

movimientos en masa

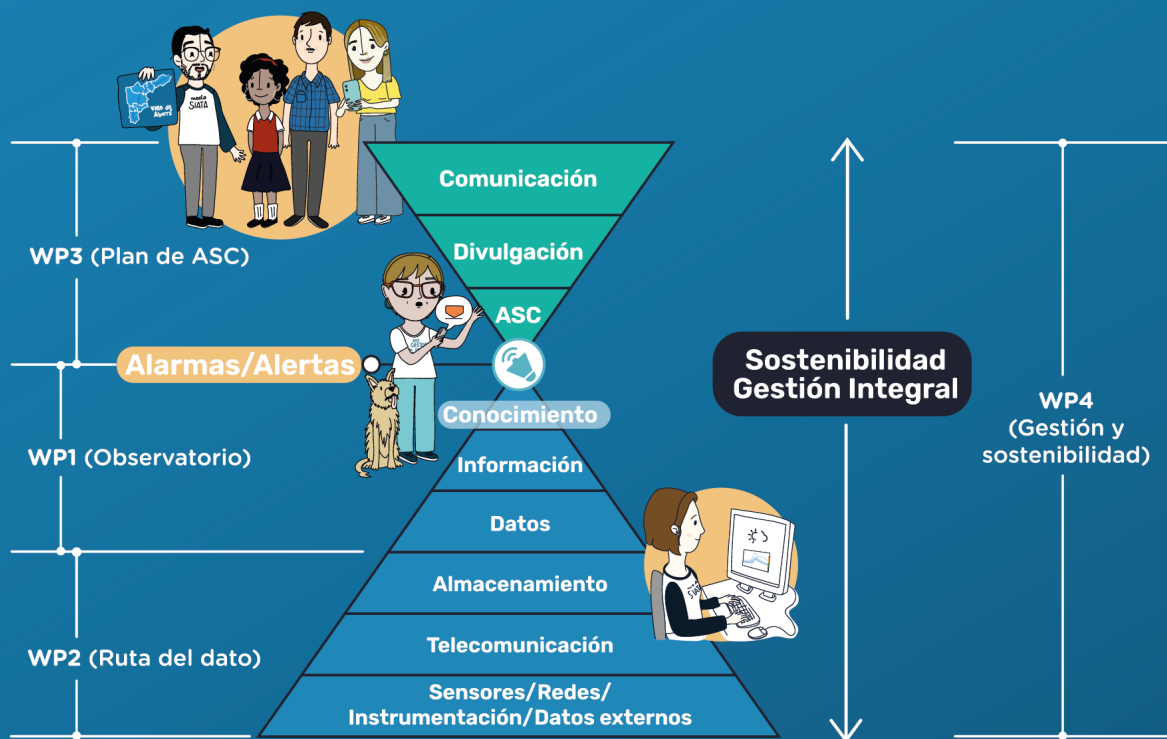


CCT 016

de 2024

Elaborado por: Universidad EAFIT

Desarrollar actividades de **investigación aplicada, desarrollo tecnológico y apropiación social del conocimiento para la acción preventiva, la toma de decisiones oportuna para una gestión efectiva del riesgo** (incluyendo variabilidad y cambio climático), y el seguimiento y análisis integral de variables relacionadas con la calidad del aire en el territorio metropolitano, **apoyando el proceso de formulación de políticas públicas y el fortalecimiento de la gobernanza por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá**, garantizando el estricto cumplimiento de las actividades de carácter obligatorio reguladas por el marco legal vigente.



Contenido

1. Estudio de la precipitación y su relación con los movimientos en masa	1
Resumen	1
Introducción	1
Área de estudio	2
Datos	3
Inventario de movimientos en masa	3
Datos de precipitación	3
Metodologías	5
Metodología para la definición de umbrales de lluvia Reciente – Antecedente (R – A) en términos de probabilidad	5
Metodología para la definición de percentiles críticos	7
Metodología para la elaboración de una Base de Datos para el inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá	9
Metodología para el análisis del Radar Meteorológico	10
Metodología para el análisis de la precipitación a partir de la información de pluviómetros y el radar meteorológico: técnicas de interpolación	11
Metodología para la elaboración de los reportes semanales y diarios de alertas por lluvia crítica que puede detonar movimientos en masa	12
Resultados	13
Resultados asociados a la definición de Umbrales Reciente - Antecedente	13
Resultados asociados a percentiles críticos de lluvia	15
Resultados asociados a la Base de Datos inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá	17
Resultado del Análisis del Radar Meteorológico	18
Resultados análisis de la precipitación a partir de la información de pluviómetros y el radar meteorológico: técnicas de interpolación	25
Resultados reportes semanales y diarios de alertas de lluvia crítica que detona movimientos en masa	30
Discusión y conclusiones	31
Umbrales de lluvia Reciente - Antecedente	31



Percentiles 32

Análisis del Radar Meteorológico 32

Análisis de la precipitación a partir de la información de pluviómetros y el radar meteorológico:
técnicas de interpolación 33

Reportes semanales y diarios de alertas de lluvia crítica que detona movimientos en masa 34

Referencias 34

Resultados asociados a la Base de Datos inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá 39

Resultado del Análisis del Radar Meteorológico 40

1 Estudio de la precipitación y su relación con los movimientos en masa

Investigador: Oscar Ivan Sanchez Patiño

Resumen

Este documento presenta los estudios y análisis realizados sobre la relación entre la precipitación y los movimientos en masa en el Valle de Aburrá, desarrollados durante la ejecución del proyecto. El objetivo principal fue diseñar herramientas innovadoras que contribuyan al estado del arte y puedan integrarse en sistemas de alerta temprana para movimientos en masa. El estudio abarcó varios aspectos clave, entre ellos: La definición de umbrales de lluvia reciente-antecedente en términos de probabilidad; El análisis de percentiles críticos de lluvia que pueden detonar movimientos en masa; La elaboración de una base de datos para registrar y gestionar información sobre movimientos en masa; El análisis de la información del radar meteorológico y su relación con los movimientos en masa; La aplicación de técnicas de interpolación para combinar datos de pluviómetros y radar meteorológico; El diseño y desarrollo de un sistema automatizado para generar reportes diarios y semanales de alertas por lluvia crítica, integrando información de la red pluviométrica, el radar meteorológico y los umbrales de lluvia definidos. Estos análisis y herramientas ofrecen recursos valiosos para la implementación de sistemas de alerta temprana por movimientos en masa detonados por lluvias. Además, están orientados a apoyar a los tomadores de decisiones, mejorando su capacidad de respuesta ante eventos que puedan generar pérdidas.

Introducción

Los movimientos en masa constituyen una de las amenazas naturales más significativas a nivel global, provocando cada año considerables pérdidas humanas y daños ambientales (Petley, 2012). Entre los factores que desencadenan estos eventos, la lluvia se destaca como uno de los más comunes (Guzzetti, 2000; Kirschbaum et al., 2010; Petley, 2012). A nivel regional, una de las estrategias más efectivas para analizar la influencia de la lluvia en la ocurrencia de movimientos en masa es el uso de umbrales de precipitación. Un umbral se define como la cantidad mínima de lluvia a partir de la cual es probable que ocurran movimientos en masa (Reichenbach et al., 1998; Guzzetti et al., 2007; Segoni et al., 2018). Por esta razón, los umbrales de lluvia se han consolidado como herramientas clave en el diseño de sistemas de alerta temprana, que buscan mitigar los riesgos asociados a este tipo de eventos.

Una de las principales ventajas de los sistemas de alerta temprana basados en umbrales críticos de lluvia es que el monitoreo de la precipitación resulta relativamente sencillo y económicamente viable en grandes áreas geográficas (IEWP, 2005). Sin embargo, en Colombia no se ha desarrollado una metodología

específica y detallada para implementar un sistema de alerta temprana dirigido a movimientos en masa inducidos por lluvias. Aunque en el Valle de Aburrá, así como en otras regiones del país, se han llevado a cabo investigaciones relevantes, la relación entre las condiciones de lluvia y los deslizamientos aún requiere un estudio más exhaustivo (Hidalgo and Vega, 2014).

A nivel local, Moreno et al. (2006) fueron pioneros en modelar la influencia de la precipitación en los movimientos en masa en Antioquia, proponiendo umbrales basados en la lluvia acumulada durante tres días anteriores y los 15 días subsiguientes, relacionando estos valores con la ocurrencia de deslizamientos. Posteriormente, Aristizábal et al. (2010) definieron umbrales específicos para el Valle de Aburrá, considerando combinaciones de lluvias acumuladas de 0 a 100 mm en cinco días, junto con lluvias antecedentes de 60 mm en 30 días, 160 mm en 60 días y 200 mm en 90 días. Más recientemente, Marin (2020) presentó una metodología basada en umbrales de intensidad-duración, utilizando un modelo físico aplicado a 108 subcuencas del Valle de Aburrá. A pesar de estos avances, persiste la necesidad de una herramienta que opere en tiempo real y proporcione información confiable sobre las lluvias capaces de desencadenar movimientos en masa en la región.

El objetivo de este estudio es identificar, analizar y evaluar diversas metodologías para desarrollar herramientas que puedan integrarse en un sistema de alerta temprana para movimientos en masa detonados por lluvias. Estas herramientas están diseñadas para su implementación operativa utilizando los datos proporcionados por la red de pluviómetros del proyecto SIATA y la información del radar meteorológico.

Como punto de partida, se trabajó con la metodología de umbrales de lluvia reciente-antecedente (R-A), basada en los enfoques de Chleborad et al. (2006) y Aristizábal et al. (2010). Posteriormente, se exploraron los percentiles críticos de lluvias históricas registradas por los pluviómetros y se realizó una clusterización de zonas con patrones de lluvia similares. También se analizó la información del radar meteorológico, identificando patrones de precipitación y su relación con el inventario de movimientos en masa. Adicionalmente, se estudiaron diversas técnicas de interpolación para integrar la información de los pluviómetros y del radar en un mapa unificado de lluvia acumulada.

Finalmente, se diseñó un sistema automatizado para generar reportes diarios y semanales, que toma en cuenta las lluvias registradas en los días previos para identificar las zonas con mayor probabilidad de lluvias críticas capaces de detonar movimientos en masa.

El documento se organiza en varias secciones. En primer lugar, se describe el área de estudio y los datos utilizados, tanto de precipitación como de movimientos en masa. A continuación, se detalla la metodología empleada en cada uno de los análisis realizados. Luego, se presentan los resultados de las metodologías explicadas anteriormente. Por último, se incluyen las conclusiones y la discusión de los principales hallazgos de este estudio.

Área de estudio

El Valle de Aburrá, ubicado en la Cordillera Central de los Andes Colombianos, cubre una extensión de 1.173 km². Este valle alberga 10 municipios, con una población total aproximada de 4.1 millones de habitantes (DANE, 2018). Se distingue por ser un cañón embebido en un sistema de altiplanos, exhibiendo variaciones altitudinales desde los 1.500 m.s.n.m. hasta los 2.300 m.s.n.m. El régimen de lluvias del Valle de Aburrá está significativamente influenciado por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), generando dos periodos de lluvias durante los meses de marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre, intercalados con periodos menos lluviosos en junio-julio-agosto y diciembre-enero-febrero (Mesa et al., 1999). Adicionalmente, la variabilidad interanual de las precipitaciones está afectada por las fases de El Niño y La Niña, fenómenos que contribuyen a alteraciones

significativas en los patrones climáticos locales (Mesa et al., 1999; Poveda and Mesa, 2000; Pabon et al., 2001).

Datos

Inventario de movimientos en masa

Se utilizaron dos fuentes principales de inventarios para realizar los análisis: el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo y Desastres (DAGR) y el Semillero de Investigación Geohazards de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. El DAGRD proporciona datos de emergencias reportadas a través de la línea de atención 123, cubriendo el período de septiembre de 2020 a marzo de 2023, con 4,153 eventos. El Semillero Geohazards complementa esta información con registros desde 1970 hasta 2023, para los demás municipios del Valle de Aburrá, fuera de Medellín.

Se seleccionó el período de 2013 a 2023 para alinear con los registros históricos de lluvias de SIATA. Se realizó una depuración, asegurando que los eventos seleccionados se relacionaban principalmente con lluvias y no con otras causas, como factores antrópicos. Para esto, se seleccionaron aquellos eventos que tuvieron más de 20 mm de acumulado en el día previo a la ocurrencia del evento y que tuviera más de 300 mm de acumulados durante los 90 días antecedentes. Finalmente, se obtuvieron 801 eventos relacionados principalmente con lluvias. El 97 % de estos eventos provienen del inventario del DAGRD, destacando la importancia de Medellín debido a su densidad poblacional y su avanzada sistematización en el registro de eventos de movimientos en masa. La Figura 1.1 muestra la distribución espacial de los eventos del inventario recopilado.

A pesar de la rigurosa depuración realizada en los datos de movimientos en masa y precipitación, existen limitaciones significativas que deben considerarse al interpretar y valorar los resultados obtenidos. Estas limitaciones incluyen incertidumbres en la ubicación espacial y temporal de los movimientos en masa, la calidad de los datos de lluvia registrados, el área de influencia de las estaciones pluviométricas y las incertidumbres inherentes a las metodologías aplicadas. Aunque se asume que los movimientos en masa analizados fueron desencadenados por lluvias, otros factores, como la actividad antrópica, podrían haber contribuido. La exactitud en la fecha y hora de cada evento está sujeta a la precisión del organismo o entidad que completó el registro, lo cual puede introducir un grado de subjetividad. Asimismo, la localización de los eventos no siempre refleja con exactitud el lugar del suceso; en algunos casos, se basa en direcciones o áreas conocidas, con un margen de error que podría alcanzar decenas de metros.

Datos de precipitación

Red pluviométrica

Para los análisis realizados, se tomaron en cuenta el registro de la red de pluviómetros del proyecto SIATA. Se seleccionaron las estaciones que tuvieran el mayor registro histórico de datos, aproximadamente desde el 2012 hasta 2024. La Figura 1.1 muestra la ubicación de los pluviómetros utilizados en los análisis, junto con la proximidad de los eventos del inventario de movimientos en masa. Para correlacionar los eventos de lluvia con los movimientos en masa del inventario, se consideraron los eventos que ocurrieron dentro de un radio de 5 km alrededor de cada pluviómetro. En casos donde un evento estuviera en el rango de dos estaciones (dentro del radio de 5 km), se asoció al pluviómetro más cercano al sitio del evento. Así, cada evento del inventario tiene asignado el pluviómetro más próximo.

Algunas limitaciones del registro pluviométrico se asocian a la variación en la altura de las estaciones pluviométricas, aumentando la incertidumbre sobre la lluvia específica que desencadenó el movimiento en masa. Además, la calidad de los datos de lluvia puede verse afectada por diversos factores, como daños en las estaciones, fallos de energía eléctrica del lugar o fallos en el registro y almacenamiento de los datos, lo que impide una representación precisa de las precipitaciones reales que provocaron los eventos.

Radar Meteorológico

Se seleccionó el registro histórico de lluvias del Radar Meteorológico, abarcando el período comprendido entre 2016 y 2024. Los datos, disponibles en formato de coordenadas polares con una frecuencia horaria, fueron sometidos a diversos procesos para su análisis. Entre estos, se incluyó la conversión a coordenadas cartesianas, el recorte de los barridos exclusivamente a la zona de interés, en este caso el Valle de Aburrá, y el ajuste de la resolución espacial a 500 metros.

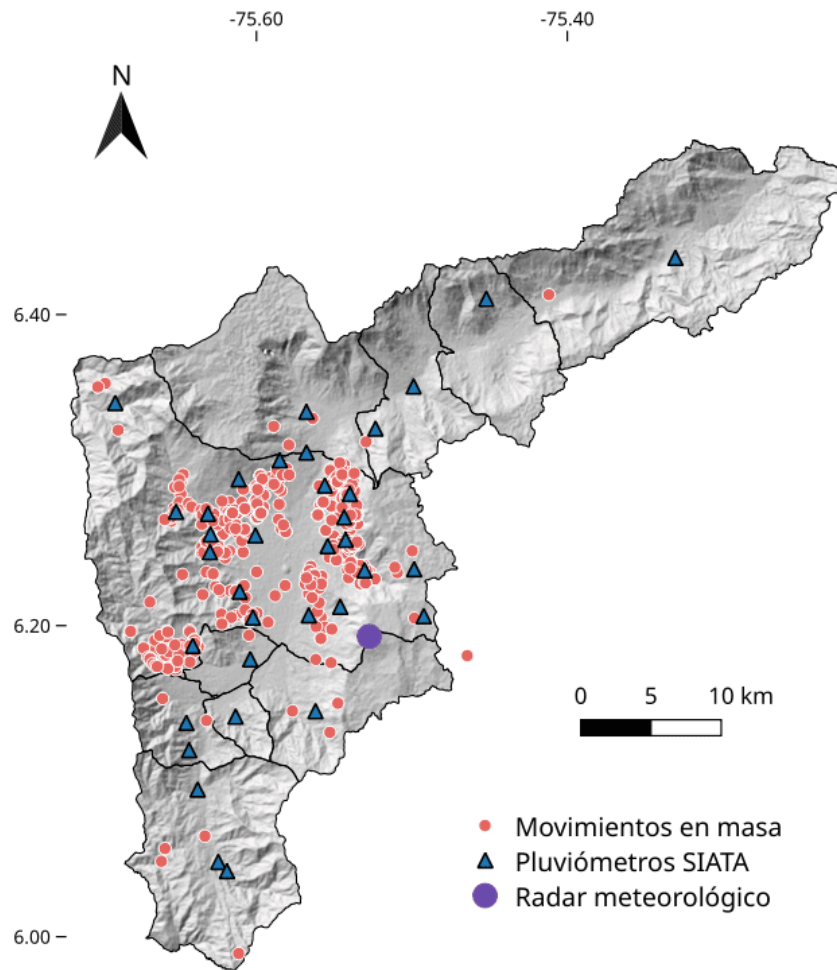


Figura 1.1: Mapa del Valle de Aburrá mostrando las ubicaciones de los eventos de los inventarios recopilados, con un total de 801 eventos. Los eventos del DAGRD (Medellín) abarcan el período de 2020 a 2023, y los de Geohazards de 2013 a 2023. Los 35 pluviómetros seleccionados del SIATA están marcados con triángulos azules.

Metodologías

Metodología para la definición de umbrales de lluvia Reciente – Antecedente (R – A) en términos de probabilidad

Los umbrales de lluvia Reciente - Antecedente, referidos en la literatura como umbrales de lluvia antecedente, están relacionados con los tipos de umbrales de precipitación que se derivan utilizando metodologías estadísticas y empíricas (Balducci et al., 2006; Chleborad et al., 2006). Estos umbrales se basan en el acumulado total de precipitación registrado en los días previos a un movimiento en masa. Para establecer estos umbrales, el estudio se centró en el análisis de dos variables específicas de precipitación antecedente.

La primera variable, nombrada Lluvia Acumulada (LA) o precipitación antecedente a corto plazo, refleja el acumulado de lluvia registrado en los días previos al evento. Por ejemplo, un LA de 5 días evalúa la precipitación acumulada en esos 5 días previos al evento. La segunda variable, llamada Lluvia Acumulada Antecedente (LAA) o precipitación de largo plazo, representa el acumulado de lluvia en los días anteriores al período considerado para LA. Por ejemplo, un LAA de 15 días indicaría la precipitación acumulada durante los 15 días antes del período de 5 días de LA. La Figura 1.2 muestra un gráfico esquemático de una serie temporal de lluvia ilustrando estas dos variables.

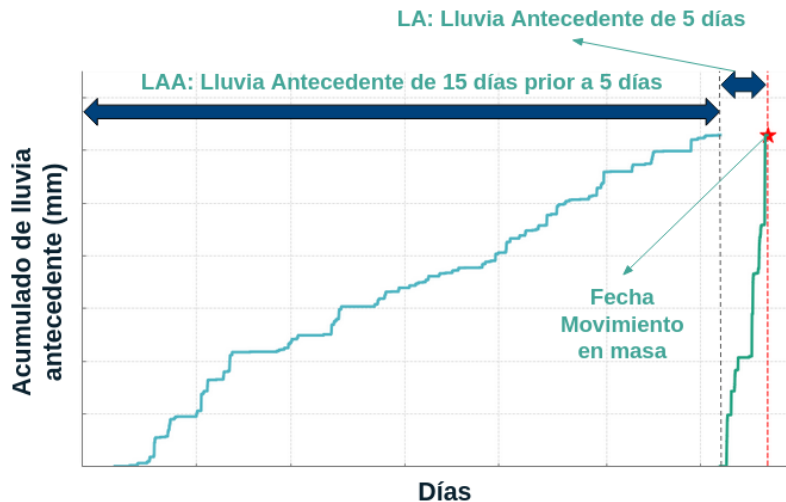


Figura 1.2: Mapa del Valle de Aburrá mostrando las ubicaciones de los eventos de los inventarios recopilados, con un total de 801 eventos. Los eventos del DAGRD (Medellín) abarcan el período de 2020 a 2023, y los de Geohazards de 2013 a 2023. Los 35 pluviómetros seleccionados del SIATA están marcados con triángulos azules.

Se realizó el cálculo de la lluvia antecedente para diferentes intervalos temporales correspondientes a cada evento. Se realizaron variadas combinaciones de días para la LA y LAA. Para LA, los períodos estudiados fueron de 1, 3, 5 y 7 días, y para LAA, de 15, 30, 60 y 90 días. Combinando estos intervalos de LA y LAA, se buscó determinar cuáles ofrecían mayor claridad para distinguir entre los patrones de precipitación que incrementan la probabilidad de movimientos en masa y aquellos que no. Para la definición del umbral se utilizaron algunas técnicas de clasificación supervisada. Se exploraron tres algoritmos: Regresión Logística (RL), Máquina de Vectores de Soporte (SVM) y Análisis Discriminante Lineal (LDA), elegidos por su prevalencia en la literatura y su eficacia en clasificar linealmente entre grupos, diferenciando los eventos de lluvia que causan deslizamientos de los que no. Adicionalmente, se usaron 801 eventos de lluvia que no resultaron en movimientos en masa tomados aleatoriamente entre 2013 y 2023, que superaron los 5 mm diarios y 100 mm en 90 días, para entrenar y evaluar los modelos, dividiendo los eventos en aquellos que resultaron y no resultaron en movimientos en masa.

Para cada combinación de días considerada, se evaluó el rendimiento de los tres algoritmos de clasificación anteriormente mencionados. Con el objetivo de identificar cuál combinación de días y qué algoritmo mostraban un desempeño superior en la clasificación de eventos de lluvia que generan movimientos en masa frente a los que no, se calcularon diversas métricas de rendimiento. Estas incluyen Accuracy, F1-Score, la curva ROC y el Área Bajo la Curva ROC (AUC), cuyos detalles se explican en el capítulo correspondiente a Metodologías de Validación. Para el entrenamiento y evaluación de cada algoritmo y combinación de días, se utilizó una división del 80 % de los datos para entrenamiento y el 20 % restante para evaluación.

Umbrales en función de probabilidades

Dado que los umbrales de lluvia Reciente - Antecedente pueden presentar limitaciones al proporcionar información sobre la lluvia crítica que desencadena movimientos en masa, en esta sección se explora la misma metodología de umbrales, pero el resultado final se expresa en términos de probabilidad. En el trabajo anterior, los umbrales se establecieron utilizando tres algoritmos de clasificación (Regresión Logística, Máquina de Soporte Vectorial y Análisis Discriminante Lineal) y se definieron líneas de decisión para distinguir la lluvia crítica —aquella que incrementa la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa— de la que no lo es. En esta ocasión, se aplicaron las mismas metodologías, pero los umbrales se definieron en términos de probabilidad.

Los umbrales definidos se basaron en las métricas obtenidas de la Curva ROC. Esta curva es un gráfico cartesiano bidimensional que describe el rendimiento y la eficacia de un modelo, mostrando la tasa de verdaderos positivos (eje y: TPR) contra la tasa de falsos positivos (eje x: 1-TNR) para diferentes escenarios de probabilidad. En este contexto, el TPR, también conocido como Sensibilidad, mide la proporción de casos de deslizamiento correctamente identificados (es decir, deslizamientos que superaron el umbral) entre todos los eventos de lluvia con deslizamientos observados. Por ejemplo, un TPR del 90 % indica que el modelo identifica correctamente el 90 % de las lluvias que provocaron deslizamientos. Por otro lado, el TNR evalúa la capacidad del modelo para identificar correctamente los días sin deslizamientos, es decir, la proporción de días lluviosos correctamente clasificados sin deslizamientos (que no superan el umbral) entre todos los eventos de lluvia observados sin deslizamientos.

Considerando lo anterior, un umbral óptimo se puede definir cuando tanto el TPR como el TNR son altos. Por esta razón, un TPR del 95 % puede interpretarse como un umbral con una probabilidad de excedencia del 5 %, un criterio común en la literatura que sugiere que el 95 % de las lluvias asociadas con deslizamientos superan el umbral definido, mientras que solo el 5 % no lo hace. En este análisis, se extrajeron tres umbrales de probabilidad. El primer umbral se asocia con un TPR del 95 %, el segundo corresponde al punto óptimo en la Curva ROC, que es el punto más cercano a la clasificación perfecta, es decir, un TPR y TNR del 100 % (esquina superior izquierda de la gráfica ROC). El tercer umbral se define con una probabilidad asociada a un TNR del 95 %, es decir, la más alta proporción de días sin deslizamientos correctamente clasificados.

Estos umbrales, basados en la Curva ROC y en la probabilidad asociada, se calcularon para cada uno de los modelos de clasificación previamente utilizados, así como para combinaciones de días anteriormente trabajadas: 7 días frente a 90 días anteriores a los 7 días, y 1 día frente a 90 días anteriores al día.

Metodología para la definición de percentiles críticos

Los percentiles son medidas estadísticas que indican la posición relativa de un valor dentro de un conjunto de datos ordenados de menor a mayor. Un percentil se expresa en términos de porcentaje y divide el conjunto de datos en 100 partes iguales. Por ejemplo, el percentil 25 (P25) es el valor bajo el cual se encuentra el 25 % de los datos, y el percentil 75 (P75) es el valor bajo el cual se encuentra el 75 % de los datos. Los percentiles también permiten identificar valores atípicos dentro de un conjunto de datos.

Para este análisis, los percentiles se utilizaron con el objetivo de entender la distribución de los datos de precipitación en el Valle de Aburrá y observar en qué percentiles se ubican los eventos de lluvia que detonaron los movimientos en masa del inventario recopilado.

El análisis se llevó a cabo en cuatro grandes pasos, explicados a continuación y esquematizados en la Figura 1.3:

- I. **Datos:** Se tomaron los datos históricos de la red de pluviómetros de SIATA y el inventario de movimientos en masa recopilados en meses anteriores.
- II. **Análisis de clustering:** Las series históricas de cada estación pluviométrica se remuestrearon a escala diaria y se seleccionaron las estaciones con datos mayores a 8 años. Luego, se agruparon las estaciones con patrones de lluvia similares mediante un análisis de clustering, utilizando la metodología de clustering jerárquico (Hierarchical Clustering). Finalmente, se escogió un número óptimo de clusters que describieran el comportamiento de lluvias en distintas zonas del Valle de Aburrá.
- III. **Cálculo de percentiles:** Se calcularon los percentiles históricos para cada cluster establecido, para acumulados de lluvia desde 1 día hasta 90 días. Posteriormente, se asignó a cada evento del inventario de movimientos en masa el cluster correspondiente según su ubicación, y se calculó el percentil en el que se encontraba cada evento del inventario, desde el acumulado de un día hasta el de 90 días.
- IV. **Definición de niveles de lluvia crítica a partir de percentiles:** Se realizó un análisis de K-Means para agrupar los intervalos de percentiles en los que se encuentran los eventos del inventario para cada día de acumulado analizado. Se optó por una agrupación de tres grupos con el fin de establecer tres categorías de lluvia crítica: el primer grupo incluye los eventos del inventario que se encuentran en los percentiles más bajos, el segundo grupo incluye los eventos en percentiles medios a altos, y el tercer grupo incluye los eventos en los percentiles más altos. Se calcularon distintas métricas para estimar los días en los que se realizaba mejor el agrupamiento de los percentiles del inventario. A partir de estos días, se identificaron los límites de los percentiles que delimitaban los tres grupos identificados con K-Means, estableciendo así los intervalos de percentiles para clasificar la lluvia crítica como baja, media o alta.

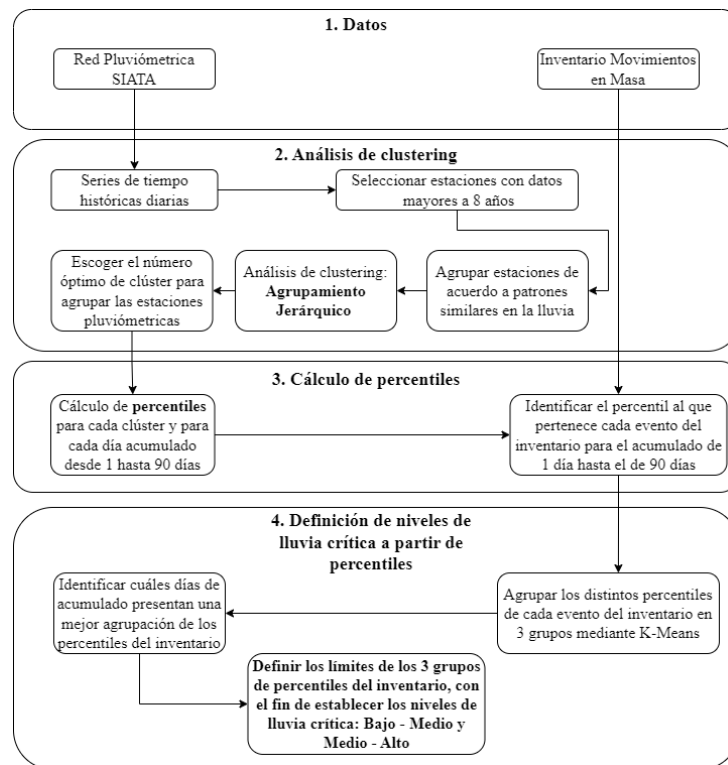


Figura 1.3: Esquema general mostrando la metodología para definir diferentes categorías de lluvia crítica que detona movimiento en masa a partir de percentiles de precipitación.

Metodología para la elaboración de una Base de Datos para el inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá

Para la construcción de la base de datos lo primero que se hizo fue definir los campos o columnas que tendría la tabla. Luego, se revisaron teniendo en cuenta la asesoría del equipo de Servidores para definir las características y restricciones de cada uno de los campos a llenar. Una vez definido esto, se construyó la base de datos en el servidor Nazca utilizando el gestor de base de datos PostgreSQL, un sistema de gestión de bases de datos relacional orientado a objetos y de código abierto.

En la Tabla 1.2 del Anexo se presentan cada uno de los campos definidos para la base de datos, el tipo de datos de cada campo, sus restricciones y la descripción de los mismos, algunos con observaciones. Cabe destacar que los campos *fecha hora evento*, *latitud* y *longitud* presentan restricciones denominadas *PRIMARY KEY*, lo que significa que los valores ingresados en estos campos deben ser únicos. Si los datos en los tres campos mencionados son iguales, no se ingresarán a la base de datos, evitando así la duplicación de la información. Otra restricción que tienen algunos campos es *NOT NULL*, lo cual indica que es obligatorio llenarlos, de lo contrario no se realizará el registro. Estos campos son: *id*, *fecha del registro*, *nombre del que registra*, *entidad*, *cargo*, *incertidumbre fecha*, *incertidumbre ubicación*, *municipio* y *validado*. Los demás campos son opcionales.

Metodología para el análisis del Radar Meteorológico

Para llevar a cabo el análisis utilizando los datos del radar meteorológico, se implementaron algunos procedimientos, los cuales se describen a continuación:

- I. **Recopilación y tratamiento de datos históricos del radar meteorológico:** Se recopiló toda la información histórica de los barridos de radar correspondientes a un ángulo de elevación de 1° . Para el análisis, se transformaron los datos a una escala horaria, con coordenadas cartesianas, a una resolución de 500 m, considerando únicamente el área del Valle de Aburrá.
- II. **Generación de series de tiempo horarias para cada celda del radar:** Cada celda de la matriz de radar que cubre el Valle de Aburrá fue tratada como un punto individual para generar su respectiva serie de tiempo. La matriz de 111 filas por 119 columnas resultó en 13,209 series de tiempo, abarcando el período desde finales de 2015 hasta junio de 2024. En la Figura 1.4, se presenta un ejemplo de una serie de tiempo para una celda específica, que incluye la fecha, hora, precipitación y coordenadas del punto.

datetime (-75.46956, 6.24544)		
0	2015-11-12 00:00:00	0.000000
1	2015-11-12 01:00:00	0.000000
2	2015-11-12 02:00:00	0.000000
3	2015-11-12 03:00:00	0.178424
4	2015-11-12 04:00:00	0.000000
...	...	...
68227	2023-12-31 19:00:00	0.000000
68228	2023-12-31 20:00:00	0.000000
68229	2023-12-31 21:00:00	0.000000
68230	2023-12-31 22:00:00	0.000000
68231	2023-12-31 23:00:00	0.000000
68232 rows x 2 columns		

Figura 1.4: Ejemplo de una serie de tiempo para una celda específica del radar.

- III. **Definición de eventos de lluvia para cada celda del radar:** Con las series de tiempo horarias generadas para cada celda, se establecieron criterios para identificar los eventos de lluvia. Los dos criterios principales fueron:
 - **Criterio 1:** El evento comienza cuando la precipitación supera un valor determinado, por ejemplo, mayor a 5 mm.
 - **Criterio 2:** Se considera que un evento ha terminado cuando hay un período sin lluvia de una duración específica.
- En la Tabla 1.3 del anexo, se presentan los diferentes criterios utilizados para definir los eventos de precipitación en cada celda del radar.
- IV. **Construcción de una tabla general de eventos de precipitación:** Con los eventos de precipitación definidos para cada celda del radar, se construyó una tabla general que contiene todos los eventos y sus características. Las variables incluidas fueron:
 - Coordenadas de la celda (latitud y longitud).
 - Fecha y hora de inicio del evento.
 - Fecha y hora de finalización del evento.

- Fecha y hora de la máxima intensidad del evento.
- Intensidad máxima del evento (mm/h).
- Intensidad media del evento (mm/h).
- Acumulado total de precipitación del evento (mm).
- Duración total del evento (horas).

En la Figura 1.5, se muestra un ejemplo de la tabla con todos los eventos de precipitación de cada celda del Valle de Aburrá.

	coords	Fec_Ini	Int_max	Fec_IntenMax	Int_media	Acumulado	Duracion	Fec_Fin
0	(-75.22206, 5.97994)	2015-11-12 06:00:00	8.935019	2015-11-12 06:00:00	8.935019	8.935019	1	2015-11-12 07:00:00
1	(-75.22206, 5.97994)	2015-11-13 23:00:00	10.350892	2015-11-13 23:00:00	10.350892	10.350892	1	2015-11-14 00:00:00
2	(-75.22206, 5.97994)	2015-11-15 00:00:00	5.470886	2015-11-15 00:00:00	5.470886	5.470886	1	2015-11-15 01:00:00
3	(-75.22206, 5.97994)	2015-11-15 02:00:00	5.663470	2015-11-15 02:00:00	5.663470	5.663470	1	2015-11-15 03:00:00
4	(-75.22206, 5.97994)	2015-11-15 22:00:00	12.176082	2015-11-15 22:00:00	12.176082	12.176082	1	2015-11-15 23:00:00
...	...	...	...	...	...	...	...	...
7309868	(-75.71706, 6.51094)	2024-05-23 13:00:00	5.819825	2024-05-23 13:00:00	5.819825	5.819825	1	2024-05-23 14:00:00
7309869	(-75.71706, 6.51094)	2024-05-25 17:00:00	5.300777	2024-05-25 17:00:00	5.300777	5.300777	1	2024-05-25 18:00:00
7309870	(-75.71706, 6.51094)	2024-05-27 16:00:00	5.813624	2024-05-27 16:00:00	5.813624	5.813624	1	2024-05-27 17:00:00
7309871	(-75.71706, 6.51094)	2024-05-29 01:00:00	5.089872	2024-05-29 01:00:00	5.089872	5.089872	1	2024-05-29 02:00:00
7309872	(-75.71706, 6.51094)	2024-06-08 22:00:00	8.695171	2024-06-08 22:00:00	8.695171	8.695171	1	2024-06-08 23:00:00

Figura 1.5: Ejemplo tabla con todos los eventos de precipitación del radar y sus variables definidas.

v. **Construcción de una matriz con diferentes estadísticos:** A partir de la tabla de eventos, se calcularon los siguientes estadísticos para cada celda del radar:

- Número total de eventos de lluvia
- Porcentaje de eventos respecto al total
- Intensidad promedio de los eventos
- Intensidad máxima promedio
- Acumulado promedio de precipitación
- Duración promedio de los eventos

vi. **Construcción del mapa del Valle de Aburrá:** Utilizando los estadísticos obtenidos, se generó un mapa del Valle de Aburrá que permite visualizar y analizar el comportamiento espacial de la precipitación de radar en el Valle de Aburrá.

vii. **Comparación de eventos de precipitación con el inventario de movimientos en masa:** Finalmente, se realizó una comparación entre los eventos de lluvia detectados por el radar meteorológico y un inventario de movimientos en masa elaborado a partir de imágenes satelitales de diferentes años. Este análisis permitió identificar correlaciones entre el comportamiento de la precipitación y la ocurrencia de movimientos en masa en el Valle de Aburrá.

Metodología para el análisis de la precipitación a partir de la información de pluviómetros y el radar meteorológico: técnicas de interpolación

Se realizó un mapa de interpolación utilizando la información de la red pluviométrica y el radar meteorológico. Para hacer esto primero se analizaron los datos y se evaluaron distintas técnicas de interpolación. A continuación se describe el procedimiento realizado para escoger la mejor técnica de interpolación y poder realizar el mapa de lluvia acumulada a partir de la información de pluviómetros y del radar:

- I. **Cálculo del acumulado de lluvia y análisis exploratorio de los datos:** Se seleccionó una fecha específica y se calculó el acumulado de lluvia para los 7 días previos, utilizando tanto los datos de la red pluviométrica como los del radar meteorológico. Posteriormente, se realizó un análisis exploratorio para comprender las características principales de los datos obtenidos, evaluando la distribución de la precipitación tanto en pluviómetros como en las celdas de radar.
- II. **Aplicación de los 4 modelos de interpolación:** Con los datos de acumulado de lluvia, se generaron mapas de interpolación utilizando cuatro metodologías: Kriging Ordinario (OK), que se basa únicamente en los datos de los pluviómetros, y tres metodologías que integran datos de radar y pluviómetros: Kriging con Deriva Externa (KED), Conditional Merging (CM) y Kriging con Vecinos Locales (SKLM). Los fundamentos y características de cada uno de estos métodos se explican en detalle más adelante.
- III. **Validación de los modelos de interpolación:** Se realizó una validación cruzada para cada modelo de interpolación, generando los mapas correspondientes. El rendimiento de los modelos se evaluó utilizando las métricas de error cuadrático medio (RSME) y error absoluto medio (MAE), con el fin de identificar el método que ofrece los mejores resultados en términos de precisión.
- IV. **Evaluación del mejor modelo a lo largo de diferentes temporadas:** Una vez seleccionado el modelo de interpolación más adecuado, este se aplicó a varias fechas representativas de diferentes épocas del año. Se seleccionó una fecha por cada trimestre del año, teniendo en cuenta tanto las temporadas de lluvia como las secas (Diciembre-Enero-Febrero, Marzo-Abril-Mayo, Junio-Julio-Agosto, y Septiembre-Octubre-Noviembre) para evaluar el comportamiento del modelo en distintos contextos climáticos.
- V. **Generación del mapa de probabilidad de lluvia crítica:** Con el modelo de interpolación seleccionado, se escogió una fecha en la que se registraron movimientos en masa, y se utilizó el mapa de lluvia interpolado junto con los umbrales de probabilidad previamente definidos en estudios anteriores, para generar un mapa de probabilidad de lluvia crítica. Este mapa se analizó para determinar su capacidad de espacializar con precisión y definir zonas con alta probabilidad de lluvia crítica en el Valle de Aburrá.

Metodología para la elaboración de los reportes semanales y diarios de alertas por lluvia crítica que puede detonar movimientos en masa

La elaboración de los reportes semanales y diarios de la precipitación crítica con potencial para detonar movimientos en masa en el Valle de Aburrá requirió considerar los estudios realizados en los meses previos. Entre los análisis destacados se encuentran: los umbrales de lluvia Reciente-Antecedente, el estudio de la lluvia registrada por el radar Meteorológico y la interpolación de los datos del radar con los obtenidos de la red de pluviómetros.

Estos tres elementos permitieron la construcción de un mapa de alertas por lluvias críticas, en el que se clasifica la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa en tres categorías: alta, media y baja.

En la Figura 1.6 se presenta el esquema metodológico que describe cada uno de los procesos realizados para obtener el producto final: los reportes diarios y semanales que clasifican la probabilidad de lluvias críticas según municipio, vereda y barrio.

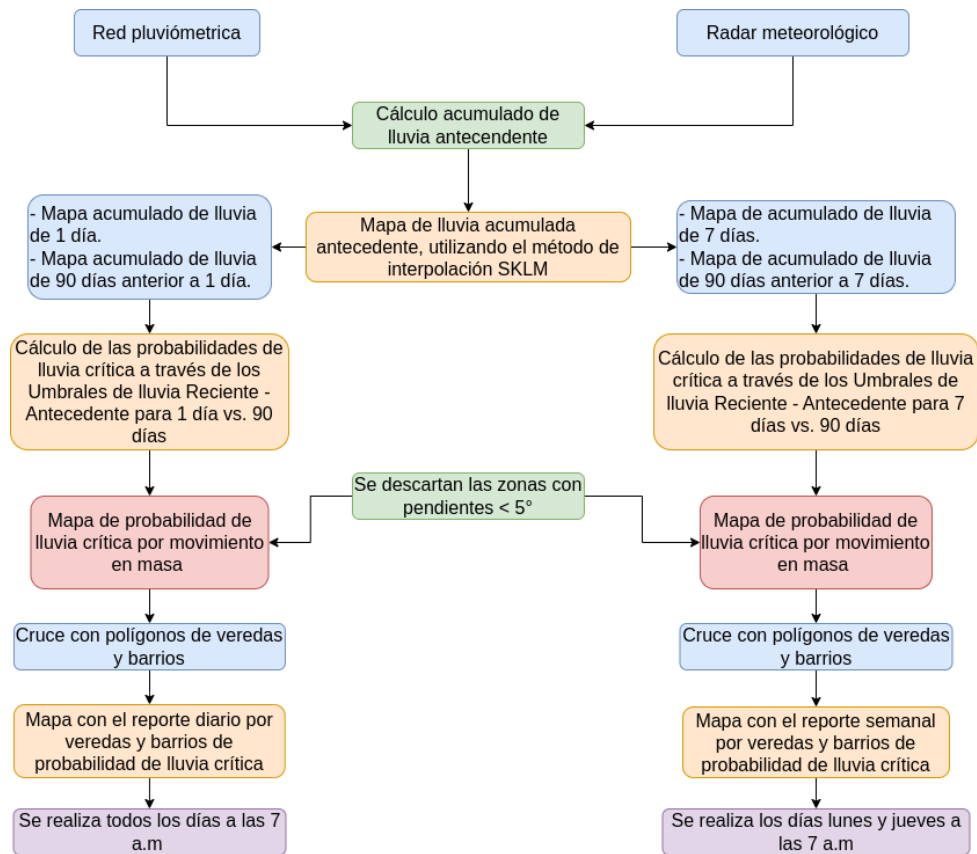


Figura 1.6: Esquema metodológico para la elaboración de los reportes diarios y semanales de alertas por lluvias críticas con potencial para detonar movimientos en masa..

Resultados

Resultados asociados a la definición de Umbrales Reciente - Antecedente

De la métricas de validación escogidas, en este caso F1-Score y Accuracy, se lograron identificar que las combinaciones de días que mejores valores presentaron fueron: 1 día vs. 90, 3 días vs. 90 días, 5 días vs. 90 días y 7 días vs. 90 días. De estas combinaciones se escogieron dos, estas fueron la combinación de 1 días vs. 90 días y las de 7 días vs. 90 días, esto por qué las primeras combinaciones refleja un poco las lluvias diaria o detonante, mientras que la segunda se asocia más a la lluvia antecedente que posiblemente aporta a la humedad en el suelo días anteriores a un evento de lluvia detonante. A continuación, se presentan los resultados de los umbrales de lluvia reciente antecedente para la combinación de 1 día vs. 90 días y 7 días vs. 90 días.

Umbrales en función de probabilidades

En las Figuras 1.7 se presentan los resultados de mejor modelo evaluado, en este caso Regresión Logística. El gráfico de la izquierda representa la combinación de 90 días prior a los 7 días contra los 7 días y sus respectivos valores de probabilidades de lluvia crítica, presentados con diferentes gamas de colores. También se muestran los eventos de lluvia que detonaron movimientos en masa, así como aquellos que no lo hicieron y que formaron parte del testeo o evaluación del modelo, junto con los tres umbrales definidos por la Curva ROC, que se muestran en el segundo gráfico a la derecha, donde se indican con puntos cada uno de los valores de los umbrales. En la Figura 1.8 se presenta la combinación de días de 1 día contra 90 días anteriores a un día.

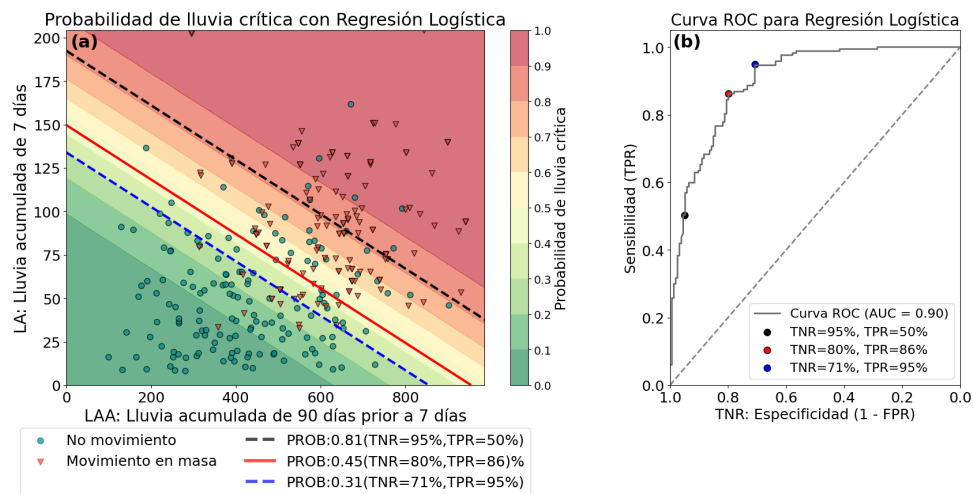


Figura 1.7: (a) Combinación de LA de 7 días y LAA de 90 días prior a 7 días y su respectiva probabilidad hallada con Regresión Logística. Las líneas negra, roja y azul representan los umbrales determinados con la Curva ROC mostrados en forma de puntos en el gráfico (b). También se muestra los datos de validación utilizados para construir la curva ROC (puntos verdes y triángulos rojos). (b) Curva ROC para la combinación de LA de 7 días y LAA de 90 días prior a 7 días con Regresión Logística. El punto azul representa el umbral hallado con un TPR de 95%, el punto rojo es el punto Óptimo y el negro el TNR de 95%.

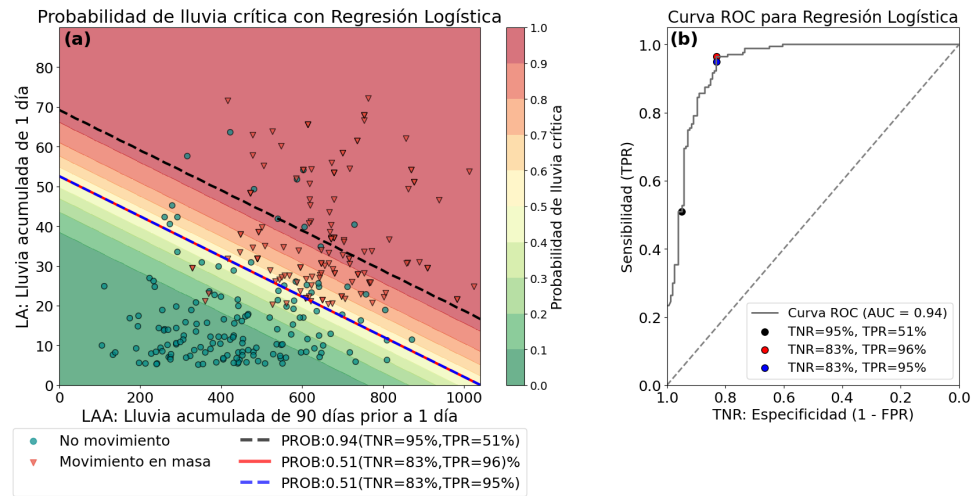


Figura 1.8: (a) Combinación de LA de 1 día y LAA de 90 días prior a 1 día y su respectiva probabilidad hallada con Regresión Logística. Las líneas negra, roja y azul representan los umbrales determinados con la Curva ROC mostrados en forma de puntos en el gráfico (b). También se muestra los datos de validación utilizados para construir la curva ROC (puntos verdes y triángulos rojos). (b) Curva ROC para la combinación de LA de 1 día y LAA de 90 días prior a 1 días con Regresión Logística. El punto azul representa el umbral hallado con un TPR de 95 %, el punto rojo es el punto Óptimo y el negro el TNR de 95 %.

Resultados asociados a percentiles críticos de lluvia

Se definió como óptimo agrupar las 79 estaciones pluviométricas en 6 clústeres. En la Figura 1.9 se presenta el mapa del Valle de Aburrá junto con las 79 estaciones pluviométricas, coloreadas de acuerdo al clúster al que pertenecen. Se puede observar una clara distinción de las zonas: los pluviómetros del norte para los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa; un grupo sobre la zona norte de Medellín y Bello; otro grupo en el oriente y suroriente de Medellín; y otro hacia el occidente. También se aprecia un grupo hacia el suroccidente de Medellín, y finalmente, los pluviómetros que abarcan los municipios del sur como Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella y Caldas.

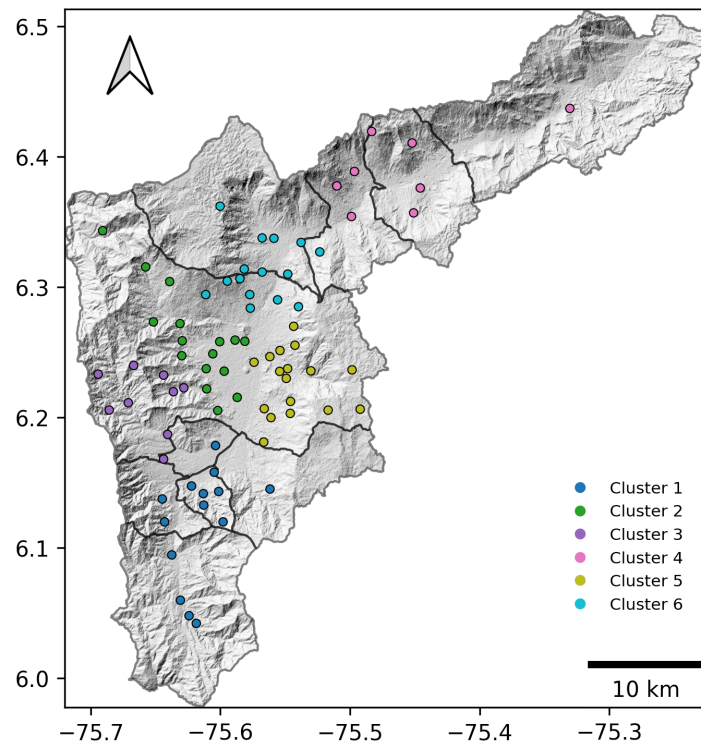


Figura 1.9: Mapa del Valle de Aburrá mostrando las 79 estaciones pluviométricas y su clasificación por clústeres.

Teniendo todas las estaciones agrupadas en 6 clusters de acuerdo a sus patrones de lluvia similares, se procedió al paso 3 de la metodología planteada: el cálculo de percentiles. Se calcularon los percentiles históricos para cada uno de los clústeres escogidos. Los percentiles calculados fueron 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 99 y 99.9. Este proceso se realizó para cada uno de los periodos acumulados analizados, desde 1 día hasta 90 días.

Después de calcular los percentiles históricos para cada clúster y para cada día acumulado, desde 1 hasta 90 días, se utilizó el inventario de movimientos en masa para determinar a qué clúster pertenece cada evento del inventario según su ubicación espacial. Posteriormente, se asignó a cada evento el acumulado de lluvia antecedente correspondiente a la fecha de ocurrencia del evento. Con este acumulado, se procedió a calcular a qué percentil pertenecía el evento para cada uno de los acumulados de lluvia, desde 1 día hasta 90 días.

Teniendo en cuenta los percentiles en los que se presenta cada uno de los eventos del inventario para cada uno de los días de acumulado de lluvia antecedente (desde 1 hasta 90 días), se procedió a definir niveles de lluvia crítica según el percentil correspondiente. Para esta división, se agruparon los percentiles de los eventos del inventario en tres grupos: el primero incluye los eventos en percentiles bajos, es decir, con acumulados de lluvia bajos; el segundo agrupa los eventos en percentiles medios a altos; y el tercero comprende los eventos en percentiles muy altos.

Se realizó un análisis de K-Means para cada día de acumulados, evaluando varias métricas para determinar qué días de lluvia acumulada antecedente agrupaba mejor estas tres categorías.

Finalmente, teniendo en cuenta todas las métricas evaluadas, se determinó que los días 20 y 2 son los

que mejor agrupan los diferentes percentiles de los eventos del inventario. En las Figuras 1.10 y 1.11 se presentan los percentiles en los cuales se encuentran los eventos del inventario para los días 2 y 20 de acumulado antecedente. Además, se muestran las delimitaciones realizadas con el análisis de K-Means en colores verde, amarillo y rojo.

Para el día 2, el 13 % de los eventos se encuentra entre los percentiles 50 y 90, marcando el nivel como lluvia crítica baja. El 30 % se encuentra en los percentiles 90 a 99, y el 57 % de los eventos están en los percentiles mayores o iguales a 99, indicando lluvia crítica alta. Para el día 20 de acumulado, el 4 % de los eventos se encuentra entre los percentiles 30 y 50, marcando la zona como lluvia crítica baja. El 39 % está entre los percentiles 60 y 90, marcando la zona como lluvia crítica media, y el 57 % se encuentra en percentiles mayores a 90, marcando la zona como lluvia crítica alta.

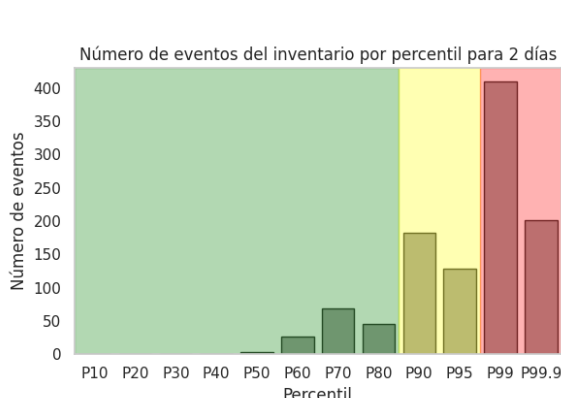


Figura 1.10: Distribución de los percentiles de los eventos del inventario para un acumulado de 2 días.

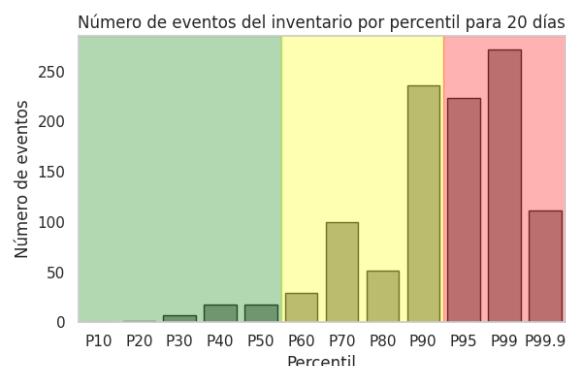


Figura 1.11: Distribución de los percentiles de los eventos del inventario para un acumulado de 20 días.

Resultados asociados a la Base de Datos inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá

La base de datos de inventario de movimientos en masa se construyó en el gestor de bases de datos PostgreSQL con el apoyo del equipo de Servidores del proyecto y se nombró como “inventario”. Dentro de la base de datos inventario se encuentra la tabla “reporte”, donde se almacenarán los registros de los movimientos en masa. El usuario y la contraseña para ingresar a la Base de Datos son:

Credenciales de Acceso

Usuario: inventario_user_M

Contraseña: s14t4_m&m_inv4nt@r10_2024

En la Figura 1.12 se presenta un ejemplo de algunos de los primeros registros ingresados a la base de datos, donde se observan los campos: id, fecha y hora de registro, nombre del registrador, entidad, cargo, fecha y hora del evento, incertidumbre de la fecha, latitud y longitud.

	id	fecha_hora_registro	nombre_del_que_registra	entidad	cargo	fecha_hora_evento	incertidumbre_fecha	latitud	longitud
1	85	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2024-07-04 17:00:00.000	Baja	6.295127	-75.531569
2	87	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2024-06-28 07:00:00.000	Baja	6.27316	-75.615728
3	88	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2014-10-30 04:00:00.000	Baja	6.316441	-75.579412
4	89	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2016-10-10 21:00:00.000	Baja	6.442787	-75.3624889999
5	90	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2016-10-26 07:00:00.000	Baja	6.319923	-75.486939
6	91	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2016-12-10 04:00:00.000	Baja	6.187465	-75.652213
7	92	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2017-04-01 02:00:00.000	Baja	6.193503	-75.66199
8	93	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2017-06-12 00:00:00.000	Media	6.277512	-75.535327
9	94	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2017-06-23 06:00:00.000	Baja	6.240396	-75.516527
10	95	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2017-06-26 19:00:00.000	Baja	6.271302	-75.536001
11	96	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2017-06-23 06:00:00.000	Baja	6.240396	-75.5165269999
12	97	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2019-06-12 07:00:00.000	Baja	6.049185	-75.6633609999
13	98	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2019-11-14 12:00:00.000	Baja	6.288871	-75.542241
14	99	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2020-12-25 02:00:00.000	Baja	6.19375	-75.6046249999
15	100	2024-07-09 10:00:00.000	Oscar Sanchez	SIATA - AMVA	Analista	2021-03-24 23:00:00.000	Baja	6.20356	-75.6040349999

Figura 1.12: Primeros reportes de movimientos en masa registrados en la tabla “reporte” en la base de datos inventario.

Se espera que esta base de datos se siga alimentando a medida que se obtengan más datos de reportes de movimientos en masa con el fin de robustecer y establecer un inventario detallado de los movimientos en masa en el Valle de Aburrá. Para facilitar esto, también se dispuso de un formulario virtual, el cual podrá ser diligenciado por cualquier profesional de SIATA o cualquier personal perteneciente a un organismo de gestión del riesgo y desastres de cualquier municipio del Valle de Aburrá. En la Figura 1.27 del anexo se presenta el formulario propuesto para diligenciar en caso de que se tenga algún reporte de movimientos en masa, y que se guardará en la base de datos.

Resultado del Análisis del Radar Meteorológico

Análisis de los patrones espaciales de precipitación a partir del radar meteorológico

Utilizando los criterios definidos en la metodología para distinguir los eventos de lluvia en cada celda del radar, se generaron varios mapas con las siguientes variables seleccionadas: número de eventos de lluvia, intensidad promedio de la lluvia (mm/h), duración promedio de los eventos (h) y acumulado promedio de los eventos (mm).

En las Figuras 1.13, 1.14, 1.15, se presentan los resultados correspondientes a los eventos de lluvia definidos con el primer criterio (eventos que inician cuando la lluvia supera los 5 mm) y el segundo criterio (períodos sin lluvia de 1, 2 y 3 horas que delimitan un evento de otro).

En estas figuras se muestran cuatro variables clave: (A) número total de eventos de lluvia por celda del radar entre 2016 y junio de 2024, (B) intensidad promedio de los eventos por celda, (C) duración promedio de los eventos, y (D) acumulado promedio de lluvia por evento.

En cuanto al número de eventos (gráfico A de las Figuras 1.13, 1.14, 1.15), se observa un patrón claro donde las zonas con mayor cantidad de eventos de lluvia se localizan en el sur y suroccidente del Valle de Aburrá, específicamente en los municipios de Caldas, La Estrella, Itagüí, Sabaneta, así como en los corregimientos de San Antonio de Prado y Palmitas, al occidente de Medellín. También se destaca un alto número de eventos en el norte, sobre el municipio de Barbosa. En contraste, las zonas con menos eventos se encuentran en los municipios de Girardota, Copacabana, Bello, y el centro y oriente de Medellín.

Respecto a la intensidad promedio de los eventos (gráfico B de las Figuras de las 1.13, 1.14, 1.15), los resultados muestran que las mayores intensidades se concentran en el sur, particularmente en el suroccidente de Medellín (San Antonio de Prado), La Estrella y Caldas. Las menores intensidades se registran en el norte del Valle, sobre los municipios de Bello, Copacabana y Girardota.

La duración promedio de los eventos (gráfico C de las Figuras de las 1.13, 1.14, 1.15) revela que los eventos

son más prolongados al norte, en el municipio de Barbosa. En el resto de los municipios, la duración de los eventos tiende a ser promedio o normal.

Finalmente, el acumulado promedio de lluvia por evento (gráfico D de las Figuras de las 1.13, 1.14, 1.15) muestra que los mayores acumulados de precipitación se dan en el sur y suroccidente del Valle de Aburrá, en áreas como La Estrella, Caldas y las laderas occidentales del valle, así como en el norte de Barbosa.

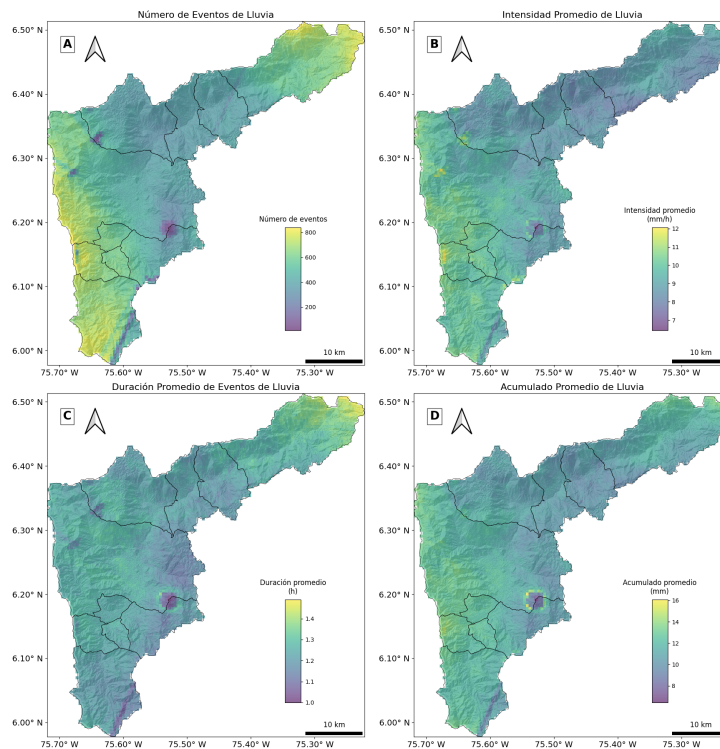


Figura 1.13: Eventos de lluvia con el inicio de evento cuando es mayor a 5 mm y separación de 1 hora sin lluvia. A) Número de eventos de precipitación. B) Intensidad promedio de los eventos de precipitación (mm/h). C) Duración promedio de los eventos de precipitación (horas). D) Acumulados promedios de los eventos de precipitación (mm).

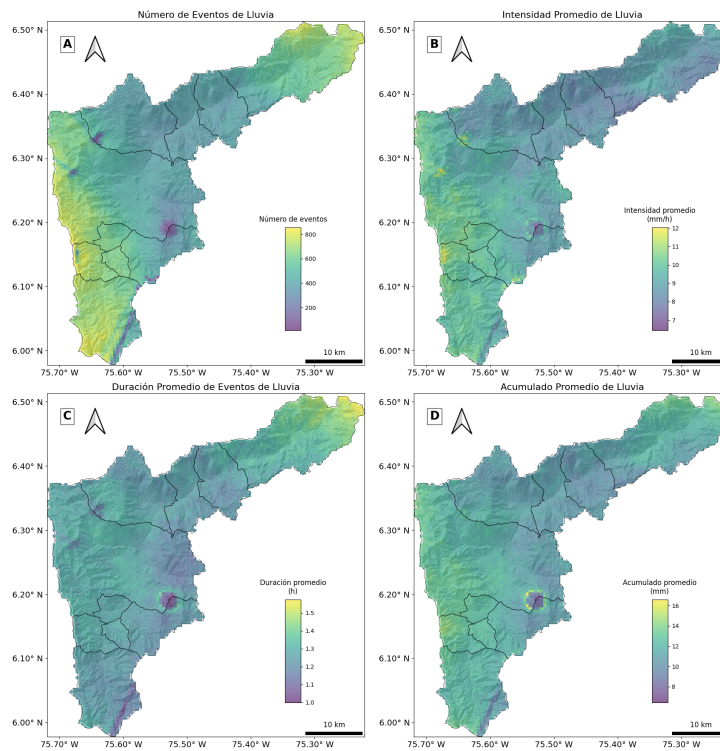


Figura 1.14: Eventos de lluvia con el inicio de evento cuando es mayor a 5 mm y separación de 2 horas sin lluvia. A) Número de eventos de precipitación. B) Intensidad promedio de los eventos de precipitación (mm/h). C) Duración promedio de los eventos de precipitación (horas). D) Acumulados promedios de los eventos de precipitación (mm).

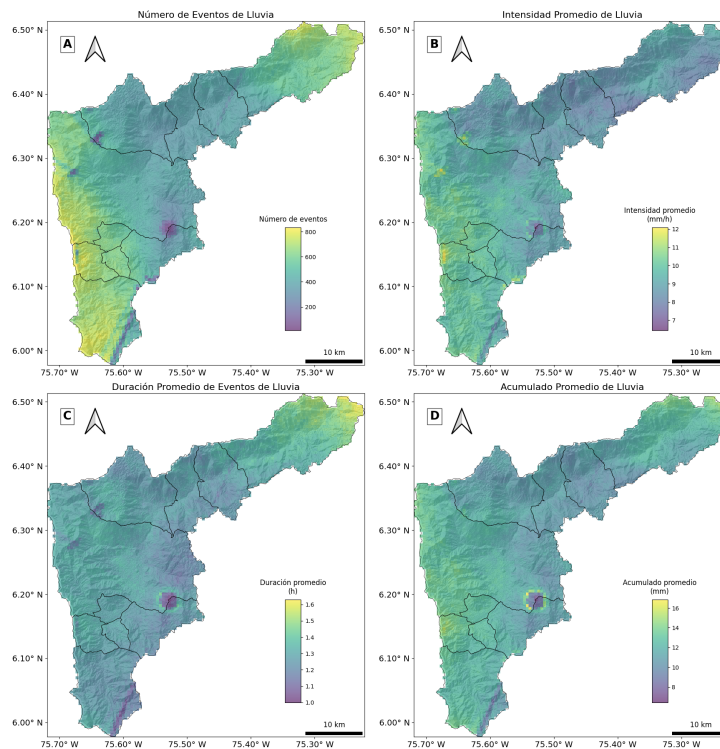


Figura 1.15: Eventos de lluvia con el inicio de evento cuando es mayor a 5 mm y separación de 3 horas sin lluvia. A) Número de eventos de precipitación. B) Intensidad promedio de los eventos de precipitación (mm/h). C) Duración promedio de los eventos de precipitación (horas). D) Acumulados promedios de los eventos de precipitación (mm).

Por otro lado, en las Figuras 1.28, 1.29 y 1.30 del anexo, se muestran los eventos de lluvia definidos con un umbral de 30 mm y los mismos criterios de separación de eventos (1, 2 y 3 horas sin lluvia). Para este caso, en las 3 Figuras se observa que, a excepción del número de eventos, que sigue predominando en las zonas sur y suroeste del Valle, las demás variables presentan patrones más uniformes a lo largo del Valle de Aburrá.

En este caso, no se observaron patrones claramente definidos en las variables de intensidad promedio, duración promedio y acumulado promedio. Sin embargo, cabe destacar que la duración de los eventos en algunas áreas del norte y oriente del valle presenta valores más elevados, como se observa en el gráfico D de las Figuras 1.28, 1.29 y 1.30.

Análisis de la precipitación de radar y los movimientos en masa

La Figura 1.16 presenta los gráficos de las cuatro variables correspondientes a los eventos de lluvia definidos con el primer criterio (eventos que inician cuando la precipitación supera los 5 mm) y el segundo criterio (períodos de 1 hora sin lluvia que delimitan un evento de otro). Los puntos negros representan el inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá.

En general, aparentemente no se aprecia una correlación directa entre los patrones de precipitación y la ubicación de los movimientos en masa. Sin embargo, se observa una notable concentración de movimientos

en masa en el suroccidente de Medellín, específicamente en el corregimiento de San Antonio de Prado y en La Estrella. Otra concentración significativa aparece en la zona nororiental de Medellín, aunque en esta área no se evidencian patrones claros en cuanto al número de eventos, intensidades, duraciones o acumulados de precipitación. Esto podría deberse a que el inventario de movimientos en masa incluye eventos que pueden haber sido provocados por otras causas, como factores antrópicos, y no exclusivamente por la lluvia.

La densidad de movimientos en masa coincide principalmente con las áreas que presentan un mayor número de eventos de lluvia, especialmente en el sur del valle. Además, las altas intensidades de precipitación en esta región también coinciden con una mayor concentración de movimientos en masa hacia el suroccidente y sur del Valle de Aburrá.

Por otro lado, las áreas que registran mayores duraciones de los eventos, ubicadas principalmente en el norte del valle, no parecen estar asociadas con una alta ocurrencia de movimientos en masa. En cuanto a las zonas con mayores acumulados de precipitación, se observa nuevamente una concentración en el suroccidente, donde también se presenta un gran número de movimientos en masa.

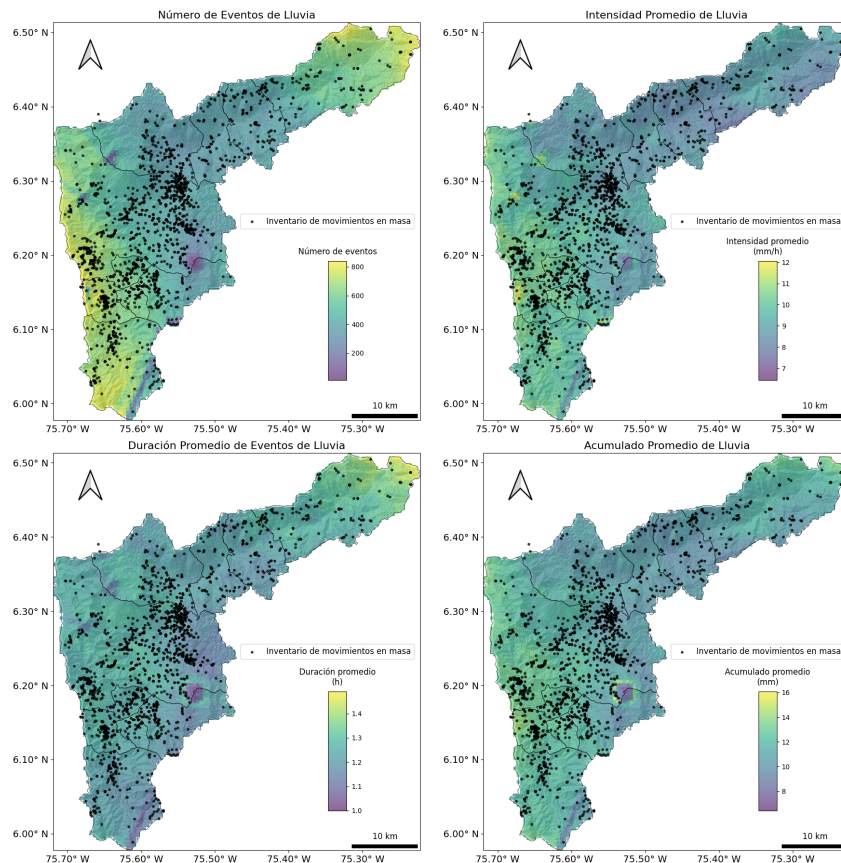


Figura 1.16: Eventos de lluvia con el inicio de evento cuando es mayor a 5 mm y separación de 1 hora sin lluvia. A) Número de eventos de precipitación. B) Intensidad promedio de los eventos de precipitación (mm/h). C) Duración promedio de los eventos de precipitación (horas). D) Acumulados promedios de los eventos de precipitación (mm). Los puntos negros representan el inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá.

Umbrales críticos a partir de la información del radar meteorológico

Utilizando el inventario de movimientos en masa y las series de tiempo de lluvia asociadas a cada celda del radar, se calcularon los umbrales de lluvia Reciente-Antecedente, de manera similar a como se hizo para los pluviómetros.

Para obtener la lluvia antecedente del radar asociada a un evento específico de movimiento en masa, se seleccionaron las cuatro celdas de radar más cercanas al evento. Luego, se eligió la celda con la mayor intensidad de lluvia y se calcularon los acumulados de lluvia antecedente a 1, 7 y 90 días previos al evento. Este procedimiento se aplicó a cada evento del inventario, permitiendo determinar la lluvia antecedente para cada caso.

Por otro lado, para identificar eventos de lluvia que no generaron movimientos en masa, se excluyeron las celdas de radar y fechas asociadas a movimientos en masa. También se eliminaron los eventos de lluvia que ocurrieron dentro de los 90 días antes y después de cada movimiento en masa. Posteriormente, se seleccionaron de forma aleatoria eventos de lluvia para formar parte del conjunto de entrenamiento del modelo de clasificación de lluvia crítica.

Se definieron umbrales probabilísticos utilizando Regresión Logística para las combinaciones de 1 día vs. 90 días y 7 días vs. 90 días. Las Figuras 1.17 y 1.18 presentan los resultados de estos modelos. En el gráfico de la izquierda, se muestra la combinación de 90 días anteriores frente a 1 o 7 días recientes, junto con las probabilidades de lluvia crítica representadas por colores. Los eventos de lluvia que generaron movimientos en masa se muestran junto con los umbrales determinados por la curva ROC en el gráfico de la derecha.

Para la combinación de 1 día vs. 90 días (Ver Figura 1.17), el umbral más alto alcanzó una probabilidad del 84 %, lo que indica una clasificación efectiva cuando la lluvia antecedente de 90 días prior a un día varía entre 200 y 1000 mm, y la lluvia reciente de 1 día supera los 30 mm. En el caso de 7 días vs. 90 días (Figura 1.18), se logró una buena clasificación cuando la probabilidad de lluvia crítica supera el 82 %, destacando que el umbral es bueno cuando los acumulados de 90 días previos están entre 200 y 1000 mm, y la lluvia acumulada de 7 días supera los 100 mm.

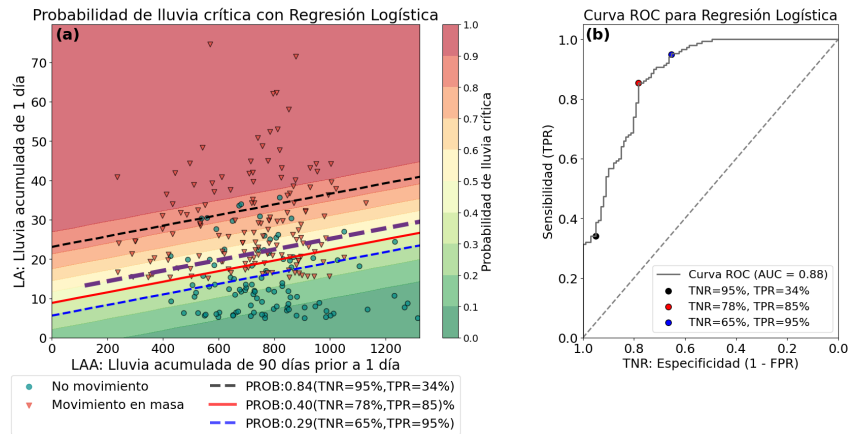


Figura 1.17: (a) Combinación de LA de 1 día y LAA de 90 días prior a 1 día y su respectiva probabilidad hallada con Regresión Logística. Las líneas negra, roja y azul representan los umbrales determinados con la Curva ROC mostrados en forma de puntos en el gráfico (b). También se muestra los datos de validación utilizados para construir la curva ROC (puntos verdes y triángulos rojos). (b) Curva ROC para la combinación de LA de 1 día y LAA de 90 días prior a 1 días con Regresión Logística. El punto azul representa el umbral hallado con un TPR de 95 %, el punto rojo es el punto Óptimo y el negro el TNR de 95 %.

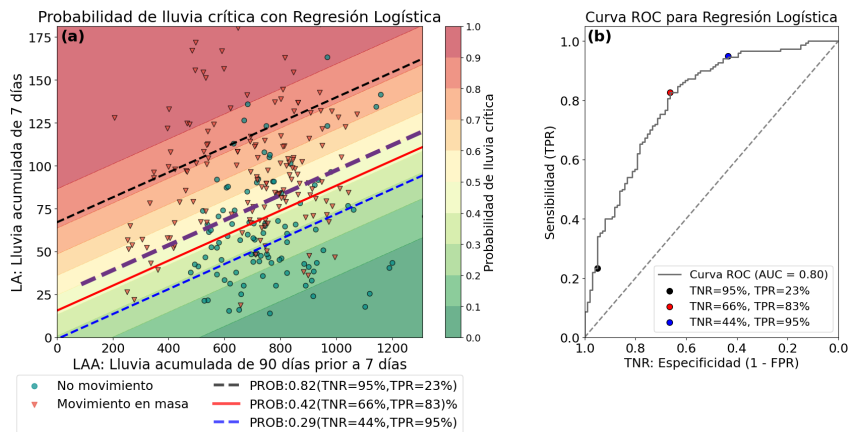


Figura 1.18: (a) Combinación de LA de 7 días y LAA de 90 días prior a 7 días y su respectiva probabilidad hallada con Regresión Logística. Las líneas negra, roja y azul representan los umbrales determinados con la Curva ROC mostrados en forma de puntos en el gráfico (b). También se muestra los datos de validación utilizados para construir la curva ROC (puntos verdes y triángulos rojos). (b) Curva ROC para la combinación de LA de 7 días y LAA de 90 días prior a 7 días con Regresión Logística. El punto azul representa el umbral hallado con un TPR de 95 %, el punto rojo es el punto Óptimo y el negro el TNR de 95 %.

Resultados análisis de la precipitación a partir de la información de pluviómetros y el radar meteorológico: técnicas de interpolación

Análisis y evaluación de los métodos de interpolación

En la Figura 1.19 se presenta el mapa de acumulado de los últimos 7 días anteriores al 9 de mayo de 2024, donde se muestra el acumulado obtenido a partir de la información del radar meteorológico y, en puntos específicos, el acumulado de la red pluviométrica del SIATA. De entrada, se observa una diferencia entre el acumulado de los pluviómetros y el del radar, siendo este último menor. Esto se debe a que la información de los pluviómetros es más precisa al registrar la lluvia que cae en un punto específico del terreno, mientras que la lluvia registrada por el radar meteorológico incluye gotas de agua suspendidas en la atmósfera que no siempre llegan al suelo, ya que parte de ellas puede evaporarse durante su caída. Se observan diferencias de aproximadamente entre 20 y 30 mm.

En la tabla 1.1 se presentan los resultados de las métricas evaluadas mediante validación cruzada para cada una de las cuatro metodologías de interpolación utilizadas. Se observa que, para las metodologías de Kriging Ordinario (KO), Kriging con Deriva Externa (KED) y Kriging Simple con Medias Locales (KSLM), las métricas de RMSE y MAE son muy similares, con diferencias apenas en los decimales, siendo la menor la de KSLM, aunque de forma mínima. Por otro lado, la metodología de Combinación Lineal (CM) presenta valores de RMSE y MAE considerablemente más altos, lo que indica un desempeño inferior en comparación con las otras técnicas.

En la Figura 1.20 se muestran los cuatro mapas de interpolación correspondientes a las metodologías utilizadas, donde se puede apreciar la distribución de la lluvia en todo el Valle de Aburrá. Como indica la tabla anterior, los métodos KO, KED y KSLM presentan similitudes en la interpolación de los datos, incrementando los valores de precipitación en zonas donde el radar mostraba bajos acumulados (Ver Figura 1.19). El mapa que mejor refleja la combinación de los pluviómetros con el radar es el de la metodología KSLM. Por otro lado, la metodología CM muestra visualmente el peor mapa de interpolación, con bajos acumulados en todo el Valle de Aburrá.

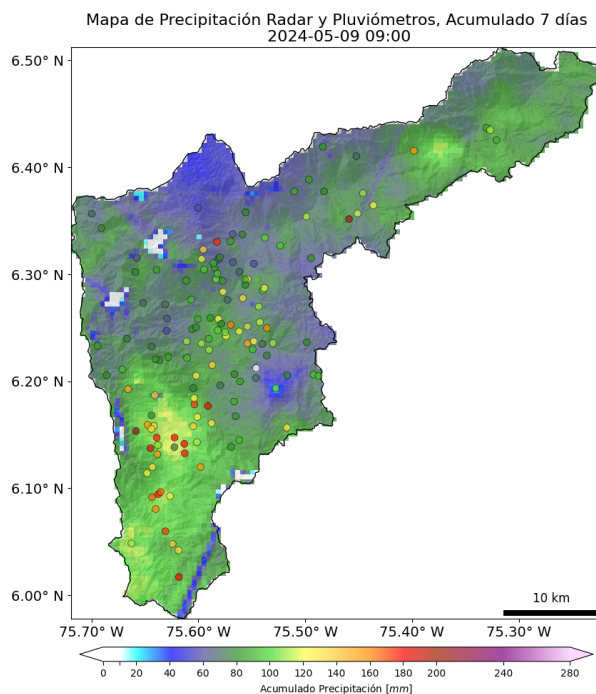


Figura 1.19: Mapa de precipitación acumulada del radar meteorológico y pluviómetros correspondiente al acumulado de lluvia de los 7 días anteriores al 9 de mayo de 2024.

Tabla 1.1: Métricas de validación RMSE y MAE para cada una de las metodologías de interpolación evaluadas.

Metdología de interpolación	RMSE	MAE
Kriging Ordinario (KO)	28.9938	21.7280
Kriging con Deriva Externa (KED)	28.9938	21.7280
Combinación Lineal (CM)	605.7142	150.1447
Kriging Simple con Medias Locales (KSLM)	28.9837	21.6482

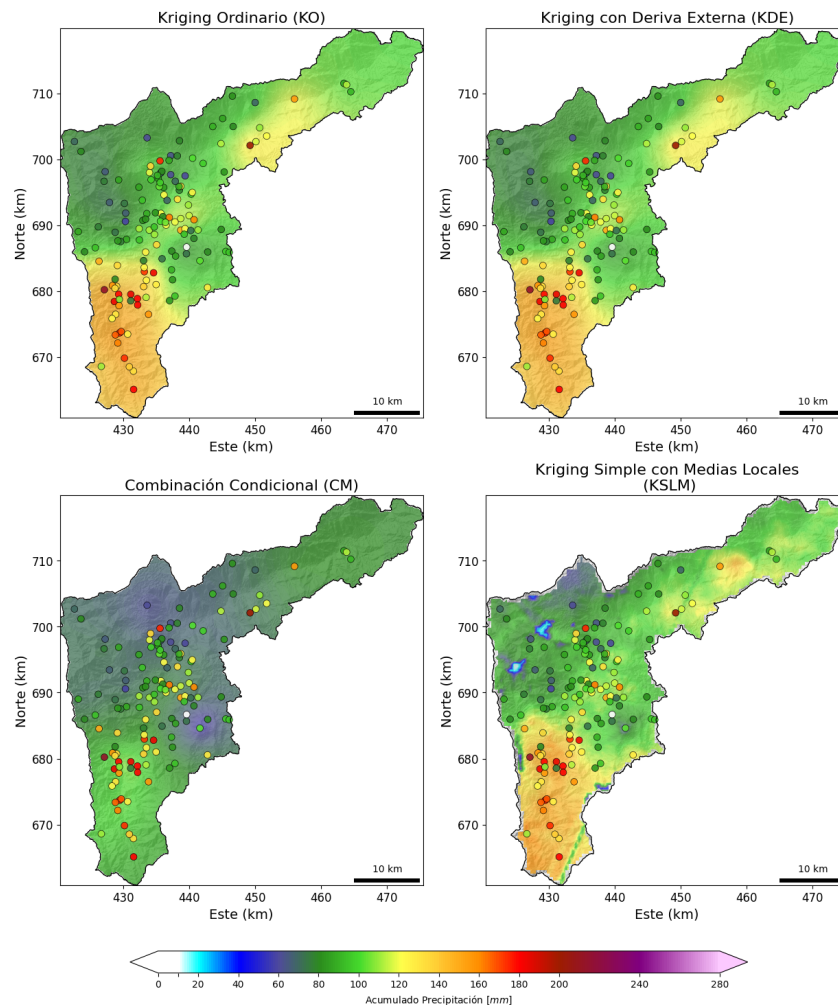


Figura 1.20: Mapas de lluvia acumulada interpolada utilizando las cuatro metodologías: Kriging Ordinario (KO), Kriging con Deriva Externa (KDE), Combinación Lineal (CM) y Kriging Simple con Medias Locales (KSLM).

Evaluación del mapa de probabilidad de lluvia crítica a partir de los umbrales y el mapa interpolado con SKLM

Se realizó la evaluación del mapa de interpolación seleccionado con el fin de determinar su capacidad para, en conjunto con los umbrales de probabilidad de lluvia crítica establecidos en meses anteriores a partir de datos de pluviómetros, generar un mapa de probabilidad de lluvia crítica para todo el polígono del Valle de Aburrá. Este mapa considera el acumulado de lluvia de los 7 días previos en comparación con el acumulado de los 90 días anteriores a estos 7 días.

El día seleccionado corresponde al 9 de mayo de 2024, fecha en la que ocurrió un movimiento en masa de tipo flujo de lodos en el sector del Himalaya, en el municipio de La Estrella. Este evento obligó a la evacuación de casi 100 personas que se encontraban en zona de alto riesgo (Ver noticia: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/emergencia-por-lluvias-en-la-estrella-deja-evacuados-LH24453668>).



En las Figuras 1.21 y 1.23 se presentan los mapas del acumulado de lluvia de los 7 días y 90 días anteriores a la fecha seleccionada, utilizando la información del radar meteorológico y de la red pluviométrica. En el mapa de 7 días (Ver Figura 1.21), se observan acumulados significativos, especialmente sobre el sur del Valle de Aburrá, con valores que alcanzan hasta 120 mm en el radar y 180 mm en los pluviómetros. En el mapa de 90 días (Ver Figura 1.23), se aprecia un acumulado significativo no solo en el sur del valle, sino también en el occidente de Medellín, con valores que llegan hasta 500 mm en el radar y 600 mm en los pluviómetros.

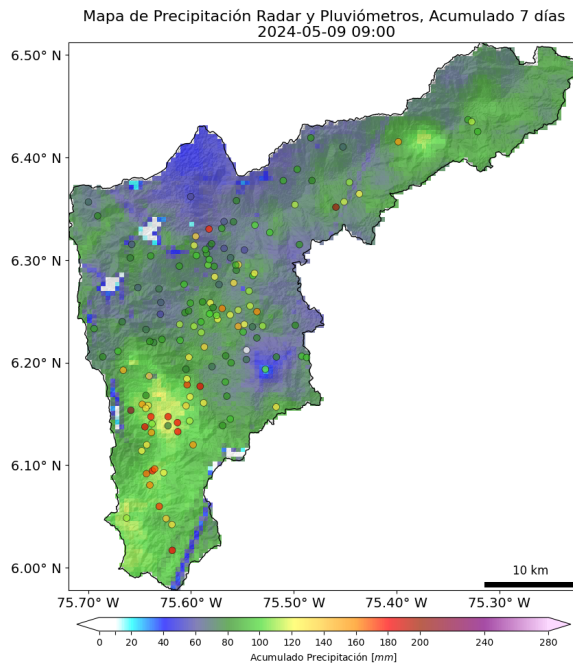


Figura 1.21: Mapa del acumulado de lluvia de los 7 días previos al 9 de mayo de 2024, basado en datos del radar y pluviómetros.

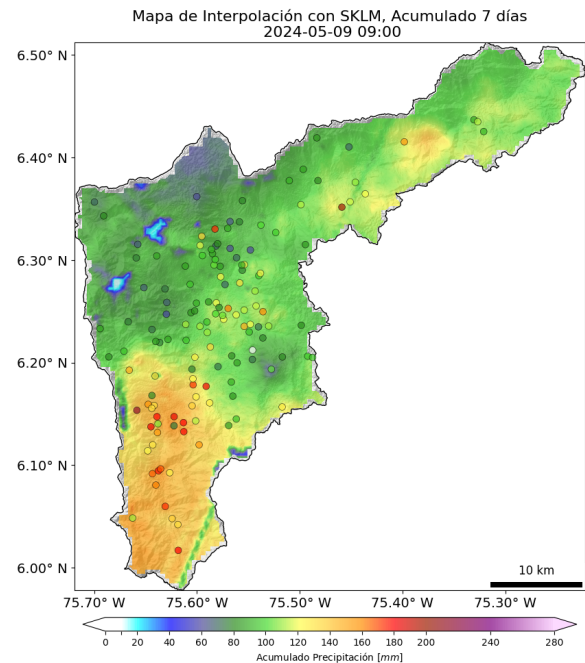


Figura 1.22: Mapa del acumulado de lluvia de los 7 días previos al 9 de mayo de 2024, obtenido mediante interpolación con KSLM.

Por otro lado, en las Figuras 1.22 y 1.24 se presentan los mapas del acumulado de lluvia para los 7 días y 90 días, respectivamente, obtenidos mediante la metodología de interpolación Kriging Simple con Medias Locales (KSLM). Al comparar visualmente estos mapas con los de la información original del radar y los pluviómetros (Ver Figuras 1.21 y 1.23), se observa una gran correspondencia en la distribución espacial de las precipitaciones. Para los 7 días, se destacan altos acumulados sobre el sur del Valle de Aburrá, mientras que para los 90 días se evidencian acumulados significativos en el occidente de Medellín y el sur del valle, corroborando la precisión de la interpolación realizada.

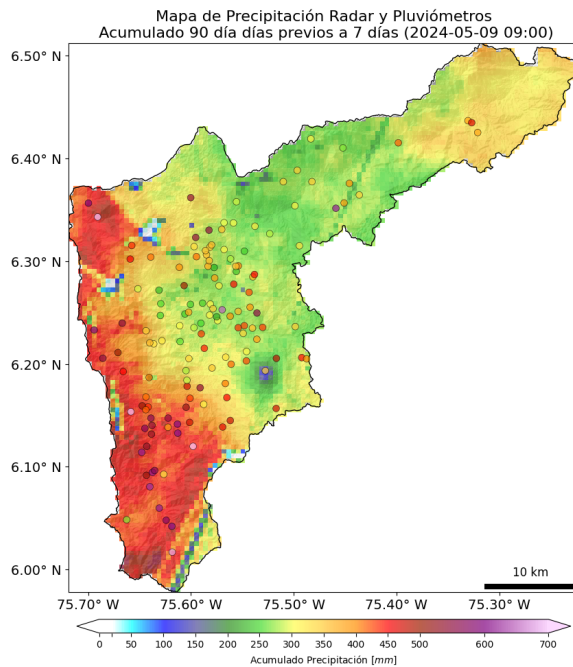


Figura 1.23: Mapa del acumulado de lluvia de los 90 días previos a los 7 días anteriores al 9 de mayo de 2024, basado en datos del radar y pluviómetros.

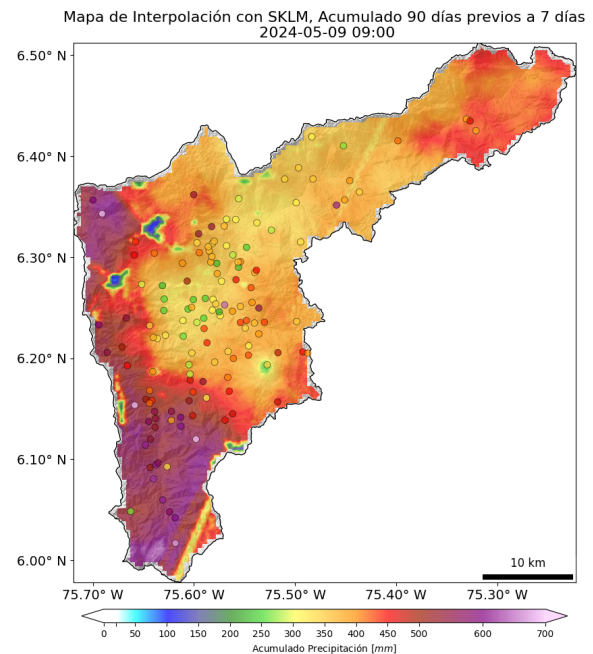


Figura 1.24: Mapa del acumulado de lluvia de los 90 días previos a los 7 días anteriores al 9 de mayo de 2024, obtenido mediante interpolación con KSLM.

Con los mapas interpolados de los acumulados de 7 y 90 días, se evaluó la probabilidad de lluvia crítica utilizando los umbrales establecidos en meses anteriores, basados en datos históricos de la red pluviométrica. En la Figura 1.25 se presenta el mapa final de probabilidad de lluvia crítica para el día 9 de mayo de 2024, día en que ocurrió el movimiento en masa. Este mapa muestra claramente que el sur del Valle de Aburrá presenta probabilidades de lluvia crítica mayores al 90 %, lo cual se representa en color rojo y delimita los municipios de La Estrella y Caldas. Se destaca que el punto donde ocurrió el movimiento en masa (estrella azul 1.25) en el sector del Himalaya, La Estrella, se encuentra en una zona de alta probabilidad de lluvia crítica, validando la efectividad del modelo propuesto. Las demás regiones del Valle de Aburrá aparecen en color amarillo, indicando probabilidades de lluvia crítica entre el 29 % y el 90 %.

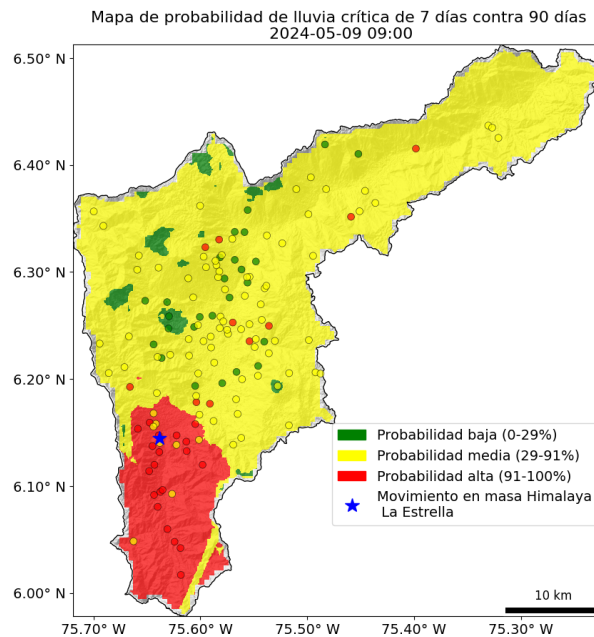


Figura 1.25: Mapa de probabilidad de lluvia crítica para el 9 de mayo de 2024, basado en el acumulado de lluvia de 7 y 90 días y los umbrales establecidos. La estrella azul indica la ubicación del movimiento en masa en el sector del Himalaya, La Estrella.

Resultados reportes semanales y diarios de alertas de lluvia crítica que detona movimientos en masa

Para generar los reportes diarios y semanales, siguiendo los procedimientos descritos en la sección de metodología (ver Figura 1.6), se desarrolló un módulo automatizado en Python. Este módulo realiza de manera eficiente todos los procesos mencionados, permitiendo la elaboración final de los reportes diarios y semanales.

El código también incluye la creación de un geovisor interactivo que presenta el mapa base del Valle de Aburrá con la división política de los municipios. Adicionalmente, el geovisor despliega las capas correspondientes a las veredas y barrios, donde cada polígono está coloreado según su nivel de probabilidad de lluvia crítica. Los colores representan las siguientes categorías:

- **Verde:** Probabilidad baja de lluvia crítica.
- **Amarillo:** Probabilidad media.
- **Rojo:** Probabilidad alta.
- **Gris:** Zonas con pendientes menores a 5°, donde la probabilidad de deslizamientos es muy baja.

En la Figura 1.26 se muestra una captura de pantalla del geovisor correspondiente a un reporte diario. Este geovisor permite la interacción directa: al hacer clic en un polígono, se despliega información específica, como el nombre del barrio o vereda, el municipio al que pertenece y el nivel de probabilidad de lluvia crítica asociado a esa área.

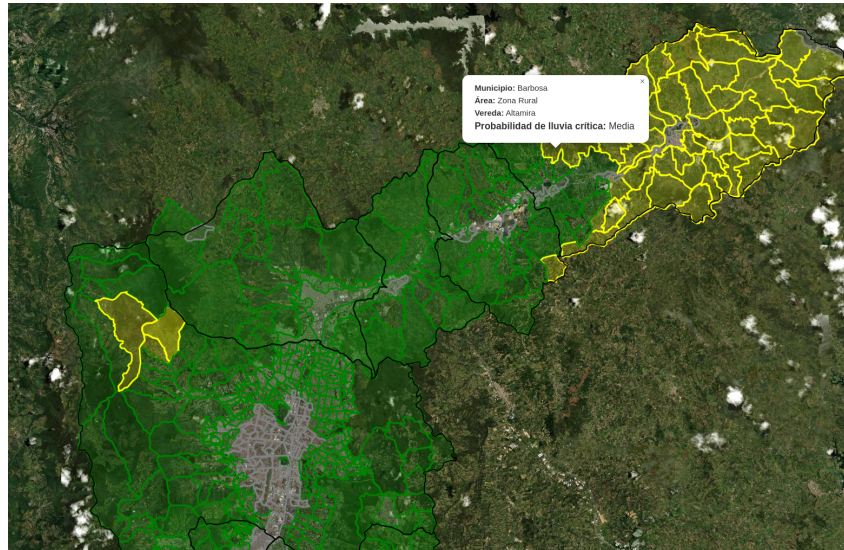


Figura 1.26: Geovisor del reporte diario que clasifica la probabilidad de lluvia crítica por veredas y barrios en el Valle de Aburrá.

Discusión y conclusiones

Umbral de lluvia Reciente - Antecedente

Los umbrales definidos mediante las métricas de desempeño y la Curva ROC pueden ofrecer una mayor fiabilidad respecto a la lluvia crítica que detona movimientos en masa, comparado con solo tener una línea de decisión como se hacía anteriormente. Además, estos umbrales resultan más fáciles de interpretar. Por ejemplo, un umbral con una probabilidad de 0.31 (línea punteada azul en la Figura 1.7 (a)) puede ser difícil de interpretar y comunicar a los tomadores de decisiones. En contraste, explicar que el 95 % (TPR) de eventos de lluvia que detonaron movimientos en masa están por encima del umbral y el 71 % (TNR) de los eventos de lluvia que no detonaron movimientos en masa se encuentran por debajo del umbral, pueden facilitar la comprensión en la interpretación de los resultados.

Una ventaja de esta metodología es que toma en cuenta los eventos de lluvia que no detonaron movimientos en masa bajo condiciones críticas de lluvia, lo que aumenta la robustez del análisis y permite establecer umbrales más optimizados que equilibran la tasa de falsas alarmas. El umbral asociado con un TPR del 95 % (línea punteada azul en la Figura 1.7 (a)) puede verse como análogo a los umbrales de precipitación empíricos definidos con un 5 % de probabilidad de excedencia. Aunque este umbral implica que una alta proporción de los deslizamientos se sitúan por encima del umbral, la tasa de falsos positivos del 29 % indica que una gran parte de eventos de lluvia sin deslizamientos también superan el umbral. Por lo tanto, una desventaja de mantener solo este umbral de TPR del 95 % es que podría resultar en un alto porcentaje de falsas alarmas. En conclusión, es crucial mantener una base de datos precisa de movimientos en masa con baja incertidumbre en las fechas y ubicaciones de los eventos, y realizar análisis con un registro equilibrado de eventos de lluvia que no detonaron movimientos en masa para tener unos umbrales de lluvia crítica más aproximados a la realidad.

Percentiles

A través del uso de percentiles históricos de lluvia, se pudo identificar los eventos de precipitación que tienen una mayor probabilidad de desencadenar movimientos en masa, permitiendo una categorización efectiva de la lluvia crítica.

El enfoque metodológico basado en el agrupamiento jerárquico permitió una clasificación precisa de las estaciones pluviométricas en seis clústeres con patrones de lluvia similares. Esta agrupación facilitó el cálculo de percentiles específicos para cada clúster, lo que a su vez permitió una evaluación más precisa de la relación entre la lluvia y los movimientos en masa.

El análisis de K-Means, aplicado a los percentiles de lluvia antecedente para diferentes períodos acumulados, destacó los días 2 y 20 como los más representativos para la categorización de la lluvia crítica. Estos días mostraron la mejor agrupación de los eventos del inventario en tres categorías de lluvia crítica: baja, media y alta. Este hallazgo es crucial para la identificación de lluvia crítica durante períodos de corto y largo plazo, permitiendo la definición de zonas con alta probabilidad de movimientos en masa detonados por lluvias. Este análisis puede proporcionar una herramienta que facilite la comprensión de las precipitaciones que aumentan la probabilidad de generar movimientos en masa en el Valle de Aburrá, mejorando la capacidad de respuesta ante eventos de precipitación que podrían desencadenar movimientos en masa.

Análisis del Radar Meteorológico

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir de la metodología y los resultados:

- El análisis de la información histórica del radar meteorológico permitió identificar diferentes patrones espaciales de la precipitación en el Valle de Aburrá. Se observó que la mayor cantidad de eventos de lluvia se concentra en la zona sur y suroccidental del valle, abarcando municipios como Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí, parte de Envigado y los corregimientos de San Antonio de Prado y Palmitas, en el occidente de Medellín. Estas zonas también registran las mayores intensidades de precipitación. En contraste, los eventos de larga duración se presentan predominantemente en el norte, en el municipio de Barbosa, mientras que los mayores acumulados de lluvia se observan tanto en el sur y suroccidente como en Barbosa. Por otro lado, en el centro, nororiente y oriente de Medellín, así como en los municipios de Bello, Copacabana y Girardota, se registra un menor número de eventos de lluvia, con intensidades y duraciones relativamente cortas.
- La relación entre los patrones de precipitación obtenidos del radar y el inventario de movimientos en masa revela una concentración significativa de deslizamientos en la zona suroccidental del Valle de Aburrá, específicamente en el corregimiento de San Antonio de Prado, Medellín. Esta área coincide con una región que presenta un alto número de eventos de lluvia, altas intensidades y acumulados relativamente elevados. Sin embargo, también se observa una concentración notable de movimientos en masa en las laderas nororientales de Medellín, donde no se detectan altos acumulados de lluvia ni un gran número de eventos. Este comportamiento podría deberse a dos factores: primero, el sesgo del inventario, que incluye eventos causados por factores distintos a la lluvia, como la intervención humana. Segundo, las características del terreno en esa zona, como la pendiente, el tipo de suelo, la geología y la cobertura vegetal, que aumentan su susceptibilidad a los movimientos en masa.
- En el caso del norte del valle, específicamente en Barbosa, aunque es una zona con altos acumulados de lluvia y eventos de larga duración, no se observan muchas ocurrencias de movimientos en masa. Esto podría deberse a un sesgo en el inventario, ya que es más probable que se registren eventos

en áreas urbanas o en municipios que cuentan con un mejor monitoreo. Barbosa tiene una gran extensión rural, lo que podría explicar la falta de registro adecuado de deslizamientos.

- Los umbrales de lluvia Reciente-Antecedente obtenidos a partir de la información del radar meteorológico mostraron una buena capacidad para clasificar la lluvia crítica frente a la no crítica. Sin embargo, los umbrales resultaron estar en niveles de acumulado relativamente bajos. De manera similar, los umbrales probabilísticos definidos mediante Regresión Logística también mostraron valores bajos, aunque se evidenció una clara distinción entre los eventos que generaron movimientos en masa y aquellos que no, especialmente en la combinación de umbrales de 7 días frente a 90 días. Si bien estos umbrales pueden ser ajustados o evaluados con datos de lluvia reales, es importante señalar que los bajos acumulados podrían generar un número considerable de falsas alarmas.

En conclusión, la información de lluvia obtenida a partir del radar meteorológico ha demostrado ser especialmente útil para identificar patrones espaciales de precipitación en el Valle de Aburrá. Además, permite establecer una relación más detallada entre la lluvia y los movimientos en masa. A diferencia de la red de pluviómetros, el radar ofrece una visión más amplia y detallada de la distribución espacial de la lluvia, incluso en áreas donde no existen estaciones de medición. Esto lo convierte en una herramienta clave para el desarrollo de sistemas de alerta temprana que permitan identificar con mayor precisión la posible ocurrencia de movimientos en masa inducidos por la lluvia.

Análisis de la precipitación a partir de la información de pluviómetros y el radar meteorológico: técnicas de interpolación

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir de la metodología y los resultados:

- De las cuatro metodologías de interpolación evaluadas—Kriging Ordinario (OK), Kriging con Deriva Externa (KED), Combinación Condicional (CM) y Kriging Simple con Medias Locales (KSLM)—el método Kriging Simple con Medias Locales (KSLM) demostró ser el más eficiente en términos de precisión, evidenciado por las métricas de RMSE y MAE más bajas y a través de la evaluación visual de los mapas de acumulado. Esto sugiere que KSLM es capaz de capturar con mayor exactitud la variabilidad espacial de la precipitación en el Valle de Aburrá al integrar de manera efectiva la información de los pluviómetros y del radar meteorológico.
- La aplicación del método KSLM para la interpolación de datos pluviométricos, junto con el análisis de probabilidades basado en umbrales previamente establecidos, permite generar mapas de probabilidad de lluvia crítica con buena precisión. La utilización de datos provenientes de fuentes combinadas, como el radar meteorológico y la red de pluviómetros, aumenta la calidad de la información utilizada en los mapas de lluvia acumulada, mejorando la representación espacial de las precipitaciones y, por ende, la confiabilidad del mapa de probabilidad de lluvia crítica.
- Se recomienda como trabajo futuro evaluar otras técnicas de interpolación mediante herramientas de redes neuronales o los modelos de machine learning, los cuales podrían ofrecer mejoras adicionales en la precisión de la estimación de la precipitación.

Reportes semanales y diarios de alertas de lluvia crítica que detona movimientos en masa

Considerando los diversos análisis y estudios realizados durante la ejecución del proyecto, en particular los umbrales reciente-antecedente definidos en términos de probabilidad, el análisis de la lluvia captada por radar, y la interpolación de los registros de la red pluviométrica con los datos del radar meteorológico, se logró diseñar y automatizar un sistema de reportes diarios y semanales.

Estos reportes se generan automáticamente cada día a las 7:00 a.m., integrando las condiciones de lluvia antecedente de los últimos días, tanto de la red de pluviómetros como del radar meteorológico. Este sistema proporciona una herramienta inicial valiosa para continuar desarrollando soluciones útiles para los tomadores de decisiones, permitiéndoles identificar de manera más eficiente las zonas con mayor probabilidad de movimientos en masa, basándose en las lluvias antecedentes.

Referencias

- Aristizábal, E., Gamboa, F., and Leoz, F. (2010). Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de aburrá, colombia. *Revista EIA*, pages 155–169.
- Balducci, V., Guzzetti, F., Peruccacci, S., and Rossi, M. (2006). Rainfall thresholds for the intiation of landslides.
- Chleborad, A. F., Baum, R. L., Godt, J. W., and Leahy, P. P. (2006). Rainfall thresholds for forecasting landslides in the seattle, washington, area-exceedance and probability.
- DANE (2018). Resultados censo nacional de población y vivienda 2018.
- Guzzetti, F. (2000). Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in italy. *ELSEVIER*, 58:89–107.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98:239–267.
- Hidalgo, C. A. and Vega, J. A. (2014). Estimación de la amenaza por deslizamientos detonados por sismos y lluvia (valle de aburrá-colombia). *Revista EIA*, 11:103 – 117.
- IEWP (2005). Dedicated to reducing disasters through effective people-centred early warning systems, world conference on disaster reduction.
- Kirschbaum, D. B., Adler, R., Hong, Y., Hill, S., and Lerner-Lam, A. (2010). A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations. *Springer*, pages 561–575.
- Marin, R. J. (2020). Physically based and distributed rainfall intensity and duration thresholds for shallow landslides. *Landslides*.
- Mesa, O., Poveda, G., Vélez, I., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Mantilla, R. I., Barco, J., Cuartas, A., Botero, B. A., and Montoya, M. I. (1999). Spatial distribution, annul and semi annual cycles of precipitation in colombia. *DYNA*, 127:7–26.
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., and Rhenals, R. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, 5:59 – 69.

- Pabon, J., Eslava, J., and Gomez, R. (2001). Climatic large –scale characteristics of the tropical americas (in spanish). *Meteorologia Colombiana*, 4:39–46.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40:927–930.
- Poveda, G. and Mesa, O. J. (2000). On the existence of lloró (the rainiest locaty on earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 27:1675–1678.
- Reichenbach, P., Cardinali, M., De, P., Guzzetti, V. F., Vita, P. D., and Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the tiber river basin (central italy).
- Segoni, S., Piciullo, L., and Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15:1483–1501.

Anexos

Anexo Metodologías para la elaboración de una Base de datos para el inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá

Tabla 1.2: Descripción de los campos de la base de datos.

Nombre del campo	Tipo de dato	Restricciones	Descripción	Observaciones
id	SERIAL	NOT NULL	Identificador único de cada reporte, secuencial.	
fecha del registro	TIMESTAMP	NOT NULL	Fecha y hora del momento en que se realizó el registro.	
nombre del que registra	VARCHAR(255)	NOT NULL	Nombre de la persona que realiza el registro.	
entidad	VARCHAR(255)	NOT NULL	Entidad u organización a la que pertenece la persona que realiza el registro.	
cargo	VARCHAR(255)	NOT NULL	Cargo del usuario que realiza el registro.	
fecha hora evento	TIMESTAMP	PRIMARY KEY	Fecha y hora en que ocurrió el evento reportado.	
incertidumbre fecha	VARCHAR(50)	NOT NULL	Incertidumbre asociada a la fecha y hora del evento (Baja, Media, Alta).	Lista desplegable con 3 opciones: Baja: Fecha y hora exacta del evento, margen de error de ± 1 hora. Media: Fecha exacta, hora con un margen de error de ± 12 horas. Alta: Solo se tiene Fecha exacta, hora no es confiable.
latitud	DECIMAL(10, 6)	PRIMARY KEY	Latitud del lugar donde ocurrió el evento.	
longitud	DECIMAL(10, 6)	PRIMARY KEY	Longitud del lugar donde ocurrió el evento.	

Continúa en la siguiente página

Tabla 1.2 continúa de la página anterior

Nombre del campo	Tipo de dato	Restricciones	Descripción	Observaciones
incertidumbre ubicación	TEXT	NOT NULL	Incertidumbre de la ubicación del evento (Baja, Media, Alta).	Lista desplegable con 3 opciones: Baja: Ubicación exacta del evento. Media: Margen de error menos a 1 km o el centroide del sector. Alta: Centroides del barrio o vereda.
tipo movimiento masa	TEXT	NULL	Tipo de movimiento en masa.	Lista desplegable con las siguientes opciones: Deslizamiento, Deslizamiento rotacional, Deslizamiento traslacional, Flujo, Caída de rocas, Complejo, Otro
origen	TEXT	NULL	Posible origen del movimiento en masa	Lista desplegable con varias opciones: Antrópico, Lluvia, Sismo, Otro
municipio	TEXT	NOT NULL	Municipio donde ocurrió el evento.	Lista desplegable con varias opciones: Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Sabaneta, Itagüí, La Estrella, Caldas
corregimiento	TEXT	NULL	Corregimiento donde ocurrió el evento, si aplica.	
vereda - barrio	TEXT	NULL	Vereda o barrio donde ocurrió el evento.	
sector	TEXT	NULL	Sector donde ocurrió el evento.	
direccion	TEXT	NULL	Dirección específica del lugar donde ocurrió el evento.	
muertes	INTEGER	NULL	Número de muertos que dejó el evento.	
heridos	INTEGER	NULL	Número de heridos que dejó el evento.	
desaparecidos	INTEGER	NULL	Número de desaparecidos que dejó el evento.	
otras afectaciones	TEXT	NULL	Descripción de otras afectaciones importantes causadas por el evento.	
fuentes	TEXT	NULL	Fuente de donde se obtuvo la información del evento.	
observaciones	TEXT	NULL	Comentarios adicionales sobre el evento.	

Continúa en la siguiente página

Tabla 1.2 continúa de la página anterior

Nombre del campo	Tipo de dato	Restricciones	Descripción	Observaciones
validado	BOOLEAN	NOT NULL	Indica si el evento fue validado por un experto (TRUE o FALSE).	

Anexo Metodologías para el análisis del Radar Meteorológico

Tabla 1.3: Criterios para definir los eventos de precipitación del radar meteorológico.

Criterio 1: Valor en mm para definir el inicio del evento	Criterio 2: Tiempo sin lluvia para separar un evento de otro (horas)
> 5	1
> 10	1
> 20	1
> 30	1
> 5	2
> 10	2
> 20	2
> 30	2
> 5	3
> 10	3
> 20	3
> 30	3



Resultados asociados a la Base de Datos inventario de movimientos en masa en el Valle de Aburrá

REGISTRO DE EVENTO

Fecha y hora del registro

01/08/2024, 09:54

DATOS DE QUIEN REGISTRA

Nombre

Entidad

Cargo

DATOS DEL EVENTO

Tipo de movimiento en masa

Origen

Fecha y hora del evento

dd/mm/aaaa, --:--

Incertidumbre de fecha y hora

Ubicación

Latitud

Longitud

Incertidumbre de ubicación

Ubicación detallada

Municipio

Corregimiento

Vereda/Barrio

Sector

Dirección

Figura 1.27: Formulario propuesto para diligenciar en caso de que se tenga algún reporte de movimientos en masa, y que se guardará en la base de datos.

Resultado del Análisis del Radar Meteorológico

Análisis de los patrones espaciales de precipitación a partir del radar meteorológico

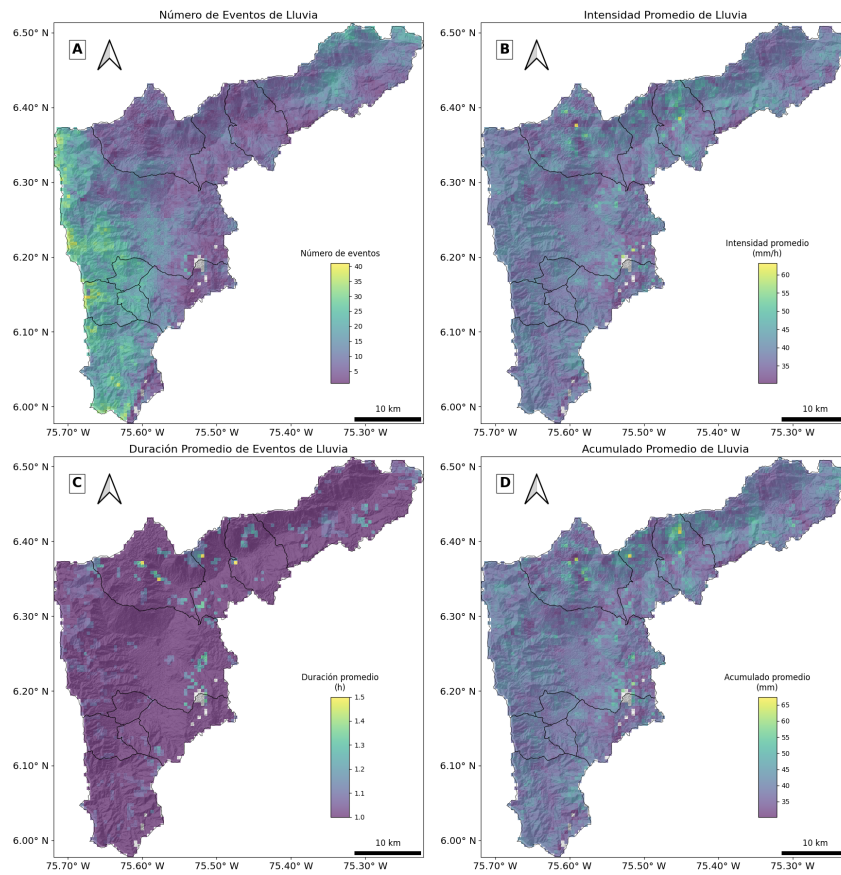


Figura 1.28: Eventos de lluvia con el inicio de evento cuando es mayor a 30 mm y separación de 1 hora sin lluvia. A) Número de eventos de precipitación. B) Intensidad promedio de los eventos de precipitación (mm/h). C) Duración promedio de los eventos de precipitación (horas). D) Acumulados promedios de los eventos de precipitación (mm).

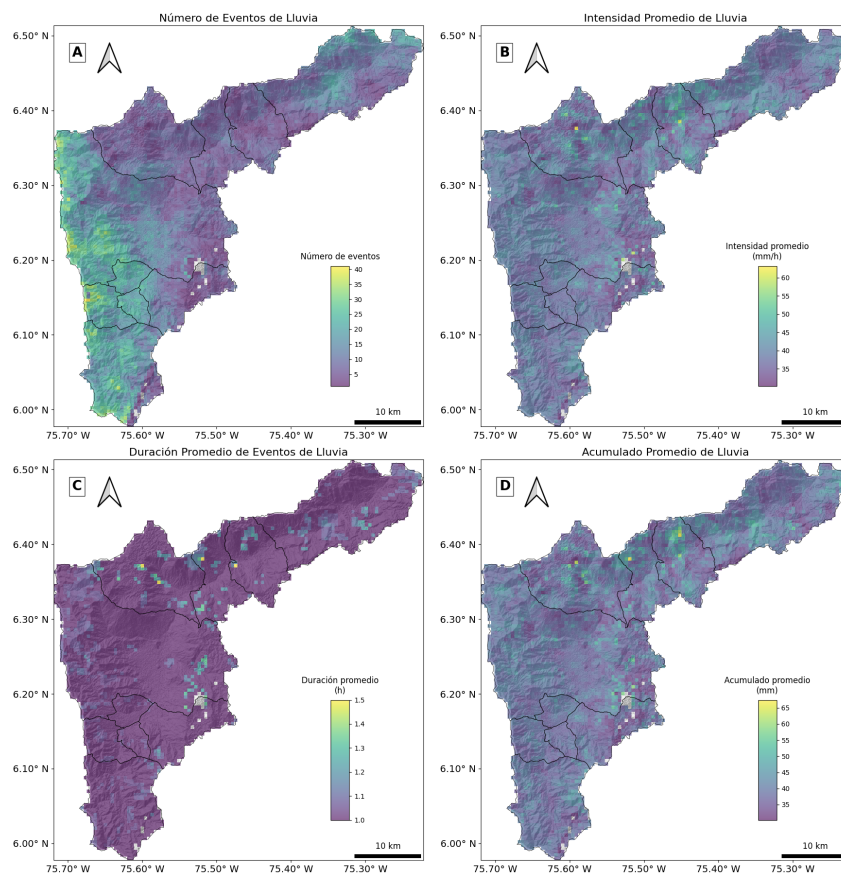


Figura 1.29: Eventos de lluvia con el inicio de evento cuando es mayor a 30 mm y separación de 2 horas sin lluvia. A) Número de eventos de precipitación. B) Intensidad promedio de los eventos de precipitación (mm/h). C) Duración promedio de los eventos de precipitación (horas). D) Acumulados promedios de los eventos de precipitación (mm).



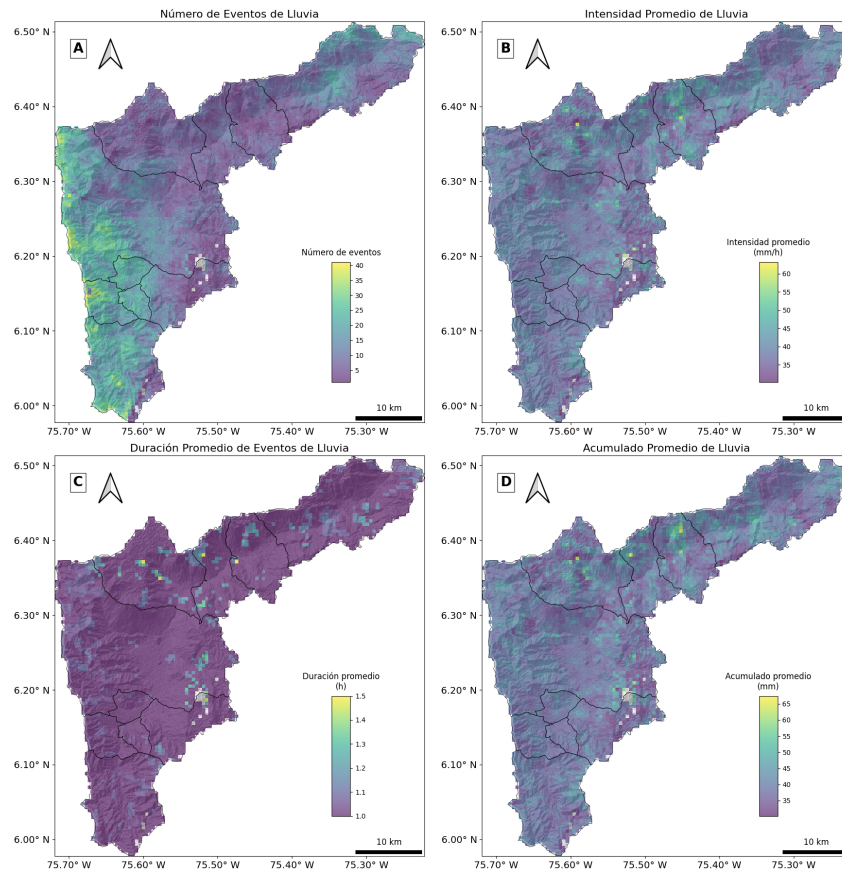


Figura 1.30: Eventos de lluvia con el inicio de evento cuando es mayor a 30 mm y separación de 3 horas sin lluvia. A) Número de eventos de precipitación. B) Intensidad promedio de los eventos de precipitación (mm/h). C) Duración promedio de los eventos de precipitación (horas). D) Acumulados promedios de los eventos de precipitación (mm).