



Influencia de la lluvia antecedente en los deslizamientos en los Andes Colombianos

Derly GOMEZ¹, Edier ARISTIZABAL² y Edwin F. GARCIA³

¹Grupo de Investigación en Infraestructura (GII), Escuela ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

²Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín - Colombia.

³Grupo de Investigación en Infraestructura (GII), Escuela ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Emails: derly.gomezg@udea.edu.co, evaristizabalg@unal.edu.co, edwin.garcia@udea.edu.co

Editor: Sergio Sepulveda

Recibido: 27 de agosto de 2022

Aceptado: 30 de enero de 2023

RESUMEN

Debido a sus condiciones geográficas e hidrometeorológicas, Colombia tiene una larga historia de desastres por remociones en masa. Según Gómez et al. (2021), la mayoría de las remociones han sido detonados por lluvias y han causado 34248 muertes en un periodo de 120 años (1900-2019). Esto hace necesario el estudio de la principal causa de la falla en la ladera, la cual está altamente relacionada con la presencia de agua en el suelo. Para esto, debido a la relación directa de la humedad en el suelo con las condiciones meteorológicas y a la mayor disponibilidad de datos de precipitación, ha sido ampliamente utilizada en la literatura la lluvia antecedente acumulada como aproximación indirecta de la humedad. La utilización de este criterio de lluvia antecedente requiere fundamentar la selección de dichas variables para cualquier análisis en las que se requieran. Por lo anterior, en este documento, se presenta un análisis de la relación entre las lluvias antecedentes de hasta 90 días con los deslizamientos en la Región Andina Colombiana por medio de la determinación de probabilidades de ocurrencia de remociones de tipo deslizamientos para dichas lluvias y de los coeficientes de la regresión logística. Los resultados señalaron las lluvias antecedentes de corto y mediano plazo (los primeros días y hasta 2 semanas atrás), seguida de la lluvia antecedente mensual (entre 30 y 40 días), como las de mayor influencia en los deslizamientos. Igualmente, se obtuvieron valores críticos de dichas variables antecedentes, los cuales son de utilidad para definición de alertas y además sirven de base para los estudios de susceptibilidad, amenaza y ordenamiento territorial.

Palabras clave: Umbrales críticos de lluvia antecedente, Probabilidades de ocurrencia de deslizamientos, Coeficientes de regresión logística.

RESUMEN

Antecedent rainfall influence on landslides in the Colombian Andes.

Colombia has a long history of mass movement disasters as a result of its geographic and hydrometeorological conditions. According to Gomez et al. (2021), most landslides have been triggered by rainfall and have caused 34248 deaths over a 120-year period (1900-2019). Therefore, it is necessary to study the main cause of the slope failure, which is highly related to the presence of moisture in the soil. In this regard, considering the direct relationship of soil moisture with meteorological conditions and the greater availability of precipitation data, accumulated antecedent rainfall has been widely used in the literature as an indirect proxy for soil moisture. This criterion of antecedent rainfall analysis requires a justification for the selection of these variables. Therefore, this study presents an analysis of the relationship between antecedent rainfall events and landslides in the Colombian Andean Region by assessing the probabilities of landslide occurrence for those rainfalls and the coefficients of the logistic regression model. The results pointed out the short and medium-term antecedent rainfall (the first days and up to 2 weeks before the event), followed by the monthly antecedent rainfall (between 30 and 40 days), as the most relevant for landslides. Likewise, critical values were obtained for these variables, which are useful for the definition of warnings alerts and also provide a basis for susceptibility, hazard and land-use planning studies.

Keywords: Antecedent critical rainfall thresholds, Landslides occurrence probabilities, Logistic Regression Coefficients.

INTRODUCCION

Colombia, por sus condiciones geográficas, tiene un largo historial de desastres por remociones en masa, que han causado 34248 víctimas mortales en un período de 120 años (Gómez et al. 2021). Entre los eventos más importantes relacionados con remociones en masa en la historia del país, están el registrado el 13 de noviembre de 1985 en la ciudad de Armero, que causó más de 22000 víctimas mortales y el registrado en la ciudad de Medellín el 27 de septiembre de 1987, con aproximadamente 500 víctimas mortales. Recientemente, en julio de 2022 se registró un evento de gran magnitud en San Antonio de Prado, Antioquia, y en lo corrido del año 2022 se han presentado múltiples remociones en masa en diferentes departamentos de la región Andina, que han cobrado la vida de más de 50 personas, los cuales cabe destacar, han sido detonados especialmente por lluvias, y en algunos casos en zonas afectadas por las intervenciones antrópicas. Por esta razón, un factor de estudio clave en estas ocurrencias de remociones en masa detonados por lluvia, es la humedad en el suelo, el cual es el principal causante de la reducción de la resistencia interna del suelo conduciendo a su inestabilidad.

Por otro lado, como es bien conocido, para estudiar el cambio en el tiempo de la humedad en el suelo para análisis de amenaza por remociones en masa, se ha utilizado ampliamente en la literatura la lluvia acumulada antecedente. Esto porque pese a que la lluvia acumulada antecedente no es el único factor que controla la humedad en el suelo, es una variable que se relaciona directamente con las condiciones meteorológicas. Además, es una variable con mayor disponibilidad en comparación con los datos directamente de humedad (Zhao et al. 2021). Para la utilización del criterio de lluvia antecedente como información de la humedad en el suelo, es importante conocer en la zona de interés, cuál es el periodo antecedente relevante, el cual está determinado por factores como el clima, las condiciones hidrológicas, morfológicas y geológicas propias de la región (Suárez 2009). Por ejemplo, Naidu et al. (2018) seleccionó hasta 5 días antecedentes para la definición de umbrales en su región en la India. En Brasil, en diferentes trabajos han utilizado hasta 8 días (Soares y Ramos 2014); 4 días (Tatizana et al. 1987a, Tatizana et al. 1987b); 7 días (Calvello et al. 2015); 2 días (Molina et al. 2015). Y en general en diversos trabajos se seleccionan entre 3 y 5 días (Kim et al. 1991, Moreiras et al. 2005), o en el caso de Chile fue la lluvia diaria la variable que mostró mayor relevancia sobre la variable antecedente (Sepúlveda y Padilla, 2008). Específicamente para Colombia, a lo largo del tiempo

se han considerado periodos antecedentes mayores, lo cual se debe al tipo de suelo característico tropical con perfiles profundos de meteorización y periodos de lluvia con una duración de 3 meses. Sin embargo, no hay un criterio en común entre la selección de dichas variables; por ejemplo, Terlien (1996) encontró mejores resultados considerando lluvias acumuladas de 15 días y 25 días. Mayorga (2003), definió entre 5 días y 87 días. Y en otros trabajos más recientes como el de Correa et al. (2019), en la ciudad de Manizales, donde se consideraron hasta 300 días antecedentes en su análisis y en Antioquia hasta 90 días antecedentes (Moreno et al. 2006, Aristizábal et al. 2010, Aristizábal et al. 2011). Por lo que resulta importante definir para la región Andina, cuál es la variable de lluvia acumulada antecedente con mayor influencia en la ocurrencia de estos eventos.

En este trabajo, se estudiaron las curvas de lluvia antecedentes de hasta 90 días, y adicionalmente se estudiaron por medio del análisis de los coeficientes del modelo de regresión logística. Se proponen valores críticos de lluvia antecedentes, los cuales debido a su simplicidad que resulta en practicidad, puede ser utilidad para aquellas zonas donde aún no se han implementado sistemas de alerta, ofreciendo así un criterio a la hora de tomar decisiones en periodos de amenaza. Así mismo, estos resultados sirven de base para la selección de variables predictoras especialmente en el uso de modelos estadísticos, así como de otros métodos para definición de umbrales más robustos y para diferentes estudios de amenaza.

DATOS Y AREA DE ESTUDIO

Área de estudio

Colombia está situada en el norte de Sudamérica (Fig. 1), su tectónica y geomorfología son el resultado del movimiento hacia el sureste de la Placa del Caribe en relación con la Placa Sudamericana y la subducción hacia el este de la Placa de Nazca bajo la Cordillera de los Andes a lo largo del margen occidental de Colombia (Kellogg et al. 1995, Taboada et al. 2000, Trenkamp et al. 2002). Estas condiciones tectónicas no sólo se traducen en una amenaza sísmica de media a alta para gran parte del territorio (Vega e Hidalgo 2016), sino también en un relieve montañoso con la presencia de 63 volcanes, de los cuales 17 están activos y la mayoría suelen estar rodeados de zonas densamente pobladas con una larga historia de desastres (Taboada et al. 2000, Mann y Corrigan 1990).

La ubicación ecuatorial de Colombia permite una alta radiación solar y disponibilidad de agua durante todo el año, lo

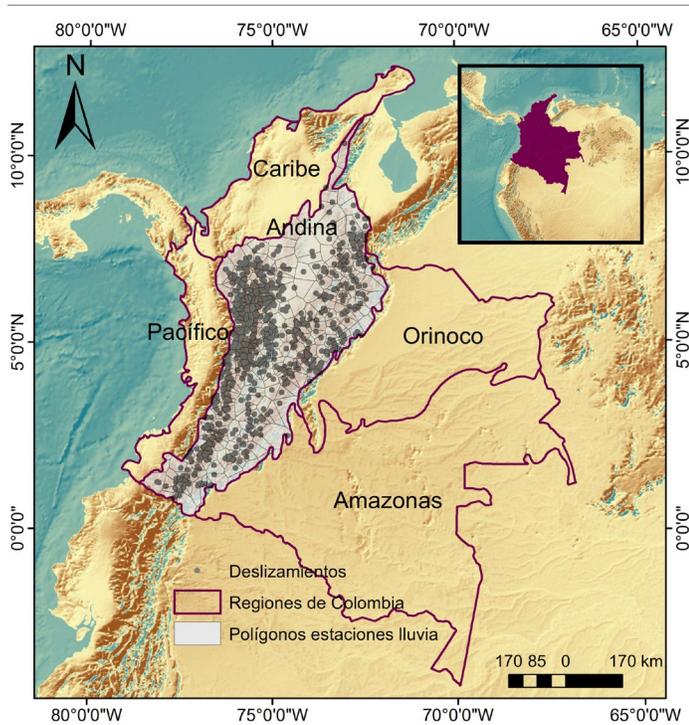


Figura 1. Mapa de la localización de la zona de estudio. Así como la distribución de los deslizamientos y los polígonos de Voronoi relacionados con las estaciones de lluvia diaria del IDEAM.

que resulta en la formación de perfiles de suelo gruesos.

El complejo entorno geográfico e hidroclimatológico mencionado anteriormente ha dado lugar a un país muy diverso que se divide en cinco regiones naturales, como se muestra en la figura 1, las regiones Andina, Caribe, Pacífica, Orinoquía y Amazónica (DANE 2005). Finalmente, este trabajo se centra en la región Andina, la cual tiene una superficie de 282540 km² que constituye el 33% de la superficie del país. Es la región más poblada de Colombia albergando aproximadamente el 65% de la población total del país, con una población de 34 millones de personas y una densidad media de 110 habitantes/km² (DANE 2005, IDEAM 2004).

Inventario de deslizamientos

Se consolidó un inventario regional de 3536 movimientos en masa detonados por lluvias, de tipo deslizamiento según la clasificación propuesta por Cruden y Varnes 1996, para el periodo de 1981 a 2019 (Fig. 1). Este inventario es principalmente proveniente del Sistema de Información de Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano-SGC (SIMMA 2022); y del Inventario de Desastres de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina-LA RED (DesInventar 2022). El inventario de deslizamientos consolidado fue filtrado seleccionando únicamente aquellos cuyo factor detonante registrado en las bases de datos fue la lluvia. Adicionalmente, de acuerdo a las unidades li-

tológicas definidas por el Servicio Geológico Colombiano, del inventario de deslizamientos aproximadamente el 50% de los eventos fueron reportados en material de tipo sedimentario como materiales de flujo volcánico, arcillas, limos, areniscas, conglomerados, calizas, entre otras. Un 20% del inventario en material de tipo rocas graníticas como granodioritas, dioritas de cuarzo, granitos entre otras. Y el restante en material de tipo basaltos, andesitas, anfibolitas, depósitos coluviales y aluviales. Finalmente, se resalta en el inventario que aproximadamente el 55% de los registros se presentaron en el Departamento de Antioquia como se observa en la figura 1; mientras que en otros departamentos el número es menor probablemente por subregistro de estos eventos.

Datos de precipitación

Para este estudio, se utilizaron mediciones de lluvia de 396 estaciones en escala diaria para el periodo 1981 - 2019 (Fig. 1) monitoreadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM 2022). En relación al tipo de precipitación en el país, en promedio, el 70% del territorio colombiano está expuesto a 2.000 mm de lluvia al año, con contrastes extremos en la costa del Pacífico, donde las precipitaciones anuales pueden superar los 8.000 mm/año debido al flujo atmosférico de humedad del Chorro de bajo nivel del Chocó y los ambientes desérticos en el norte del país (Eslava 1993, Poveda et al. 2006, Poveda y Mesa 2000). El desplazamiento de la zona de convergencia intertropical ZCIT controla fuertemente el ciclo anual de la hidroclimatología colombiana. La precipitación se caracteriza por dos regímenes: bimodal en la zona andina, cuyos trimestres lluviosos son marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre, y unimodal en la parte oriental de Colombia (Puertas y Carvajal 2008). La variabilidad interanual de las lluvias está controlada principalmente por los efectos de las dos fases de El Niño/Oscilación del Sur, El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría) (Poveda et al. 2007, Pabón et al. 2001). Adicionalmente, cabe mencionar la importancia de los bosques del Amazonas ya que por medio de flujos atmosféricos de humedad alimentan especialmente las zonas medias y altas de la cuenca del Río Magdalena en Colombia (Salazar et al. 2018, Weng et al. 2018, Mesa y Rojas 2020).

MARCO METODOLÓGICO

Con el objetivo de analizar las variables antecedentes y su relación con los deslizamientos; se comenzó por asociar a cada evento de deslizamiento la serie de lluvia por medio del método de interpolación de los Polígonos de Voronoi o Thies-

sen (Fig. 1). Estos polígonos se forman por medio de la unión de las bisectrices perpendiculares de las líneas que unen las estaciones más cercanas y permite estimar la precipitación media de una región o en este caso de los deslizamientos, a partir de la asignación de pesos a la red de estaciones por sus áreas relativas (Schumann 1998).

Para esto se propuso utilizar una metodología para la determinación de probabilidades de ocurrencia y definición de valores críticos de lluvia por medio de las curvas de lluvias, ya utilizadas en la literatura (Mayorga 2003, Correa et al. 2019), las cuales relacionan las series de lluvias históricas en un cierto periodo. Esta metodología fue llamada en este trabajo como Curvas 90 días. Adicionalmente, se utilizó el modelo de regresión logística enfocado a analizar la significancia o importancia de las variables predictoras. Estas metodologías se presentan con mayor detalle a continuación:

Curvas 90 días

Construcción de las Curvas 90 días:

Las Curvas 90 días comparan la cantidad de lluvia diaria y lluvia acumulada antecedente hasta 90 días atrás en cada estación. Estas curvas fueron generadas para todo el periodo de análisis entre 30/04/1981 y 31/12/2019. A continuación, se listan los pasos para la elaboración de las Curvas 90 días y será seleccionada para el ejemplo la estación número 24025050 ubicada en Santander, donde se reportó un deslizamiento el 8 de mayo de 2013 (Fig. 2):

1. Para explicar este paso, será seleccionado el primer día del periodo: 30/04/1981. En la primera posición del eje de las abscisas ($x=0$; ver Fig. 3) será graficada la cantidad de lluvia reportada ese día. La lluvia del día antes (29/04/1981) será graficada en la segunda posición de las abscisas ($x=1$), la lluvia acumulada de dos días antes (29/04/1981 y 28/04/1981) se grafica en la tercera posición ($x=2$), hasta que finalmente la lluvia acumulada de los 90 días anteriores al 30/04/1981 será graficada en $x=90$. Este procedimiento da como resultado una de las curvas mostradas en la figura 3.

2. El procedimiento anterior comienza el 30/04/1981 y se repite hasta el 31/12/2019. Es decir, el total de curvas negras de la figura 3, corresponden a las 14124 series de lluvia antecedente correspondientes a cada día analizado en esa estación durante el periodo. Por otro lado, algunas de esas 14124 series de lluvia se resaltan en rojo ya que corresponden a aquellas en las cuales se reportaron deslizamientos. Para el caso particular de la estación 24025050 de Charalá, Santander, sólo se reportó un deslizamiento y por tanto sólo hay una línea roja, pero en caso de haber tenido más deslizamientos registrados como fue sucedió en estaciones, habría tantas líneas rojas como deslizamientos en la figura 3.



Figura 2. Mapa de Colombia con los polígonos de Voronoi definidos según las estaciones de lluvia del IDEAM. Se resalta la estación 24025050 del municipio de Charalá, Santander, donde se asocia un deslizamiento reportado en mayo de 2013, durante todo el periodo de análisis 1981-2019.

3. Las Curvas 90 días se construyen para cada estación de la zona de estudio. En el caso de la región Andina, son en total 396 estaciones y, por lo tanto, habrá 396 gráficos similares al mostrado en la figura 3.

Selección de variables antecedentes de lluvia:

A partir de las Curvas 90 días se seleccionaron del eje de las abscisas, las 6 variables de interés mencionadas anteriormente, para los cuales se tomó su correspondiente serie de lluvia, como lo ilustra la figura 4. Estos días fueron: $x=1$ correspondiente a la lluvia diaria, $x=3$ correspondiente a la lluvia acumulada de 3 días antecedentes, $x=15$, $x=30$, $x=60$ y $x=90$, respectivamente. Es decir, se tomó la información de lo que históricamente en la estación llovió en un sólo día ($x=1$), y así sucesivamente hasta tomar lo que históricamente llovió acumulando 90 días ($x=90$). A esta información la llamamos: *series de lluvia histórica correspondiente a la lluvia diaria y antecedente a corto, mediano y largo plazo.*

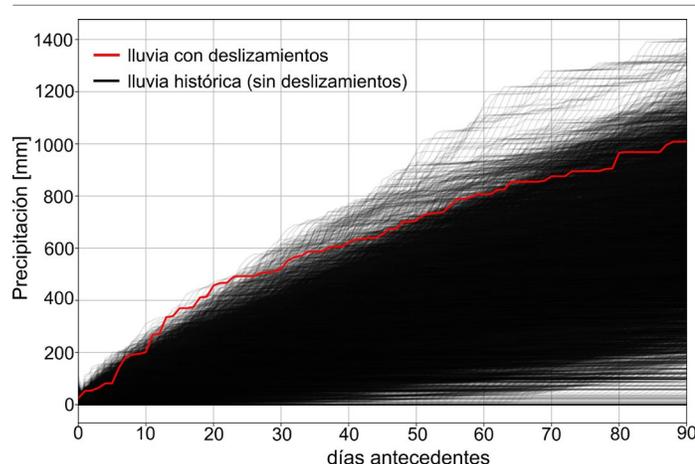


Figura 3. Curvas de 90 días antecedentes para la estación del IDEAM 24025050 de Charalá, Santander, construidas para el periodo 1981-2019. Se resalta en color rojo la línea de lluvias antecedentes asociadas al deslizamiento reportado en mayo de 2013.

Relación entre lluvias asociadas con deslizamientos respecto al histórico del periodo:

Para conocer la importancia de las lluvias asociadas a los deslizamientos se comparó su valor con lo que históricamente se observó en su respectiva estación, este porcentaje fue denominado “significancia de la lluvia detonante de deslizamientos” y se determina por medio de la Ecuación 1.

$$\text{Significancia de la lluvia detonante de deslizamientos} = \frac{\sum \text{curvas (puntos) debajo de la línea roja}}{\text{Número total de curvas observadas en la serie}} * 100\% \quad [1]$$

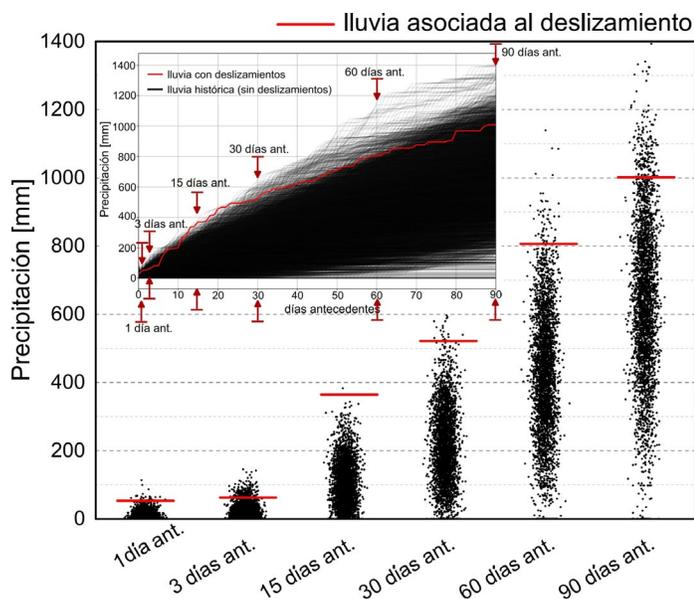


Figura 4. Curvas de 90 días antecedentes para la estación del IDEAM 24025050 de Charalá, Santander, construidas para el periodo 1981-2019. Se resalta con flechas rojas, las series de lluvia seleccionadas correspondientes a los días de análisis de interés: lluvia diaria, 3, 15, 30, 60 y 90 días acumulados antecedentes.

Probabilidad de excedencia de un determinado valor de lluvia:

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de lluvias que igualen o excedan cierta magnitud fue utilizada la definición clásica de probabilidad, mostrada en la Ecuación 2:

$$P(X) = \frac{\sum \text{registros de lluvia iguales y superiores al valor } X \text{ de lluvia}}{\text{Número total de registros de lluvia}} * 100\% \quad [2]$$

Probabilidades condicionadas de ocurrencia de deslizamientos:

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos condicionada a que se presenten magnitudes de lluvia que igualen o superen un determinado valor, fue utilizada la definición clásica de la probabilidad considerando el cambio de espacio muestral y se muestra en la Ecuación 3:

$$P(D|X) = \frac{\sum \text{registros de lluvia asociados a deslizamiento iguales y superiores al valor } X \text{ de lluvia}}{\text{Número total de registros de lluvia iguales y superiores al valor } X \text{ de lluvia}} * 100\% \quad [3]$$

Análisis de los coeficientes en el modelo de regresión logística

Se utilizó el modelo de regresión logística altamente usado en la literatura para relaciones con deslizamientos (Bui et al. 2011, Bui et al. 2016, Muller y Guido 2017, Raja et al. 2017, Géron 2019, Merghadi et al. 2020). El modelo de regresión logística es un tipo de modelo lineal generalizado (Ecuación 4) y en el cual, mediante la significancia de los coeficientes, puede conocerse la importancia de las variables predictoras por medio del valor de su coeficiente (Raja et al. 2017, Merghadi et al. 2020). La regresión logística asocia la probabilidad de aciertos (en este caso la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos) con una función Logit basados en relación con las variables predictoras (Ecuación 5), que, en este caso particular, los aciertos son ocurrencias de deslizamientos y los predictores, las variables de lluvia diaria detonante y antecedentes (coeficientes a_n de la Ecuación 4) (Raja et al. 2017, Merghadi et al. 2020).

$$\text{Logit} = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = Z = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n \quad [4]$$

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} = \frac{e^z}{1 + e^z} \quad [5]$$

Finalmente, debido a que en este trabajo se utilizó el modelo de regresión logística con enfoque en el análisis de los predictores y no propiamente en la predicción, se seleccionó la librería *StatsModels* desarrollada en *Python* por Skipper y Perktold 2010. La cual permite conocer la significancia de los

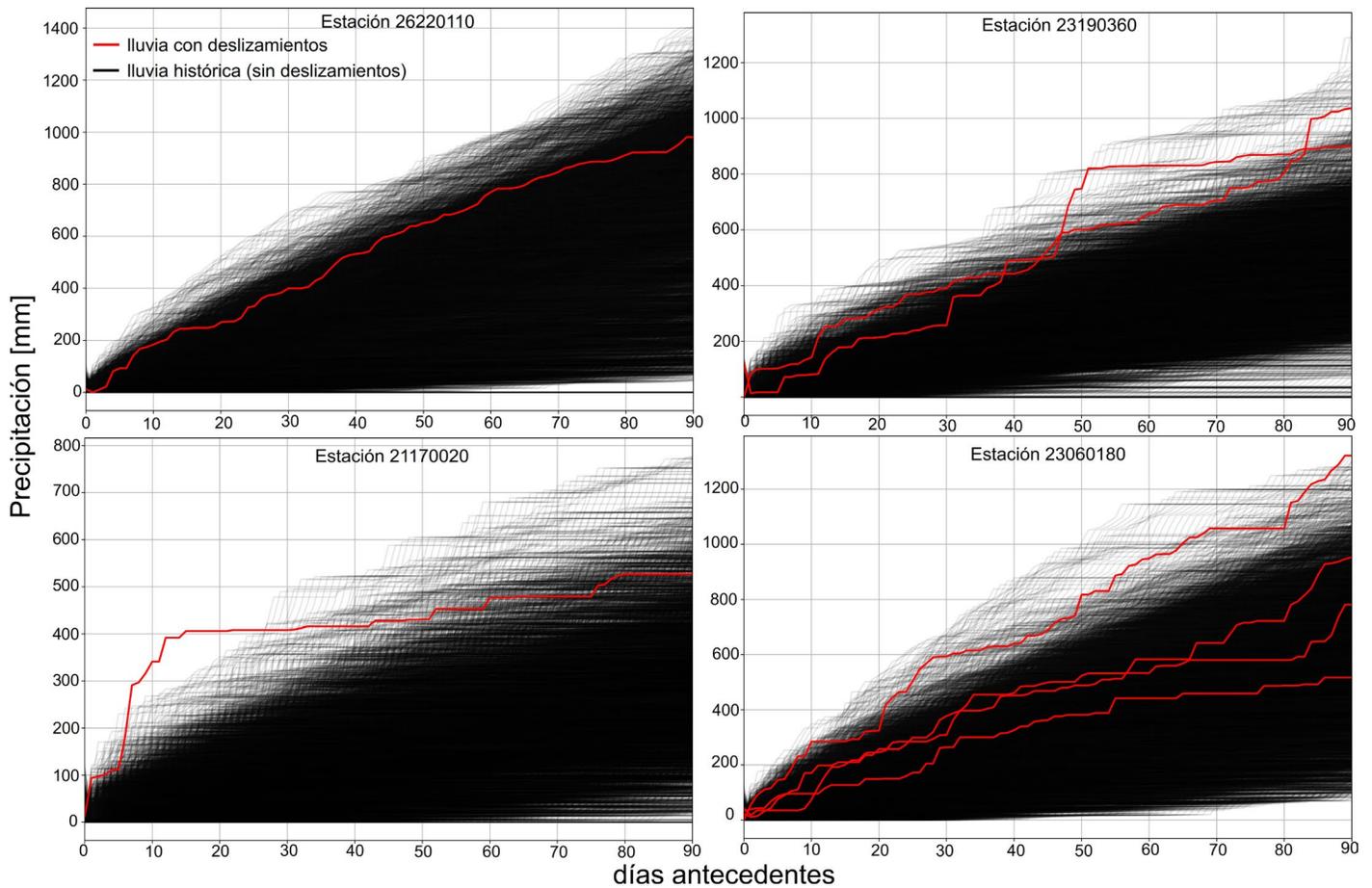


Figura 5. Curvas 90 días para cuatro diferentes estaciones de la región Andina Colombiana

predictores al proveer información de los coeficientes de regresión, el valor Z y sus respectivos valores-P. Cabe mencionar, que el valor-P corresponde a una medida estadística utilizada para validar o rechazar la hipótesis nula propuesta, en este caso que el coeficiente de las variables es igual a cero. Un valor-P igual o menor a 0,05 permite rechazar la hipótesis nula y aceptar que el valor del coeficiente obtenido es estadísticamente significativo (Ramachandran y Tsokos 2020).

RESULTADOS

Curvas 90 días

Análisis de la lluvia antecedente asociada a los deslizamientos:

A partir de la revisión de las Curvas 90 días de todas las 396 estaciones y la relación entre las lluvias y los deslizamientos, se observaron particularidades en el comportamiento en cada estación. Por ejemplo, la lluvia acumulada de 15 días antecedentes asociada a algún deslizamiento fue la máxima reportada, pero a su vez, esta serie no presentó altos valores de lluvias antecedentes acumulando más de un mes, como lo

es el caso de la estación 21170020 mostrada en la figura 5. Lo que puede deberse a la variabilidad de la lluvia y la diferencia de gradientes climáticos presentes en la zona andina (Valencia et al. 2021). Así mismo, se encontraron eventos de lluvia asociada con deslizamientos que no fueron significativos respecto al histórico reportado en el periodo.

Por otro lado, se encontraron similitudes en varias de las estaciones, como lo fueron los reportes de deslizamiento en días específicos sin lluvia, pero con registro de lluvias altas de hasta 3 meses atrás (figura 5). Específicamente, aproximadamente el 10% de los eventos se registraron en días sin lluvia; el 36% ocurrieron en días de hasta 10 [mm] y el 54% en días con lluvia diaria superiores a 10 [mm]. Para interpretar mejor toda esta información en conjunto en la región Andina, y para dar respuesta a qué lluvia antecedente es más importante en la ocurrencia de deslizamientos, fueron escogidas 6 variables específicas abarcando el corto, mediano y largo plazo. Estas fueron: 1 día, 3 días, 15 días, 30 días, 60 días y 90 días antecedentes. Además, el criterio de selección de las variables antecedentes de interés se realizó considerando conclusiones de diferentes autores que mencionan la relación con los deslizamientos y las variables antecedentes de más de un

mes en la región (Terlien 1996, Moreno et al. 2006, Suárez 2009, Aristizábal et al. 2010, Aristizábal et al. 2011, Correa et al. 2019, Gómez et al. 2021). Con todo, se recomienda para trabajos futuros analizar el comportamiento histórico de las lluvias antecedentes de cada localización en particular.

Relación entre lluvias asociadas con deslizamientos respecto al histórico del periodo: Con el fin de dar respuesta a las particularidades mencionadas anteriormente en el inicio de la revisión de las Curvas 90 días de todas las estaciones, se buscó responder la siguiente pregunta: ¿Fueron significativas las lluvias asociadas a los deslizamientos en relación con el histórico de lluvias registradas en dicha estación?

Para esto, a partir de las curvas de las 396 estaciones, se

identificó la serie de lluvia correspondiente al deslizamiento (línea en rojo de la figura 4), y para el valor de lluvia observado en cada día de interés ($x=1$, $x=3$, $x=15$, $x=30$, $x=60$ y $x=90$), se comparó su valor con lo que históricamente se observó en la respectiva estación. Esta comparación se realizó a cada una de las series de *lluvia histórica correspondiente a la lluvia diaria y antecedente a corto, mediano y largo plazo* (Fig. 4) por medio de la Ecuación 1. Por último, estos 6 porcentajes para cada día de interés (correspondientes a: $x=1$, $x=3$, $x=15$, $x=30$, $x=60$ y $x=90$) se determinaron para cada deslizamiento; y como se explica en la figura 3, cada deslizamiento está asociado a una estación de lluvia según su ubicación, la cual tendrá sus propias Curvas 90 días.

Para visualizar más claramente estos resultados, se ilus-

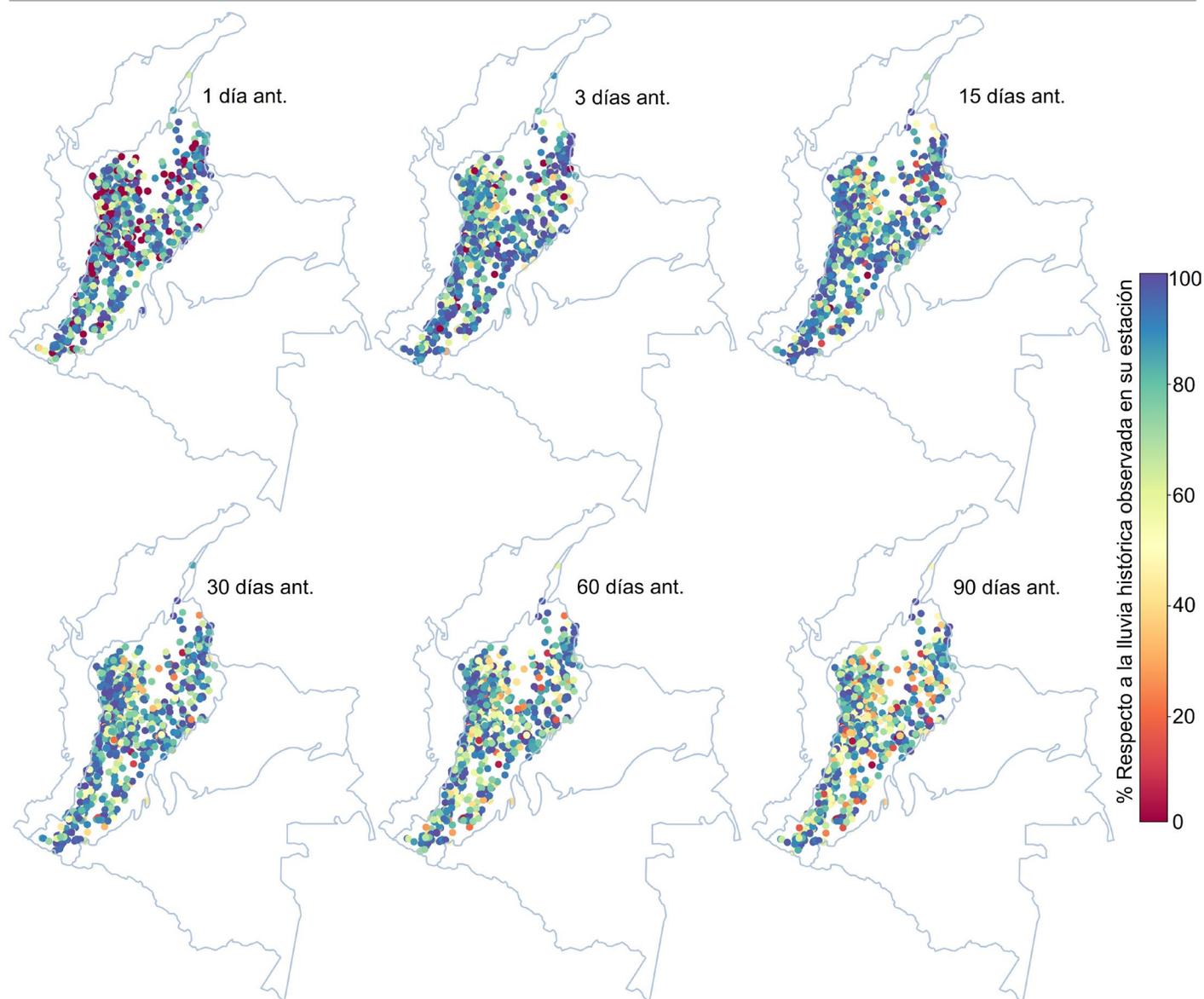


Figura 6. Mapa con la ubicación de los 3536 deslizamientos en la región. Cada deslizamiento o punto del mapa se asoció a un valor de lluvia diaria y lluvias antecedentes, por lo tanto, cada punto indica el porcentaje de dicha lluvia asociada al deslizamiento respecto a la lluvia histórica registrada en todo el periodo en su estación correspondiente.

tran en el mapa de la figura 6 cada evento de deslizamiento reportado (el cual está relacionado a un evento de lluvia); y representa el porcentaje de eventos de lluvia que superaron en magnitud, en su respectiva estación a lo largo de todo el periodo. En otras palabras, por ejemplo, un punto de alguno de los mapas de la figura 6 con un valor de 80% quiere decir, que la magnitud del evento de lluvia que ocasionó ese deslizamiento superó el 80% de las lluvias reportadas en todo el periodo. Por lo tanto, estos porcentajes reflejan si la cantidad de lluvia asociada a los deslizamientos, respecto a lo observado históricamente en su estación, fue importante o significativo.

De aquí en adelante los eventos de lluvia a los que se hace mención son aquellos asociados a los deslizamientos como se observa en la figura 6. De esta figura se puede concluir que los deslizamientos si fueron detonados por lluvias y que además fueron magnitudes importantes, porque entre el 70% y el 85% de los registros de deslizamientos observados en los 6 mapas de la figura 6, se concentraron en el rango entre el 60 y el 100% de lo observado en todo el periodo. Finalmente, se agruparon los eventos de lluvia en 5 categorías de acuerdo con los porcentajes de la ecuación anterior: 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, y en cada una de ellas se determinó el valor medio de la lluvia observada. Estos valores representativos en cada categoría dan información de qué lluvias pueden ser responsables de las ocurrencias de deslizamientos y son mostrados en el Cuadro 1.

Por último, como se mencionó anteriormente, debido a que a partir de la figura 6 se concluyó que en los 6 mapas de cada variable antecedente entre el 70% y el 85% de los deslizamientos están concentrados entre el 60 y 100% de las lluvias históricas observadas; las lluvias medias dadas en la Tabla 1 corresponden a una primera aproximación de los valores críticos de lluvia antecedente, los cuales se resaltan en color azul. Estos resultados de los valores críticos de lluvia, será retomado y complementado en el último análisis presentado en este trabajo.

Importancia de las variables antecedentes en la ocurrencia de deslizamientos-metodología Curvas 90 días:

Por otro lado, esta y la próxima sección tiene como fin responder a la pregunta: ¿Qué variables antecedentes influyen más en la ocurrencia de deslizamientos en la región Andina?

Para esto, se asociaron probabilidades a los valores de lluvia que ocasionaron los deslizamientos del inventario, utilizando las series de lluvia histórica correspondiente a la lluvia diaria y antecedente a corto, mediano y largo plazo (Fig. 4) por medio de la Ecuación 3. La cual, determina la probabili-

Cuadro 1. Valores medios de lluvias asociadas a los deslizamientos analizada en cada categoría

%	1 día [mm]	3 días [mm]	15 días [mm]	30 días [mm]	60 días [mm]	90 días [mm]
0-20	0	0.16	24	58.11	163.2	303
20-40	0.79	6	62.2	128.6	297	441
40-60	2.2	14	94	189.7	380	558
60-80	7.6	28	127.3	250.3	471	696
80-100	30.13	67.8	220.3	380	676	934.6

dad de ocurrencia condicionada a eventos de lluvia que igualen o superen dichas magnitudes.

Con el fin de resumir los resultados de todas las probabilidades de ocurrencia asociadas a las lluvias relacionadas con los deslizamientos, estas fueron agrupadas en la figura 7. Estos resultados indican que las magnitudes de probabilidades son bajas, concentrando aproximadamente el 90% de las lluvias asociadas a los deslizamientos, entre aproximadamente el 0 y el 20% de probabilidad. Esto debido a que en los 38 años de análisis hay más eventos sin deslizamientos asociados; lo que cabe mencionar, puede deberse a que no en todas las regiones se lleva cuenta de estos inventarios. También se observa la tendencia a disminuir la probabilidad de ocurrencia a medida que se aumenta la variable de días antecedentes. Esto confirma las conclusiones preliminares de la revisión de las Curvas 90 días, donde se observaron para ciertas zonas en la región andina lluvias antecedentes de corto plazo altas, pero después del mes estos valores no eran significativos. Esto lleva a dos conclusiones importantes, la primera es que, en la zona Andina, aunque la lluvia antecedente de hasta 90 días atrás puede ser relevante, las que contribuyen con mayor importancia en la ocurrencia de deslizamientos son las variables de corto y mediano plazo. Otra conclusión es la de aplicar esta metodología en diferentes zonas de la región Andina con similitudes en el comportamiento de la lluvia. Cabe mencionar que, a razón de la segunda conclusión, se han venido adelantando diferentes análisis, y resultados preliminares señalan que la importancia de las variables antecedentes difiere entre regiones de la zona Andina. Sin embargo, se conserva el comportamiento encontrado de manera general para toda la zona Andina, esto es, la relevancia va disminuyendo en la medida que se alejan del mes antecedente.

Análisis de los coeficientes en el modelo de regresión logística

Para complementar los resultados de la sección inmediatamente anterior, se aplicó otra metodología por medio de un análisis de sensibilidad de los coeficientes de la regresión logística. Esto se realizó entrenando el modelo de regresión logística utilizando únicamente dos variables en cada entrenamiento: la lluvia del día del evento y la variable de lluvia antecedente. En cada entrenamiento se dejó fija la variable de lluvia del día del reporte del deslizamiento y fue cambiando la variable antecedente. Es decir, en el primer modelo se utilizaron las variables: lluvia detonante y lluvia antecedente del día anterior. En el segundo modelo: lluvia detonante y lluvia antecedente de 2 días anteriores, y así sucesivamente hasta que el último modelo se entrenó con las variables: lluvia detonante y lluvia acumulada de 90 días antecedente. Esto con el fin de conocer la importancia de la variable predictora a través de la significancia del valor-P o el valor del coeficiente producto de la regresión. Para lo cual, fue utilizada la librería *StatsModels* desarrollada en *Python* por Skipper y Perktold 2010, la cual permite visualizar en detalle los resultados de la significancia de los predictores.

Para esto, fue necesario construir una base de datos de lluvias para la totalidad del inventario de deslizamientos de la región Andina, por medio de las series de lluvia antecedentes definidas en las Curvas 90 días para cada estación que fue

asignada a cada deslizamiento por medio de los polígonos de Thiessen (Fig. 1). Fueron seleccionadas las variables predictoras de lluvias que ocasionaron deslizamientos (curvas rojas de todas las estaciones) y en la misma proporción, se seleccionaron aleatoriamente series de lluvia que no reportaron deslizamientos (curvas negras).

En todos los casos, los resultados del valor-P de cada modelo entrenado y cada variable predictora utilizada, fueron significativos (valor-P menor que 0.05). Adicionalmente, aunque no fue el enfoque del presente análisis, cabe mencionar que los modelos de predicción de deslizamientos también mostraron un buen desempeño en la determinación de las probabilidades de ocurrencia. En este caso, los resultados están enfocados en la evaluación de las variables predictoras a partir de la razón de probabilidades (*odd*). Un *odd* o razón de probabilidad, es la probabilidad de ocurrencia sobre la probabilidad de no ocurrencia, es decir, un valor mayor que la unidad indica que la probabilidad de ocurrencia es mayor que la de no ocurrencia.

En la figura 8 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad de las variables predictoras y su razón de probabilidad. La línea azul ilustra los resultados de la variable detonante (fue utilizada en todos los modelos) y la línea marrón corresponde a las variables predictoras antecedentes que fueron cambiando en cada modelo. Esta figura permite concluir que en primera instancia en todos los casos la razón

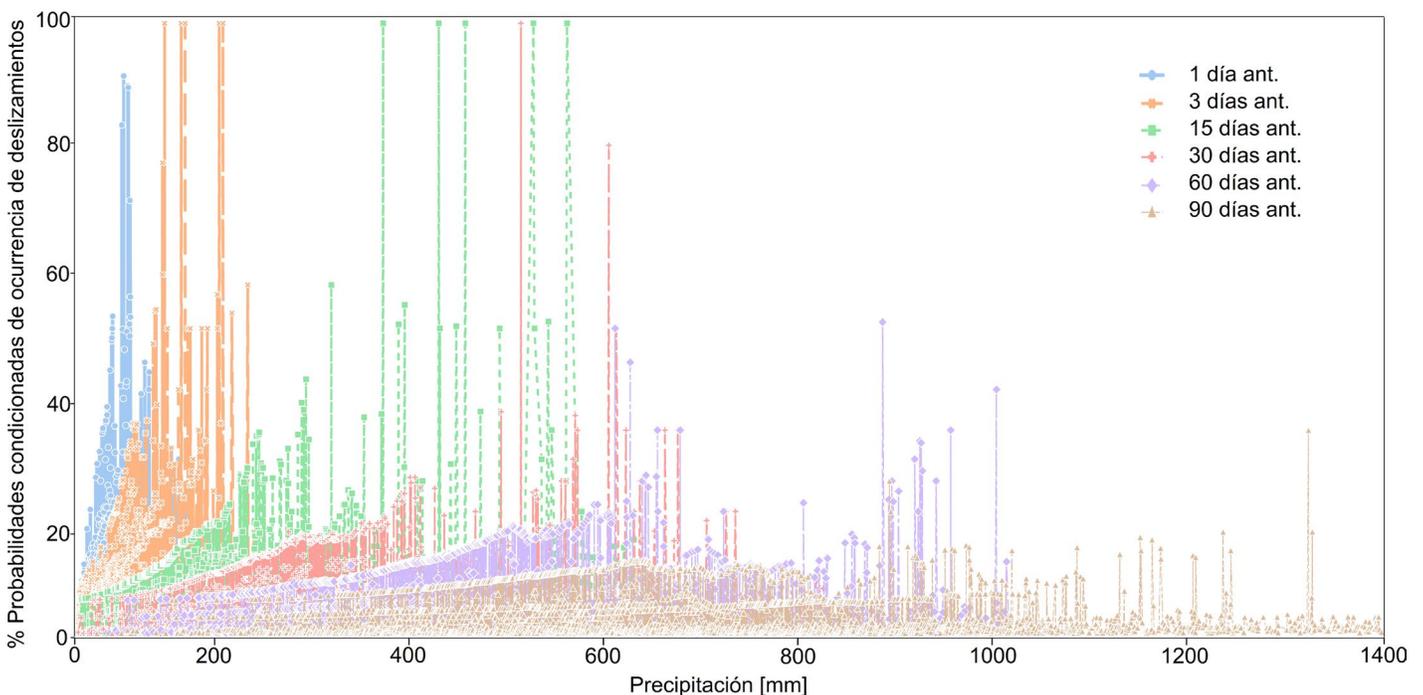


Figura 7. Probabilidades de deslizamientos condicionadas (Ecuación 3) a magnitudes de lluvia que igualaron o superaron los valores de precipitaciones registradas aquellos días con ocurrencias de deslizamientos en el inventario. Estas probabilidades fueron calculadas para cada serie de lluvia histórica antecedente de cada estación y son presentadas en colores diferentes.

de probabilidad fue mayor a la unidad, lo que indica que en todos los casos estas variables influyen en el fenómeno natural de interés. Con todo, se puede observar que la importancia de las variables predictoras antecedentes de corto y mediano plazo (hasta aproximadamente 40 días) es mayor que la detonante, y en la medida que los días antecedentes aumentan, la variable detonante tiende a aumentar su importancia mientras que la variable antecedente disminuye. Así mismo, se muestra una diferencia más marcada entre los coeficientes de las primeras dos semanas, indicando que tiene en general más relevancia en la ocurrencia de deslizamientos en la región Andina la lluvia antecedente de corto y mediano plazo (hasta 2 semanas) que la intensidad de la lluvia detonante. También se observó que tienen similar importancia la lluvia detonante y la lluvia antecedente de largo plazo (40 a 50 días). Por último, la lluvia antecedente de 2 a 3 meses influye en menor grado, sin alcanzar a superar la importancia de la lluvia detonante.

Finalmente, se analizaron los coeficientes de las variables de lluvia diaria detonante y antecedentes hasta 90 días en un mismo modelo de regresión logística (Fig. 9). Este segundo análisis confirmó que las variables antecedentes de corto y mediano plazo (3 a 15 días) tienen mayor relevancia en la ocurrencia de deslizamientos que las variables antecedentes de largo plazo, y sólo hasta 2 meses aproximadamente (50 días) contribuyen directamente con la ocurrencia de los deslizamientos. Esto se afirma debido a que el coeficiente de la variable de 90 días fue negativo o en términos de razón de probabilidad (*odd*) fue menor a la unidad. Finalmente, la variable detonante mostró menor importancia en la ocurrencia

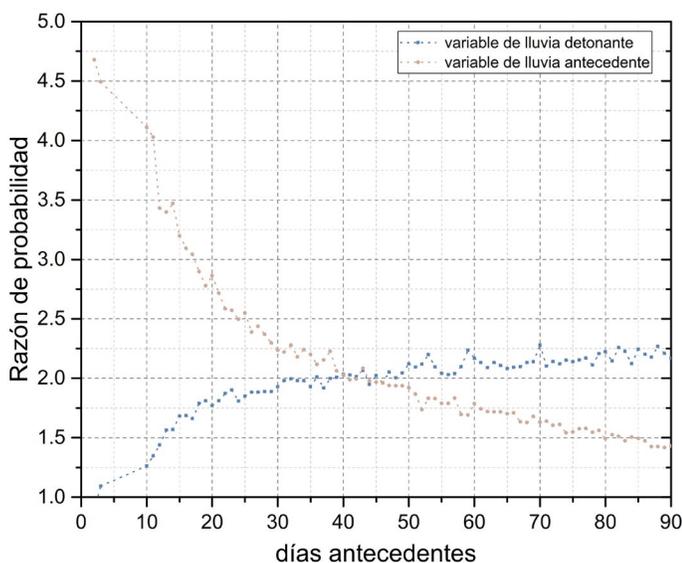


Figura 8. Resultados del análisis de sensibilidad de los coeficientes del modelo de regresión logística. En esta figura se presentan los resultados de cada uno de los modelos que evaluaron la lluvia diaria detonante y una a una las variables antecedentes de hasta 90 días.

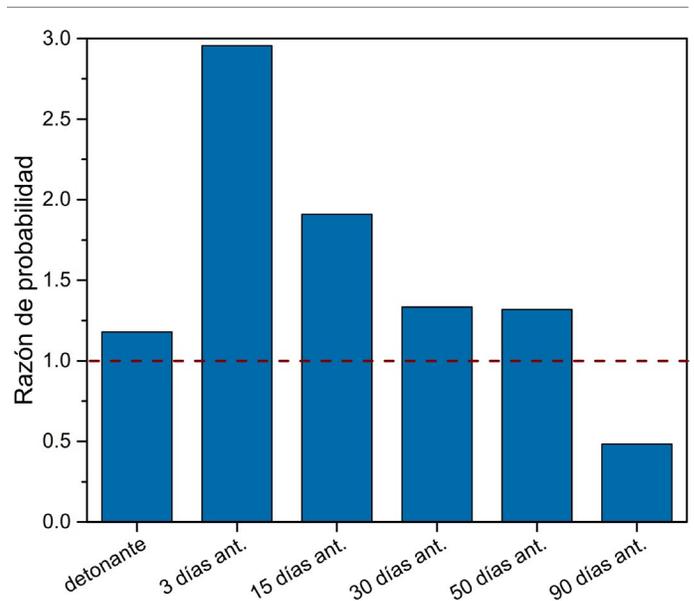


Figura 9. Resultados de los coeficientes del modelo de regresión logística evaluando todas las variables de lluvia diaria detonante y antecedentes seleccionadas en el análisis. La línea en trazos se ubica en la unidad del *odd* o la razón de probabilidad, con el fin de diferenciar las variables que aportan información al modelo (razón de probabilidad >1) de las que no, como lo es el caso de la variable antecedente de 90 días.

del fenómeno en comparación con las variables antecedentes de hasta 50 días, siendo únicamente más relevante que la variable antecedente de 90 días.

Esto confirma la relevancia de la lluvia antecedente de hasta 40 y 50 días y lo también mencionado en las primeras observaciones de las Curvas 90 días de todas las estaciones, ya que en muchos casos se presentaron deslizamientos sin reportar lluvias significativas específicamente en el día de ocurrencia sino en periodos anteriores (aproximadamente 46% de los reportes en días con lluvias menores a 10 mm).

Definición de umbrales críticos univariantes de lluvia antecedente (Curvas 90 días):

Retomando los resultados presentados en el Cuadro 1 donde se dio una primera aproximación de valores críticos de lluvia antecedente responsable de deslizamientos, por medio de los valores medios en cada variable. Fue aplicada la misma metodología donde se determinaron las probabilidades condicionadas de ocurrencia de deslizamientos (Ecuación 3), pero en este caso no fueron determinadas únicamente para los valores de lluvia asociados a deslizamientos, ni se determinaron para cada estación independiente. En esta sección, con la intención de determinar probabilidades que puedan ser representativas para toda la región Andina, se reunieron las Curvas 90 días (de las 396 estaciones) en una sola figura llamada Curva Unificada 90 días de la Región Andina (Fig. 10); conservando la distinción entre las lluvias que no reporta-

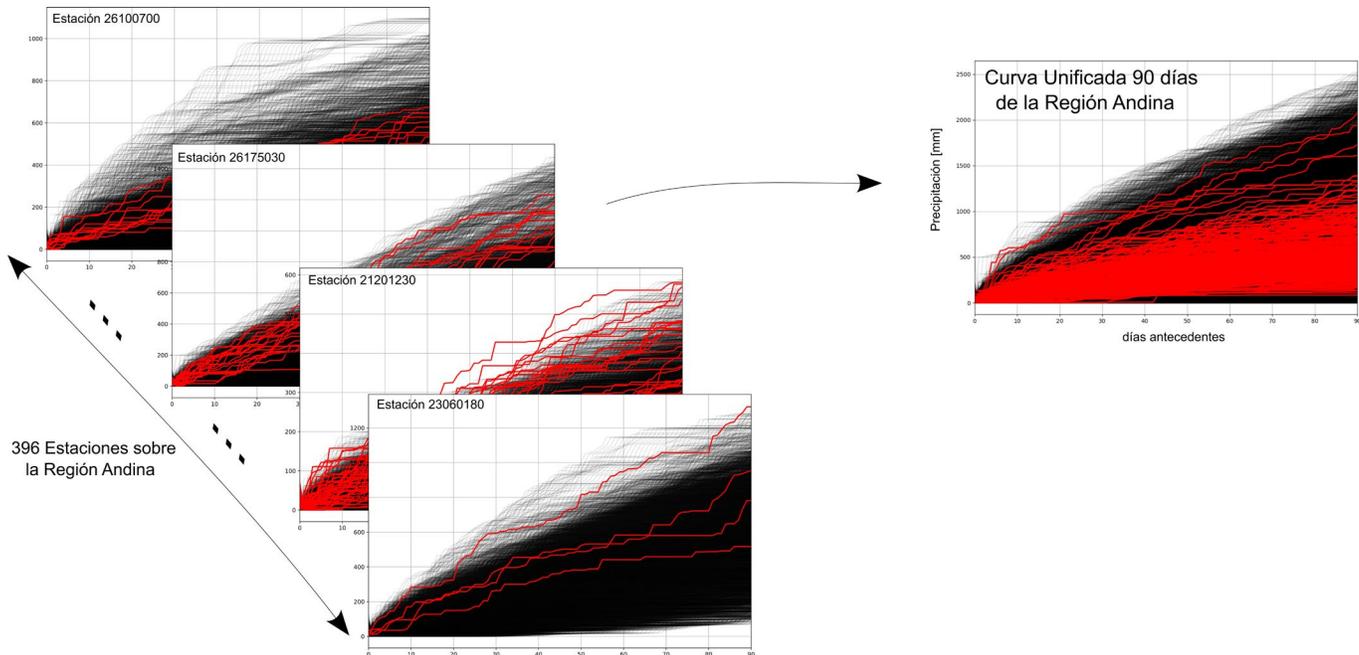


Figura 10. Curva Unificada 90 días de la Región Andina. La cual conforma todas las líneas negras (lluvias sin deslizamiento) y las líneas rojas (lluvias con deslizamiento) de las 396 estaciones analizadas en la región.

ron deslizamientos (curvas negras) y las asociadas a deslizamientos (curvas rojas). En este análisis las magnitudes de las probabilidades condicionadas disminuyeron en relación con el análisis mostrado en la figura 7, concentrándose entre 0 y 1%. Esto debido a que las curvas negras (lluvias sin deslizamiento en todo el periodo de análisis de todas las estaciones unidas) aumentan en relación con las curvas rojas (lluvias asociadas a los deslizamientos del inventario) como se explica en la figura 10. Adicionalmente, las probabilidades de ocurrencia se determinaron para diferentes valores de lluvia, de acuerdo con la variable antecedente cada 5 mm como se indica en el Cuadro 2.

Así mismo, fue determinada la probabilidad de excedencia de la lluvia (Ecuación 2) y la cantidad de deslizamientos que se presentaron en dichos intervalos, con el fin de encontrar una relación que permitiera en conjunto con las probabilidades de ocurrencia, definir umbrales críticos para cada variable. La figura 11 presenta los resultados de las probabilidades de ocurrencia dado que se presente o supere cierto valor de lluvia (dadas en el Cuadro 2). Así mismo, las probabilidades que dichos valores de lluvia sean excedidos y la cantidad de deslizamientos que han sido registrados para estos valores de lluvia.

En cuanto al comportamiento de la curva de probabilidades condicionadas de ocurrencia de deslizamientos (Fig. 11), los resultados indicaron que estos valores fueron en aumento a medida que la curva de la probabilidad de excedencia disminuía. Luego se estabilizaron en la medida que el reporte

de deslizamientos para esos intervalos fue disminuyendo, y finalmente cayeron a cero cuando no se encontraron más registros de deslizamientos. Además, se observó una pendiente mayor en dicha curva de tendencia de las probabilidades cerca del pico de deslizamientos reportados, y adicionalmente se observó este comportamiento cuando la probabilidad de excedencia de dicha lluvia bajaba a un aproximado de 10%. Esto, exceptuando en la variable de 90 días antecedentes, ya que este pico se dio para lluvias con probabilidades de excedencia cerca del 35%.

Adicionalmente, la variable de lluvia diaria registró aproximadamente el 42% de los deslizamientos con lluvias nulas o inferiores a 5 mm, presentando además una caída en la probabilidad de excedencia entre ese periodo de lluvia (0 a 5 mm) del 100% al aproximadamente 30%. Esto confirma los resultados de los coeficientes de la regresión logística en la que, en comparación con las variables antecedentes, la intensidad de lluvia diaria detonante no tiene igual influencia.

Finalmente, como fue mencionado anteriormente, se observó un patrón entre las curvas de probabilidades condicionadas, las probabilidades de excedencia de la lluvia y el número de registros de deslizamientos (tres ejes verticales analizados en la figura 11). Este patrón indicó para cada variable de lluvia diaria y antecedente analizada, un valor determinado de la lluvia con más del 60% de ocurrencias registradas, coincidiendo con el aumento en la pendiente de las probabilidades condicionadas y el porcentaje de excedencia de la lluvia en torno a 10%. Este valor de lluvia indicado en

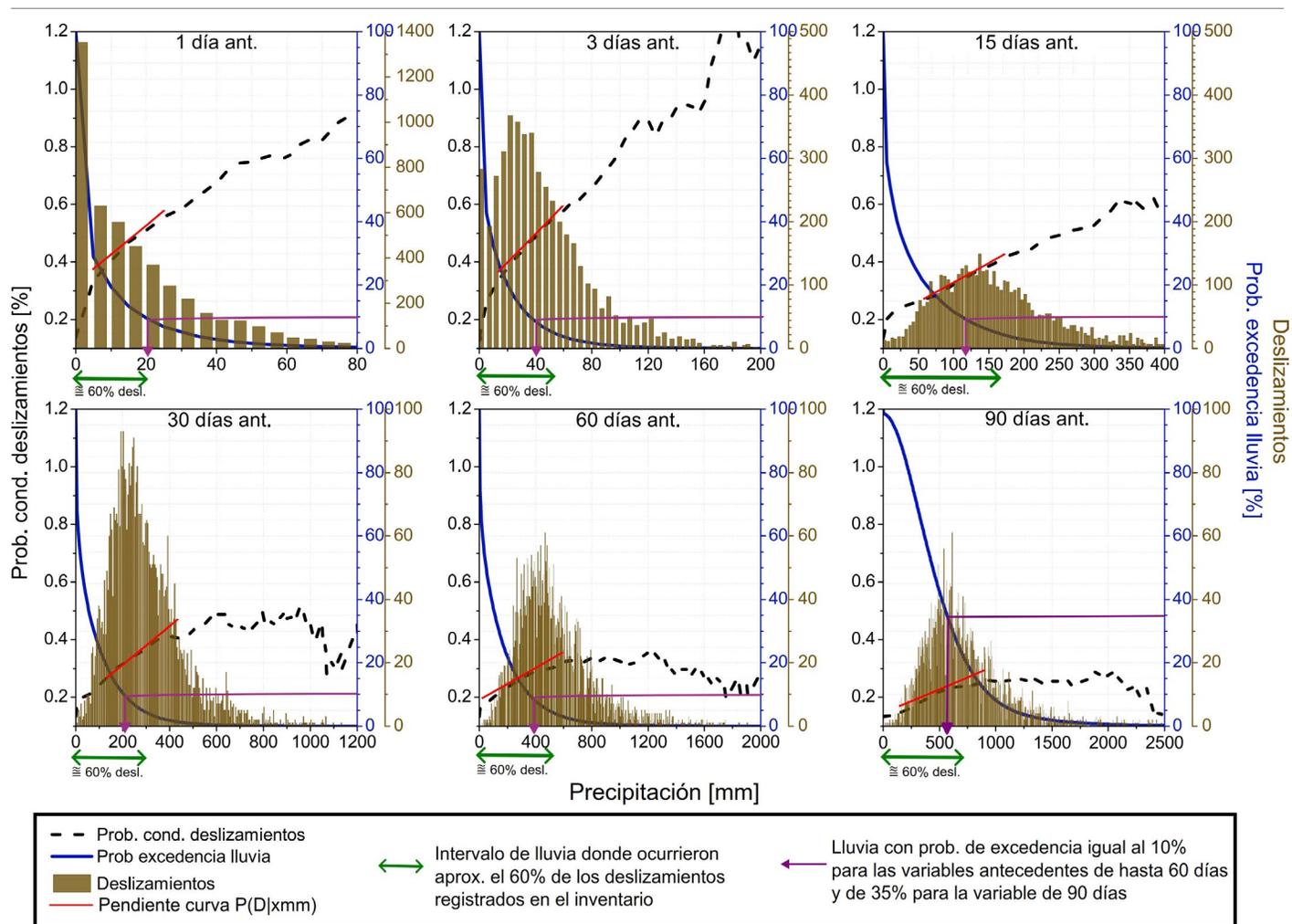


Figura 11. Probabilidades de deslizamientos condicionadas a magnitudes de lluvia iguales o superiores a los valores de lluvia definidos en la columna de rango de precipitación de la Tabla 2. Estos valores son presentados en las líneas negras discontinuas para cada serie histórica de lluvia antecedente de la Curva Unificada 90 días de la Región Andina, en los ejes de la izquierda. Las líneas de color azul presentadas en el primer eje de la derecha, corresponden a las probabilidades de excedencia de las lluvias del rango de precipitaciones del Cuadro 2. Las barras de color café presentadas en el segundo eje de la derecha, corresponden al número de deslizamientos registrados en cada intervalo del rango de precipitaciones del Cuadro 2. Las flechas color púrpura indican el valor de la lluvia con una probabilidad de excedencia igual al 10% en las variables antecedentes hasta 60 días, y el valor de la lluvia con una probabilidad cerca del 35% para la variable de 90 días. La línea roja indica la pendiente de la curva de probabilidades condicionadas de ocurrencia de deslizamientos. Finalmente, la línea verde indica el rango de lluvia en cada variable analizada en la que ocurrieron aproximadamente el 60% de los deslizamientos registrados.

cada variable antecedente fue establecido como un umbral crítico determinante de deslizamientos, complementando los resultados del Cuadro 1 y son mostrados en el Cuadro 3. Finalmente, los resultados del Cuadro 3 confirman una vez más que las variables antecedentes de corto plazo presentan magnitudes de probabilidad mayor y por tanto mayor influencia en la ocurrencia de deslizamientos, en relación con las variables antecedentes de largo plazo.

Finalmente, se encontraron las probabilidades de ocurrencia de deslizamientos dado que se presenten o superen los valores críticos de lluvia propuestos en cada estación en particular, con el fin de especializar las probabilidades de ocurrencia. Estos resultados se presentan en la figura 12, donde cada punto representa una estación de lluvia con su respec-

tiva probabilidad de ocurrencia. El rango de probabilidades mostrado en la figura 12 fue seleccionado entre 0 y el 20% con el fin de apreciar con más detalle la diferencia entre las zonas de las estaciones. Esto debido a que, en el análisis realizado para cada estación, las magnitudes de las probabilidades se condensaron en este rango de manera similar a los resultados del análisis previo de cada estación mostrado en la figura 7.

DISCUSIÓN

Respecto a la metodología empleada, el uso de las Curvas 90 días permitió conocer el comportamiento de las llu-

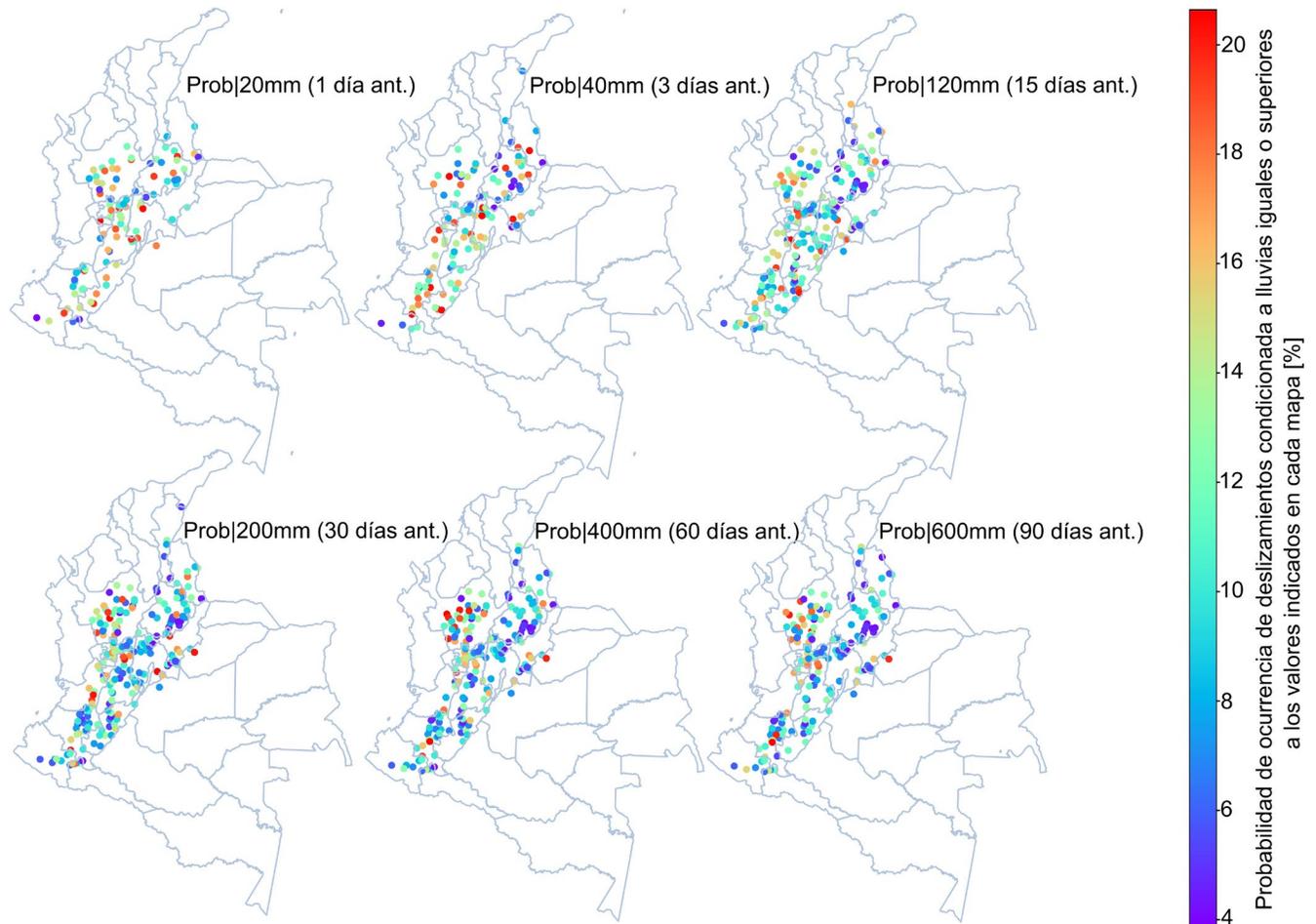


Figura 12. Distribución de las probabilidades de deslizamientos en función de la lluvia para las variables antecedentes en cada estación. Adicionalmente, con el fin de apreciar las diferencias entre las probabilidades de las zonas de las estaciones, se seleccionó el rango de probabilidades entre 0 y 20%, debido a que las magnitudes de las probabilidades se condensaron en estos valores.

vias asociadas a los deslizamientos, ofreciendo aún solo con la observación, una idea de qué tan relevantes son estos eventos de periodos anteriores. Esto debido a que el análisis preliminar de las Curvas 90 días, permitió descartar aquellos eventos en los que la lluvia fue nula o insignificante, lo cual pudo deberse a errores en el reporte de su factor detonante en las bases de datos. Además, el uso de este método permitió analizar de forma independiente cada serie histórica, de cada variable antecedente, conociendo su relevancia en el periodo, así como probabilidades en relación con los deslizamientos, y las probabilidades de excedencia de las lluvias en conjunto. Adicionalmente, permite ser aplicado en detalle en cada estación o zona específica.

La aplicación de esta metodología señaló que las variables antecedentes en la Región Andina tienen relevancia en la ocurrencia de deslizamientos especialmente las de corto plazo, y en la medida que aumentan los días antecedentes esta relevancia disminuye. Estos resultados fueron comple-

mentados por medio del análisis de los coeficientes del modelo de regresión logística, evaluando la importancia de las variables predictoras, lo cual es el primer paso y es determinante para el uso de cualquier modelo estadístico; en este caso en particular, en el estudio de amenaza por movimientos en masa. Este segundo análisis indicó que las variables antecedentes de hasta 30 días son más relevantes que la intensidad diaria en la ocurrencia de deslizamientos. Lo anterior se atribuye a que los suelos tropicales con perfiles profundos de meteorización, como es el caso de la región Andina Colombiana, están asociados con periodos mayores de lluvia y no con eventos particulares de altas intensidades (Suárez 2009). Así mismo, los resultados señalaron que las variables de aproximadamente entre 30 y 40 días, aunque con menos relevancia siguen influenciando y las variables antecedentes mayores a estos valores no influyen más que la intensidad diaria en la ocurrencia de deslizamientos. Adicionalmente, un último análisis fue realizado utilizando la metodología de las

Cuadro 2. Rangos definidos para la determinación de probabilidades de deslizamientos en función de la lluvia.

Variable	Rango de Prec. [mm]	Paso [mm]
1 día ant.	0-100	5
3 días ant.	0-200	5
15 días ant.	0-400	5
30 días ant.	0-1200	5
60 días ant.	0-2000	5
90 días ant.	0-2500	5

Cuadro 3. Valores críticos de lluvias antecedentes en la ocurrencia de deslizamientos. Señalados con las flechas de color púrpura en la figura 11.

Variable	Valor crítico lluvia [mm]	%P(D X)mm	%P. Exced.
Lluvia	0-100	5	
1 día ant.	20	0.51	9.69
3 días ant.	40	0.49	8.51
15 días ant.	120	0.35	8.91
30 días ant.	200	0.32	10.4
60 días ant.	400	0.29	8.0
90 días ant.	600	0.23	31.6

Curvas 90 días, unificando todas las curvas de la Región Andina con el fin de encontrar valores críticos de lluvia en cada variable antecedente. Estos umbrales críticos se encontraron a partir de la observación en conjunto de las probabilidades condicionadas de ocurrencia (aumento en la pendiente de la curva), las probabilidades de excedencia de la lluvia (en torno al 10%) y la concentración de los registros de deslizamientos en ciertos rangos de lluvia (en torno al 60%). Además, estos resultados permitieron confirmar lo dicho anteriormente respecto a la importancia de la lluvia antecedente en la Región Andina, esto porque las magnitudes de las probabilidades condicionadas de deslizamientos indicaron que la influencia de la lluvia acumulada antecedente es mayor a corto y mediano plazo, y se reduce en la medida que aumentan los días antecedentes. Adicionalmente, el análisis indicó que la lluvia de 3 meses antecedentes no tuvo el mismo patrón que las variables de hasta 2 meses, dificultando la definición del valor crítico, señalando que sólo hasta 2 meses atrás la lluvia estaría influenciando en la ocurrencia de deslizamientos.

Por último, se recomienda para trabajos futuros aplicar las metodologías mencionadas anteriormente en cada estación o zona específica delimitando el área de estudio con similitudes

en el comportamiento de la lluvia. Esto con el fin de reducir la incerteza en el análisis asociada a la localización de los eventos de deslizamientos, al subregistro de inventarios en algunas regiones alterando el balance en los análisis y a la malla de estaciones meteorológicas. Así mismo, se recomienda incluir en trabajos futuros otros factores condicionantes que influyen también en la ocurrencia de deslizamientos en la Región.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados se concluye que, en la región Andina, las lluvias antecedentes tienen mayor relevancia que la intensidad diaria en la ocurrencia de deslizamientos, debido a los perfiles profundos característicos de los suelos tropicales. Específicamente las variables de lluvias antecedentes de mayor importancia son las de corto y mediano plazo (los primeros días y hasta 2 semanas atrás), seguida de la lluvia antecedente mensual (entre 30 y 40 días). Así mismo, es necesario comparar esta tendencia general obtenida para toda la Región Andina, aplicando estas metodologías a zonas específicas de la Región, delimitando el área de estudio y ampliando el alcance del análisis incluyendo otros factores condicionantes de deslizamientos.

También se propusieron valores críticos de lluvias antecedentes iguales a 20 mm, 40mm, 120mm, 200mm, 400mm y 600mm, para las variables antecedentes de 1, 3, 15, 30, 60 y 90 días respectivamente. Finalmente, si bien es cierto que existen otras metodologías más robustas en la definición de umbrales, la simplicidad de la metodología presentada en este análisis ofrece utilidad para las zonas donde aún no se han implementado sistemas de alerta. Estos valores críticos proporcionan un criterio práctico que en momentos de amenaza pueden dar directrices en la decisión de activación de alarmas y acciones por parte de la comunidad. Adicionalmente, estos resultados sirven de base para la selección de variables predictoras de lluvia especialmente en el uso de modelos estadísticos, así como de otros métodos para definición de umbrales más robustos y para diferentes estudios de amenaza.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del grupo GII de la Universidad de Antioquia, así como del Grupo GEOHAZARD de la Universidad Nacional-Sede Medellín, por el apoyo en la investigación. Asimismo, este trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (MINCIENCIAS)

a través del proyecto " Diseño e Implementación de un Sistema de Alerta Temprana por Fenómenos Hidrometeorológicos extremos utilizando Métodos de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para la Gestión del Riesgo y Ordenación Sostenible del territorio Colombiano en los Andes y la Guajira " [Cto. ICETEX 2022-0772 código 1118-890-82246].

REFERENCIAS

- Aristizábal, E., Gamboa, M. F. y Leoz, F. J. 2010. Sistema De Alerta Temprana Por Movimientos En Masa Inducidos Por Lluvia Para El Valle De Aburrá, Colombia. *Revista EIA* (13): 155 -169.
- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J.D, Vélez, J.I., Martínez, H. y Guerra, A. 2011. Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA* (15): 95-111.
- Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I. y Dick, O. 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards* (59): 1413–1444.
- Bui, D.T., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B. y Revhaug, I. 2016. Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides* (13): 361-378.
- Calvellido, M., Neiva d'Orsi, R., Piciullo, L., Paes, N, Magalhaes, M. y Alvarenga Lacerda, W. 2015. The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: Analysis of performance for the years 2010–2013. *International Journal of Disaster Risk Reduction* (12): 3-15.
- Correa, O., García, F., Bernal, G., Cardona, O. y Rodriguez, C. 2020. Early warning system for rainfall-triggered landslides based on real-time probabilistic hazard assessment. *Natural Hazards* (100): 345-361.
- Cruden, D. M. y Varnes, D. J. 1996. *Landslide Types and Processes*. Turner, A.K. and Shuster, R.L., Eds. *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report (247) 36-75.
- DANE 2005. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1/sistema-de-consulta-censo-2005>.
- DesInventar 2022. www.desinventar.org.
- Eslava, J. 1993. Climatología y diversidad climática de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de las Ciencias* 18(71): 507-38.
- Gerón, A. 2019. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow.
- Gómez, D., García, E. y Aristizábal, E. 2021. Spatial and temporal patterns of fatal landslides in Colombia. SCG-XIII International Symposium on Landslides, Cartagena-Colombia.
- IDEAM 2004. Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. Bogotá, Colombia.
- IDEAM 2022. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- Kellogg, J. N., Vega, V., Stallings, T. C. y Aiken, C. L. V. 1995. Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity. *Geological Society of America* (295):75-90.
- Kim S. K., Hong W.P. y Kim, Y.M. 1991. Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea. *Landslides*.
- Mann, P. y Corrigan, J. 1990. Model for late Neogene deformation in Panama. *Geology* (18):558–562.
- Mayorga, R. 2003. Determinación De Umbrales De Lluvia Detonante De Deslizamientos En Colombia. *Meteorología Colombiana* (7): 157-168.
- Merghadi, A., Yunus, A., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D.T., Avtar, R. y Abderrahmane, B. 2020. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews* (207). ISSN 0012-8252.
- Mesa-Sánchez, Ó.J. y Rojo-Hernández, J.D. 2020. On the general circulation of the atmosphere around Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 44(172):857-875.
- Molina, E., Cardoso, A. y Nogueira, R. 2015. Relação Precipitação-Deslizamento no Município de São Bernardo do Campo-SP. *Ciência e Natura* 37(1):46-54.
- Moreiras, S. M. 2005. Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslides* (2): 53-59.
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D. y Rhenals, R. L. 2006. La lluvia y los movimientos en masa de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA* (5): 59-69.
- Muller, A. y Guido, S. 2017. *Introduction to Machine Learning with Python*.
- Naidu, S., Sajinkumar, K.S., Oommen, T., Anuja V.J., Samuel, R.A. y Muraleedharan, C. 2018. Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis. *Geoscience Frontiers* 9(6): 1871-1882.
- Pabon, J.D., Eslava, J. y Gomez, R., 2001. Climatic large –scale characteristics of the tropical Americas. *Meteorología Colombiana* (4): 39-46.
- Poveda, G., y Mesa, O. J. 2000. On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical research letters*, 27(11), 1675-1678.
- Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O. J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R.I. y Quevedo, D.I. 2007. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(1): 4-13.
- Poveda, G., Waylen, P. R. y Pulwarty, R. S. 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234(1):3-27.
- Puertas, O. y Carvajal, Y. 2008. Incidencia de El Niño -Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, Utilizando el Climate Explorer. *Ingeniería & Desarrollo* (23):104-118.

- Raja, N.B., Çiçek, I., Türkoğlu, N., Aydın, O. y Kawasaki, A. 2017. Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model. *Natural Hazards* (85): 1323–1346.
- Ramachandran, K. M., y Tsokos, C. P. 2020. *Mathematical statistics with applications in R*. Academic Press.
- Salazar, J. F., Villegas, J. C., Rendón, A. M. y Rodríguez, E. 2018. Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a “forest reservoir”. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(3), 1735-1748.
- Sepúlveda, S. A., y Padilla, C. 2008. Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Natural Hazards* 47(2): 201-215.
- Schumann, A.H., 1998. Thiessen polygon. *Encyclopedia of Hydrology and Lakes*. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Dordrecht.
- SIMMA 2022. <http://simma.sgc.gov.co>
- Skipper, S. y Perktold, J. 2010. statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference.
- Soares, F. y Ramos, G. 2014. Correlações entre movimentos de massa e pluviosidade nas encostas de Joao Pessoa-PB. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnicas, COBRAMSEG. Goiania-Brasil.
- Suarez, J. 2009. Deslizamientos. ISBN: 978-958-8504-03-2
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H. y Clara Rivera, J.O. 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics* 19(5): 787-813.
- Tatizana, C., Ogura, A.T., Cerri, L. E. DA S. y Rocha, M.C.M. 1987a. Análise da correlação entre chuvas e escorregamentos aplicados às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. Anais, São Paulo: ABGE. 2, 225-236.
- Tatizana, C., Ogura, A. T., Cerri, L. E. DA S. y Rocha, M. C. M. 1987b. Modelamento numérico de análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. Anais, São Paulo: ABGE. V.2, p.237-248.
- Terlien, M.T.J. 1996. Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides: the integration of hydrologic models, slope stability models and geographic information systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, The Netherlands (32).
- Trenkamp, R., Kellogg, J. N. y Freymueller, J. T. 2002. Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Science* (15): 157-171.
- Valencia, S., Marín, D., Salazar, J., Villegas, J. y Gómez, D. 2021. Evaluación espacio-temporal de las estimaciones remotas de precipitación a lo largo de gradientes topográficos y climáticos en la Amazonía y Orinoquía Colombiana. XXIV Seminario Nacional De Hidráulica E Hidrología.
- Vega, J. y Hidalgo, C. 2016. Quantitative risk assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings. *Geomorphology* (273): 217–235.
- Weng, W., Luedeke, M. K., Zemp, D. C. y Lakes, T. 2018. Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 911-927.
- Zhao, B., Dai, Q., Zhuo L., Zhu S., Shen, Q. y Han, D. 2021. Assessing the potential of different satellite soil moisture products in landslide hazard assessment. *Remote Sensing of Environment* Volume 264: 112583.