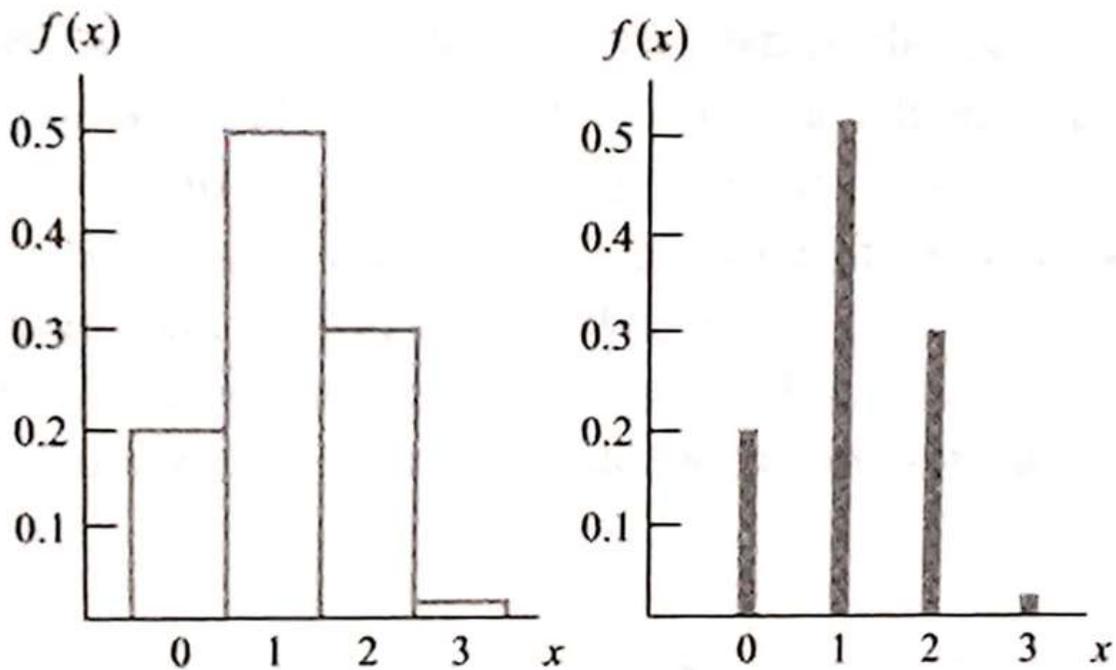


Figura 3-16. (izq.) histograma de probabilidad; (der.) barras de probabilidad (Johnson, 2012).

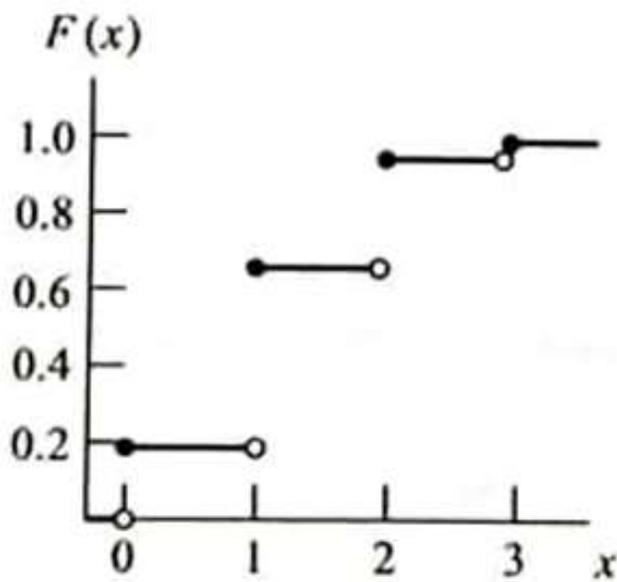


Figura 3-17 Representación función de distribución acumulada (Johnson, 2012).

3.2.2 Asociación Lineal de Variables, Coeficientes de Correlación; Pearson, Spearman y Kendall.

3.2.2.1 Coeficiente de Correlación de Pearson.

El grado de asociación lineal entre dos variables X e Y se mide por su coeficiente de correlación (simple, ordinario o de Pearson), que se calcula a partir de un conjunto de n observaciones o puntos, mediante la expresión (Caridad y Ocerin, 1998):

$$\rho_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Donde; S_{xy} es la covarianza de la variable X e Y, S_x es la varianza de la variable X y S_y es la varianza de la variable.

El coeficiente de correlación toma valores en el intervalo $[-1; +1]$. Si es $\rho_{xy} = +1$ los n puntos están alineados de forma creciente, y si es $\rho_{xy} = -1$, de manera decreciente (Figura 4-3). Si es $\rho_{xy} = 0$, a las variables X e Y se las llama incorreladas y no existe relación lineal alguna entre ambas (Caridad y Ocerin, 1998) (Figura 3-18).

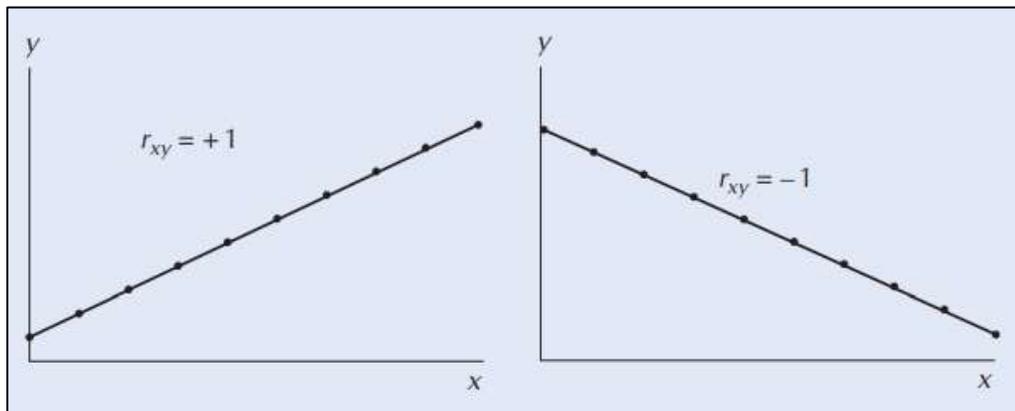


Figura 3-18 Diagrama de correlación positiva (izquierda), diagrama de correlación negativa (derecha) (Caridad y Ocerin, 1998).

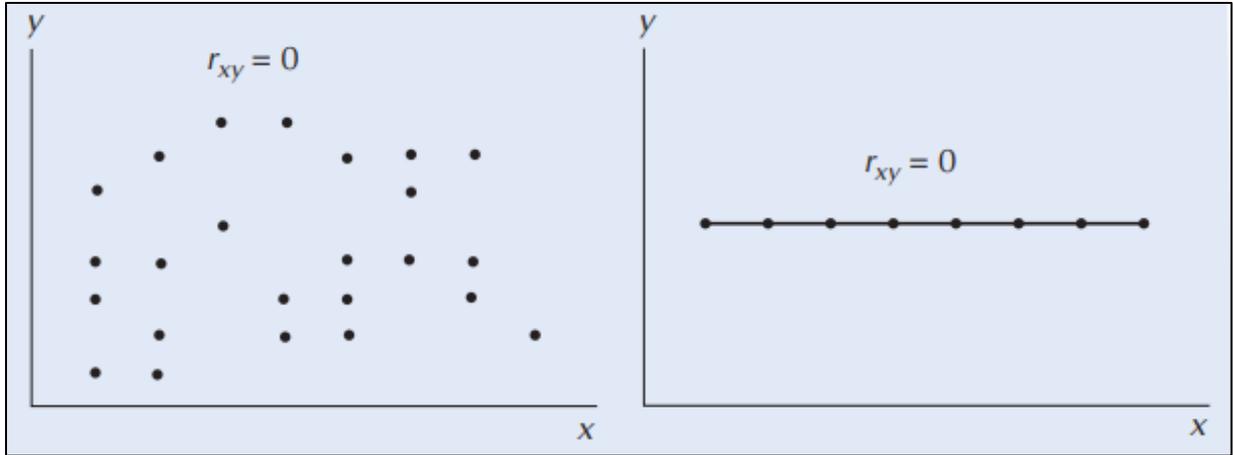


Figura 3-19 Diagramas de variables sin correlación (Caridad y Ocerin, 1998).

En el caso de existir una relación lineal aproximada, el coeficiente de correlación tomará valores intermedios.

3.2.2.2 Coeficiente de Correlación de Spearman.

Coeficiente de correlación no paramétrico también conocido como coeficiente de correlación por rangos de Spearman. Para definirlo es necesario calcular los rangos de menor a mayor de las variables X e Y, en lugar de utilizar los valores originales de cada una. Es equivalente al coeficiente de correlación de Pearson (Marques Dos Santos, 2001), la fórmula para calcularlo es:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}$$

Donde; n es el número de parejas de datos, d_i es la diferencia de los rangos X_i e Y_i

La hipótesis nula es probar que la no correlación de las variables X e Y. Para probar se siguen los siguientes pasos:

- Asignar rangos de 1 a n a los valores de X (1 al menor n al mayor), luego asignar los valores de Y , también de menor a mayor.
- Calcular las diferencias entre los rangos de X e Y para cada pareja.
- Calcular r_s que varía entre -1 y +1 (Marques Dos Santos, 2001).

3.2.2.1 Coeficiente de Correlación de Kendall.

El coeficiente de correlación tau (τ) de Kendall puede usarse como alternativa al coeficiente de correlación de Spearman para datos en forma de rangos. Este coeficiente es una función simple del mínimo de cambios necesarios para pasar de una ordenación a otra (Sarabia Alegría et al., 2005). Su cálculo sigue la siguiente formula:

$$\tau = \frac{C - D}{\frac{n(n - 1)}{2}}$$

Donde; C es el número de concordancias, D es el número de discordancias y n es el número de parejas de datos.

El valor de τ se encuentra entre -1 y +1.

Los coeficientes de correlación en esta investigación juegan un rol preponderante, entendiendo que se busca demostrar la existencia de una relación entre la ocurrencia de eventos referentes a los movimientos en masa y la precipitación antecedente.

3.2.3 Comparaciones de Dos Muestras a Partir de Funciones de Distribución Acumulada: Kolmogorov – Smirnov y Prueba de Diferencia Máxima.

3.2.3.1 Prueba Kolmogorov – Smirnov (KS)

Es una prueba no paramétrica entre funciones de distribución acumulada, se ocupa de la concordancia entre dos distribuciones observadas o empíricas, se basa en la diferencia absoluta máxima D entre los valores de la distribución acumulada empírica y una distribución acumulativa teórica especificada (Johnson, 2012). Para el cálculo del estadístico D es necesario construir las funciones de distribución de las variables X e Y denominadas $F_x(x)$ y $F_y(x)$ respectivamente, en donde se calcula la diferencia máxima absoluta para todos los valores de x (Lopes, 2011) así:

$$D = \max x: -\infty < x < \infty: F_x(x) - F_y(x)$$

La prueba KS presenta las siguientes ventajas:

- Puede ser aplicada sobre datos de naturaleza continua.
- La distribución de estadístico es invariante bajo la re-parametrización y puede ser calculado fácilmente por mecanismos computacionales.
- Puede ser extendido a datos multivariados (Lopes, 2011).

3.2.3.1 Prueba de Diferencia Máxima (DM)

La prueba DM se trata de una adaptación, propuesta en esta investigación, de la prueba KS, con el objetivo de poder determinar si una función de distribución acumulada se desvía de manera positiva o negativa a partir de una de referencia, cuando esta última alcanza un valor de probabilidad igual a 1. Como se ilustró en el punto anterior, la prueba KS mide la distancia máxima entre dos funciones, sin embargo, no determina cuál de las dos tiene un comportamiento superior o inferior con respecto a la otra, cuando haya lugar. Para esto, se propone tomar el concepto de la prueba KS y realizar dos ajustes en su análisis, a partir de las funciones de distribución acumulada de la climatología (Función de referencia) y la precipitación antecedente (Función a comparar) en diferentes intervalos, así:

- i) Identificar el valor de precipitación en el cual la Función de referencia alcanza su valor máximo. Esto quiere decir, de forma operativa en esta investigación, el valor máximo probable de la precipitación en términos climatológicos para una posición cualquiera $X_{i,j}$ y en un intervalo de tiempo determinado.
- ii) Identificar el valor de probabilidad para el cual la Función a comparar iguala al máximo de la Función de referencia en la misma posición e intervalo de tiempo. Es decir, qué valor de probabilidad toma la función de precipitación antecedente cuando la climatología es máxima y determinar si existe un exceso, déficit, o no hay variaciones de la precipitación antecedente con respecto a la climatología. De forma general, la función que describe la prueba DM se presenta como:

$$P_{\max(y)} = F_y[\min [F_y(x)] \geq \max [F_x(x)]]$$

$$DM = 1 - P_{\max}$$

Donde; $P_{\max(y)}$ representa el valor de probabilidad de la Función a comparar cuando la Función de referencia es máxima, $F_y(x)$ es el valor de precipitación de la Función a comparar, $F_x(x)$ es el valor de precipitación la Función de referencia. En el caso que la

Función a comparar alcance un valor de probabilidad de 1 antes que la Función de referencia, DM se expresa como:

$$P_{\max(x)} = F_x[[F_y(x)] == 1]$$

$$DM = -1 * (1 - P_{\max})$$

Los valores positivos de DM representan exceso de precipitación antecedente con respecto a la climatología y los valores negativos representan un déficit.

Este ajuste de la prueba DM permitió establecer, de manera cuantitativa, la diferencia entre la climatología y la precipitación antecedente para cada uno de los eventos del inventario nacional de movimientos en masa, expresado en términos de probabilidad y no en valores absolutos de precipitación acumulada, entendiendo que el régimen y el volumen de precipitación son dinámicos en todo el territorio nacional. En términos gráficos, el análisis de las funciones de distribución de climatología y precipitación antecedente se observan en la Figura 3-20, tanto para la prueba KS como la DM.

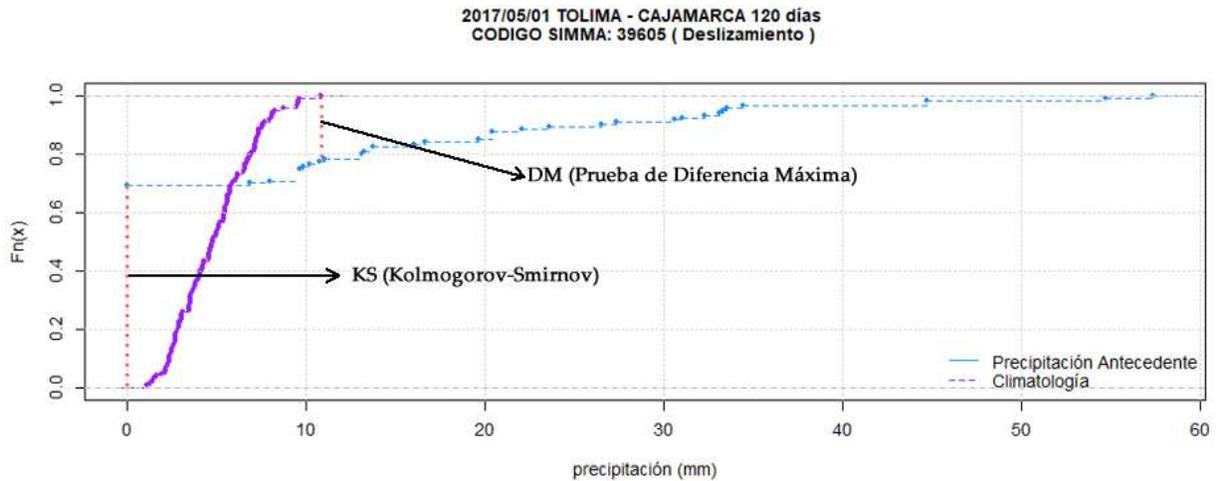


Figura 3-20. Aplicación de las pruebas KS y DM sobre evento registrado el 01/05/2017 en Cajamarca (Tolima).

3.2.4 Medidas de Similitud: Coseno Similitud o Similaridad.

El coseno similitud o similaridad es una medida que permite establecer el nivel de asociación o similitud entre un conjunto de datos, de manera análoga a el coeficiente de correlación. Comúnmente, está definido como el coseno del ángulo θ entre dos vectores x e y (Reyes et al., 2021):

$$Sim(x, y) = Sim_{\text{cosine}}(x, y) = \frac{(x, y)}{\|x\|_2 \|y\|_2} = \frac{\sum_i x_i y_i}{\sqrt{\sum_i x_i^2} \sqrt{\sum_i y_i^2}} = \cos \theta$$

En donde: x e y corresponden a dos vectores distintos de cero.

El resultado del coseno similitud es un número entre 0 y 1, los valores calculados cercanos a cero indican que los vectores objeto del análisis se encuentran ortogonales entre ellos ($\sim 90^\circ$) y no se evidencian similitudes entre el conjunto de datos. Por el contrario, si los valores del cálculo son cercanos a 1, el ángulo formado entre los vectores de análisis es cercano a cero ($\sim 0^\circ$), e indica una coincidencia mayor entre los datos de análisis.

4. Metodología

De manera general, la metodología empleada para el desarrollo de esta investigación se puede segmentar en cinco etapas (Figura 4-1).

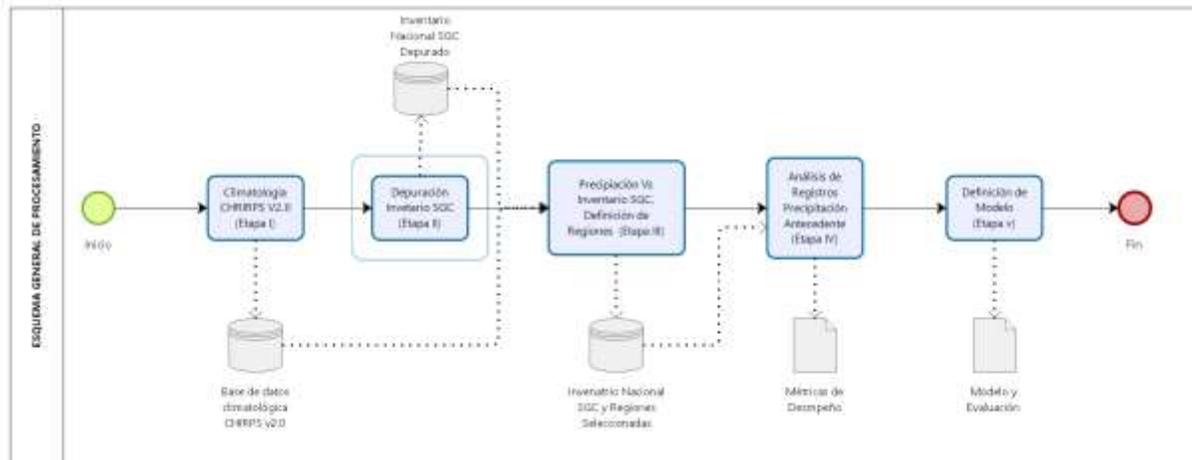


Figura 4-1. Esquema general de la metodología empleada.

Para la realización de cada una de estas etapas se definió como fechas de interés las comprendidas entre el 01/01/1981 y 31/12/2019, obedeciendo a un criterio de disponibilidad de la información raster de precipitación. La primera etapa, consistió en la construcción de la base climatológica anual a partir de la información de precipitación proveniente de CHIRPS V2.0, obteniendo como resultado archivos raster climatológicos (promedio multianual) para cada uno de los días de un año típico. La segunda, consistió en la depuración del inventario nacional de movimientos en masa del SGC, a través de la eliminación de eventos registrados fuera de las fechas de interés y duplicados. La tercera etapa, consistió en el establecimiento de la relación entre el volumen de precipitación y el número de eventos reportados por el SGC, a partir del inventario nacional de movimientos en masa depurado, así como la definición de regiones con las medidas de similaridad más significativas. La cuarta consistió en el análisis de los registros de precipitación, en

diferentes intervalos de días precipitación antecedente; 120, 90, 60, 30 y 15 días conforme al análisis de la memoria de humedad del suelo (Dirmeyer et al., 2009), en donde se establecen rezagos entre 10 y 90 días para determinar la autocorrelación de la humedad del suelo en un intervalo del 99% de confianza a nivel mundial. De esta manera, para cada uno de los eventos depurados del inventario nacional de movimientos en masa y para las regiones priorizadas en la etapa inmediatamente anterior, se establecieron los diferentes rezagos y el cálculo de métricas que permitieran la caracterización general del fenómeno. La quinta y última etapa, consistió en la definición del modelo que permita la estimación de aquellas áreas que, potencialmente, pueden presentar deslizamientos detonados por precipitación antecedente. El detalle de cada una de estas etapas se describe en los siguientes apartados.

4.1 Climatología CHIRPS V2.0. (ETAPA I).

Conforme la Organización Mundial Meteorológica, se entiende por clima la *“síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, etc.) de los elementos meteorológicos en dicho lugar”* (World Meteorological Organization, 1992). De igual manera define la climatología como el *“estudio del estado físico medio de la atmósfera y de sus variaciones estadísticas en el espacio y en el tiempo, tal como se reflejan en el comportamiento meteorológico en un periodo de muchos años”* (World Meteorological Organization, 1992). Teniendo en cuenta estos conceptos, en este punto se construyó la base climatológica nacional diaria, a partir del comportamiento promedio de la precipitación empleando la información CHIRPS V2.0 para el periodo 1981 – 2019.

Este proceso consistió en la elaboración de un archivo diario de precipitación media, es decir, en promediar cada uno de los días de un año típico para obtener el comportamiento medio en cada posición X_i de la imagen. En la Figura 4-2 se ilustra el proceso de extracción de las series para la construcción de la climatología.

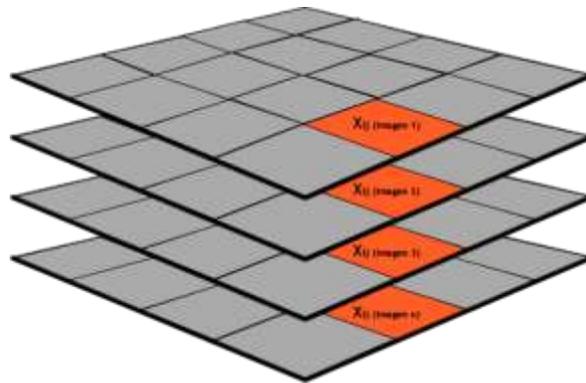


Figura 4-2. Extracción de series para construcción de climatologías CHIRPS V2.0

X_{ij} representa la posición de fila y columna en el archivo raster de precipitación CHIRPS V2.0. **Imagen (1,2,3...n)** representa cada uno de los archivos de precipitación para una fecha específica a lo largo de n periodos, es decir, entre 1981 y 2019. De esta manera se obtiene que:

$$\bar{X}_{ij} = \frac{x_{ij} (\text{Imagen 1}) + x_{ij} (\text{Imagen 2}) + x_{ij} (\text{Imagen 3}) + \dots + x_{ij} (\text{Imagen } n)}{n}$$

\bar{X}_{ij} = el valor medio en la posición i, j (fila , columna).

x_{ij} = el valor de precipitación para la imagen 1, 2, 3, ... n en la posición i, j (fila , columna).

n = Número de años del análisis.

Este proceso se realizó en todas las posiciones X_{ij} para obtener el mapa promedio diario. Por ejemplo, para construir la climatología típica de todos los 01 de enero se promediaron todos los valores de los píxeles de cada una de las imágenes de 1981 a 2019. Con este proceso se obtuvieron todos los archivos medios de un año típico, los raster obtenidos se ilustran en el capítulo de resultados.

4.2 Depuración del Inventario Nacional de Movimientos en Masa del SGC (ETAPA II).

Como se describió en el capítulo de materiales y métodos, el inventario nacional de movimientos en masa consolida la información nacional de este tipo de fenómenos, con énfasis en los relacionados con los deslizamientos de tierra. Al realizar una inspección detallada de los registros originales, en esta base de datos, tenemos un comportamiento anual como se ilustra en la Figura 4-3.



Figura 4-3. Número de eventos anuales reportados en el Inventario Nacional de Movimientos en Masa (original) 1981 - 2019

Durante los primeros años de registros en el inventario nacional de movimientos en masa original, se evidencia una relativa estabilidad hasta el año 2002, siendo el año de 1999 (508 eventos) el de mayor número de registros y el año 1992 (22 eventos) el del menor número. Sin embargo, Para el año 2003 se exhibe un fuerte incremento en el número reportado, alcanzando un valor de 1.326 registros, cercano a los valores de los años 2010 – 2012 en donde la influencia del fenómeno de La Niña desató un gran número de emergencias de naturaleza hidrometeorológica a nivel nacional. Esta situación llamó la atención, atendiendo a que los reportes del Oceanic Niño Index (ONI), índice empleado para determinar las anomalías de la temperatura en la región Niño 3.4, no evidencian la presencia del fenómeno de La Niña para el año 2003, contrario a lo evidenciado para el periodo 2010 – 2012 (Figura 4–4).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2

Figura 4-4. ONI periodo 2000 – 2012, azul periodos La Niña y rojo El Niño (NOAA's, 2021)

Al establecer la relación de los registros del inventario nacional de movimientos en masa con la información de precipitación, en el mismo intervalo de tiempo a nivel nacional, obtenida a través de los archivos de CHIRPS V2.0, tenemos el siguiente comportamiento (Figura 4-5):



Figura 4-5. Relación entre el número de eventos del Inventario Nacional de Movimientos en Masa (Original) y la Precipitación Total Anual CHIRPS V2.0

Como se observa en la figura anterior, se evidencia una relación directa entre el comportamiento nacional de la precipitación y el número de eventos reportados en el inventario nacional de movimientos en masa de manera anual, mostrando un coeficiente de correlación de Pearson de 0.54; de esta manera se entiende que un mayor volumen de precipitación está relacionado con un mayor número de eventos y viceversa. Sin embargo,

llama la atención el comportamiento del año 2003, en donde el incremento de reportes en el inventario no se relaciona con un incremento proporcional de la precipitación. Esta situación, aunada a la no presencia de fenómeno de La Niña para el mismo año, permitió concluir que debía realizarse una depuración de registros donde, tentativamente, se presentan inconsistencias.

El primer filtro que se aplicó sobre el conjunto de datos consistió en la eliminación de todos aquellos registros que no se encuentran comprendidos en el rango de información de precipitación, es decir todos aquellos con fecha anterior al 01/01/1981 y posterior a 31/12/2019. Originalmente el inventario nacional de movimientos en masa cuenta con 14.864 eventos registrados. Así, tenemos 997 registros que se encuentran por fuera del rango necesario, registros que incluyen fechas entre 12/10/1492 y el 28/12/1980. Una vez aplicado este primer filtro, la base de datos del inventario nacional consolidó 13.867 registros.

Un segundo filtro aplicado a la base de datos consistió en la eliminación de registros duplicados, es decir aquellos que se reportan para una misma localización y fecha más de una vez. Así, una vez aplicado este criterio se encontraron 5.735 registros que cumplen esta condición, para consolidar finalmente un inventario nacional de movimientos en masa con un total de 8.132 registros. En la Tabla 4-1 se ilustra una comparación entre el inventario nacional de movimientos en masa original y el inventario depurado con los dos filtros aplicados, a nivel departamental.

DEPARTAMENTO	INVENTARIO ORIGINAL	INVENTARIO FILTRADO	REDUCCIÓN (%)
<i>Meta</i>	1.564	229	85,36
<i>Putumayo</i>	112	28	75,00
<i>Tolima</i>	646	277	57,12
<i>Bolívar</i>	161	70	56,52
<i>Antioquia</i>	4.083	1.840	54,94
<i>Cesar</i>	135	61	54,81
<i>Huila</i>	470	273	41,91
<i>Quindío</i>	322	189	41,30
<i>Caldas</i>	637	404	36,58
<i>Casanare</i>	47	31	34,04
<i>Cundinamarca</i>	924	621	32,79
<i>Boyacá</i>	1.071	742	30,72
<i>Valle del Cauca</i>	693	486	29,87
<i>Chocó</i>	528	382	27,65
<i>Norte de Santander</i>	720	525	27,08
<i>Cauca</i>	1.168	852	27,05

Risaralda	441	324	26,53
Atlántico	69	51	26,09
Bogotá	8	6	25,00
La Guajira	4	3	25,00
Santander	746	560	24,93
Nariño	200	154	23,00
Caquetá	59	49	16,95
Magdalena	31	26	16,13
Arauca	4	4	0,00
Córdoba	14	14	0,00
Guainía	1	1	0,00
Guaviare	1	1	0,00
	14.864	8.132	44,78

Tabla 4-1. Comparación Inventario Nacional de Movimientos en Masa Original y Filtrado.

La reducción en el número de registros más significativa corresponde al departamento del Meta, en donde el 85 % de los registros se encontraban inmersos dentro de alguno de los dos criterios priorizados de fecha y duplicidad; seguido por el departamento de Putumayo (75%), Tolima (57%), Bolívar (54%), Antioquia (54%) y Cesar (54%). En general, la base de datos original presenta un 44% de los registros dentro de alguno de los criterios de filtrado expuestos anteriormente. La base de datos final filtrada se compone de 8.208 registros; sobre esta base de datos se realizó la selección de zonas y eventos más representativos, basados en criterios de similitud entre la precipitación CHIRPS V2.0 y la fecha de ocurrencia de los eventos, proceso que se expondrá posteriormente. En la Figura 4-6 se observa el comportamiento anual de la base de datos filtrada y original, en donde para el año 2003 se aprecia la mayor reducción de registros, pasando de 1.326 registros a 220.



Figura 4-6. Número de eventos Inventario Nacional de Movimientos en Masa Original y Filtrado anual.

Al realizar el cálculo de las medidas de asociación sobre el inventario nacional filtrado se observa un incremento en todas las mediciones, especialmente sobre la correlación de Spearman donde se evidencia un incremento de 0,13 (Tabla 4-2).

MEDIDA ASOCIACIÓN	FILTRADO		ORIGINAL	
	VALOR	p.Value	VALOR	p.Value
<i>Pearson</i>	0,59	8,27E-05	0,54	4,22E-04
<i>Kendall</i>	0,50	8,48E-06	0,37	6,56E-04
<i>Spearman</i>	0,69	1,42E-06	0,53	6,87E-04
<i>Coseno similitud</i>	0,74	N/A	0,71	N/A

Tabla 4-2. Medidas de asociación entre precipitación CHIRPS v2.0 e Inventario Nacional de Movimientos en Masa (Original y Filtrado) entre 1981 y 2019.

Visualmente se observa, en la Figura 4-7, el comportamiento del inventario filtrado y la precipitación total anual estimada por CHIRPS V2.0, en donde la anomalía sobre el año 2003 no se refleja, sin embargo, el impacto del fenómeno de la niña 2010 – 2012 permanece.



Figura 4-7. Relación entre el número de eventos del Inventario Nacional de Movimientos en Masa (Filtrado) y la Precipitación Total Anual CHIRPS V2.0 entre 1981 y 2019.

A manera de síntesis, en este apartado se evidenció la presencia de eventos reportados en el Inventario Nacional de Movimientos en Masa original que se encontraban fuera del periodo de análisis o duplicados (en términos de fecha y posición). Esta situación incidía en el comportamiento y la relación con los datos de precipitación CHIRPS V2.0. Una vez aplicados los filtros sobre el conjunto de datos se evidenció el incremento en las medidas de asociación entre las dos variables (número de eventos y precipitación). En el capítulo de resultados, se muestra en manera detallada el número de registros y la distribución final del inventario nacional de movimientos en masa filtrado.

4.3 Definición de Regiones de Análisis; Precipitación CHIRPS V2.0 y Número de Eventos del Inventario nacional de Movimientos en Masa Filtrado (ETAPA III).

La tercera etapa consistió en la identificación y definición de zonas en las cuales la ocurrencia de eventos, registrados en el inventario nacional de movimientos en masa filtrado, es más frecuente y su relación con los registros de precipitación CHIRPS V2.0 es significativa, en términos de las métricas de asociación. Para este fin se construyó un raster de densidad de ocurrencia de eventos que, de manera iterativa, fue segmentado a partir de la definición de cuantiles sobre sus valores, permitiendo así obtener subregiones (zonas) de análisis para el cálculo de las métricas de asociación. El número de subregiones de análisis se incrementó proporcionalmente al número de iteraciones, es decir: para la primera iteración una única subregión de análisis que incluye todos los valores de densidad, para la segunda iteración dos subregiones que contienen densidades de eventos segmentadas así: primera región que agrupa densidades entre 1 – 7 eventos y una segunda región con densidades entre 8 – 352 eventos. El proceso continuó hasta alcanzar ocho iteraciones con sus respectivas subregiones, al interior de cada una se evaluaron las diferentes métricas de asociación. En la Tabla 4-3 se aprecian las iteraciones y subregiones con sus respectivos valores de densidad.

<i>ITERACIÓN</i>	<i>SUBREGIÓN</i>	<i>DENSIDAD EVENTOS / (5 Km x 5 Km)</i>
1	1	1 - 352
2	1	1 - 7
	2	8 - 352
3	1	1 - 3
	2	4 - 7
	3	8 - 352
4	1	1
	2	2 - 3
	3	4 - 7
	4	8 - 352
5	1	1
	2	2 - 3
	3	4 - 7
	4	8 - 13
	5	14 - 352
6	1	1

	2	2 - 3
	3	4 - 6
	4	7 - 8
	5	9 - 13
	6	14 - 352
	1	1
	2	2 - 3
	3	4
7	4	5 - 7
	5	8 - 11
	6	12 - 19
	7	20 - 352
	1	1
	2	2 - 3
	3	4
8	4	5 - 6
	5	7
	6	8 - 11
	7	12 - 19
	8	20 - 352

Tabla 4-3. Iteraciones, subregiones y densidad de eventos del Inventario Nacional de Movimientos en Masa filtrado.

El raster de densidad se construyó con una resolución espacial de 5 km x 5 km, a nivel nacional, conforme con la resolución de los raster de precipitación CHIRPS V2.0. El objetivo de esta etapa fue el análisis de los eventos en una escala local, entendiendo que en las etapas anteriores se realizó un análisis preliminar, a nivel nacional, entre la relación de los eventos y la precipitación estimada. En las Figuras 4-8 a 4-15 se observan las diferentes segmentaciones del raster de densidad para cada una de las ocho iteraciones.

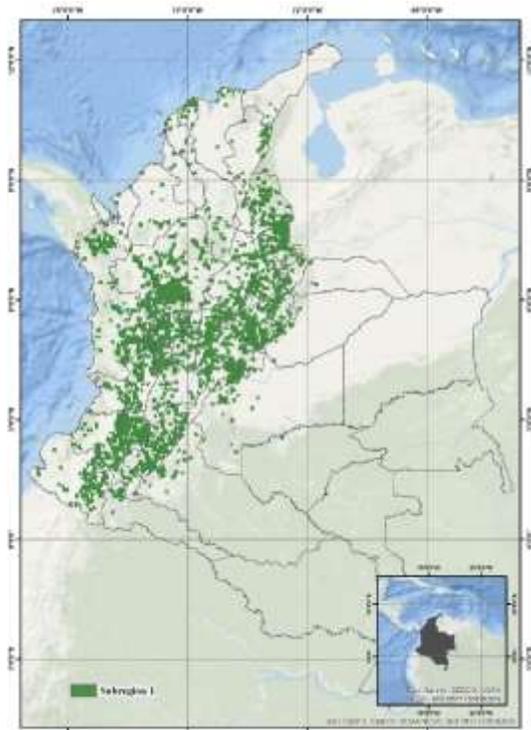


Figura 4-8. Mapa de densidad, Iteración 1.

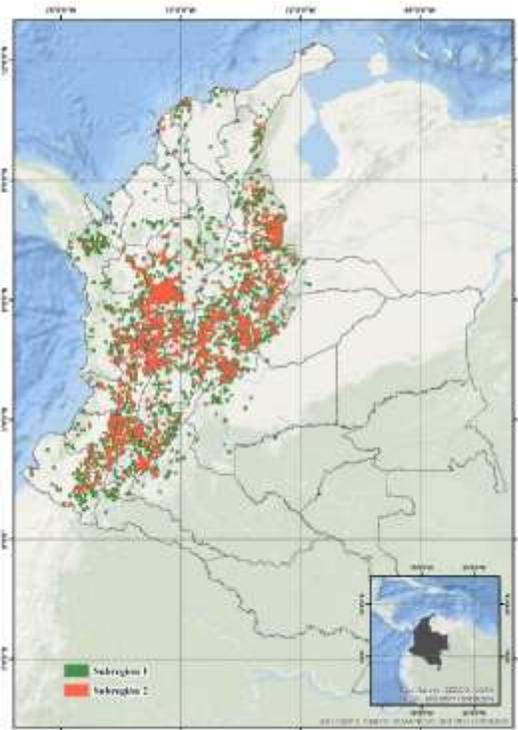


Figura 4-9. Mapa de densidad, Iteración 2.

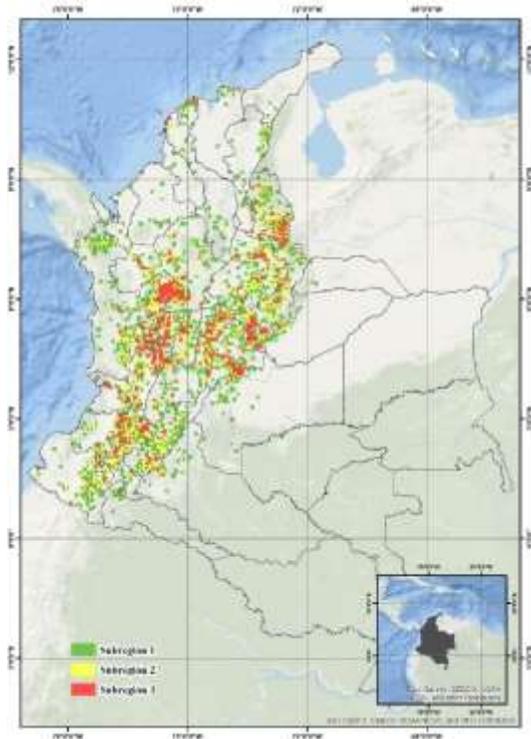


Figura 4-10. Mapa de densidad, Iteración 3.

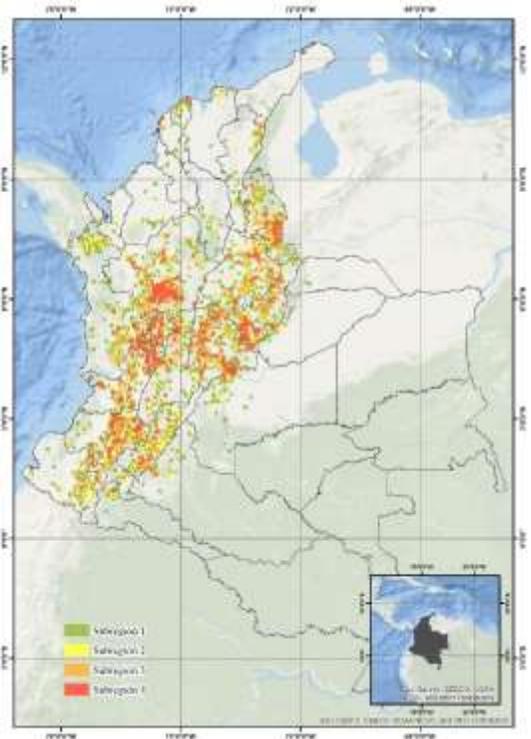


Figura 4-11. Mapa de densidad, Iteración 4.

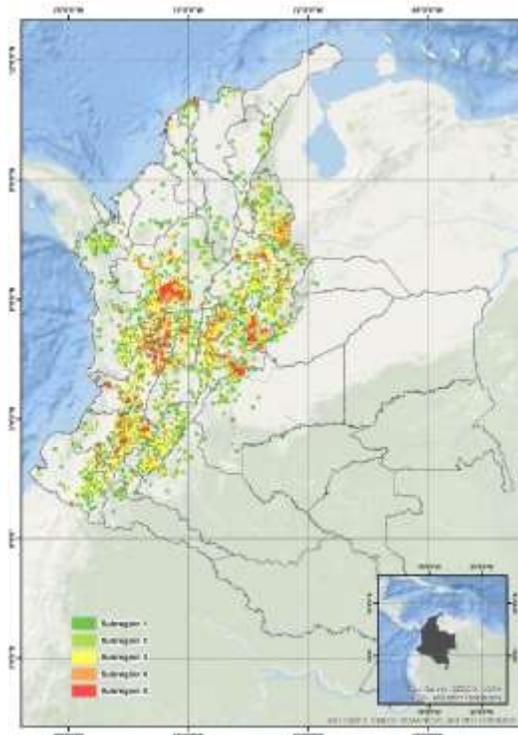


Figura 4-12. Mapa de densidad, Iteración 5.

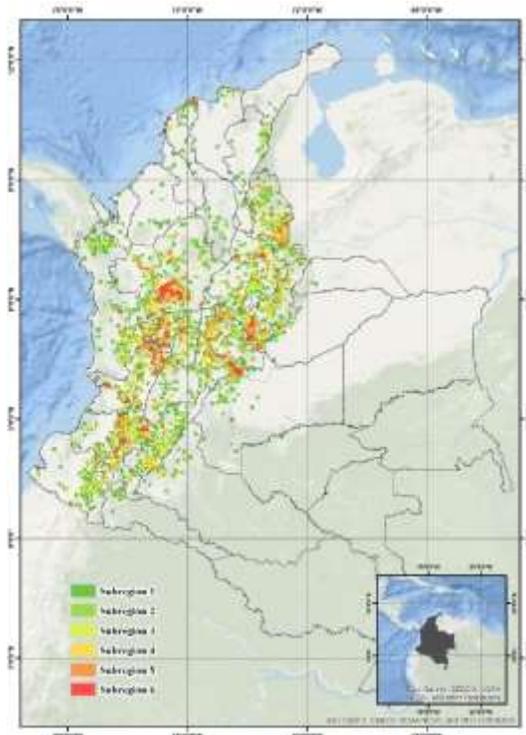


Figura 4-13. Mapa de densidad, Iteración 6.

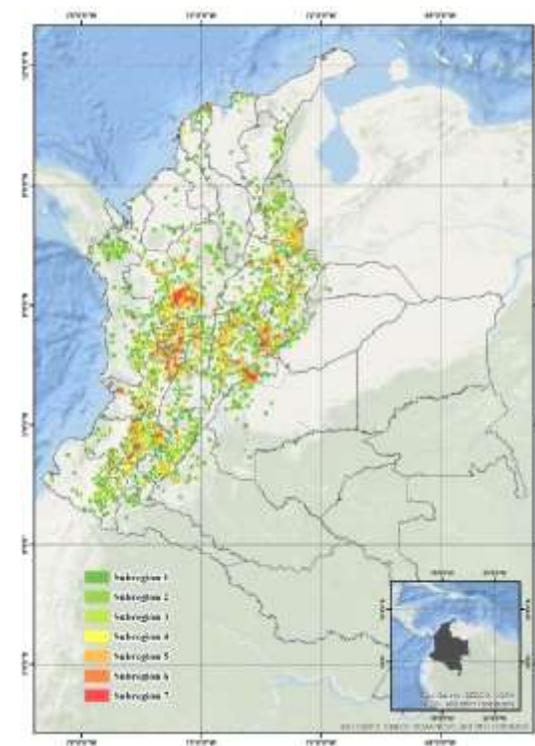


Figura 4-14. Mapa de densidad, Iteración 7.

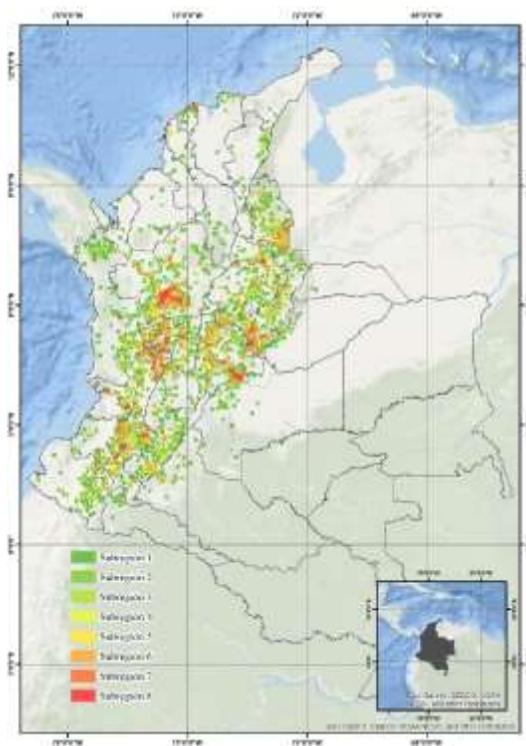


Figura 4-15. Mapa de densidad, Iteración 8.

El cálculo de las métricas de asociación por subregiones permitió focalizar el análisis, exclusivamente, en aquellas áreas en donde se reportan eventos en el inventario nacional de movimientos en masa depurado, permitiendo encontrar una mejor relación entre la precipitación y la ocurrencia de eventos a nivel anual. Por ejemplo, para la segunda iteración se tiene el siguiente comportamiento para cada una de las subregiones:



Figura 4-16. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Iteración 2 - Subregión 1.



Figura 4-17. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Iteración 2 - Subregión 2.

Podemos observar en las Figuras 4-16 y 4-17 que ambas subregiones guardan una relación estrecha entre el comportamiento de la precipitación y el número de eventos, agrupados de manera anual, sin embargo, la relación es más fuerte con la segunda subregión. Esta situación queda confirmada al observar los resultados del cálculo de las métricas de asociación (Tabla 4-5). Destaca el hecho que los valores de correlación se incrementan significativamente con respecto a los análisis preliminares a nivel nacional.

<i>SUBREGIÓN</i>	<i>COSENO SIMILARIDAD</i>	<i>PEARSON</i>	<i>p.Value (PEARSON)</i>	<i>KENDALL</i>	<i>p.Value (KENDALL)</i>	<i>SPEARMAN</i>	<i>p.Value (SPEARMAN)</i>
1	0,54	0,47	0,003	0,29	0,011	0,38	0,0166
2	0,78	0,69	1,38E-06	0,58	2,09E-07	0,76	1,66E-08

Tabla 4-4. Métricas de asociación para la segunda iteración, subregión 1 y 2.

Las gráficas para cada una de las iteraciones y subregiones, así como la tabla final del cálculo de las métricas de asociación, se exponen en el apartado de resultados. El resultado final de este proceso derivó en la obtención de un conjunto de eventos del inventario nacional de movimientos en masa que mejor representan el comportamiento con respecto de la precipitación CHIRPS V2.0. Los resultados completos por subregiones se muestran el capítulo de resultados.

4.4 Análisis de Registros de Precipitación Antecedente (ETAPA IV).

En este punto se empleó la información de la precipitación CHIRPS V2.0 (climatología y precipitación antecedente) y los registros del inventario nacional de movimientos en masa filtrados y producto de la definición de las subregiones que mejor se relacionan, a partir de las métricas de asociación. El objetivo de esta etapa era determinar las diferencias de comportamiento entre la climatología y la precipitación antecedente, para cada uno de los eventos reportados, a diferentes rezagos; 120, 90, 60, 30 y 15 días.

4.5 Definición y Evaluación del Modelo de Pronóstico (ETAPA V).

Para la definición del modelo se emplearon dos insumos principales; i) El Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa reclasificado y ii) La precipitación antecedente en términos de precipitación crítica, es decir, aquellas zonas en las que consistentemente se supera la climatología en los diferentes intervalos definidos. De igual manera se realizó una evaluación a los resultados arrojados por el modelo de identificación de zonas de riesgo.

5. Resultados

A continuación, se exponen los resultados de los análisis indicados en el capítulo anterior. Inicialmente se muestra un breve resumen del comportamiento de los deslizamientos de tierra en Colombia, a partir de la información reportada por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres -UNGRD- desde el año de 1998, con el ánimo de poner en contexto al lector sobre el comportamiento del fenómeno con información de atención de emergencias que efectivamente ocurrieron y sobre las cuales se realizaron inversiones de recursos (económicos y humanos). En la segunda parte se muestra la climatología diaria calculada a partir de la información proveniente de CHIRPS V2.0, para un año típico en formato raster. En la Tercera parte se detalla el inventario nacional de movimientos en masa depurado, a partir de los criterios expuestos. En la cuarta parte se muestran los resultados de la selección de subregiones y eventos más representativos a partir del análisis de densidad y la segmentación por cuantiles. Por último, en la quinta parte, se detallan los resultados de la evaluación de la precipitación rezagada y los resultados del modelo propuesto.

5.1 Deslizamientos de Tierra en Colombia.

Desde el año de 1998, las entidades encargadas de la atención y prevención de desastres en Colombia, incluida la actual Unidad Nacional para La Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD –, consolidan y publican periódicamente la información de atención a emergencias en el país, detallando las afectaciones sobre personas e infraestructura y los aportes económicos para la atención de cada emergencia, cuando haya lugar. A partir de esta información, de acceso público a través del sitio web de la entidad, fue posible realizar una caracterización del fenómeno a nivel nacional, discriminando por años, por entidades

territoriales, así como la afectación a la infraestructura, personas y los recursos invertidos en la atención de cada emergencia de manera consolidada.

5.1.1 Comportamiento Anual de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020.

El comportamiento del fenómeno de Deslizamientos de tierra en el país obedece, mayoritariamente, a la influencia de las temporadas de lluvia sobre los territorios, gobernadas por el movimiento de la zona de confluencia intertropical, que interactúan con las características orográficas y el uso del suelo a lo largo del territorio. En la Figura 5-1 se observa el comportamiento anual de los deslizamientos de tierra en Colombia, para el periodo 1998–2020, de acuerdo con los reportes de atención a emergencias de la UNGRD.

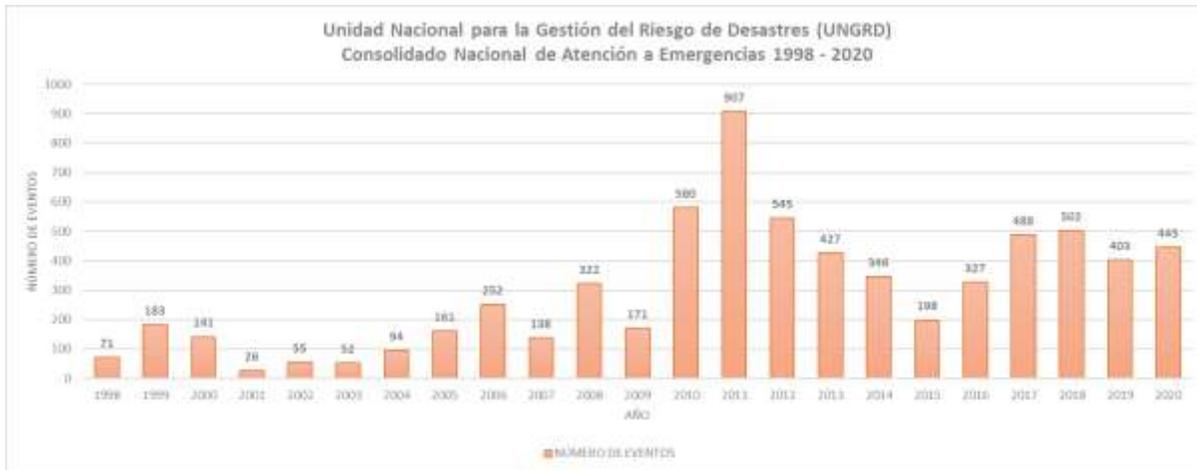


Figura 5-1. Comportamiento anual de los deslizamientos de tierra en Colombia, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

En total el consolidado reporta 6.834 emergencias atendidas, relacionadas con deslizamientos de tierra, por las instituciones del sistema de prevención y atención de desastres, en donde destacan los años 2010, 2011 y 2012 con 580, 907 y 545 registros respectivamente. Esta fuente de información no da cuenta de todos los eventos ocurridos en el país, refleja aquellos que, efectivamente, fueron atendidos por las instituciones que conforman el sistema.

5.1.2 Comportamiento Anual de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020 a Nivel Departamental y Municipal.

Los departamentos de Cundinamarca con 789 eventos, alrededor del 12% de los registros, Nariño con 743, Antioquia con 639, Santander con 517 y Risaralda con 492, concentran cerca del 50% de los eventos reportados por la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (Tabla 5-1). Diez departamentos concentran un poco más del 80% de los eventos de emergencias atendidas en el periodo de análisis. Se destaca que, todos los departamentos que concentran los eventos corresponden a la región Andina, que, por sus características orográficas, concentración de población y por las prácticas agropecuarias emergen como los más vulnerables a este tipo de fenómenos, en particular en las temporadas de lluvias características de esta región.

DEPARTAMENTO	NÚMERO DE EVENTOS	%	% ACUMULADO
CUNDINAMARCA	789	11,55%	11,55%
NARIÑO	743	10,87%	22,42%
ANTIOQUIA	639	9,35%	31,77%
SANTANDER	517	7,57%	39,33%
RISARALDA	492	7,20%	46,53%
TOLIMA	476	6,97%	53,50%
CAUCA	470	6,88%	60,37%
BOYACA	436	6,38%	66,75%
HUILA	365	5,34%	72,10%
NORTE DE SANTANDER	364	5,33%	77,42%
CALDAS	325	4,76%	82,18%
OTROS	1281	17,82%	100%

Tabla 5-1. Concentración de eventos de deslizamientos de tierra, discriminados por departamento, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

A nivel municipal, Bogotá con 122 eventos lidera el número de registros de emergencias atendidas en el periodo 1998 – 2020, le siguen Manizales con 113 eventos, Medellín con 106, Ibagué con 95 y Pereira con 92. Es importante resaltar que los ocho municipios que registran el mayor número de eventos son capitales de departamento, todos ubicados en la región Andina (Tabla 5-2).

MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	NÚMERO DE EVENTOS	%	% ACUMULADO
BOGOTÁ, D.C.	BOGOTÁ, D.C.	122	1,79%	1,79%
MANIZALES	CALDAS	113	1,66%	3,45%
MEDELLÍN	ANTIOQUIA	106	1,56%	5,01%
IBAGUÉ	TOLIMA	95	1,40%	6,41%
PEREIRA	RISARALDA	92	1,35%	7,76%
ARMENIA	QUINDÍO	87	1,28%	9,04%
QUIBDÓ	CHOCÓ	85	1,25%	10,29%
BUCARAMANGA	SANTANDER	68	1,00%	11,29%
DOSQUEBRADAS	RISARALDA	52	0,76%	12,05%
FLORENCIA	CAQUETÁ	48	0,71%	12,76%
GRAMALOTE	NORTE DE SANTANDER	47	0,69%	13,45%
MARSELLA	RISARALDA	46	0,68%	14,13%
OTROS	OTROS	5848	85,87%	100,00%

Tabla 5-2. Concentración de eventos de deslizamientos de tierra, discriminados por municipio, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

Espacialmente, en la Figura 5-2, se observa la distribución de eventos para el periodo de análisis a nivel municipal. Es de resaltar la concentración en los municipios que componen la región del eje cafetero, departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y nororiente del Tolima, así como la vertiente occidental de la cordillera oriental sobre el departamento de Cundinamarca y la vertiente oriental del mismo departamento sobre los municipios que comunican al centro del país con la región de los llanos orientales por el departamento del Meta. De igual forma, al sur del país, en los departamentos de Nariño y Cauca se observa una fuerte concentración de municipios que regularmente se ven afectados por este fenómeno.

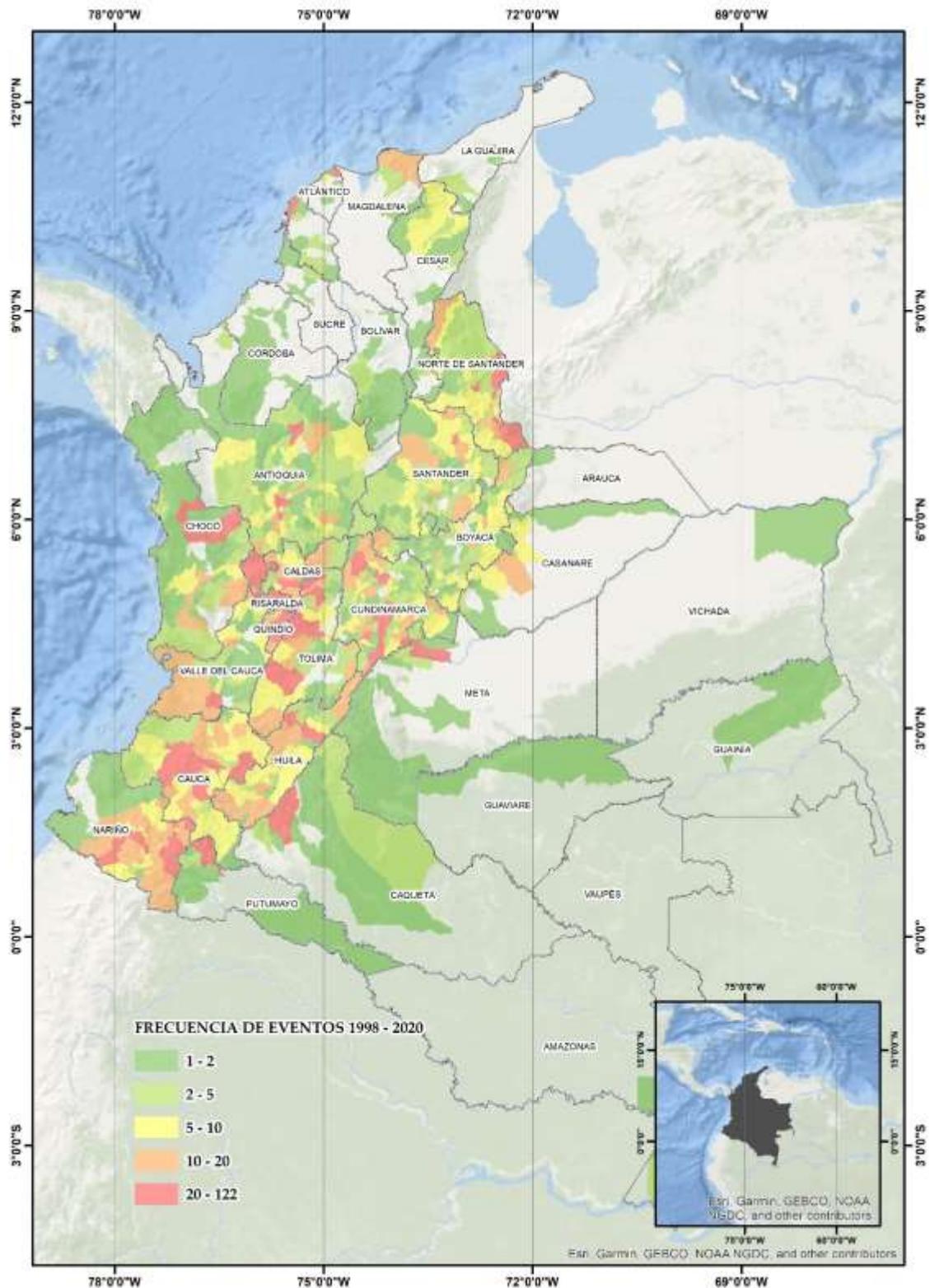


Figura 5-2. Distribución espacial de la concentración de eventos de deslizamientos de tierra, discriminados por municipio, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

5.1.3 Comportamiento Mensual de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020 y su Relación con la Climatología.

A nivel nacional, la distribución mensual de ocurrencia de deslizamientos reportados por la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 presenta dos periodos de concentración en un típico comportamiento bimodal, característico de la región andina, así; un primer pico para los meses de marzo, abril y mayo y un segundo pico para los meses de octubre, noviembre y diciembre, siendo los meses de abril y noviembre los de mayor número de reportes (Figura 5-3).



Figura 5-3. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, a nivel nacional, conforme información de la UNGRD para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

Al establecer la relación entre los municipios más afectados (las ocho capitales de departamento reportadas anteriormente) con la climatología de la precipitación, empleando la climatología del IDEAM 1981 – 2010 (IDEAM, 2022), se obtiene una relación directa entre el comportamiento de los volúmenes de precipitación y la ocurrencia de eventos. De la Figura 5-4 a 5-11 se observa el comportamiento de dichos municipios, en donde se exhibe el comportamiento de ambas variables discriminados mensualmente.



Figura 5-4. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Bogotá, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología de la precipitación 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).

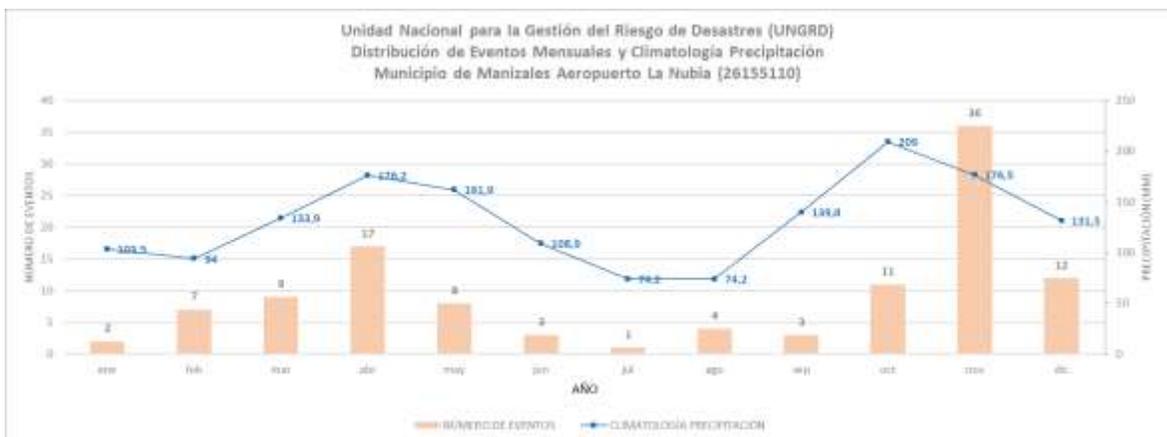


Figura 5-5. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Manizales, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).



Figura 5-6. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Medellín, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).



Figura 5-7. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Ibagué, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).



Figura 5-8. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Pereira, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).

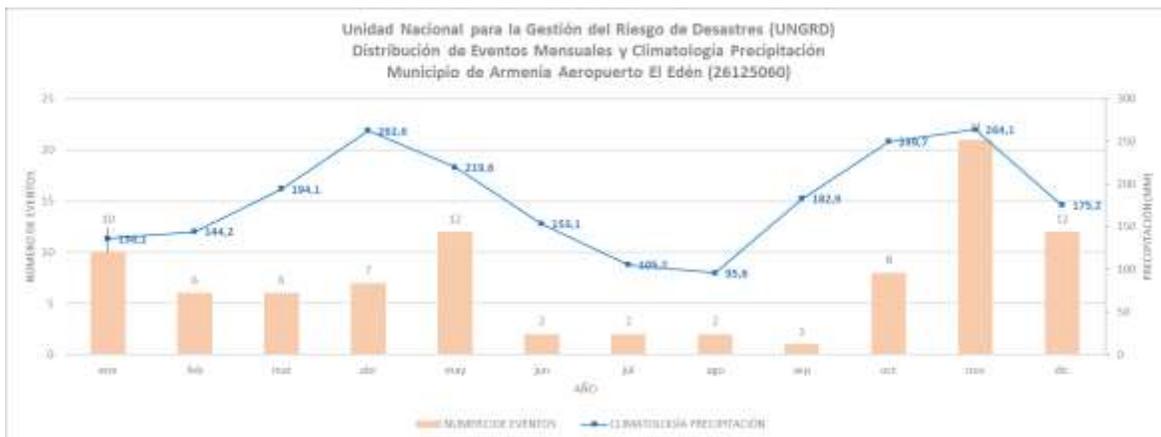


Figura 5-9. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Armenia, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).

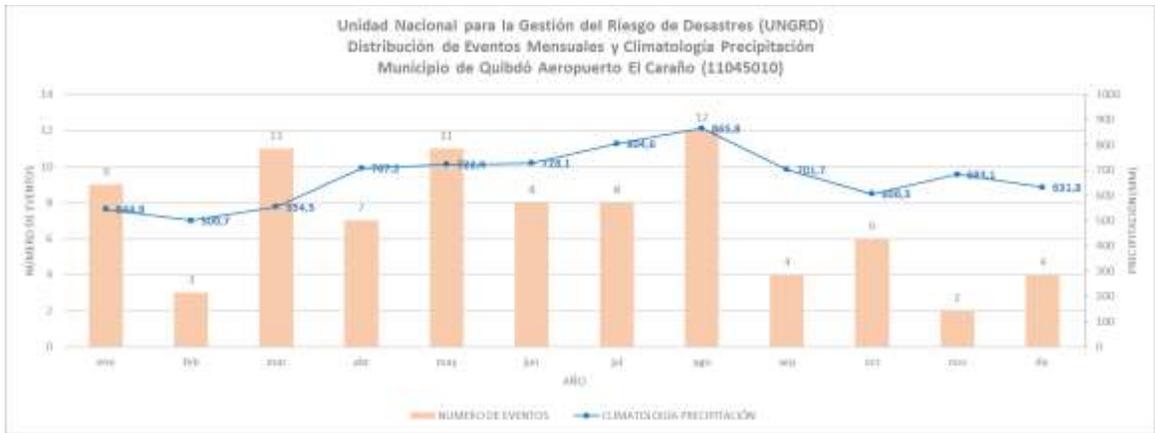


Figura 5-10. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Quibdó, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).



Figura 5-11. Comportamiento mensual de los reportes de eventos de deslizamientos de tierra, Municipio de Bucaramanga, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).

En la Tabla 5-3 se observa el comportamiento de la correlación de Pearson entre los registros agregados mensuales de deslizamientos de tierra, a nivel municipal (UNGRD, 2022) y la climatología de la precipitación (IDEAM, 2022). En términos generales, se evidencia una relación directa entre el volumen de la precipitación y el número de eventos, es decir, una mayor ocurrencia de eventos en la medida que se incrementa el volumen de precipitación. El municipio de Ibagué es el que mejor representa esta relación, con un valor de coeficiente de correlación de Pearson de 0.82, seguido por Medellín y Bogotá con 0.8 y 0.76 respectivamente. El menor coeficiente de correlación el municipio de Quibdó con un valor de 0.34. Se emplearon como referencia las estaciones de los aeropuertos de los centros urbanos, que por sus características de operación cuentan todos los días del año con monitoreo, excepto para la ciudad de Bucaramanga, para la cual se usó la de la

Universidad Industrial de Santander, debido a que su aeropuerto se encuentra por fuera del perímetro urbano.

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE ESTACIÓN	MUNICIPIO	CORRELACIÓN PEARSON (EVENTOS – PRECIPITACIÓN)
21205790	APTO EL DORADO	BOGOTA DC	0,76
26155110	APTO LA NUBIA	MANIZALES	0,62
27015070	A. OLAYA HERRERA	MEDELLIN	0,80
21245040	APTO PERALES	IBAGUE	0,82
26135040	APTO MATECANA	PEREIRA	0,72
26125060	APTO EL EDEN	ARMENIA	0,60
11045010	APTO EL CARANO	QUIBDO	0,34
23195040	UNIV IND SANTANDER	BUCARAMANGA	0,42

Tabla 5-3. Coeficiente de correlación de Pearson entre los reportes de eventos mensuales de deslizamientos de tierra para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022) y la climatología 1981 – 2010 (IDEAM, 2022).

5.1.4 El Impacto de los Deslizamientos de Tierra en Colombia 1998 – 2020.

A lo largo del periodo 1998 – 2020 los deslizamientos de tierra en Colombia han cobrado la vida de cientos de personas, generado afectaciones sobre la infraestructura de transporte terrestre nacional, transformado los paisajes, ecosistemas y sistemas productivos y económicos de las zonas afectadas, así como la movilización de millones de pesos en recursos para la atención de las emergencias generadas.

Discriminados de manera anual para el periodo 1998 – 2020 encontramos que 240.454 familias se han visto afectadas por fenómenos de deslizamientos de tierra en Colombia, se han reportado 1875 personas fallecidas y 1895 personas heridas (UNGRD, 2022). En la Figura 5-12 se observa el comportamiento de estas variables en el tiempo, destaca para los años 2010 y 2011 el incremento en las familias afectadas, 73.888 y 52.425

respectivamente, así como el número de personas fallecidas de 218 y 237 respectivamente. En la Tabla 2-4 se observan estos valores discriminados por años.

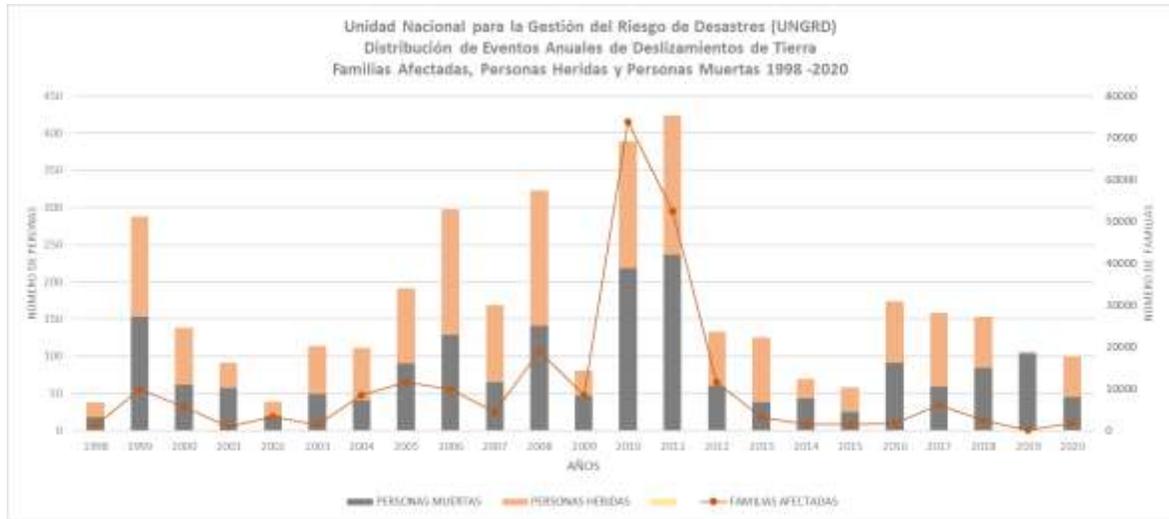


Figura 5-12. Comportamiento anual de los reportes de familias y personas afectadas, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

AÑO	FAMILIAS AFECTADAS	PERSONAS FALLECIDAS	PERSONAS HERIDAS
1998	1.145	18	20
1999	9.837	153	135
2000	5.722	62	76
2001	810	57	34
2002	3.408	20	19
2003	1.394	49	65
2004	8.479	41	70
2005	11.620	90	101
2006	9.873	129	169
2007	4.510	65	104
2008	18.949	141	182
2009	8.470	47	34
2010	73.888	218	171
2011	52.425	237	187
2012	11.566	60	73
2013	3.242	38	87
2014	1.497	43	26
2015	1.517	25	33
2016	1.729	91	83
2017	6.113	59	99
2018	2.428	84	69
2019	85	103	3
2020	1.747	45	55
TOTAL	240.454	1.875	1.895

Tabla 5-4. Comportamiento anual de los reportes de familias y personas afectadas, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

Por otra parte, la afectación sobre viviendas en el mismo periodo de registros muestra que 124.786 sufrieron algún tipo de daño en su estructura y 17.971 fueron completamente destruidas. Los años de mayor impacto sobre las viviendas corresponde con el periodo 2010-2011 con 45.162 y 32.588 viviendas afectadas, respectivamente. La infraestructura vial también se vio fuertemente impactada, en total 5.522 vías y 358 puentes vehiculares sufrieron algún nivel de daño en su estructura, así como la infraestructura de salud y educación; 722 centros educativos y 80 centros de salud sufrieron algún nivel de afectación en su infraestructura. En la Tabla 5-5 se observa el resumen del comportamiento de las afectaciones sobre viviendas e infraestructura.

AÑO	VIVIENDAS AFECTADAS	VIVIENAS DESTRUIDAS	VIAS AFECTADAS	PUENTES VEHICULARES AFECTADOS	CENTROS EDUCATIVOS AFECTADOS	CENTROS DE SALUD AFECTADOS
1998	262	216	43	6	3	0
1999	2.600	732	159	40	17	1
2000	1.307	451	48	11	19	1
2001	243	110	19	6	1	1
2002	680	304	37	3	1	0
2003	511	240	4	1	1	0
2004	602	138	27	4	1	0
2005	2.186	957	121	20	9	0
2006	4.125	830	309	4	23	1
2007	2.702	425	54	3	6	1
2008	7.287	1.334	182	6	42	3
2009	4.294	505	79	10	5	0
2010	45.162	4.997	650	43	239	7
2011	32.588	3.871	668	30	137	9
2012	9.381	638	1.079	39	137	14
2013	1.796	222	311	10	13	1
2014	929	105	230	17	8	1
2015	619	198	162	20	6	1
2016	388	76	196	9	8	1
2017	4.468	257	418	36	19	0
2018	861	109	445	13	11	1
2019	388	1.118	8	15	10	35
2020	1.407	138	273	12	6	2
TOTAL	124.786	17.971	5.522	358	722	80

Tabla 5-5. Comportamiento anual de los reportes de afectación sobre viviendas e infraestructura, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020 (UNGRD, 2022).

Finalmente, en términos económicos, teniendo en cuenta exclusivamente el costo de la atención de cada emergencia y transformando sus valores a valor presente, en función de

la inflación anual a precios del 2020, tenemos que, en total para el periodo 1998 – 2020, el país ha invertido 109.560.385.490,45 millones de pesos, de los cuales los años 2010, 2011 y 2012 corresponden al mayor aporte de recursos económicos con cerca de 38% del total de los recursos para el periodo de análisis, que ascienden a 41.223.779.308,83 millones de pesos.

AÑO	APORTE	INFLACIÓN ANUAL (%)	APORTE VALOR PRESENTE A 2020
1998	\$ 121.344.632,70	16,7	\$ 274.408.752,39
1999	\$ 490.134.199,70	9,23	\$ 1.026.537.067,85
2000	\$ 438.825.196,00	8,75	\$ 878.571.924,91
2001	\$ 77.252.694,20	7,65	\$ 147.908.008,32
2002	\$ 181.398.316,60	6,99	\$ 333.428.245,74
2003	\$ 136.861.070,00	6,49	\$ 241.997.743,97
2004	\$ 363.689.869,60	5,5	\$ 619.472.954,89
2005	\$ 2.507.135.597,00	4,85	\$ 4.132.511.604,54
2006	\$ 3.979.224.826,00	4,48	\$ 6.365.963.876,63
2007	\$ 3.731.921.315,00	5,69	\$ 5.803.137.644,83
2008	\$ 4.359.581.280,00	7,67	\$ 6.531.088.715,57
2009	\$ 2.093.061.497,00	2	\$ 2.975.077.611,84
2010	\$ 2.157.245.320,00	3,17	\$ 3.023.163.591,45
2011	\$ 10.378.383.648,00	3,73	\$ 14.215.272.082,67
2012	\$ 9.136.235.337,00	2,44	\$ 12.173.119.963,02
2013	\$ 11.342.039.192,00	1,94	\$ 14.835.387.263,14
2014	\$ 6.923.327.774,00	3,66	\$ 8.921.400.169,58
2015	\$ 802.330.148,60	6,77	\$ 1.004.517.346,05
2016	\$ 170.732.624,50	5,75	\$ 202.198.647,20
2017	\$ 6.361.395.216,00	4,09	\$ 7.168.020.129,39
2018	\$ 3.959.623.911,00	3,18	\$ 4.299.755.604,95
2019	\$ 8.960.096.913,00	3,8	\$ 9.444.838.155,99
2020	\$ 4.864.293.264,00	1,61	\$ 4.942.608.385,55
TOTAL	\$ 83.536.133.841,90		\$ 109.560.385.490,45

Tabla 5-6. Comportamiento anual de los aportes económicos para la atención e las emergencias, a nivel nacional, para el periodo 1998 – 2020, a precios de 2020 (UNGRD, 2022).

5.2 Resultados Climatología CHIRPS V2.0.(ETAPA I).

Se obtuvieron 366 archivos con la información climatológica diaria en formato GeoTiff, que consigan la precipitación media diaria multianual 1981 – 2019. Cada uno de los archivos obtenidos se nombró conforme la siguiente nomenclatura:

1981-2019.MM.DD.tif

En donde;

1981-2019= Representa el periodo de información empleada.

MM= El mes de correspondiente al cálculo realizado.

DD = El día de correspondiente al cálculo realizado.

tif = Extensión del archivo en formato GeoTif.

La Figura 5-13 muestra la climatología diaria para el primer día de cada mes del año típico climatológico creado.

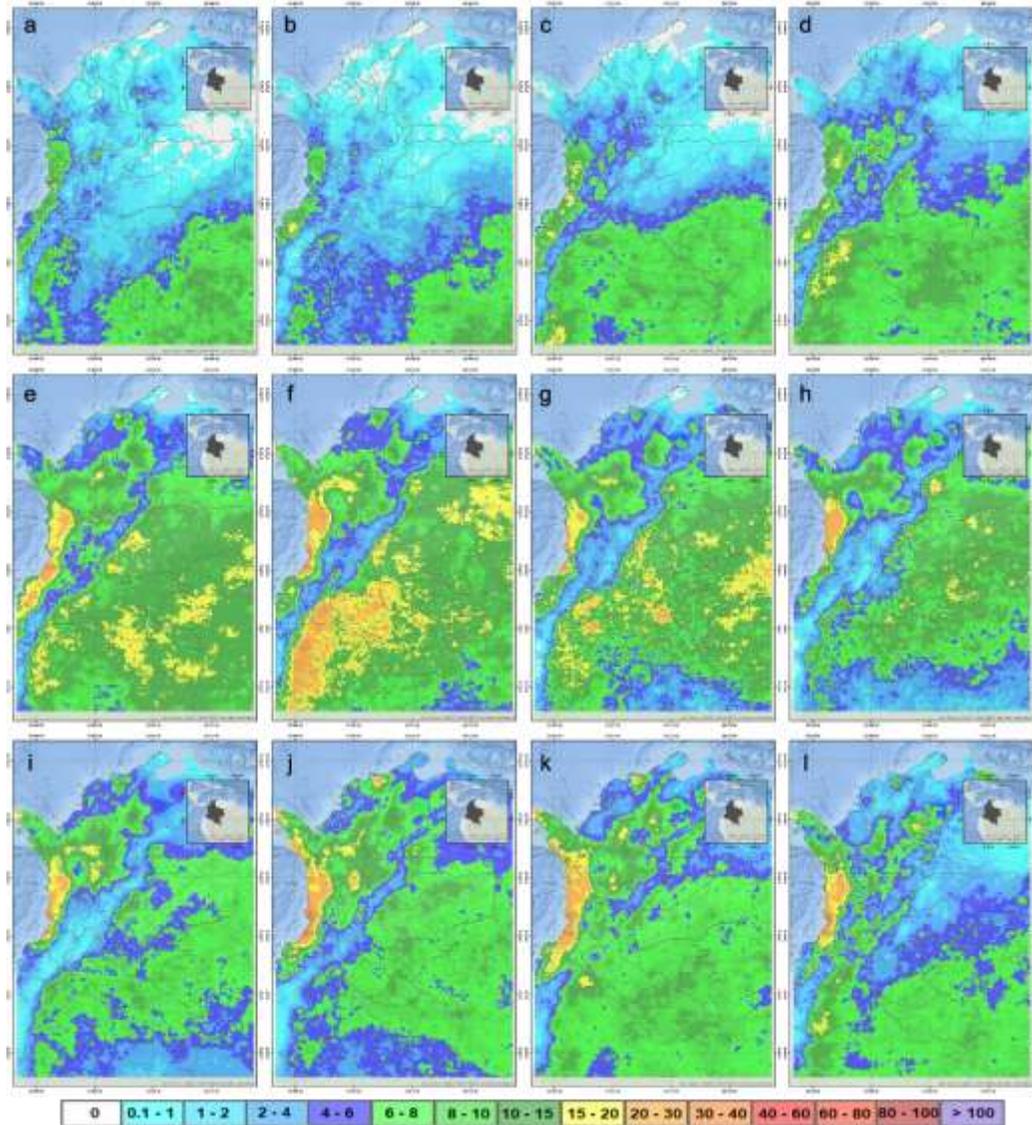


Figura 5-13. Climatología diaria 1981 - 2019 para los primeros días de cada mes; (a) enero 01, (b) febrero 01, (c) marzo 01, (d) abril 01, (e) mayo 01, (f) junio 01, (g) julio 01, (h) agosto 01, (i) septiembre 01, (j) octubre 01, (k) noviembre 01 y (l) diciembre 01. Precipitación expresada en mm / día.

Cada archivo cuenta con una resolución espacial de 0.05° (5km X 5Km) y contiene 243 x 234 píxeles, correspondientes al área completa del territorio nacional continental, los volúmenes de precipitación están expresados en mm/día. Esta información se constituyó en la base climatológica sobre la cual se realizaron los cálculos de métricas de asociación para la precipitación antecedente en los diferentes intervalos definidos.

5.3 Resultados Depuración del Inventario Nacional de Movimientos en Masa del SGC (ETAPA II)

Como se expuso en la metodología, esta etapa consistió en la depuración del inventario nacional de movimientos en masa, una vez identificadas las posibles inconsistencias sobre el conjunto de datos, a partir de la aplicación de dos filtros; uno temporal y otro espacial referente a la duplicidad de eventos en la misma localización y fecha. El resultado final de esta depuración dejó un total de 8.132, distribuidos a lo largo del territorio nacional, predominando la concentración de eventos sobre la región andina (Figura 5-14). En la Tabla 5-7 se observa la distribución de eventos a nivel departamental.

DEPARTAMENTO	NÚMERO DE EVENTOS	%	% ACUMULADO
ANTIOQUIA	1.831	22,52%	22,52%
CAUCA	844	10,38%	32,89%
BOYACÁ	739	9,09%	41,98%
CUNDINAMARCA	619	7,61%	49,59%
SANTANDER	555	6,82%	56,42%
NORTE DE SANTANDER	523	6,43%	62,85%
VALLE DEL CAUCA	484	5,95%	68,80%
CALDAS	401	4,93%	73,73%
CHOCÓ	380	4,67%	78,41%
RISARALDA	322	3,96%	82,37%
HUILA	272	3,34%	85,71%
TOLIMA	271	3,33%	89,04%
META	227	2,79%	91,83%
QUINDÍO	188	2,31%	94,15%
NARIÑO	138	1,70%	95,84%
BOLÍVAR	70	0,86%	96,70%
CESAR	61	0,75%	97,45%
ATLÁNTICO	51	0,63%	98,08%
CAQUETÁ	38	0,47%	98,55%
CASANARE	31	0,38%	98,93%
PUTUMAYO	28	0,34%	99,27%
MAGDALENA	26	0,32%	99,59%
CÓRDOBA	14	0,17%	99,77%
BOGOTÁ	6	0,07%	99,84%
ARAUCA	4	0,05%	99,89%
SUCRE	4	0,05%	99,94%
LA GUAJIRA	3	0,04%	99,98%

<i>GUAINÍA</i>	1	0,01%	99,99%
<i>GUAVIARE</i>	1	0,01%	100,00%
	8.132	100,00%	

Tabla 5-7. Distribución departamental de eventos registrados en el Inventario Nacional de Movimientos en Masa filtrado para el periodo 1981 – 2019.

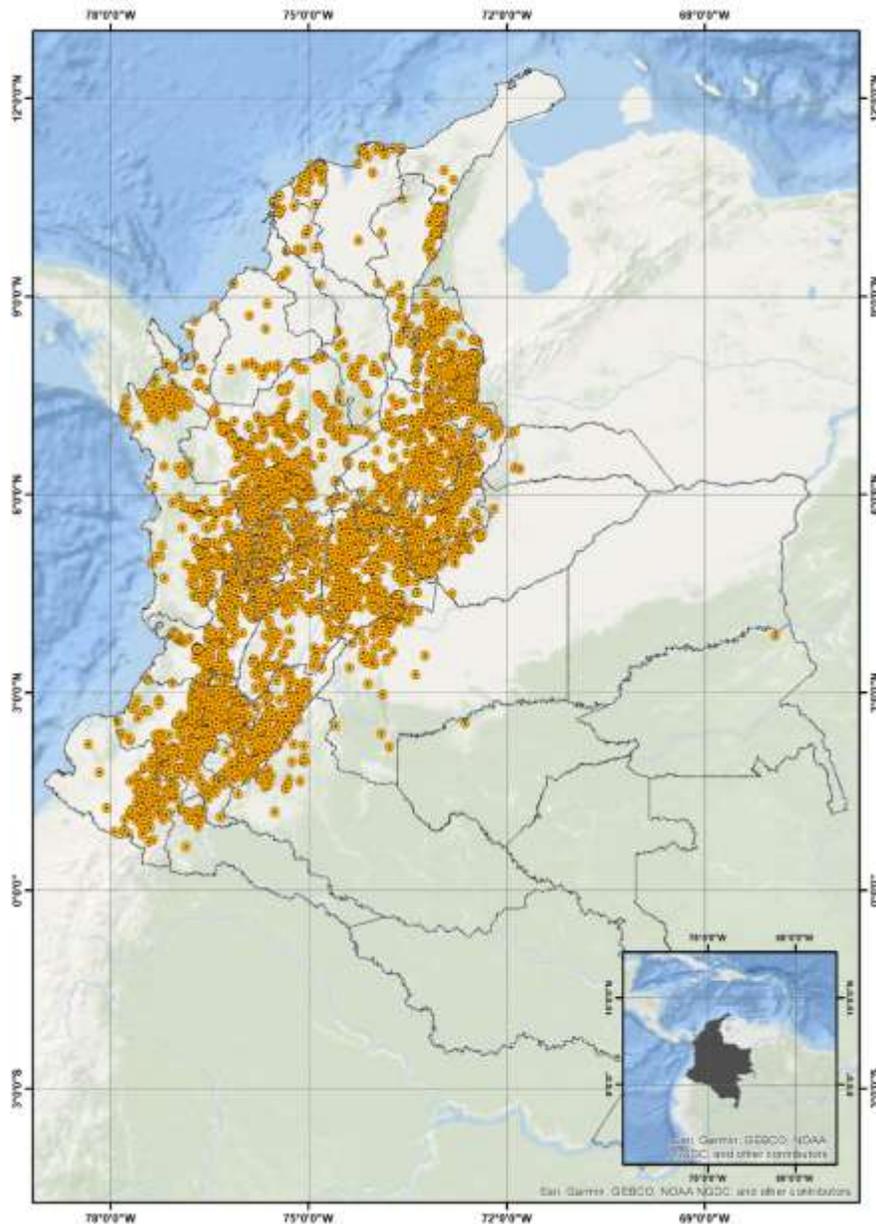


Figura 5-14. Distribución espacial de los eventos registrados en el Inventario Nacional de Movimientos en Masa depurado.

Cerca del 50% de los eventos se concentran en cuatro departamentos; Antioquia (22.52%), Cauca (10,38%), Boyacá (9,09%) y Cundinamarca (7,61%). El comportamiento anual para cada uno de estos departamentos se muestra en las Figuras 5-15 a 5-18.



Figura 5-15. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Antioquia.



Figura 5-16. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Cauca.



Figura 5-17. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Boyacá.



Figura 5-18. Precipitación CHIRPS V2.0 Vs Número de Eventos, Cundinamarca.

En las métricas de similaridad (Tabla 5-8), para los cuatro departamentos indicados anteriormente, se evidencian que Antioquia y Cundinamarca representan de mejor manera la relación entre número de eventos y precipitación CHIRPS V2.0.

DEPARTAMENTO	COSENO SIMILARIDAD	PEARSON	p.Value (PEARSON)	KENDALL	p.Value (KENDALL)	SPEARMAN	p.Value (SPEARMAN)
ANTIOQUIA	0,77	0,59	8,07E-05	0,41	2,12E-04	0,62	2,22E-05
CAUCA	0,55	0,37	2,21E-02	0,33	3,00E-03	0,48	2,03E-03
BOYACÁ	0,72	0,34	3,38E-02	0,30	7,39E-03	0,40	1,15E-02
CUNDINAMARCA	0,66	0,51	9,34E-04	0,39	5,75E-04	0,53	4,55E-04

Tabla 5-8. Métricas de similaridad; Antioquia, Cauca, Boyacá y Cundinamarca.

Sin embargo, es importante mencionar que en este primer análisis se empleó el valor de la precipitación total anual a nivel departamental, por lo cual se están incluyendo áreas que, aunque no reportan eventos, si suman en la totalización de la precipitación. En virtud de esto, se consideró necesario realizar un análisis más focalizado en donde se emplean los análisis de densidad, expuestos en la metodología, con el objetivo de identificar aquellas áreas de mayor concentración de eventos y de mejor relación con respecto a los valores de precipitación, sin incluir aquellos valores de precipitación en sectores sin reporte de eventos. Para esto, se definieron las regiones de análisis, a través de ocho iteraciones, que se describen a continuación.

Cada región de análisis se dividió en subregiones, en función de cuantiles proporcionales a cada iteración; un cuantil para la primera iteración, dos cuantiles para la segunda, tres para la tercera y así sucesivamente. De esta manera, fue posible obtener solo aquellas áreas (subregiones) en las cuales, efectivamente, se presentan eventos y solo en estas

subregiones totalizar la precipitación. En la Figura 5-19 se observa el comportamiento de la precipitación al interior de cada una de las subregiones de la iteración 3, de igual forma, a manera de ejemplo, en la Figura 5-20 se observa para las subregiones de la iteración 5.

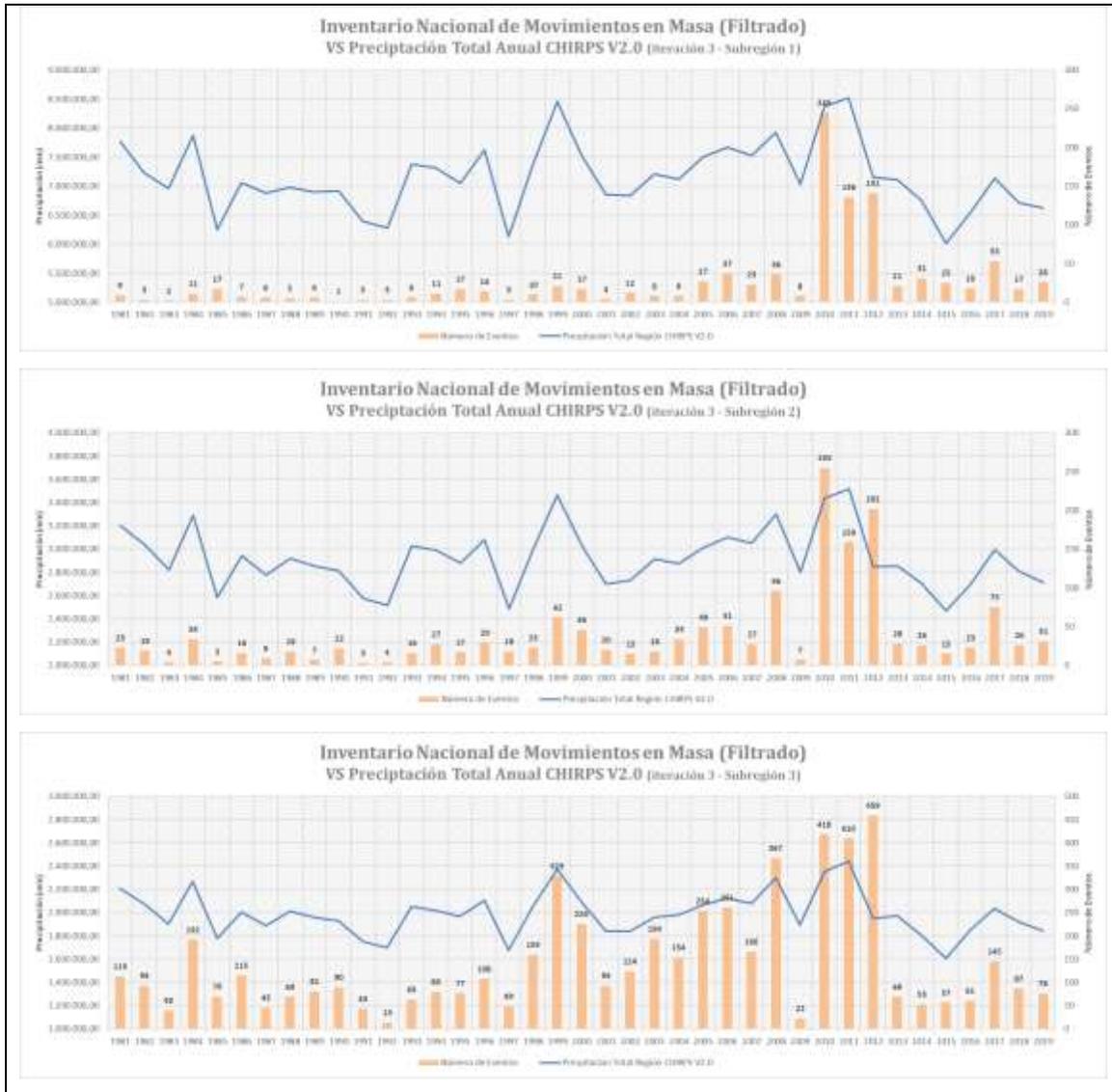


Figura 5-19. Comportamiento de la precipitación Vs Número de eventos registrados en la iteración 3, subregiones; 1, 2 y 3.

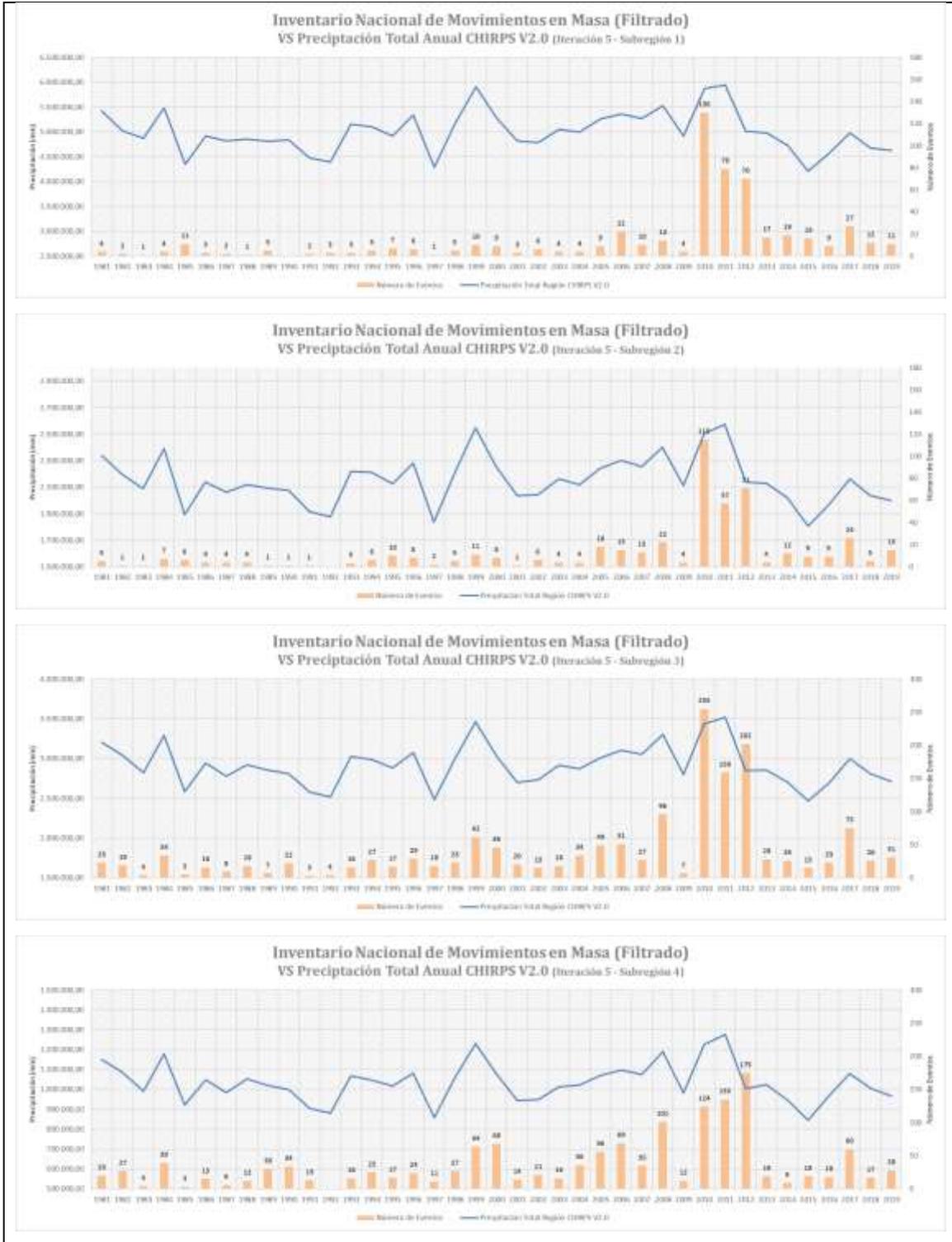




Figura 5-20. Comportamiento de la precipitación Vs número de eventos registrados en la iteración 5, subregiones; 1, 2, 3, 4 y 5.

Fueron calculadas las métricas de similaridad para cada una de las subregiones de las ocho iteraciones, con el objetivo de determinar aquella que mejor representa la relación entre la precipitación y el número de eventos. La Tabla 5-9 muestra el resultado de las métricas calculadas, en donde: ITERACIÓN hace referencia al número de cada una de las iteraciones realizadas, SUBREGIÓN hace referencia a la subdivisión al interior de cada iteración (subregiones), COSENO SIMILARIDAD hace referencia a el cálculo de esta métrica para cada subregión, PEARSON, KENDALL y SPEARMAN hacen referencia a cada una de las correlaciones calculadas, los campos p_Value contienen el valor del estadístico de prueba para cada una de las correlaciones, TOTAL EVENTOS SIMMA SUBREGIÓN indican el número de eventos al interior de cada una de las subregiones, TOTAL EVENTOS representa el total de registros dentro de cada iteración y PORCENTAJE EVENTOS SIMMA SUBREGIÓN indican la proporción de eventos al interior de cada subregión.

ITERACIÓN	SUBREGIÓN	COSENO SIMILARIDAD	PEARSON	p.Value (PEARSON)	KENDALL	p.Value (KENDALL)	SPEARMAN	p.Value (SPEARMAN)	TOTAL EVENTOS SIMMA SUBREGIÓN	TOTAL EVENTOS	% EVENTOS SIMMA SUBREGIÓN
1	1	0,74	0,59	8,27E-05	0,50	8,48E-06	0,69	1,42E-06	8132	8132	100,0
2	1	0,54	0,47	2,50E-03	0,29	1,05E-02	0,38	1,66E-02	1048	8132	12,9
	2	0,78	0,69	1,38E-06	0,58	2,09E-07	0,76	1,66E-08	7084		87,1
3	1	0,54	0,47	2,50E-03	0,29	1,05E-02	0,38	1,66E-02	1048	8132	12,9
	2	0,64	0,56	2,39E-04	0,47	2,51E-05	0,64	1,13E-05	1559		19,2
	3	0,82	0,72	2,69E-07	0,55	7,48E-07	0,74	7,29E-08	5525		67,9
4	1	0,53	0,46	3,92E-03	0,21	6,93E-02	0,27	1,00E-01	550	8132	6,8
	2	0,55	0,46	3,57E-03	0,30	9,13E-03	0,42	8,77E-03	498		6,1
	3	0,64	0,56	2,39E-04	0,47	2,51E-05	0,64	1,13E-05	1559		19,2
	4	0,82	0,72	2,69E-07	0,55	7,48E-07	0,74	7,29E-08	5525		67,9
5	1	0,53	0,46	3,92E-03	0,21	6,93E-02	0,27	1,00E-01	550	8132	6,8
	2	0,55	0,46	3,57E-03	0,30	9,13E-03	0,42	8,77E-03	498		6,1
	3	0,64	0,56	2,39E-04	0,47	2,51E-05	0,64	1,13E-05	1559		19,2

	4	0,73	0,58	1,45E-04	0,50	1,07E-05	0,68	2,82E-06	1419	17,4
	5	0,83	0,76	2,24E-08	0,57	2,91E-07	0,76	2,37E-08	4106	50,5
6	1	0,53	0,46	3,92E-03	0,21	6,93E-02	0,27	1,00E-01	550	6,8
	2	0,55	0,46	3,57E-03	0,30	9,13E-03	0,42	8,77E-03	498	6,1
	3	0,64	0,56	2,10E-04	0,49	1,62E-05	0,66	4,83E-06	1287	15,8
	4	0,67	0,55	3,71E-04	0,51	7,69E-06	0,69	1,61E-06	900	11,1
	5	0,79	0,61	4,82E-05	0,42	2,25E-04	0,58	1,58E-04	1204	14,8
	6	0,84	0,77	1,38E-08	0,59	1,16E-07	0,77	9,48E-09	3693	45,4
7	1	0,53	0,46	3,92E-03	0,21	6,93E-02	0,27	1,00E-01	550	6,8
	2	0,55	0,46	3,57E-03	0,30	9,13E-03	0,42	8,77E-03	498	6,1
	3	0,60	0,52	6,83E-04	0,41	2,76E-04	0,58	1,18E-04	854	10,5
	4	0,69	0,55	4,08E-04	0,44	1,36E-04	0,60	8,26E-05	705	8,7
	5	0,73	0,58	1,45E-04	0,50	1,07E-05	0,68	2,82E-06	1419	17,4
	6	0,80	0,70	6,64E-07	0,56	5,71E-07	0,73	1,15E-07	1140	14,0
	7	0,84	0,76	1,90E-08	0,59	1,24E-07	0,78	4,85E-09	2966	36,5
8	1	0,53	0,46	3,92E-03	0,21	6,93E-02	0,27	1,00E-01	550	6,8
	2	0,55	0,46	3,57E-03	0,30	9,13E-03	0,42	8,77E-03	498	6,1
	3	0,60	0,52	6,83E-04	0,41	2,76E-04	0,58	1,18E-04	854	10,5
	4	0,71	0,57	2,15E-04	0,48	3,95E-05	0,62	3,72E-05	433	5,3
	5	0,65	0,48	3,10E-03	0,26	3,52E-02	0,36	3,15E-02	272	3,3
	6	0,73	0,58	1,45E-04	0,50	1,07E-05	0,68	2,82E-06	1419	17,4
	7	0,80	0,70	6,64E-07	0,56	5,71E-07	0,73	1,15E-07	1140	14,0
	8	0,84	0,76	1,90E-08	0,59	1,24E-07	0,78	4,85E-09	2966	36,5

Tabla 5-9. Cálculo de métricas de similitud, entre la precipitación Vs número de eventos, por iteración y subregión.

De la Tabla 5-9 se puede evidenciar que, consistentemente, las métricas de similitud se incrementan en la medida que las iteraciones lo hacen, es decir, mientras que las zonas de concentración de los registros de deslizamientos se hacen más detalladas, la relación precipitación y número de eventos se incrementa. De igual manera, al interior de cada iteración los valores de las métricas de similitud aumentan progresivamente dentro de las subregiones, siendo la última de cada iteración la que representa dicha relación (valores resaltados en rojo), adicionalmente es la que concentra el mayor número de eventos. Se puede observar que a partir de la iteración 5 los valores de las diferentes métricas se estabilizan y sus fluctuaciones son menores, esto se puede evidenciar en la Figura 5-21. En virtud de esto, para la siguiente etapa de análisis de los registros de precipitación antecedente, se optó por emplear exclusivamente los registros de este nivel de subregión. En la Figura 5-22 se observa la distribución espacial de las subregiones de la iteración 5 y en la Figura 5-23 el detalle de solamente la subregión 5 de la misma iteración.



Figura 5-21. Comportamiento de las métricas de similitud entre la precipitación Vs número de eventos registrados, para la última subregión de cada iteración.

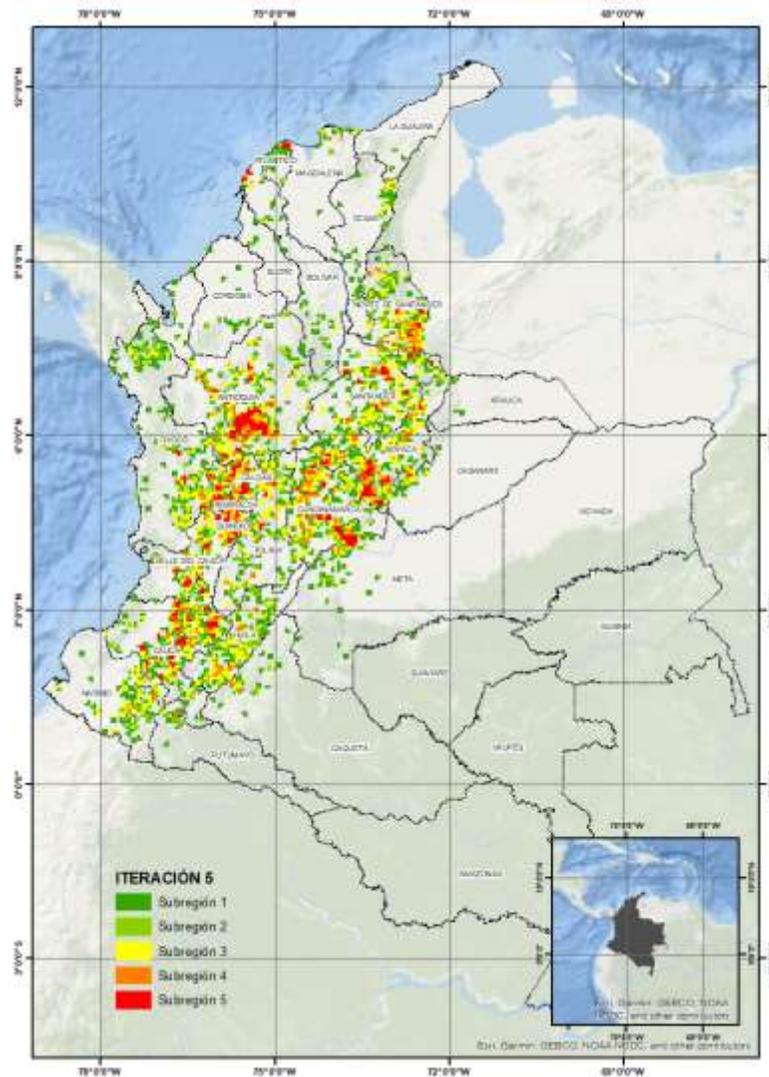


Figura 5-22. Subregiones de densidad de eventos de deslizamientos determinadas para la Iteración 5.

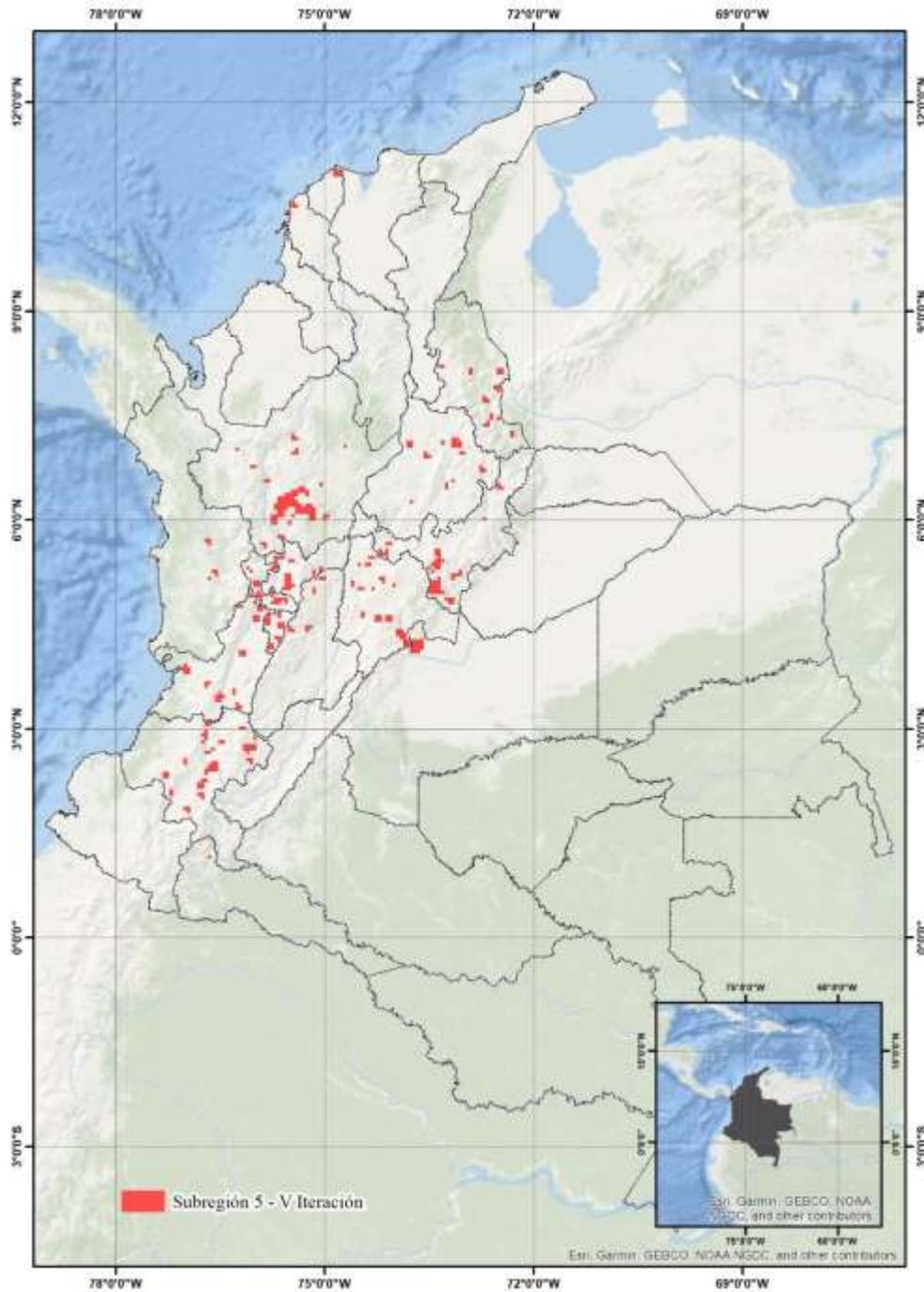


Figura 5-23. Subregión 5 de densidad de eventos de deslizamientos determinadas para la Iteración 5.

Finalmente se obtuvieron 4106 registros que representan de la mejor manera la relación de la precipitación y el número de eventos, en términos de las métricas de similitud, los cuales serán empleados para realizar el análisis de precipitación antecedente que se expone a continuación.

5.4 Análisis de Precipitación Antecedente.

En los apartados anteriores los análisis de la precipitación y los eventos de deslizamientos se han realizado agrupando zonas, ya sean departamentos, municipios o subregiones, agregados en periodos de un año, con el objetivo de identificar el conjunto de eventos que mejor representa esta relación. Estos procesos permitieron la depuración gradual del Inventario Nacional de Movimientos en Masa hasta consolidar una base final con 4106 registros, sobre los cuales se trabajó en esta etapa.

A partir de este punto el análisis se centró en la evaluación individual de cada uno de los eventos registrados en la base final, en intervalos de tiempo más cortos, empleando la climatología diaria generada y la precipitación acumulada para 120, 90, 60, 30 y 15 días anteriores al evento, en ambos casos a partir de la información de CHIRPS V2.0. Para esto se emplearon las pruebas de Kolmogorov–Smirnov y de Diferencia Máxima -DM-, con el objetivo de determinar las diferencias existentes entre el comportamiento inmediatamente anterior al evento y su promedio climatológico equivalente, con el fin de determinar la variación de la precipitación antecedente con respecto a su histórico y su influencia sobre la ocurrencia de eventos de deslizamientos. A diferencia de las investigaciones que se ilustraron el marco teórico, que se centraban mayoritariamente en determinar un valor de umbral fijo (expresado en mm) a partir del cual es probable que se detone un evento de deslizamientos, en esta investigación se pretende determinar la desviación de la precipitación antecedente con respecto a la climatología y de esta manera establecer en que rangos de variación es más probable la ocurrencia de estos eventos.

Para esto, en cada localización de evento de deslizamiento se extrajo la precipitación antecedente, conforme cada uno de los intervalos definidos, y se comparó con su equivalente climatológico para el mismo periodo de tiempo. Se calcularon los valores de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM, así como las precipitaciones acumuladas en el intervalo de tiempo. Gráficamente se generó un archivo PNG con la información de las Funciones de Distribución y Distribución Acumulada, esta última esencial para el cálculo de las pruebas, así como las comparativa de las precipitaciones acumuladas, con el objetivo de apoyar visualmente el análisis de los resultados tabulares. De la Figura 5-24 a la Figura 5-28 se observan, a manera de ejemplo, las gráficas generadas para el evento identificado con el código SIMMA 37857 en el municipio de Pereira – Risaralda el

2019/06/10 y en la Tabla 5-10 el resultado de los diferentes cálculos realizados para el mismo evento.

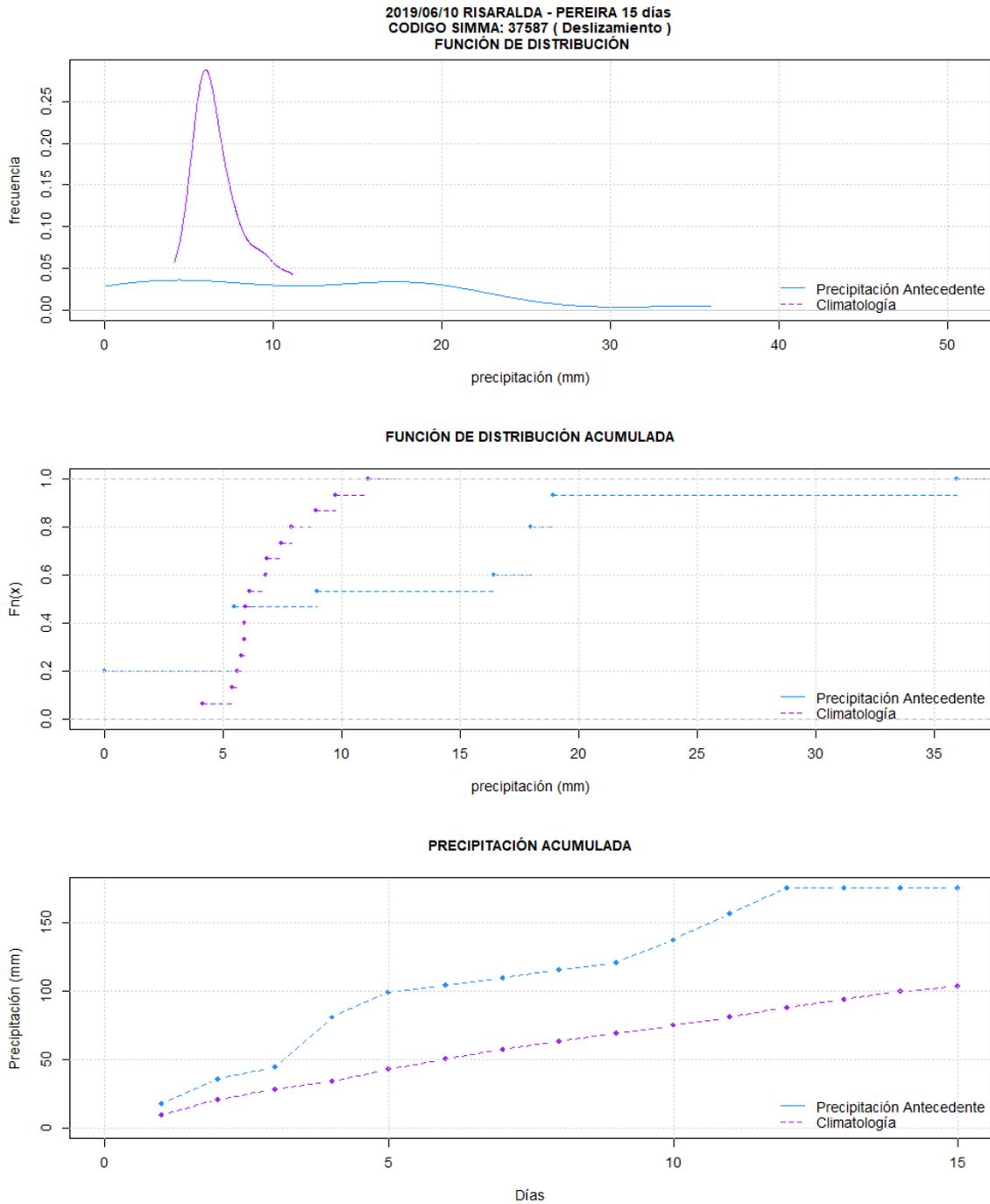


Figura 5-24. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 15 días anteriores al evento.

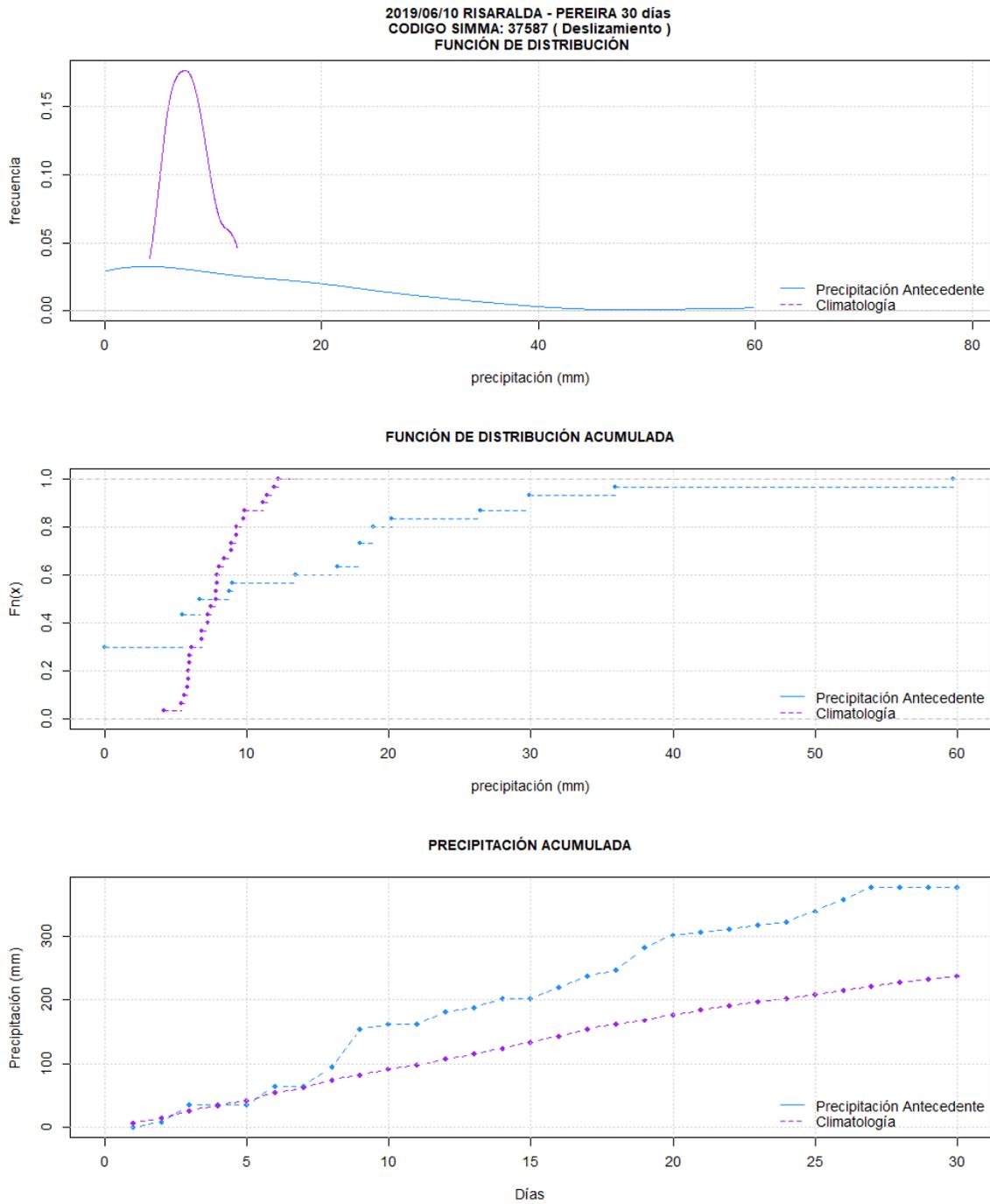


Figura 5-25. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 30 días anteriores al evento.

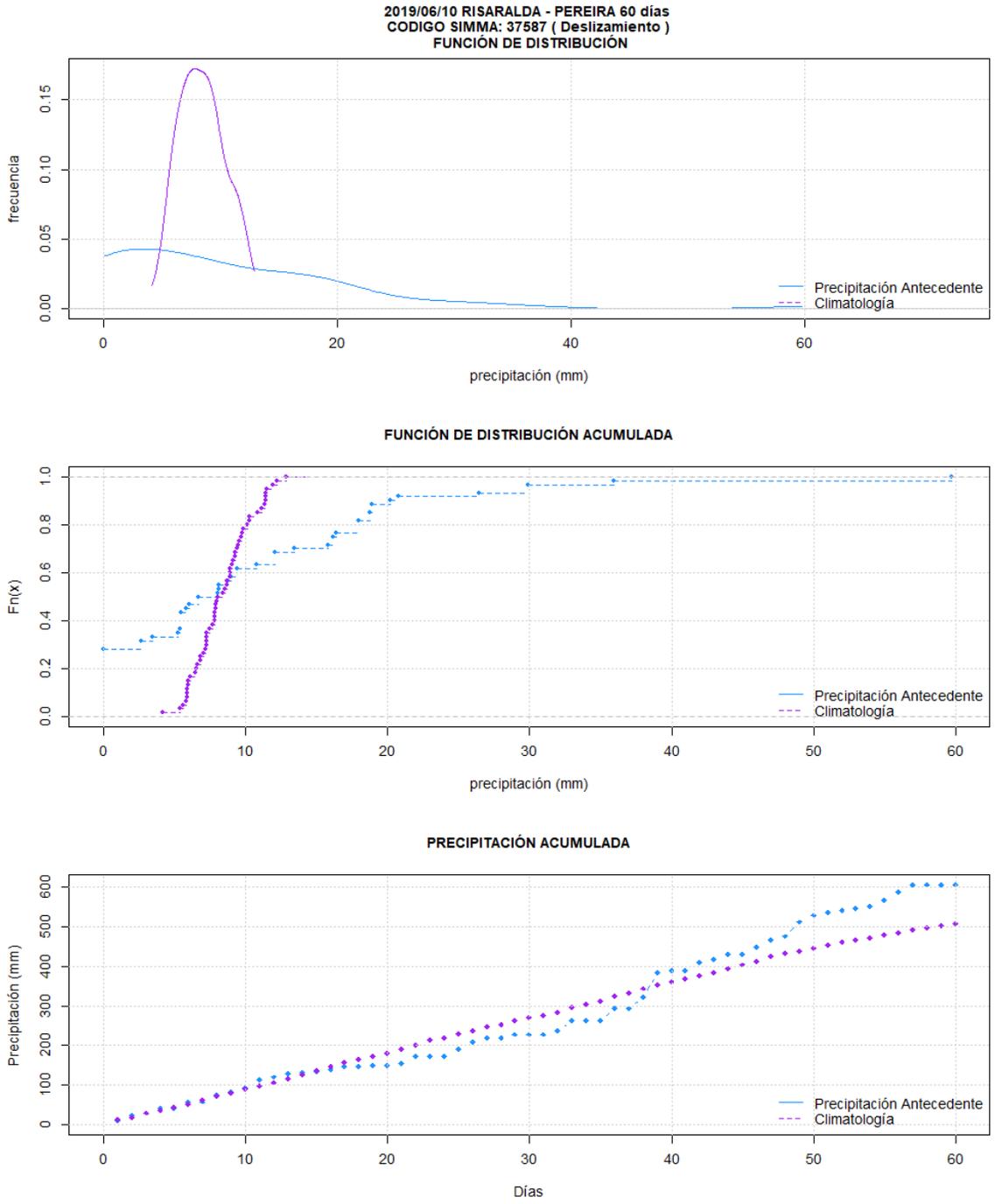


Figura 5-26. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 60 días anteriores al evento.

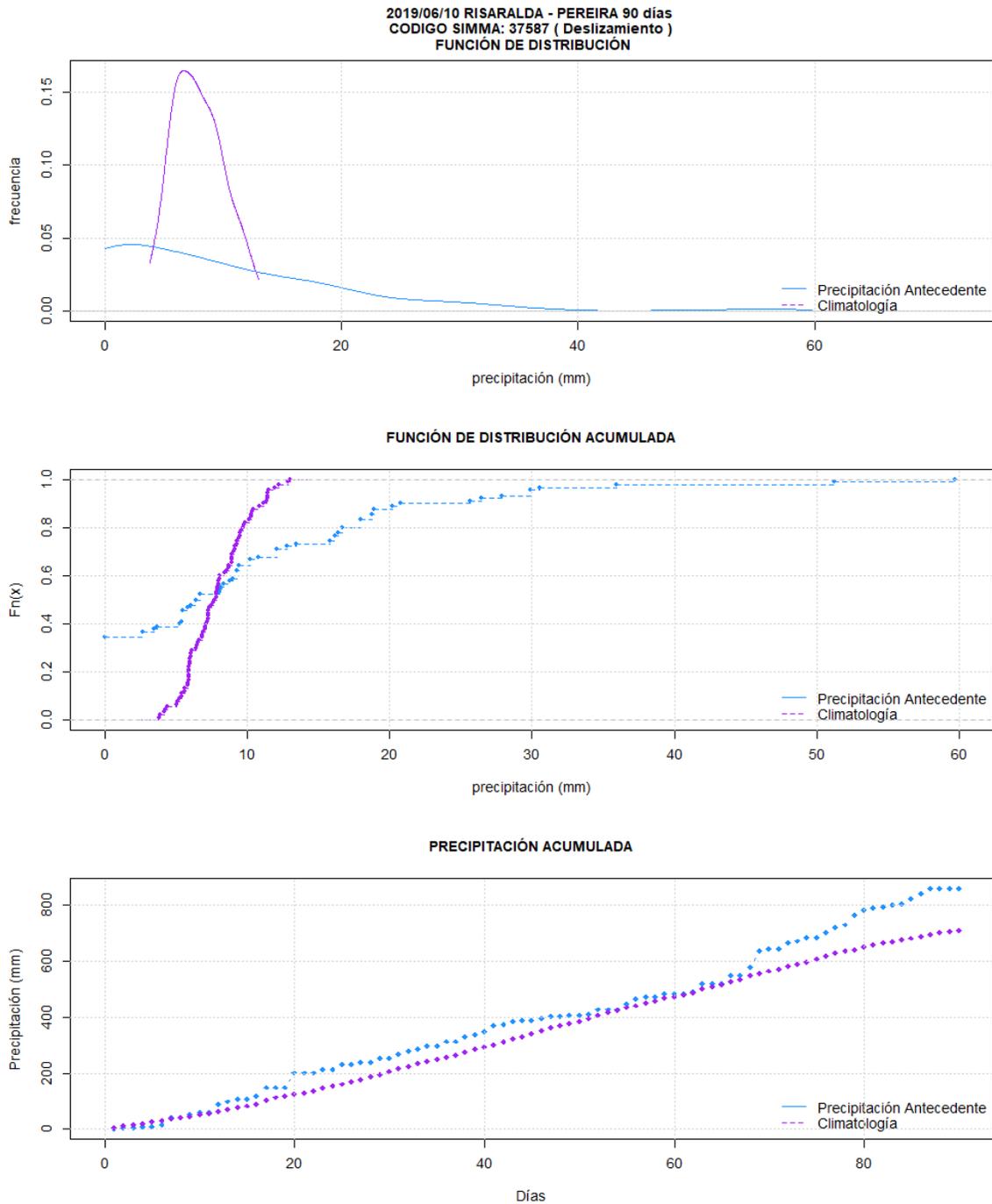


Figura 5-27. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 90 días anteriores al evento.

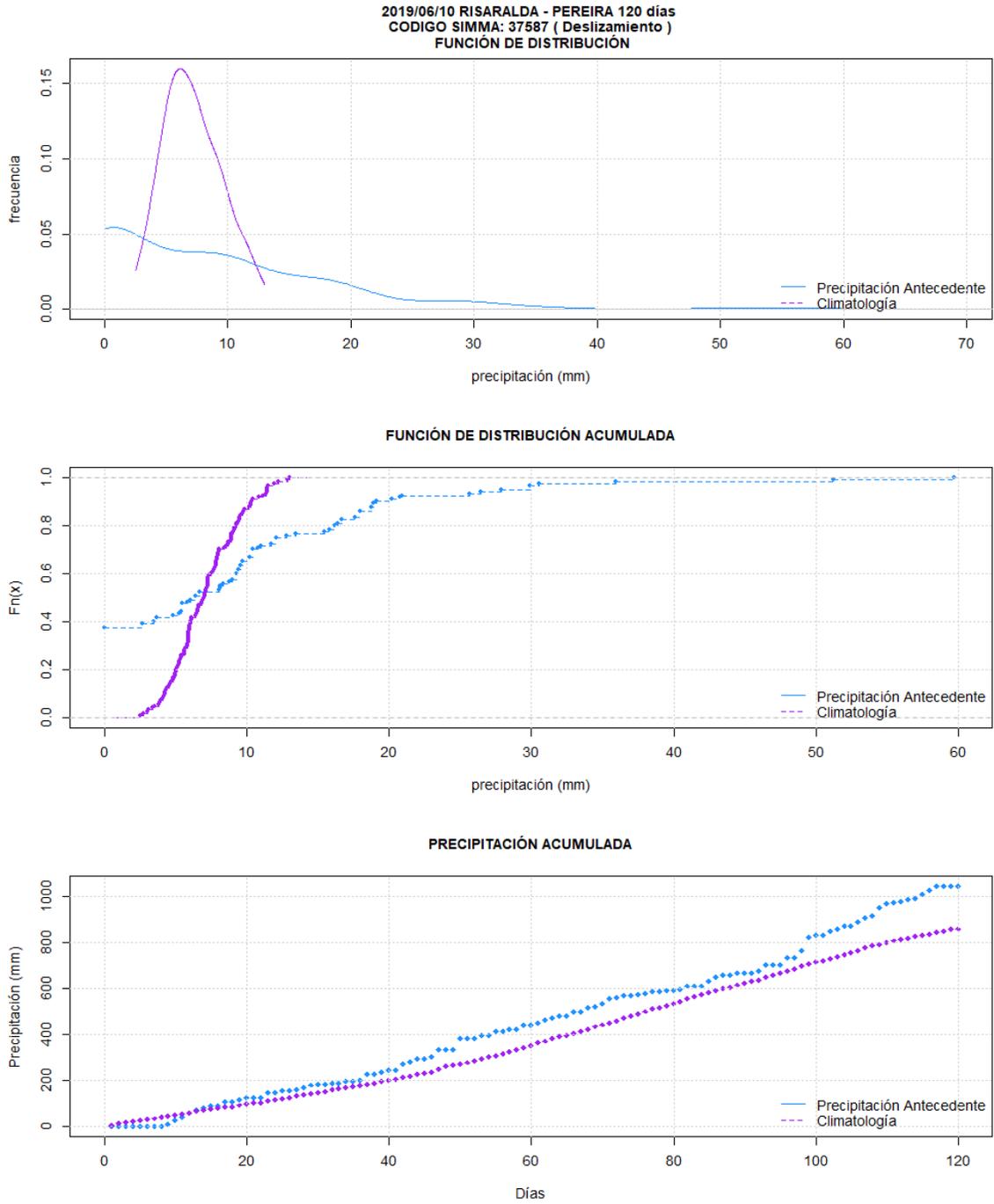


Figura 5-28. Función de Distribución, Distribución Acumulada y Precipitación Acumulada del Evento identificado con el código SIMMA 37587 del 2019/06/10 para los 120 días anteriores al evento.

<i>DIAS ANTECEDENTES</i>	<i>ID SIMMA</i>	<i>DEPARTAMENTO</i>	<i>MUNICIPIO</i>	<i>FECHA EVENTO</i>	<i>PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANTECEDENTE</i>	<i>PRECIPITACIÓN ACUMULADA CLIMATOLOGÍA</i>	<i>KOLMOGOROV-SMIRNOV</i>	<i>DM</i>
120	37587	RISARALDA	PEREIRA	10/06/2019	1044,43	859,61	0,38	0,23
90	37587	RISARALDA	PEREIRA	10/06/2019	859,91	710,90	0,39	0,27
60	37587	RISARALDA	PEREIRA	10/06/2019	605,13	506,79	0,40	0,30
30	37587	RISARALDA	PEREIRA	10/06/2019	376,92	237,30	0,43	0,40
15	37587	RISARALDA	PEREIRA	10/06/2019	175,06	103,71	0,47	0,40

Tabla 5-10. Tabla de cálculo precipitación acumulada antecedente y climatológica, pruebas de Kolmogorov- Smirnov y DM para el evento identificado con el código SIMAA 37587, en 120, 90, 60, 30 y 15 días antecedentes.

Tanto las gráficas como la tabla con los cálculos se realizaron para la totalidad de los 4106 eventos de la base final. En términos de la distribución de frecuencias, encontramos que los valores de la prueba de Kolmogorov Smirnov y DM sugieren una concentración de valores que fluctúan en función del número de días antecedentes empleados. Es importante resaltar que, como se mencionó en el marco teórico , aunque ambas pruebas buscan establecer una medida de desviación de un conjunto de datos (precipitación antecedente) con respecto a un conjunto de referencia (climatología), en la prueba Kolmogorov – Smirnov sus valores fluctúa entre 0 y 1, mientras que la prueba DM lo hace entre -1 y 1, dando la posibilidad adicional de identificar si el conjunto de datos a evaluar se encuentra en déficit con respecto a su referencia, en cuyo caso tomará valores negativos, o si por el contrario se encuentra por encima de la referencia en donde tomará valores positivos. Así las cosas, las distribuciones de frecuencias de ambas pruebas para los diferentes intervalos de precipitación antecedente se muestran de la Tabla 5-11 a la Tabla 5-15. Las gráficas de las distribuciones de frecuencias se observan de la Figura 5-29 a la Figura 5–33.

<i>INTERVALO</i>	<i>NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA DM</i>	<i>% (DM)</i>	<i>NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV</i>	<i>% (KOLMOGOROV - SMIRNOV)</i>
-1	0	0,00%	N/A	N/A
-0,9	0	0,00%	N/A	N/A
-0,8	0	0,00%	N/A	N/A
-0,7	0	0,00%	N/A	N/A
-0,6	0	0,00%	N/A	N/A
-0,5	0	0,00%	N/A	N/A
-0,4	0	0,00%	N/A	N/A

-0,3	0	0,00%	N/A	N/A
-0,2	0	0,00%	N/A	N/A
-0,1	0	0,00%	N/A	N/A
0	1	0,02%	0	0,00%
0,1	291	7,12%	0	0,00%
0,2	1899	46,44%	0	0,00%
0,3	1579	38,62%	12	0,29%
0,4	300	7,34%	487	11,91%
0,5	19	0,46%	837	20,47%
0,6	0	0,00%	1056	25,83%
0,7	0	0,00%	1081	26,44%
0,8	0	0,00%	488	11,93%
0,9	0	0,00%	128	3,13%
1	0	0,00%	0	0,00%

Tabla 5-11.Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 120 días.

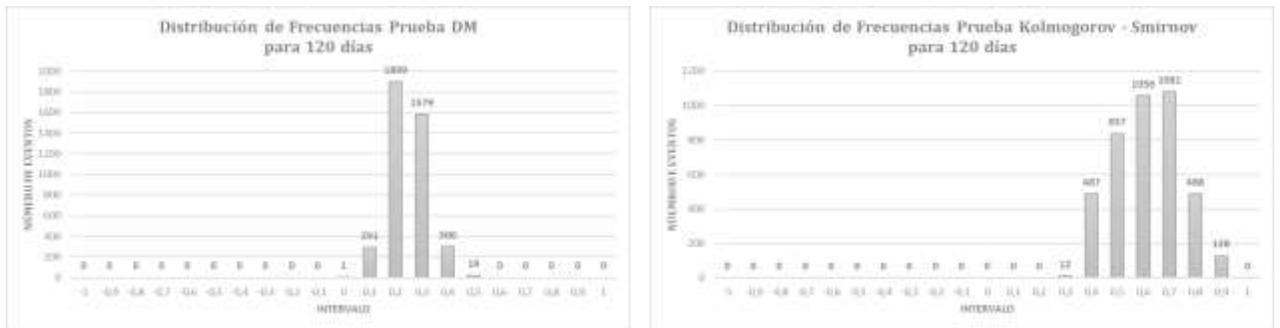


Figura 5-29. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 120 días.

INTERVALO	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA DM	% (DM)	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV	% (KOLMOGOROV - SMIRNOV)
-1	0	0,00%	N/A	N/A
-0,9	0	0,00%	N/A	N/A
-0,8	0	0,00%	N/A	N/A
-0,7	0	0,00%	N/A	N/A
-0,6	0	0,00%	N/A	N/A
-0,5	0	0,00%	N/A	N/A
-0,4	0	0,00%	N/A	N/A
-0,3	0	0,00%	N/A	N/A
-0,2	0	0,00%	N/A	N/A
-0,1	0	0,00%	N/A	N/A

0	1	0,02%	N/A	N/A
0,1	285	6,97%	N/A	N/A
0,2	1554	38,00%	N/A	N/A
0,3	1708	41,77%	21	0,51%
0,4	498	12,18%	533	13,03%
0,5	42	1,03%	1023	25,02%
0,6	1	0,02%	993	24,28%
0,7	0	0,00%	850	20,79%
0,8	0	0,00%	501	12,25%
0,9	0	0,00%	162	3,96%
1	0	0,00%	6	0,15%

Tabla 5-12. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 90 días.

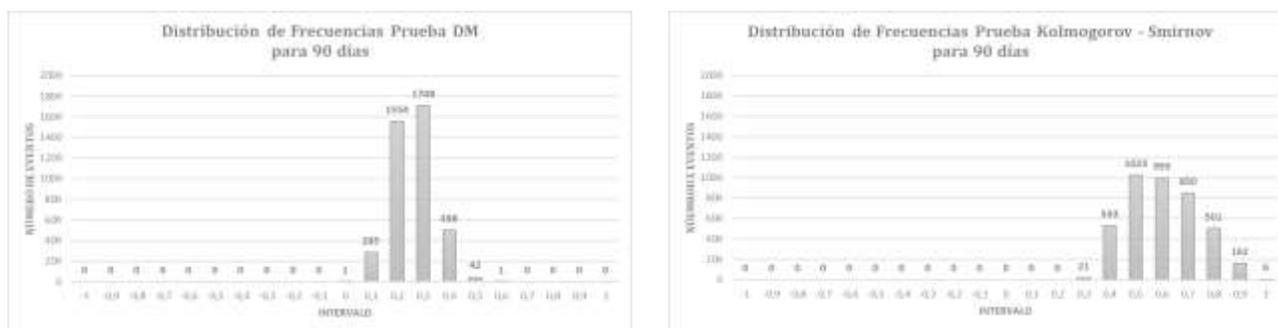


Figura 5-30. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 90 días.

INTERVALO	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA DM	% (DM)	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV	% (KOLMOGOROV - SMIRNOV)
-1	0	0,00%	N/A	N/A
-0,9	0	0,00%	N/A	N/A
-0,8	0	0,00%	N/A	N/A
-0,7	0	0,00%	N/A	N/A
-0,6	0	0,00%	N/A	N/A
-0,5	0	0,00%	N/A	N/A
-0,4	0	0,00%	N/A	N/A
-0,3	0	0,00%	N/A	N/A
-0,2	0	0,00%	N/A	N/A
-0,1	0	0,00%	N/A	N/A
0	3	0,07%	0	0,00%
0,1	278	6,80%	0	0,00%
0,2	1276	31,21%	0	0,00%

0,3	1643	40,18%	17	0,42%
0,4	768	18,78%	497	12,15%
0,5	116	2,84%	1280	31,30%
0,6	5	0,12%	923	22,57%
0,7	0	0,00%	673	16,46%
0,8	0	0,00%	452	11,05%
0,9	0	0,00%	227	5,55%
1	0	0,00%	20	0,49%

Tabla 5-13. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 60 días.

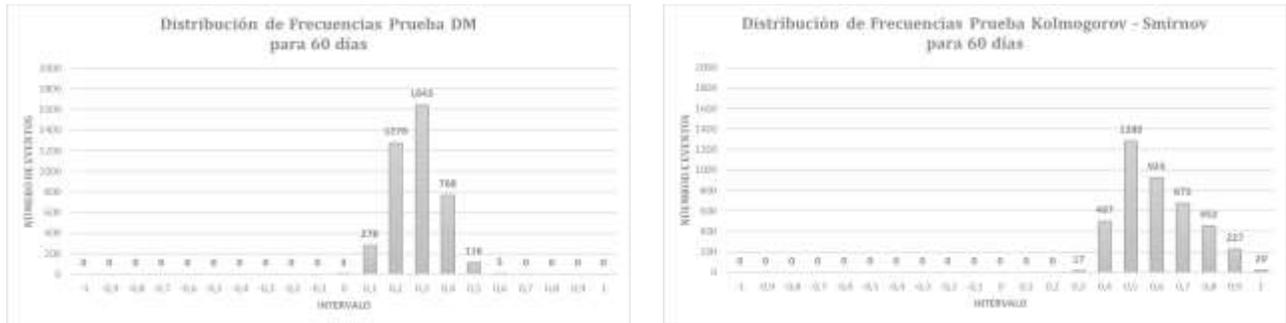


Figura 5-31. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 60 días.

INTERVALO	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA DM	% (DM)	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV	% (KOLMOGOROV - SMIRNOV)
-1	0	0,00%	N/A	N/A
-0,9	9	0,22%	N/A	N/A
-0,8	0	0,00%	N/A	N/A
-0,7	1	0,02%	N/A	N/A
-0,6	2	0,05%	N/A	N/A
-0,5	1	0,02%	N/A	N/A
-0,4	0	0,00%	N/A	N/A
-0,3	0	0,00%	N/A	N/A
-0,2	0	0,00%	N/A	N/A
-0,1	0	0,00%	N/A	N/A
0	66	1,61%	0	0,00%
0,1	418	10,22%	0	0,00%
0,2	1107	27,07%	0	0,00%
0,3	1297	31,72%	16	0,39%
0,4	853	20,86%	401	9,81%

0,5	289	7,07%	1341	32,80%
0,6	43	1,05%	958	23,43%
0,7	2	0,05%	638	15,60%
0,8	1	0,02%	423	10,34%
0,9	0	0,00%	225	5,50%
1	0	0,00%	87	2,13%

Tabla 5-14. Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 30 días.

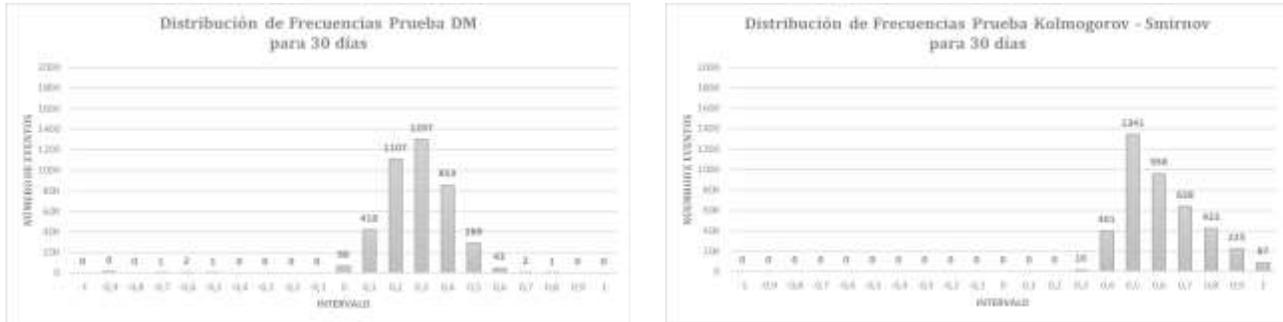


Figura 5-32. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 30 días.

INTERVALO	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA DM	% (DM)	NÚMERO DE EVENTOS PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV	% (KOLMOGOROV - SMIRNOV)
-1	0	0,00%	N/A	N/A
-0,9	74	1,81%	N/A	N/A
-0,8	13	0,32%	N/A	N/A
-0,7	3	0,07%	N/A	N/A
-0,6	6	0,15%	N/A	N/A
-0,5	4	0,10%	N/A	N/A
-0,4	5	0,12%	N/A	N/A
-0,3	2	0,05%	N/A	N/A
-0,2	0	0,00%	N/A	N/A
-0,1	0	0,00%	N/A	N/A
0	277	6,77%	0	0,00%
0,1	412	10,08%	0	0,00%
0,2	1229	30,06%	0	0,00%
0,3	677	16,56%	7	0,17%
0,4	973	23,80%	408	9,98%
0,5	247	6,04%	662	16,19%
0,6	143	3,50%	1564	38,25%
0,7	17	0,42%	448	10,96%
0,8	7	0,17%	596	14,58%

0,9	0	0,00%	195	4,77%
1	0	0,00%	209	5,11%

Tabla 5-15Tabla de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov y DM para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 15 días.

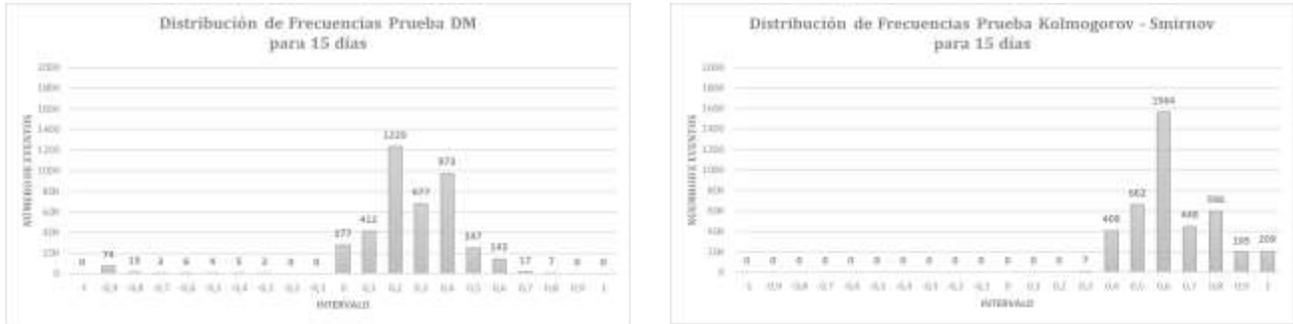


Figura 5-33. Gráficos de distribución de frecuencias de las pruebas de Kolmogorov – Smirnov (Der.) y DM (Izq.) para los 4106 eventos de la base de datos final, con precipitación antecedente de 15 días.

En la medida que se incrementa el número de días de precipitación antecedente se observa en el resultado de la prueba DM un ligero descenso de los valores medios y una disminución de la varianza de los resultados. Mientras en los primeros intervalos, 15 y 30 días antecedentes, se observan valores negativos de la prueba, no sucede lo mismo con precipitaciones antecedentes mayores, inclusive la presencia de valores atípicos disminuye considerablemente en los intervalos mayores. Por el contrario, los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov muestran un ligero incremento de los valores medios, excepto para el primer intervalo de 15 días, y una varianza relativamente constante a lo largo de todos los intervalos, así como la presencia de significativamente menor de valores atípicos. Estas condiciones pueden evidenciarse en las Figuras 5-34y 5-35 que muestran los diagramas de caja para los resultados de cada una de las pruebas. En virtud de esto resultados, se decidió plantear el modelo de riesgo basado en ambas métricas, Kolmogorov-Smirnov y DM, teniendo en consideración el incremento y descenso de cada uno de los valores de las pruebas para el mismo conjunto de intervalos de precipitación antecedente.

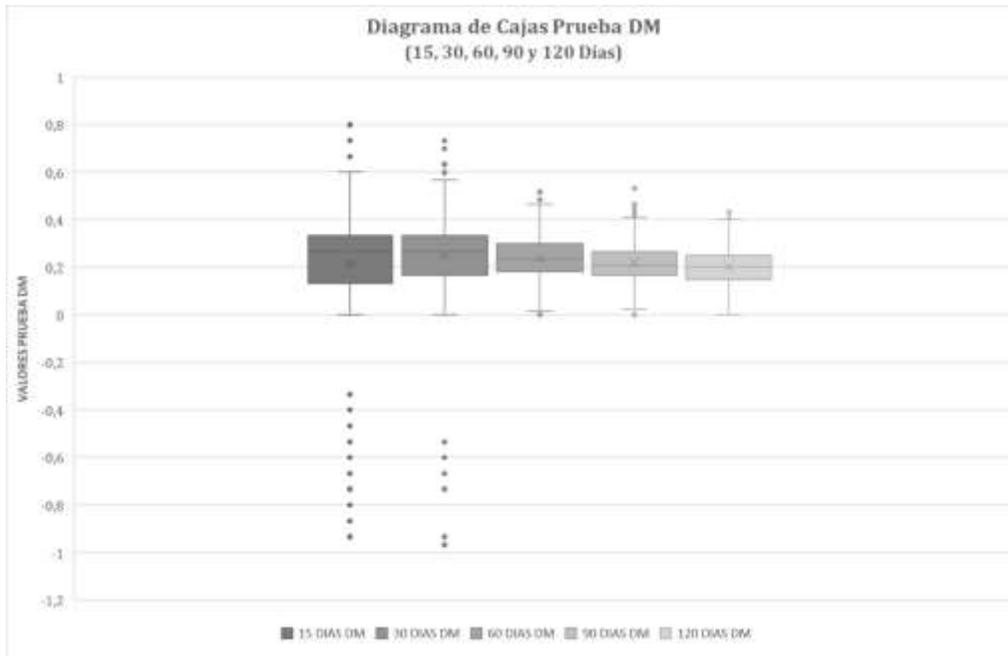


Figura 5-34. Diagramas de caja resultados de la prueba DM para 15, 30, 60, 90 y 120 días de precipitación antecedente.

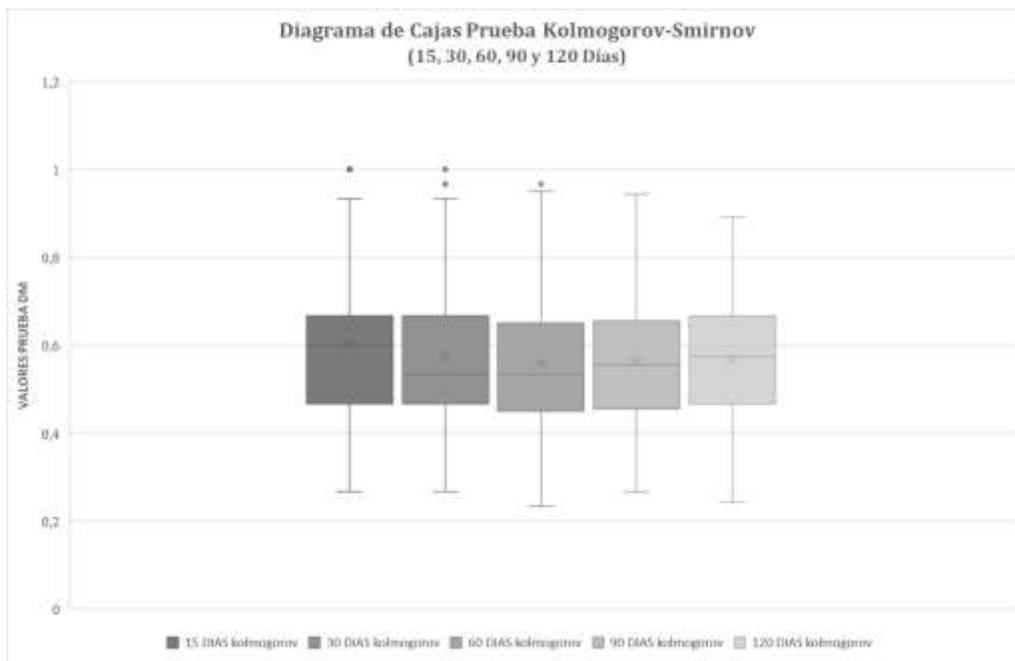


Figura 5-35. Diagramas de caja resultados de la prueba Kolmogorov-Smirnov para 15, 30, 60, 90 y 120 días de precipitación antecedente.

El comportamiento de los diferentes intervalos de precipitación antecedente se hace menos variable en la medida que se incrementa el número de días, así; para los 15 días antecedentes se tiene una varianza de 0,05 y un rango 1,73, con valores entre -0,93 y

0.80, disminuyendo progresivamente en la medida que el número de días se incrementa, alcanzando un rango 0.45 y valores máximos y mínimos de 0.00 y 0.45 respectivamente para los 120 días. En términos de la media, para los valores de la prueba DM, se observa que a partir del día 30 se mantiene un descenso sostenido pasando 0.25 para los 30 días a 0.20 para los 120 (Tabla 5–16). Estos valores de la media son importantes y se constituyeron en la referencia para el planteamiento del modelo en la definición de las áreas de precipitación crítica.

Estadística	15 días DM	30 días DM	60 días DM	90 días DM	120 días DM
<i>Media</i>	0,22	0,25	0,24	0,22	0,20
<i>Varianza</i>	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00
<i>Rango</i>	1,73	1,70	0,53	0,53	0,45
<i>Mínimo</i>	-0,93	-0,97	0,00	0,00	0,00
<i>Máximo</i>	0,80	0,73	0,53	0,53	0,45

Tabla 5-16. Estadísticas de resumen para los resultados de la prueba DM para los diferentes intervalos de precipitación antecedente.

A continuación, se expone la conceptualización del modelo empleado para determinar el riesgo a deslizamientos por precipitación antecedente, teniendo en consideración su evaluación a través de la prueba DM y empleando el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000.

5.5 Modelo de Evaluación del Riesgo a Movimientos en Masa a Partir de la Precipitación Antecedente.

En esta etapa se emplearon dos insumos principales; i) Los resultados de las pruebas DM en formato raster para los diferentes intervalos de tiempo (120, 90 60, 30 y 15 días antecedentes) y ii) El Mapa Nacional Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000. La combinación de ambos insumos permitió realizar una aproximación a aquellas zonas que potencialmente pueden presentar riesgo de fenómenos de movimientos en masa, teniendo en cuenta que los archivos raster con la prueba DM brindan un componente dinámico de la variabilidad de la precipitación y el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa ilustra las zonas que, por sus características intrínsecas, son más propensas a este tipo de fenómenos. Finalmente se optó por el uso del resultado de la prueba DM entendiendo que esta brinda información de la variación de

la precipitación antecedente con respecto a la climatología y si existe un exceso o déficit de dicha variación, además de determinar el porcentaje de dicha variación con respecto a la climatología. El cálculo y evaluación del modelo se realizó para los meses de abril, junio, octubre y diciembre del año 2020, intentando cubrir el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical sobre el territorio nacional en un año típico. Para esto, se siguió el esquema operacional que a continuación se muestra:

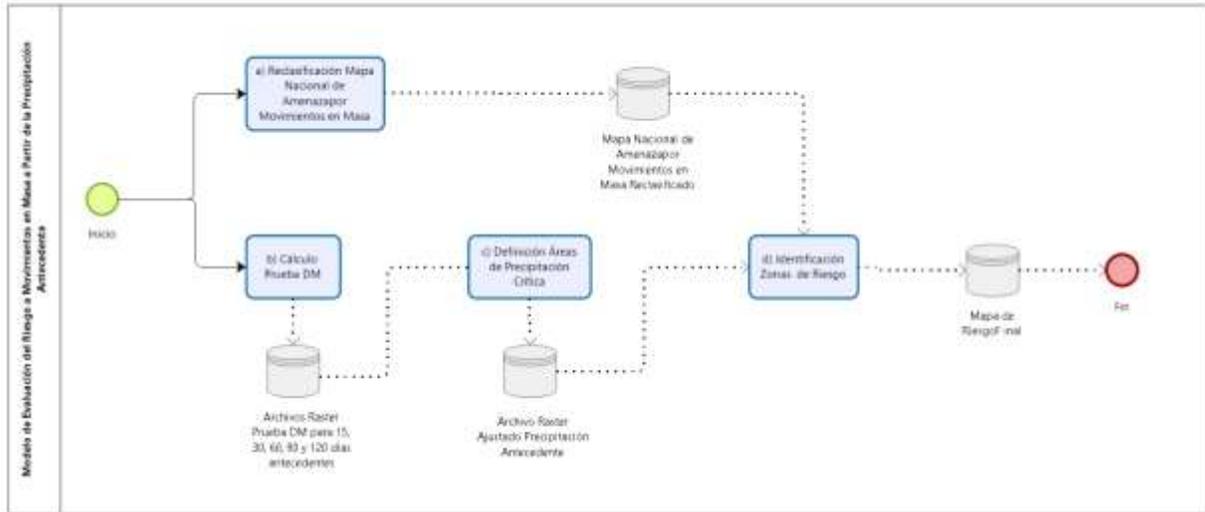


Figura 5-36. Esquema Operacional para el Cálculo del Modelo de Evaluación del Riesgo a Movimientos en Masa a partir de la Precipitación Antecedente

a) Reclasificación Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa.

Este proceso consistió en seleccionar las categorías dentro del mapa que por sus características resultan de interés para esta evaluación; laderas inestables, procesos erosivos muy frecuentes y una fuerte intervención antrópica, conforme la información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano (Ruiz Peña et al., 2017). Para esto, se convirtió el mapa original en un archivo booleano en donde las categorías MUY ALTA y ALTA les fue asignado el valor de uno (1), es decir las áreas de interés y las demás categorías el valor de cero (0) (Figura 5 -37).

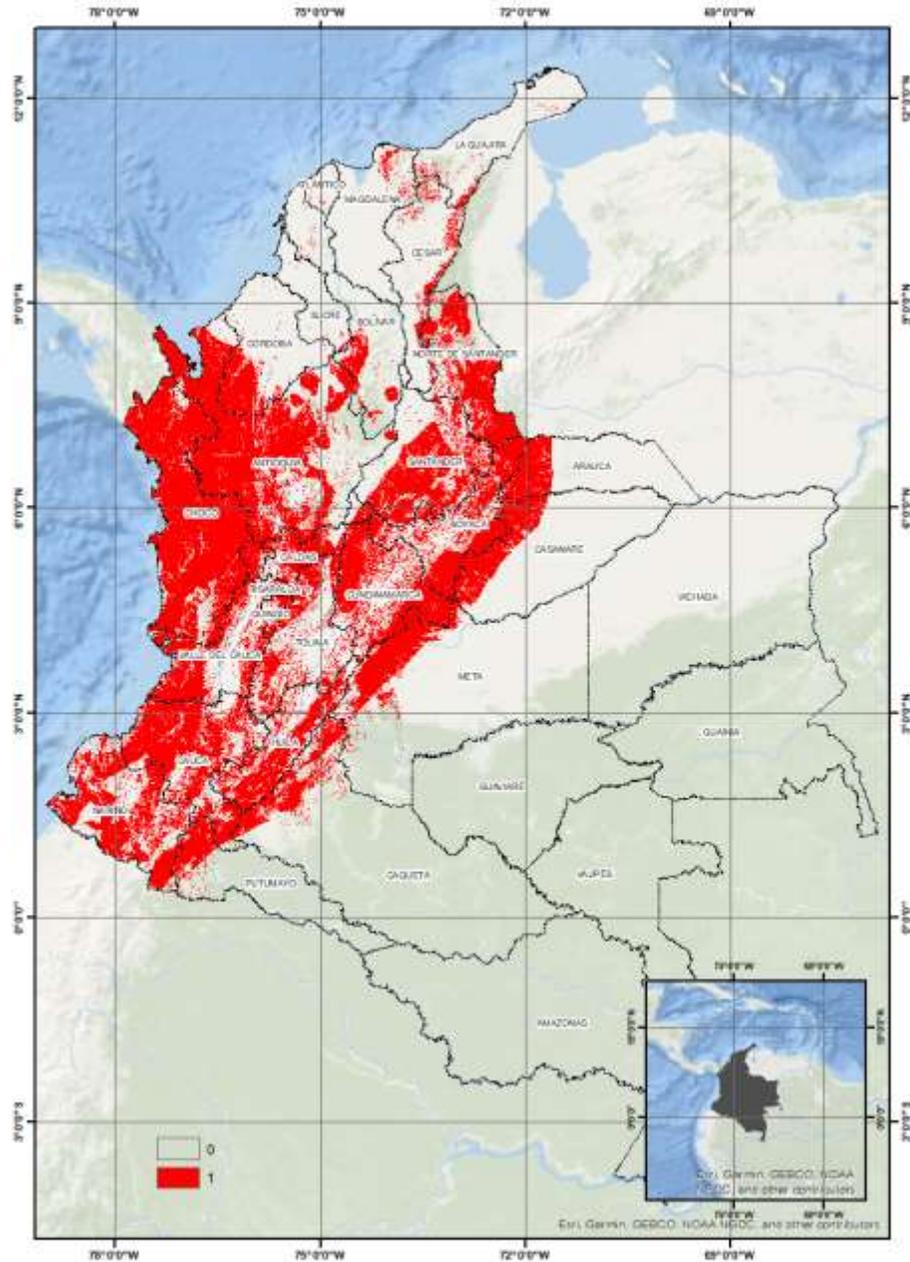


Figura 5-37. Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado.

b) Cálculo de Prueba DM.

El cálculo de la prueba DM se efectuó para la precipitación antecedente en cada posición X_{ij} de los archivos raster de CHIRPS V2.0 en los diferentes intervalos de tiempo definidos (15, 30, 60, 90 y 120 días) para los días de los meses de evaluación de prueba. Así, para

cada día evaluado se obtuvieron cinco archivos con el cálculo de esta prueba, correspondientes a cada uno de los intervalos de precipitación antecedente (Figura 5-38).

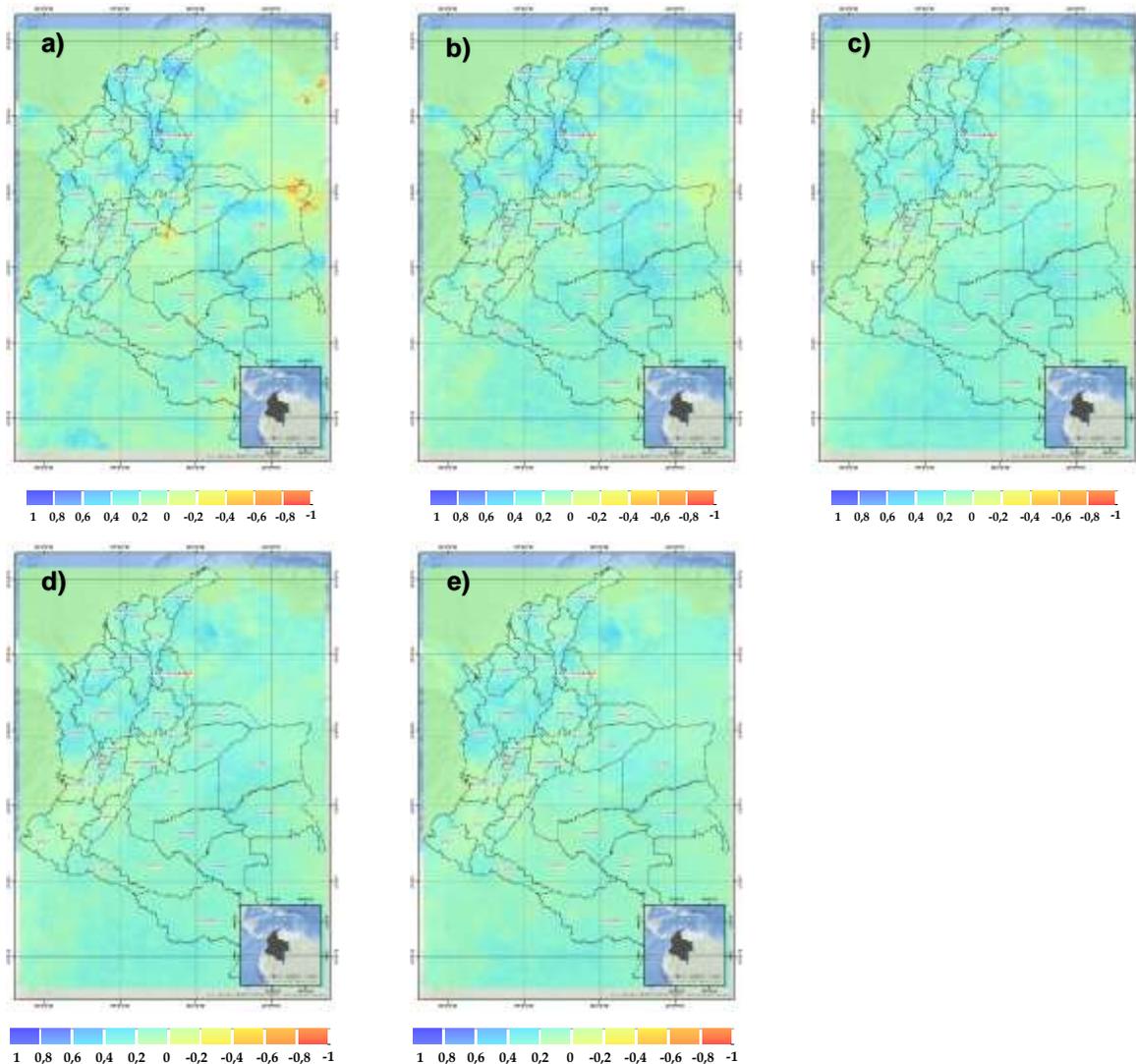


Figura 5-38. Resultados del cálculo de la prueba DM para el 2020/10/31. a) Prueba DM 15 días de precipitación antecedente, b) Prueba DM 30 días de precipitación antecedente, c) Prueba DM 60 días de precipitación antecedente, d) Prueba DM 90 días de precipitación antecedente y e) Prueba DM 120 días de precipitación antecedente.

En la Figura 5-38 se puede apreciar claramente que, para el intervalo de 15 días de precipitación antecedente, amplias zonas de la Orinoquía y el Caribe colombiano se encuentran con valores negativos de la prueba DM (colores rojos), lo que significa que, comparado con su equivalente climatológico, estas regiones están por debajo de sus promedios climatológicos indicando un déficit de precipitaciones. En la medida que se incrementan los intervalos de precipitación antecedente estos déficits se hacen menos

evidentes y empieza a evidenciarse una evolución de sus valores hacia resultados positivos en la prueba DM (colores azules). La varianza se aprecia mayor en los menores intervalos de precipitación antecedente (15 y 30 días) y se estabiliza en valores positivos hacia los intervalos mayores (60, 90 y 120 días). En la siguiente etapa se emplearon estos resultados para definición de las áreas de precipitación crítica.

c) Áreas de Precipitación Crítica.

A partir de los archivos raster resultado de la prueba DM se realizó la reclasificación de cada uno de ellos para identificar las zonas que pueden considerarse como críticas de exceso de precipitación con respecto a la climatología equivalente. Para esto se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

$$\text{Raster 15 días antecedentes} \begin{cases} x_{ij} \geq 0.22 = 1 \\ x_{ij} < 0.22 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Raster 30 días antecedentes} \begin{cases} x_{ij} \geq 0.25 = 1 \\ x_{ij} < 0.25 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Raster 60 días antecedentes} \begin{cases} x_{ij} \geq 0.24 = 1 \\ x_{ij} < 0.24 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Raster 90 días antecedentes} \begin{cases} x_{ij} \geq 0.22 = 1 \\ x_{ij} < 0.22 = 0 \end{cases}$$

$$\text{Raster 120 días antecedentes} \begin{cases} x_{ij} \geq 0.20 = 1 \\ x_{ij} < 0.20 = 0 \end{cases}$$

En donde X_{ij} representa el valor de cada píxel resultado de aplicar la prueba DM. Los límites de referencia, para cada intervalo de precipitación antecedente, se establecieron a partir de los resultados de la media expuestos en la Tabla 5-16.

Así, se obtuvieron nuevos archivos raster, booleanos, en donde los valores de 1 se consideran críticos para la precipitación antecedente y los valores de 0 se entienden como precipitaciones deficitarias o no críticas para generar eventos de deslizamientos. En la Figura 5-39 se observa el resultado de la reclasificación para el mismo conjunto de archivos del 2020/12/3, en azul los valores que cumplen los criterios expuestos anteriormente.

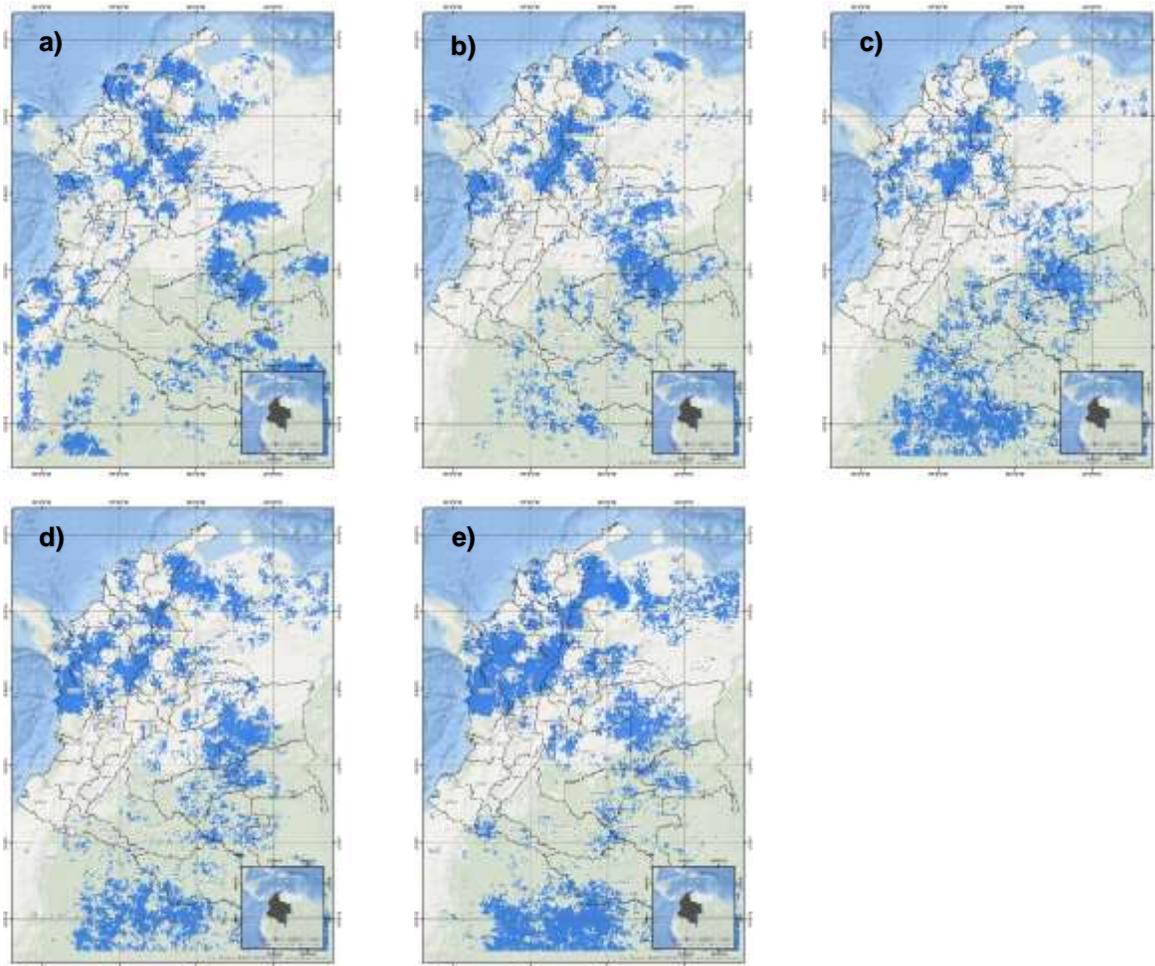
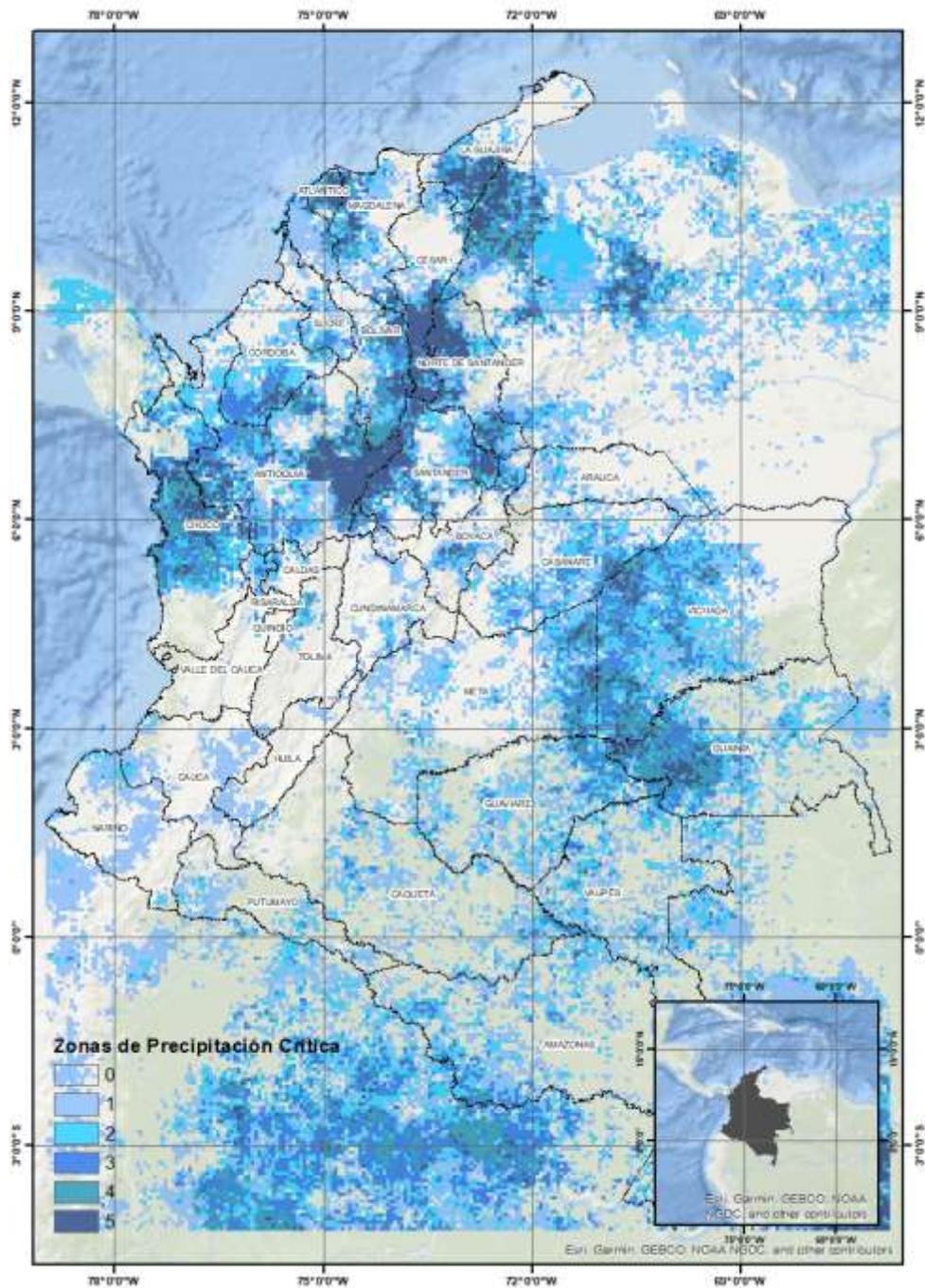


Figura 5-39. Reclasificación de resultados de la prueba DM para la identificación de áreas de precipitación crítica del 2020/10/31. a) Reclasificación para 15 días de precipitación antecedente, b) Reclasificación para 30 días de precipitación antecedente, c) Reclasificación para 60 días de precipitación antecedente, d) Reclasificación para 90 días de precipitación antecedente y e) Reclasificación para 120 días de precipitación antecedente.

Finalmente, estos archivos fueron sumados, con el objetivo de determinar aquellas zonas en las que persistentemente existen las condiciones de precipitación en exceso para todos los intervalos y así establecer las llamadas áreas de precipitación crítica (Figura 5-40). Este archivo resultado contiene valores entre 0 y 5, siendo 0 las zonas en las que no se

evidencia la presencia de precipitación en exceso y 5 aquellas en las que consistentemente a lo largo de los intervalos de precipitación antecedente se presentan condiciones de exceso. Este archivo se constituyó en el segundo insumo, junto con el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado, para la identificación de las zonas de riesgo.



d) Identificación Zonas de Riesgo.

Para la identificación de las zonas de riesgo, como se mencionó anteriormente, se emplearon los archivos del Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado y las Zonas Críticas de Precipitación. La combinación de ambos insumos permitió identificar aquellas zonas con potencial de desatar fenómenos de movimientos en masa detonados por precipitación antecedente:

$$ZR = MNAMMR * ZCP$$

En donde:

ZR= Zonas de Riesgo.

MNAMMR= Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado.

ZCP= Zonas críticas de precipitación.

El resultado de este modelo limita las zonas de precipitación crítica a solo aquellas áreas en las que, por sus características intrínsecas, es posible la ocurrencia de fenómenos de movimientos en masa. El resultado final arroja valores entre 0 y 5 siguiendo las siguientes características:

VALOR	DESCRIPCIÓN
0 – 1 (Sin Riesgo)	Zonas que se pueden encontrar en laderas inestables, presentar procesos erosivos muy frecuentes y evidenciar una fuerte intervención antrópica. Sin embargo, el nivel de precipitación crítica tan solo es alcanzado, como máximo, en uno de los intervalos de precipitación antecedente.
2 (Bajo)	Zonas que se pueden encontrar en laderas inestables, presentar procesos erosivos muy frecuentes y evidenciar una fuerte intervención antrópica. El nivel de precipitación crítica es alcanzado en dos de los intervalos de precipitación antecedente.
3 (Moderado)	Zonas que se pueden encontrar en laderas inestables, presentar procesos erosivos muy frecuentes y evidenciar una fuerte intervención antrópica. El nivel de precipitación crítica es alcanzado en tres de los intervalos de precipitación antecedente.
4 (Alto)	Zonas que se pueden encontrar en laderas inestables, presentar procesos erosivos muy frecuentes y evidenciar una fuerte intervención antrópica. El nivel de precipitación crítica es alcanzado en cuatro de los intervalos de precipitación antecedente.

5 (Muy Alto)	Zonas que se pueden encontrar en laderas inestables, presentar procesos erosivos muy frecuentes y evidenciar una fuerte intervención antrópica. El nivel de precipitación crítica es alcanzado en todos los intervalos de precipitación antecedente.
--------------	--

Tabla 5-17. Clasificación de zonas de riesgo a través del análisis del Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado y las zonas de precipitación crítica antecedente para intervalos de 15, 30, 60, 90 y 120 días.

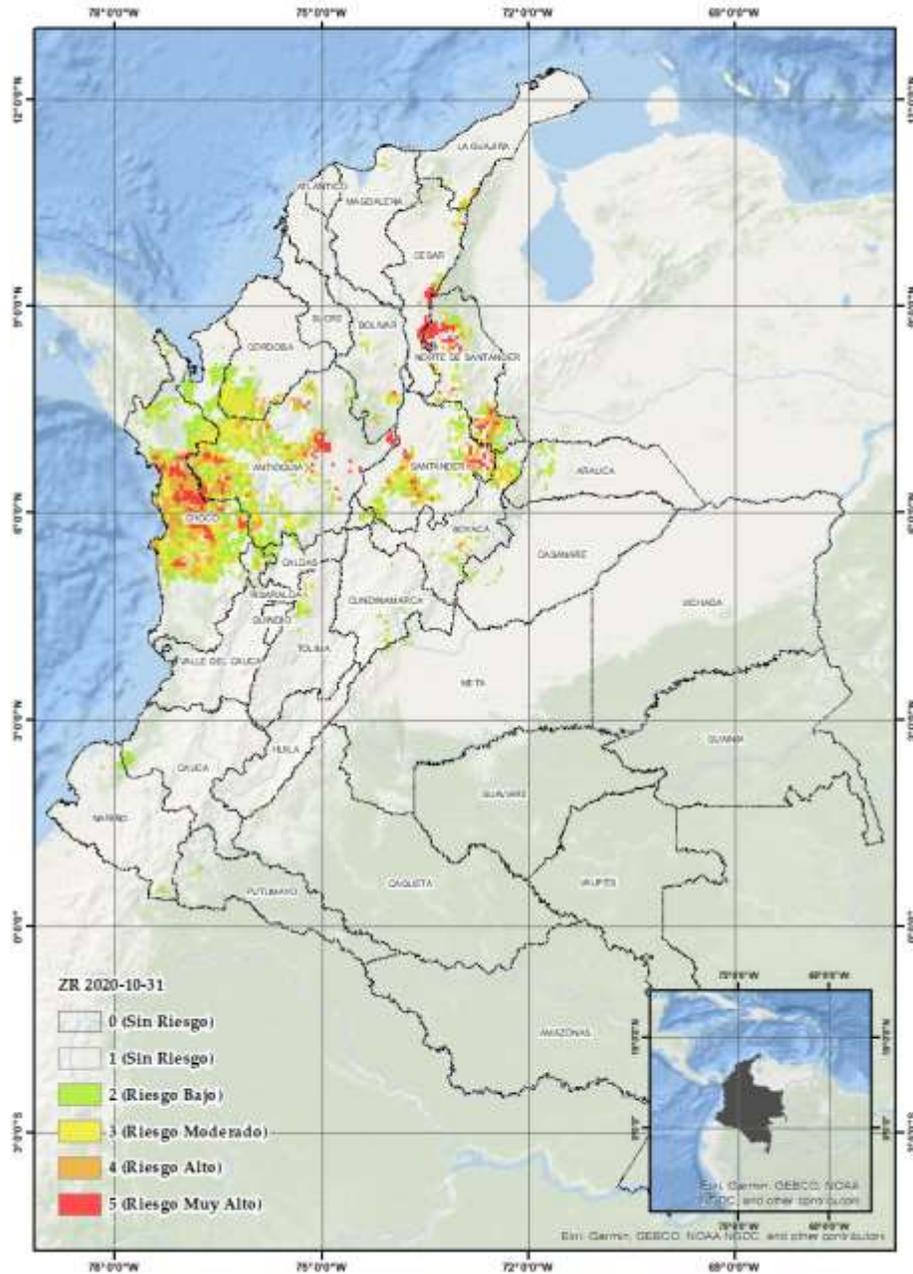


Figura 5-41. Identificación espacial de zonas de riesgo para el 2020/10/31 a través del análisis del Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado y las zonas de precipitación crítica antecedente para intervalos de 15, 30, 60, 90 y 120 días.

El resultado final se compone de un archivo raster diario con resolución espacial de 5 km x 5 km, entendiendo que esta es la resolución espacial nativa de los archivos de precipitación CHIRPS V2.0. A continuación se muestran los resultados de la evaluación del modelo propuesto.

5.6 Evaluación de Resultados.

Para la evaluación de los resultados del modelo propuesto se emplearon los registros de atención a emergencias para los meses de: enero, abril, julio, octubre y diciembre del año 2020, provenientes del consolidado de atención a emergencias de la UNGRD (UNGRD, 2022). En esta última etapa se buscó identificar la capacidad que tiene el modelo propuesto para determinar una categoría de riesgo a eventos reales sobre el territorio y poder asignarle una valoración numérica a su desempeño. Para esto, se extrajeron los registros de eventos del consolidado para los meses de interés y se compararon con las asignaciones que realizó el modelo para los mismos días de ocurrencia de los eventos. Como el consolidado de atención a emergencias no registra la ubicación exacta de cada evento, tan solo lo hace a nivel municipal, se trabajó en escala municipal para evaluar los resultados. Dependiendo de la extensión de un municipio, es posible que al interior de este el modelo pueda asignar diferentes categorías de riesgo, por lo cual se optó por emplear la categoría más alta al interior de cada entidad territorial para realizar la evaluación. Finalmente se obtuvo una tabla que relaciona los eventos reportados por la UNGRD y los valores y categorías de riesgo asignados por el modelo, en donde se aprecia en dos partes: i) la información reportada en el consolidado de atención a emergencias UNGRD en la cual se puede observar la FECHA, DEPARTAMENTO, MUNICIPIO y el tipo de EVENTO evaluado, en este caso MOVIMIENTO EN MASA y ii) la información arrojada por el modelo en términos del valor numérico asignado VALOR MODELO y su equivalente en CATEGORÍA DEL RIESGO DEL MODELO en formato texto. En la Tabla 5-18 se observa el resultado de esta evaluación, evento por evento. En total fueron evaluados 162 emergencias con respecto al modelo propuesto. Los registros del consolidado de atención a emergencia de la UNGRD no se emplearon para la generación del modelo, entendiendo que carecen de localización geográfica precisa, por lo cual el uso en esta evaluación resulta pertinente.

INFORMACIÓN UNGRD (ENERO, ABRIL, JULIO, OCTUBRE Y DICIEMBRE DE 2020)				INFORMACIÓN MODELO PROPUESTO	
FECHA	DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	EVENTO	VALOR MODELO	CATEGORÍA DEL RIESGO MODELO
1/01/2020	CAUCA	SUCRE	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
1/01/2020	QUINDIO	MONTENEGRO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
1/01/2020	RISARALDA	SANTA ROSA DE CABAL	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
3/01/2020	VALLE DEL CAUCA	CALI	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
4/01/2020	CHOCO	QUIBDO	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
4/01/2020	CHOCO	QUIBDO	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
8/01/2020	CUNDINAMARCA	ARBELAEZ	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
20/01/2020	CHOCO	EL CARMEN DE ATRATO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
21/01/2020	NARIÑO	LOS ANDES	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
21/01/2020	NARIÑO	TAMINANGO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
26/01/2020	RISARALDA	SANTA ROSA DE CABAL	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
27/01/2020	QUINDIO	CALARCA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
27/01/2020	RISARALDA	MISTRATO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
30/01/2020	TOLIMA	CAJAMARCA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
1/04/2020	ANTIOQUIA	COCORNA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
3/04/2020	ANTIOQUIA	COCORNA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
4/04/2020	SANTANDER	FLORIDABLANCA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
9/04/2020	CHOCO	SAN JOSE DEL PALMAR	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
10/04/2020	ANTIOQUIA	SAN RAFAEL	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
11/04/2020	CHOCO	ISTMINA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
13/04/2020	AMAZONAS	TARAPACÁ (CD)	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
15/04/2020	ANTIOQUIA	SONSON	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
16/04/2020	NARIÑO	LA UNION	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
17/04/2020	NARIÑO	RICAURTE	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
18/04/2020	SANTANDER	SAN VICENTE DE CHUCURI	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
23/04/2020	NARIÑO	GUAITARILLA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
23/04/2020	NARIÑO	SAMANIEGO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
24/04/2020	NARIÑO	CONSACA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
24/04/2020	NARIÑO	PROVIDENCIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
24/04/2020	NARIÑO	RICAURTE	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
24/04/2020	NARIÑO	SAMANIEGO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
25/04/2020	CAUCA	ARGELIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
25/04/2020	NARIÑO	LINARES	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
26/04/2020	QUINDIO	ARMENIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
28/04/2020	BOGOTA, D.C.	BOGOTA, D.C.	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
30/04/2020	CUNDINAMARCA	MACHETA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/07/2020	ANTIOQUIA	PUERTO BERRIO	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
2/07/2020	BOLIVAR	EL CARMEN DE BOLIVAR	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO

2/07/2020	CUNDINAMARCA	CHIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/07/2020	HUILA	NATAGA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/07/2020	HUILA	TESALIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/07/2020	RISARALDA	BALBOA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/07/2020	RISARALDA	MARSELLA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/07/2020	RISARALDA	MARSELLA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/07/2020	RISARALDA	MARSELLA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
3/07/2020	RISARALDA	GUATICA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
4/07/2020	ANTIOQUIA	BETANIA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
4/07/2020	HUILA	ISNOS	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
4/07/2020	HUILA	SANTA MARIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
4/07/2020	NARIÑO	LA UNION	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
4/07/2020	NARIÑO	SAN LORENZO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
4/07/2020	TOLIMA	CAJAMARCA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
4/07/2020	TOLIMA	CHAPARRAL	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
5/07/2020	ANTIOQUIA	EL CARMEN DE VIBORAL	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
5/07/2020	ANTIOQUIA	VEGACHI	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
5/07/2020	ANTIOQUIA	YALI	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
5/07/2020	HUILA	GUADALUPE	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
5/07/2020	HUILA	PITAL	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
5/07/2020	HUILA	PITALITO	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
5/07/2020	SUCRE	SAN ONOFRE	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
6/07/2020	CHOCO	ISTMINA	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
6/07/2020	HUILA	LA PLATA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
9/07/2020	RISARALDA	PEREIRA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
9/07/2020	TOLIMA	CAJAMARCA	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
11/07/2020	ANTIOQUIA	MEDELLIN	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
11/07/2020	MAGDALENA	SANTA MARTA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
11/07/2020	MAGDALENA	SANTA MARTA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
11/07/2020	SANTANDER	PUERTO WILCHES	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
12/07/2020	ANTIOQUIA	CIUDAD BOLIVAR	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
13/07/2020	ANTIOQUIA	ANORI	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
16/07/2020	RISARALDA	PUEBLO RICO	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
18/07/2020	CUNDINAMARCA	CABRERA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
19/07/2020	RISARALDA	PEREIRA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
21/07/2020	TOLIMA	RONCESVALLES	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
23/07/2020	RISARALDA	PEREIRA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
25/07/2020	ANTIOQUIA	SAN PEDRO	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
25/07/2020	ANTIOQUIA	YALI	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
25/07/2020	TOLIMA	IBAGUE	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
26/07/2020	PUTUMAYO	MOCOA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
27/07/2020	ANTIOQUIA	BETANIA	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
27/07/2020	ANTIOQUIA	PUEBLORRICO	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO

28/07/2020	ANTIOQUIA	ANDES	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
28/07/2020	BOGOTA, D.C.	BOGOTA, D.C.	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
30/07/2020	BOYACA	SAN EDUARDO	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
31/07/2020	ANTIOQUIA	BRICEÑO	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
31/07/2020	ANTIOQUIA	FREDONIA	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
31/07/2020	ANTIOQUIA	VALDIVIA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
2/10/2020	ANTIOQUIA	YARUMAL	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
4/10/2020	ANTIOQUIA	CONCORDIA	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
4/10/2020	ANTIOQUIA	RETIRO	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
5/10/2020	ANTIOQUIA	CARACOLI	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
5/10/2020	RISARALDA	LA VIRGINIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
7/10/2020	CASANARE	CHAMEZA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
12/10/2020	ANTIOQUIA	HISPANIA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
12/10/2020	ANTIOQUIA	SAN FRANCISCO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
12/10/2020	NORTE DE SANTANDER	EL CARMEN	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
13/10/2020	ANTIOQUIA	SABANALARGA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
13/10/2020	SANTANDER	SAN BENITO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
15/10/2020	SANTANDER	CHIMA	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
19/10/2020	MAGDALENA	SANTA MARTA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
22/10/2020	ANTIOQUIA	CARAMANTA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
22/10/2020	ANTIOQUIA	URRAO	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
24/10/2020	ANTIOQUIA	DABEIBA	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
24/10/2020	ANTIOQUIA	FREDONIA	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
24/10/2020	ANTIOQUIA	PUERTO BERRIO	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
24/10/2020	ANTIOQUIA	REMEDIOS	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
24/10/2020	ANTIOQUIA	REMEDIOS	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
24/10/2020	ANTIOQUIA	SANTA BARBARA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
24/10/2020	ANTIOQUIA	URAMITA	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
29/10/2020	ANTIOQUIA	EBEJICO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
29/10/2020	QUINDIO	ARMENIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
30/10/2020	ANTIOQUIA	FREDONIA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
30/10/2020	ANTIOQUIA	MONTEBELLO	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
30/10/2020	ANTIOQUIA	SEGOVIA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
31/10/2020	ANTIOQUIA	ANORI	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
31/10/2020	ANTIOQUIA	EBEJICO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
31/10/2020	ANTIOQUIA	SANTA BARBARA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
31/10/2020	ANTIOQUIA	TOLEDO	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
31/10/2020	CUNDINAMARCA	LA CALERA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
31/10/2020	NORTE DE SANTANDER	ARBOLEDAS	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
31/10/2020	NORTE DE SANTANDER	CUCUTILLA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
31/10/2020	NORTE DE SANTANDER	DURANIA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
1/12/2020	ANTIOQUIA	DABEIBA	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO

1/12/2020	CUNDINAMARCA	SASAIMA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
1/12/2020	SANTANDER	SAN BENITO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
1/12/2020	TOLIMA	COELLO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
1/12/2020	TOLIMA	RIOBLANCO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
2/12/2020	CAUCA	TORIBIO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/12/2020	CUNDINAMARCA	ALBAN	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
2/12/2020	TOLIMA	CAJAMARCA	MOVIMIENTO EN MASA	5	RIESGO MUY ALTO
3/12/2020	ANTIOQUIA	SAN LUIS	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
3/12/2020	NARIÑO	LA CRUZ	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
3/12/2020	RISARALDA	PEREIRA	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
4/12/2020	META	VILLAVICENCIO	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
5/12/2020	ANTIOQUIA	SAN LUIS	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
6/12/2020	ANTIOQUIA	SAN FRANCISCO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
8/12/2020	TOLIMA	CHAPARRAL	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
9/12/2020	RISARALDA	DOSQUEBRADAS	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
11/12/2020	CAUCA	CAJIBIO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
12/12/2020	ANTIOQUIA	SAN LUIS	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO
12/12/2020	CAUCA	SUAREZ	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
14/12/2020	ANTIOQUIA	MEDELLIN	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
19/12/2020	NORTE DE SANTANDER	BOCHALEMA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
22/12/2020	CAUCA	SUAREZ	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
23/12/2020	CUNDINAMARCA	SAN FRANCISCO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
24/12/2020	CAUCA	SUAREZ	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
24/12/2020	NARIÑO	ANCUYA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
24/12/2020	NARIÑO	ARBOLEDA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
24/12/2020	NARIÑO	GUAITARILLA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
25/12/2020	ANTIOQUIA	ITAGUI	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
25/12/2020	ANTIOQUIA	ITAGUI	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
25/12/2020	CAUCA	TORIBIO	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
25/12/2020	QUINDIO	ARMENIA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
25/12/2020	QUINDIO	CALARCA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
25/12/2020	QUINDIO	SALENTO	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
26/12/2020	CAUCA	LA SIERRA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
27/12/2020	CAUCA	CALDONO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
27/12/2020	CAUCA	CALDONO	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
27/12/2020	RISARALDA	MARSELLA	MOVIMIENTO EN MASA	0	SIN RIESGO
29/12/2020	CALDAS	MANZANARES	MOVIMIENTO EN MASA	3	RIESGO MODERADO
29/12/2020	CAUCA	LA SIERRA	MOVIMIENTO EN MASA	2	RIESGO BAJO
30/12/2020	CAUCA	BALBOA	MOVIMIENTO EN MASA	4	RIESGO ALTO

Tabla 5-18. Evaluación del modelo propuesto en esta investigación con respecto a emergencias ocurridas en el territorio y atendidas por la UNGRD para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre de 2020(UNGRD, 2022).

En total se obtuvieron 162 registros de eventos de movimientos en masa, de los cuales el modelo propuesto en esta investigación fue capaz de identificar bajo algún nivel de riesgo 86 de estos. Esto significa que el modelo propuesto presenta un rendimiento de **53,08%**. En la Tabla 5-19 se observa el rendimiento del modelo por categoría de riesgo.

CATEGORÍA DEL RIESGO	NÚMERO DE EVENTOS IDENTIFICADOS	%
SIN RIESGO	76	47%
RIESGO BAJO	26	16%
RIESGO MODERADO	22	14%
RIESGO ALTO	20	12%
RIESGO MUY ALTO	18	11%
	162	100%

Tabla 5-19. Categorías de riesgo identificadas por el modelo de riesgo propuesto, con respecto a los a emergencias ocurridas en el territorio y atendidas por la UNGRD para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre de 2020(UNGRD, 2022).

En la Tabla 5-20 se observa el desempeño del modelo a nivel mensual. El mes de abril presenta el peor desempeño para la identificación de las zonas de riesgo alcanzando tan solo un 9% de aciertos, mientras que los meses de julio, octubre y diciembre alcanzan valores de 55%, 66% y 68% respectivamente. Es importante notar que el mecanismo que detona los deslizamientos, empleado en esta investigación, es la precipitación antecedente en periodos superiores a 15 días, por lo cual se evidencia que este tipo de mecanismo es más influyente para el segundo semestre del año, y, en consecuencia, es de mejor detección para el modelo diseñado.

MES	CATEGORÍA DEL RIESGO MODELO					TOTAL REGISTROS EVALUADOS	% ACIERTO
	SIN RIESGO	RIESGO BAJO	RIESGO MODERADO	RIESGO ALTO	RIESGO MUY ALTO		
ENERO 2020	8	2	1	1	2	14	43%
ABRIL 2020	20	1		1		22	9%
JULIO 2020	23	6	7	9	6	51	55%
OCTUBRE 2020	12	3	8	4	8	35	66%
DICIEMBRE 2020	13	14	6	5	2	40	68%
TOTAL GENERAL	76	26	22	20	18	162	

Tabla 5-20. Categorías de riesgo identificadas por el modelo de riesgo propuesto, discriminadas mensualmente, con respecto a las emergencias ocurridas en el territorio y atendidas por la UNGRD para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre de 2020(UNGRD, 2022).

En la mayoría de los meses la categoría SIN RIESGO domina en los resultados de la evaluación, por lo cual es altamente recomendable, en futuras investigaciones, incorporar la precipitación antecedente a intervalos menores a 15 días, inclusive, considerar la variable de intensidad de la precipitación, entendida como la precipitación máxima ocurrida/hora, con el objetivo de detectar aquellas en regiones en las cuales, aunque no existan acumulados que superen el comportamiento climatológico, si pueda evidenciarse un a condición de riesgo para desarrollar este tipo de fenómenos.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

A través de esta investigación fue posible establecer una metodología para la cuantificación del riesgo de ocurrencia de deslizamientos, empleando como insumos principales el Mapa Nacional de Amenazas por Movimientos en Masa y la precipitación antecedente estimada a través de sensores remotos, CHIRPS V2.0, para cinco diferentes intervalos de tiempo. De igual forma, se definió la relación directa entre el volumen de precipitación antecedente y el número de eventos de deslizamientos, identificando plenamente aquellos periodos de tiempo en los cuales los eventos de variabilidad climática, particularmente en escenarios Niña, tienen su mayor impacto en el desarrollo de este tipo de fenómenos.

Se estableció la relación entre la precipitación antecedente, en diferentes intervalos de tiempo; 15, 30, 60, 90 y 120 días y el conjunto de registros depurados por subregiones del Sistema de Información de Movimientos en Masa -SIMMA-, a través de la implementación de la prueba de Diferencias Máximas -DM-, propuesta en esta investigación como variación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con la cual se determinaron límites, expresados en términos relativos y no en valores de mm estáticos, a partir de los cuales una desviación positiva de la precipitación antecedente, con respecto a su equivalente climatológico, podría considerarse crítica para detonar eventos de deslizamientos. En la literatura revisada y expuesta en el marco teórico es posible evidenciar que en las investigaciones cuyo objetivo es la definición de límites y umbrales detonantes de eventos de deslizamientos, tales como Mayorga (2003) y Aristizábal et al (2022), sus resultados siempre conducen a la definición de valores expresados en términos absolutos (mm), los cuales difícilmente podrían ser replicables a nivel nacional, entendiéndose la dificultad que supone extrapolar valores fijos de precipitación acumulada a un entorno de variabilidad de

precipitación tan complejo como el de Colombia. Por otra parte, tan solo la investigación de Aristizábal et al (2022) realiza una comparación de la precipitación antecedente (AD) contra registros acumulados a 90 días históricos (AH), con el objetivo de determinar el nivel de desviación de los valores de AD contra los comportamientos históricos (AH), sin embargo, esta comparación contra series históricas obedece a una acumulación sucesiva cada 90 días hasta el origen de los datos, por lo cual las series AD se comparan contra todos los posibles valores históricos AH, en donde entran en juego, inclusive, valores de series que corresponden a periodos climatológicos que no son equivalentes y que no agregarían valor al análisis, por ejemplo comparar temporadas secas contra lluviosas y viceversa. Por último, en la investigación objeto de este documento, las comparaciones de la precipitación antecedente, en diferentes intervalos, contra series históricas se centran en periodos climatológicos equivalentes y sus variaciones se expresan en valores relativos (%), lo cual permite la extrapolación a diferentes regiones del país dada su condición de no estar expresada en términos absolutos. Finalmente, en esta investigación, se evaluaron 5 diferentes intervalos de precipitación antecedente que, en conjunto, garantizan el seguimiento sostenido del déficit, exceso o condiciones de normalidad de la precipitación actual con respecto a su equivalente histórico climatológico.

Se diseñó e implementó un modelo de evaluación del riesgo para eventos de deslizamientos empleando como insumos principales el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa Reclasificado y la Precipitación Crítica identificada a través del cálculo de la prueba DM sobre los diferentes intervalos de precipitación antecedente. Este modelo busca identificar aquellas zonas en las cuales, por las características propias del terreno, es posible que se desarrollen este tipo de fenómenos y en las cuales el comportamiento de la precipitación antecedente es significativamente superior a su equivalente climatológico. El modelo propuesto no pretende ser una herramienta precisa e infalible para la detección de áreas con inminente presencia de deslizamientos, pero si constituirse en un insumo para la gestión del riesgo en aquellas de zonas en las que la precipitación antecedente supera sus comportamientos históricos de manera sostenida y que permita a las autoridades locales y nacionales anticipar posibles afectaciones sobre la infraestructura, ecosistemas, población y actividades económicas. El resultado final del modelo se presenta como un archivo raster de resolución de 5 km x 5 km con valores numéricos entre 0 y 5, siendo 0 zonas en las cuales no se percibe el riesgo de ocurrencia

de deslizamientos y 5 un riesgo muy alto de ocurrencia, con la posibilidad de ejecutarse de manera diaria.

Fueron evaluados los resultados del modelo propuesto empleando los reportes de atención a emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres -UNGRD- para los meses de enero, abril, julio, octubre y diciembre de 2020. Como resultado final se obtuvo un desempeño general del 53.08% de identificación de las zonas de riesgo en las cuales, efectivamente, se presentaron y atendieron este tipo de emergencias. En los resultados de evaluación se resalta un mayor acierto en los meses correspondientes al segundo semestre, alcanzando valores de hasta 68% para el mes de diciembre.

6.2 Recomendaciones

Algunas de las recomendaciones producto del desarrollo de esta investigación se relacionan con i) Registros históricos de ocurrencia de eventos de deslizamiento, ii) distribución espacial y temporal de la precipitación CHIRPS V2.0, iii) incorporación de nuevas variables de la precipitación para la depuración del modelo propuesto y iv) el posible uso de la Precipitación Crítica propuesta.

- i) La mayor dificultad en el desarrollo de esta investigación consistió en la identificación de la localización de los eventos de deslizamientos a emplear, es decir, en los registros históricos de ocurrencia de eventos de deslizamiento. Aunque el SIMMA es una base de datos plenamente estructurada y entrega la posición X e Y de cada uno de sus registros, lo cual es una enorme ventaja en este tipo de trabajos, fue necesario realizar una depuración masiva de la información, múltiples iteraciones y procesos que permitieran consolidar información que estadísticamente fuera robusta para el análisis. El proceso de análisis de estos registros fue dispendioso y redundó en la pérdida de cerca del 70% de los mismos, de 14.864 registros iniciales a 4.106 depurados, sin tener certeza del nivel de calidad o de evaluación de estos desde el origen. Por otra parte, en ninguno de los atributos entregados en el SIMMA se evidencia la fuente de obtención ni se da claridad sobre el nivel de calidad de la información. Se sugiere, para futuras investigaciones, el uso de registros de los cuales pueda

- establecerse plenamente su origen y se conozca, con algún nivel de certeza, la calidad de la información consignada.
- ii) La distribución espacial de la precipitación es una de las mayores ventajas de emplear sensores remotos en este tipo de investigaciones. A diferencia de los registros obtenidos directamente en campo a través del uso de estaciones meteorológicas, en donde es necesario realizar una labor de procesamiento adicional con el objetivo de interpolar valores en donde no hay puntos de medición, con este tipo de herramienta se obtiene una distribución espacial más natural de la misma y permite llegar a zonas de bajo o nulo cubrimiento de la red tradicional de estaciones. Adicionalmente, por tratarse de información que proviene, generalmente, de satélites geoestacionarios, su frecuencia de adquisición es alta, alcanzando inclusive intervalos de 10 minutos por imagen, fundamental para el cálculo de nuevas variables en función de precipitación, como la intensidad.
 - iii) Para futuros desarrollos en este campo se recomienda complementar la precipitación antecedente en intervalos menores a los propuestos, no en términos acumulados, sino en función de intensidades. Para ello, es posible construir series climatológicas de intensidades e introducirlas como nuevas variables a este tipo de modelos, dando así cubrimiento a periodos más pequeños de medición de la precipitación, en donde realizar curvas de precipitación acumulada no tendría sentido. Este tipo de incorporaciones posibilitarían la detección de zonas en las cuales las precipitaciones de alta intensidad son predominantes en el desarrollo de fenómenos de movimientos en masa. Así pues, a la hora de trabajar con este tipo de variables, es fundamental no fijar umbrales fijos a nivel nacional a partir de los cuales sea posible el desarrollo de un deslizamiento, entendiendo que la dinámica y comportamiento de la precipitación obedece a condiciones locales.
 - iv) La precipitación crítica propuesta en esta investigación, producto de la fusión de la precipitación antecedente en diferentes intervalos, puede constituirse en un insumo para la evaluación de otro tipo de fenómenos de origen hidrometeorológico, como lo son aquellos de origen hidrológico; crecientes

súbitas, lentas o avalanchas torrenciales e inclusive, desde una perspectiva antagónica a la presentada en esta investigación, como la identificación de áreas de muy bajas precipitaciones que favorecerían el desarrollo de incendios de la cobertura vegetal.

7. Bibliografía

- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). *Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia*. 17.
- Aristizábal, E., Riaño, F., & Jiménez-Ortiz, J. (2022). Umbrales de lluvia como detonante de movimientos en masa en el piedemonte de la cordillera Central en los Andes colombianos. *Boletín de Geología*, 44(2), 183.
<https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022009>
- Aristizábal, E., & Sánchez, O. (2020). Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes. *Disasters*, 44(3), 596-618. <https://doi.org/10.1111/disa.12391>
- Aristizábal, E., Vélez Upegui, J. I., & Martínez Carvajal, H. E. (2017). Influencia de la lluvia antecedente y la conductividad hidráulica en la ocurrencia de deslizamientos detonados por lluvias utilizando el modelo shia_landslide. *Revista EIA*, 13(26), 31-46. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.863>
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Un aporte para la construcción de políticas públicas*. (Primera Edición).
<http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>
- Caridad y Ocerin, J. M. (1998). *Econometría: Modelos econométricos y series temporales con los paquetes TSP*. Tomo 1. Reverté.

- Chiorean, V.-F. (2017). Determination of Matric Suction and Saturation Degree for Unsaturated Soils, Comparative Study—Numerical Method versus Analytical Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 032074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/3/032074>
- Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo SNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- Ley 9 de 1979, Pub. L. No. 9 (1979).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1177>
- Ley 46 de 1988, Pub. L. No. 46 de 1989 (1988). <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1788525>
- Decreto Ley 919 de 1989, Pub. L. No. 919 (1989).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=13549>
- Ley 99 de 1993, Pub. L. No. Ley 99 de 1998 (1993).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Ley 388 de 1997, Pub. L. No. 388 de 1997 (1997).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339#:~:text=Garantizar%20que%20la%20utilizaci%C3%B3n%20del,como%20por%20la%20protecci%C3%B3n%20del>
- Decreto Ley 4147 de 2011, (2011).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=44600#:~:text=Coordinar%20impulsar%20y%20fortalecer%20capacidades,y%20Atenci%C3%B3n%20de%20Desastres%20%E2%80%93SNPAD>
- Ley 1523 de 2012, Pub. L. No. 1523 (2012).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141#:~:te>

- xt=Cr%C3%A9anse%20los%20Consejos%20departamentales%2C%20distritales,
de%20manejo%20de%20desastres%20en
- de Blasio, F. V. (2011). *Introduction to the Physics of Landslides*. Springer Netherlands.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-1122-8>
- Dirmeyer, P. A., Schlosser, C. A., & Brubaker, K. L. (2009). Precipitation, Recycling, and Land Memory: An Integrated Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1), 278-288. <https://doi.org/10.1175/2008JHM1016.1>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Rowland, J., Romero, B., Husak, G., Michaelsen, J., & Verdin, A. (2014). *A Quasi-Global Precipitation Time Series for Drought Monitoring* (U.S. Geological Survey Data Series N.º 832; Data Series, p. 4). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/ds/832/pdf/ds832.pdf>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides* (Geological Survey Circular N.º 1325; Circular). United States Geological Survey - USGS.
https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf
- IDEAM, I. de H., Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Promedios Climatológicos 1981—2010*.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/553571/Promedios+Climatol%C3%B3gicos++1981++2010.xlsx/f28d0b07-1208-4a46-8ccf-bddd70fb4128>
- Johnson, R. A. (2012). *Probabilidad y estadística para ingenieros de Miller y Freund*. Pearson.

- Londoño Linares, J. P. (2007). Evaluación holística de riesgos frente a movimientos en masa en áreas urbanas andinas. Una propuesta metodológica. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 55-72.
- Lopes, R. H. C. (2011). Kolmogorov-Smirnov Test. En M. Lovric (Ed.), *International Encyclopedia of Statistical Science* (pp. 718-720). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_326
- Marín, R. J., García-Aristizábal, E., & Aristizábal, E. (2019). Rainfall thresholds for shallow landslides based on physical models: Application in a sub-basin of the Valle de Aburrá (Colombia). *DYNA*, 86(210), 312-322.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.77166>
- Marques Dos Santos, M. J. (2001). *Estadística Basica Un enfoque no parametrico*. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://books.google.com.co/books?id=SaGNZ9CDIe0C>
- Martínez Ardila, N. J., Corrales Cobos, J. J., & Sánchez Calderón, F. V. (2010). Relación de los Deslizamientos y La Dinámica Climática en Colombia. *Experiencias en el Uso y Aplicación de Tecnologías Satelitales para Observación de la Tierra*, 80-97.
- Mayorga Márquez, R. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 7, 157-168.
- NOAA's, C. P. C. (2021, junio 16). *NOAA's Climate Prediction Center. Cold & Warm Episodes by Season*.
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Peña-Rincón, C. A. (2017). Datos de precipitación con el modelo HSB para pronóstico de deslizamiento de suelos superficiales. *Boletín de Geología*, 39(2), 49-56.
<https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017003>

- Ramos Cañón, A. M., Trujillo Vela, M. G., & Prada Sarmiento, L. F. (2015). Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: Una revisión crítica. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 61. <https://doi.org/10.18359/rcin.1432>
- Reyes, N., Connor, R., Kriege, N., Kazempour, D., Bartolini, I., Schubert, E., & Chen, J.-J. (Eds.). (2021). *Similarity Search and Applications: 14th International Conference, SISAP 2021, Dortmund, Germany, September 29 – October 1, 2021, Proceedings* (Vol. 13058). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89657-7>
- Ruiz, G., Medina, E., Alvarado, C., Trejos, G., Sandoval, J., Montero, J., López, S., & Ortegón, C. (2012). *Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en masa (escala 1:500.000)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14231.16800>
- Ruiz Peña, G. L., Barrera Parrales, L. A., Gamboa Rodríguez, C. A., Sandoval Ramírez, J. H., & Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia: Una visión a escala 1:100.000*.
- Rybar, J. (2018). *Landslides: Proceedings of the First European Conference on Landslides, Prague, Czech Republic, 24-26 June 2002*. CRC Press. <https://books.google.com.co/books?id=mIMPEAAAQBAJ>
- Sarabia Alegría, J. M., Pascual Sáez, M., & Universidad de Cantabria. (2005). *Curso básico de estadística para economía y administración de empresas*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- SGC, S. G. C. (2020). *Sistema de Información de Movimientos en Masa. SIMMA*. <http://simma.sgc.gov.co/>
- UNGRD, U. N. para la G. del R. de D. (2022). *Consolidado Anual de Emergencias. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) 1998—2020*.

<http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>

Villalobos, F. (2016). *Mecánica de suelos* (Segunda Edición). Ediciones UCSC.

<https://elibro.net/es/ereader/elibrodemo/196179>

World Meteorological Organization (Ed.). (1992). *International meteorological vocabulary*

=: *Vocabulaire météorologique internationale* (2nd ed). Secretariat of the World

Meteorological Organization.

Wu, L., Huang, R., & Li, X. (2020). *Hydro-mechanical Analysis of Rainfall-Induced*

Landslides. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0761-8>