

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/369552890>

Antecedent rainfall influence on landslides in the Colombian Andes

Article · March 2023

CITATIONS

0

READS

124

3 authors:



Derly Gómez

University of Antioquia

11 PUBLICATIONS 29 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Edier Aristizábal

Universität Potsdam

86 PUBLICATIONS 673 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Edwin García

University of Antioquia

76 PUBLICATIONS 485 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Advances in embedded wall design: theories and algorithms on reliability [View project](#)



Rainfall-induced landslide hazard assessment in the tropical and mountainous terrains of the Colombian Andes [View project](#)

1 **Influencia de la lluvia antecedente en los deslizamientos en los Andes Colombianos**2 Derly GOMEZ^a, Edier ARISTIZABAL^b, Edwin F. GARCIA^c3 ^aGrupo de Investigación en Infraestructura (GII), Escuela ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de
4 Antioquia, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia. derly.gomezg@udea.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-1778-5743>.6 ^bUniversidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Carrera 80
7 No 65-223, Medellín - Colombia. evaristizabal@unal.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-2648-2197>.8 ^cGrupo de Investigación en Infraestructura (GII), Escuela ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de
9 Antioquia, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia. edwin.garcia@udea.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-4837-8518>.

11

12 **RESUMEN**

13 Debido a sus condiciones geográficas e hidrometeorológicas, Colombia tiene una larga
14 historia de desastres por remociones en masa. Según Gómez et al. 2021, la mayoría de las
15 remociones han sido detonados por lluvias y han causado 34248 muertes en un periodo de
16 120 años (1900-2019). Esto hace necesario el estudio de la principal causa de la falla en la
17 ladera, la cual está altamente relacionada con la presencia de agua en el suelo. Para esto,
18 debido a la relación directa de la humedad en el suelo con las condiciones meteorológicas y
19 a la mayor disponibilidad de datos de precipitación, ha sido ampliamente utilizada en la
20 literatura la lluvia antecedente acumulada como aproximación indirecta de la humedad. La
21 utilización de este criterio de lluvia antecedente requiere fundamentar la selección de dichas
22 variables para cualquier análisis en las que se requieran. Por lo anterior, en este documento,
23 se presenta un análisis de la relación entre las lluvias antecedentes de hasta 90 días con los
24 deslizamientos en la Región Andina Colombiana por medio de la determinación de
25 probabilidades de ocurrencia de remociones de tipo deslizamientos para dichas lluvias y de
26 los coeficientes de la regresión logística. Los resultados señalaron las lluvias antecedentes de
27 corto y mediano plazo (los primeros días y hasta 2 semanas atrás), seguida de la lluvia
28 antecedente mensual (entre 30 y 40 días), como las de mayor influencia en los deslizamientos.
29 Igualmente, se obtuvieron valores críticos de dichas variables antecedentes, los cuales son

30 de utilidad para definición de alertas y además sirven de base para los estudios de
31 susceptibilidad, amenaza y ordenamiento territorial.

32

33 **ABSTRACT**

34 **Antecedent rainfall influence on landslides in the Colombian Andes**

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

51

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

54

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

57

58 INTRODUCCION

59

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

74 Por otro lado, como es bien conocido, para estudiar el cambio en el tiempo de la humedad en
75 el suelo para análisis de amenaza por remociones en masa, se ha utilizado ampliamente en
76 la literatura la lluvia acumulada antecedente. Esto porque pese a que la lluvia acumulada
77 antecedente no es el único factor que controla la humedad en el suelo, es una variable que
78 se relaciona directamente con las condiciones meteorológicas. Además, es una variable con
79 mayor disponibilidad en comparación con los datos directamente de humedad (Zhao et al.
80 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

108 de otros métodos para definición de umbrales más robustos y para diferentes estudios de
109 amenaza.

110

111 DATOS Y AREA DE ESTUDIO

112

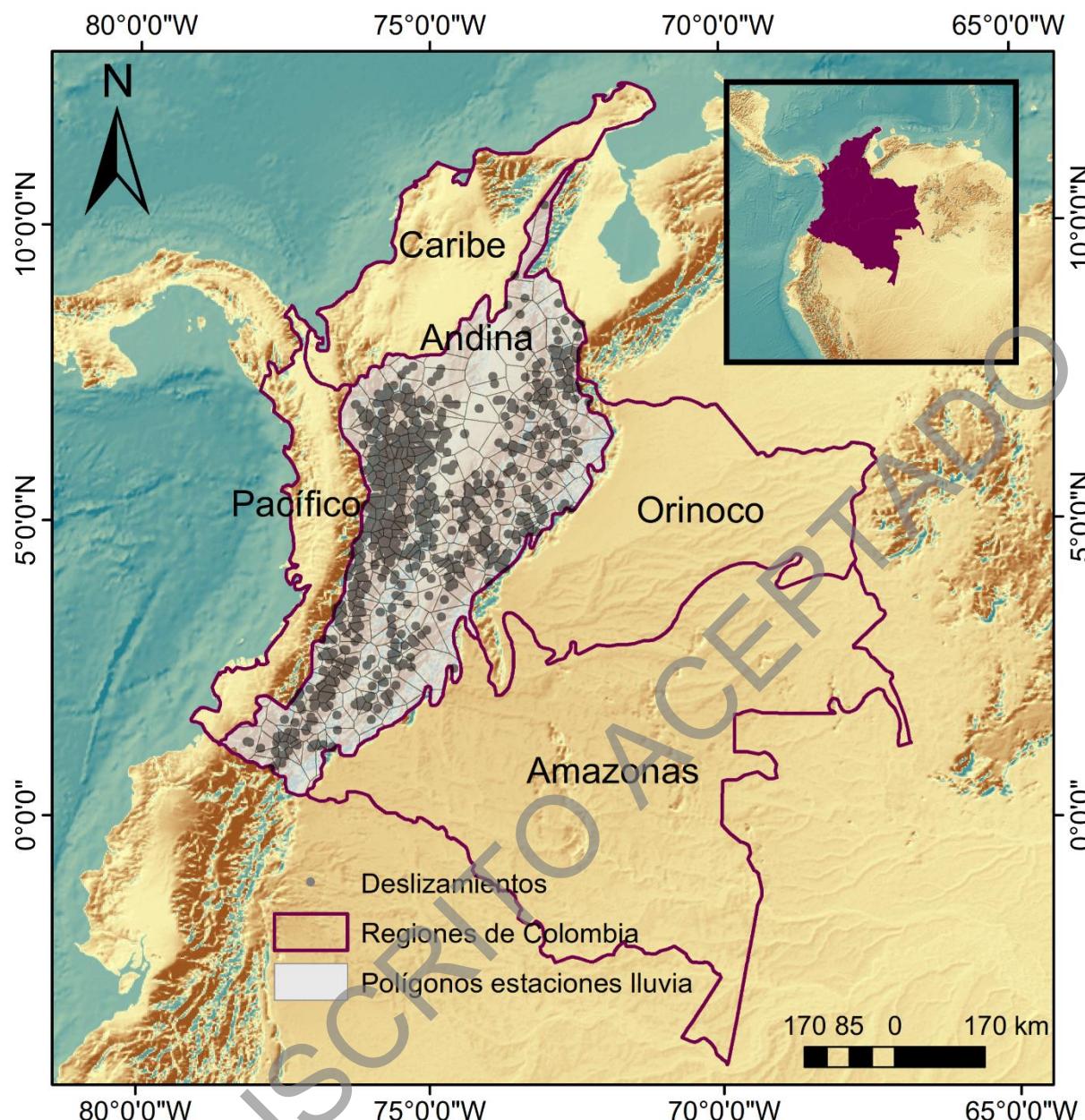
113 Área de estudio

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

123 La ubicación ecuatorial de Colombia permite una alta radiación solar y disponibilidad de agua
124 durante todo el año, lo que resulta en la formación de perfiles de suelo gruesos.

125 El complejo entorno geográfico e hidroclimatológico mencionado anteriormente ha dado lugar
126 a un país muy diverso que se divide en cinco regiones naturales, como se muestra en la Figura
127 1, las regiones Andina, Caribe, Pacífica, Orinoquía y Amazónica (DANE 2005). Finalmente,
128 este trabajo se centra en la región Andina, la cual tiene una superficie de 282540 km² que
129 constituye el 33% de la superficie del país. Es la región más poblada de Colombia albergando
130 aproximadamente el 65% de la población total del país, con una población de 34 millones de
131 personas y una densidad media de 110 habitantes/km² (DANE 2005, IDEAM 2004).

132



133
134 **Figura 1.** Mapa de la localización de la zona de estudio. Así como la distribución de los deslizamientos y los
135 polígonos de Voronoi relacionados con las estaciones de lluvia diaria del IDEAM.

136
137 **Inventario de deslizamientos**
138 Se consolidó un inventario regional de 3536 movimientos en masa detonados por lluvias, de
139 tipo deslizamiento según la clasificación propuesta por Cruden y Varnes 1996, para el periodo
140 de 1981 a 2019 (Figura 1). Este inventario es principalmente proveniente del Sistema de
141 Información de Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano-SGC (SIMMA
142 2022); y del Inventario de Desastres de la Red de Estudios Sociales en Prevención de

143 Desastres en América Latina-LA RED (DesInventar 2022). El inventario de deslizamientos
144 consolidado fue filtrado seleccionando únicamente aquellos cuyo factor detonante registrado
145 en las bases de datos fue la lluvia. Adicionalmente, de acuerdo a las unidades litológicas
146 definidas por el Servicio Geológico Colombiano, del inventario de deslizamientos
147 aproximadamente el 50% de los eventos fueron reportados en material de tipo sedimentario
148 como materiales de flujo volcánico, arcillas, limos, areniscas, conglomerados, calizas, entre
149 otras. Un 20% del inventario en material de tipo rocas graníticas como granodioritas, dioritas
150 de cuarzo, granitos entre otras. Y el restante en material de tipo basaltos, andesitas,
151 anfibolitas, depósitos coluviales y aluviales. Finalmente, se resalta en el inventario que
152 aproximadamente el 55% de los registros se presentaron en el Departamento de Antioquia
153 como se observa en la Figura 1; mientras que en otros departamentos el número es menor
154 probablemente por subregistro de estos eventos.

155

156 **Datos de precipitación**

157 Para este estudio, se utilizaron mediciones de lluvia de 396 estaciones en escala diaria para
158 el periodo 1981 - 2019 (Figura 1) monitoreadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y
159 Estudios Ambientales (IDEAM 2022). En relación al tipo de precipitación en el país, en
160 promedio, el 70% del territorio colombiano está expuesto a 2.000 mm de lluvia al año, con
161 contrastes extremos en la costa del Pacífico, donde las precipitaciones anuales pueden
162 superar los 8.000 mm/año debido al flujo atmosférico de humedad del Chorro de bajo nivel
163 del Chocó y los ambientes desérticos en el norte del país (Eslava 1993, Poveda et al. 2006,
164 Poveda y Mesa 2000). El desplazamiento de la zona de convergencia intertropical ZCIT
165 controla fuertemente el ciclo anual de la hidroclimatología colombiana. La precipitación se
166 caracteriza por dos regímenes: bimodal en la zona andina, cuyos trimestres lluviosos son
167 marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre, y unimodal en la parte oriental de
168 Colombia (Puertas y Carvajal 2008). La variabilidad interanual de las lluvias está controlada
169 principalmente por los efectos de las dos fases de El Niño/Oscilación del Sur, El Niño (fase

170 cálida) y La Niña (fase fría) (Poveda et al. 2007; Pabón et al. 2001). Adicionalmente, cabe
171 mencionar la importancia de los bosques del Amazonas ya que por medio de flujos
172 atmosféricos de humedad alimentan especialmente las zonas medias y altas de la cuenca del
173 Río Magdalena en Colombia (Salazar et al. 2018; Weng et al. 2018; Mesa y Rojas 2020).

174

175 MARCO METODOLÓGICO

176

177 Con el objetivo de analizar las variables antecedentes y su relación con los deslizamientos;
178 se comenzó por asociar a cada evento de deslizamiento la serie de lluvia por medio del
179 método de interpolación de los Polígonos de Voronoi o Thiessen (Figura 1). Estos polígonos
180 se forman por medio de la unión de las bisectrices perpendiculares de las líneas que unen las
181 estaciones más cercanas y permite estimar la precipitación media de una región o en este
182 caso de los deslizamientos, a partir de la asignación de pesos a la red de estaciones por sus
183 áreas relativas (Schumann 1998).

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

191

192 Curvas 90 días

193 *Construcción de las Curvas 90 días:*

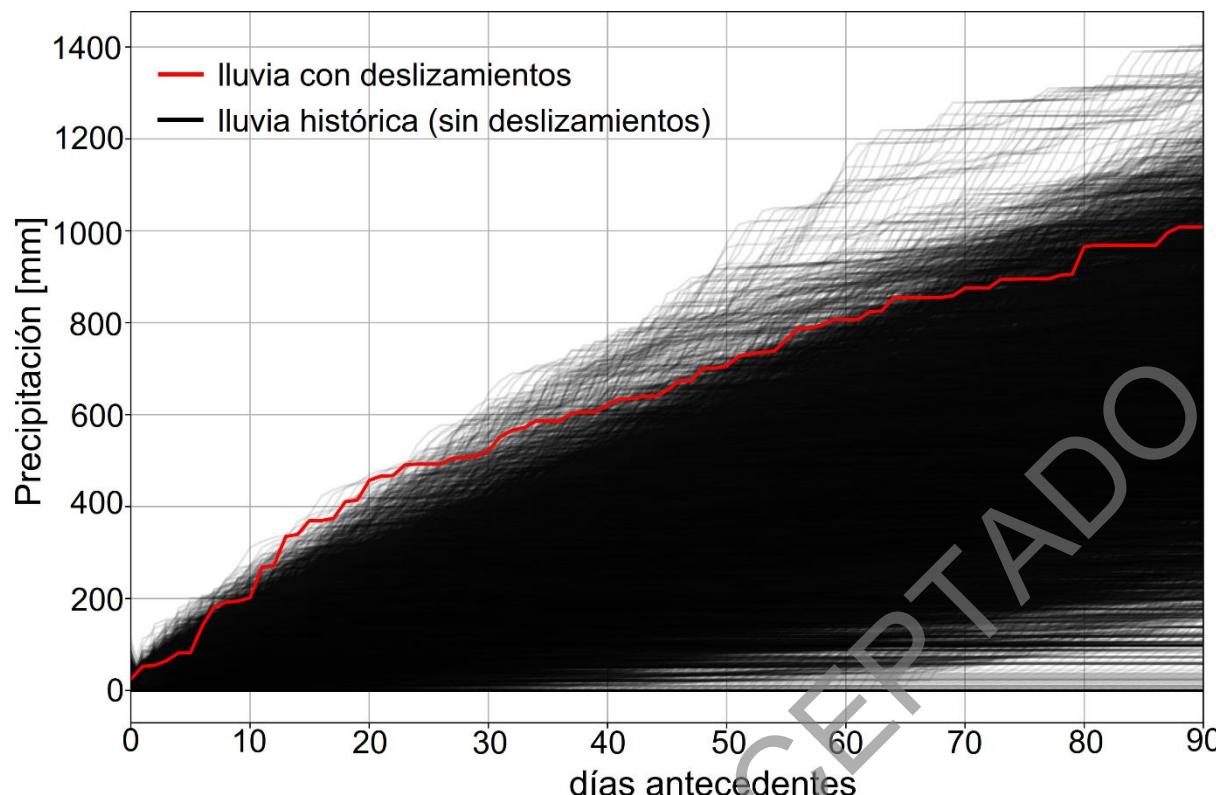
194 Las Curvas 90 días comparan la cantidad de lluvia diaria y lluvia acumulada antecedente hasta
195 90 días atrás en cada estación. Estas curvas fueron generadas para todo el periodo de análisis
196 entre 30/04/1981 y 31/12/2019. A continuación, se listan los pasos para la elaboración de las
197 Curvas 90 días y será seleccionada para el ejemplo la estación número 24025050 ubicada en
198 Santander, donde se reportó un deslizamiento el 8 de mayo de 2013 (Figura 2):
199



200
201 **Figura 2.** Mapa de Colombia con los polígonos de Voronoi definidos según las estaciones de lluvia del IDEAM. Se
202 resalta la estación 24025050 del municipio de Charalá, Santander, donde se asocia un deslizamiento reportado en
203 mayo de 2013, durante todo el periodo de análisis 1981-2019.

204

- 205 1. Para explicar este paso, será seleccionado el primer día del periodo: 30/04/1981. En la
206 primera posición del eje de las abscisas ($x=0$; ver Figura 3) será graficada la cantidad de
207 lluvia reportada ese día. La lluvia del día antes (29/04/1981) será graficada en la segunda
208 posición de las abscisas ($x=1$), la lluvia acumulada de dos días antes (29/04/1981 y
209 28/04/1981) se grafica en la tercera posición ($x=2$), hasta que finalmente la lluvia
210 acumulada de los 90 días anteriores al 30/04/1981 será graficada en $x=90$. Este
211 procedimiento da como resultado una de las curvas mostradas en la Figura 3.
- 212
- 213 2. El procedimiento anterior comienza el 30/04/2019 y se repite hasta el 31/12/2019. Es
214 decir, el total de curvas negras de la Figura 3, corresponden a las 14124 series de lluvia
215 antecedente correspondientes a cada día analizado en esa estación durante el periodo.
216 Por otro lado, algunas de esas 14124 series de lluvia se resaltan en rojo ya que
217 corresponden a aquellas en las cuales se reportaron deslizamientos. Para el caso
218 particular de la estación 24025050 de Charalá, Santander, sólo se reportó un
219 deslizamiento y por tanto sólo hay una línea roja, pero en caso de haber tenido más
220 deslizamientos registrados como fue sucedió en estaciones, habría tantas líneas rojas
221 como deslizamientos en la Figura 3.
- 222
- 223 3. Las Curvas 90 días se construyen para cada estación de la zona de estudio. En el caso
224 de la región Andina, son en total 396 estaciones y, por lo tanto, habrá 396 gráficos
225 similares al mostrado en la Figura 3.



226

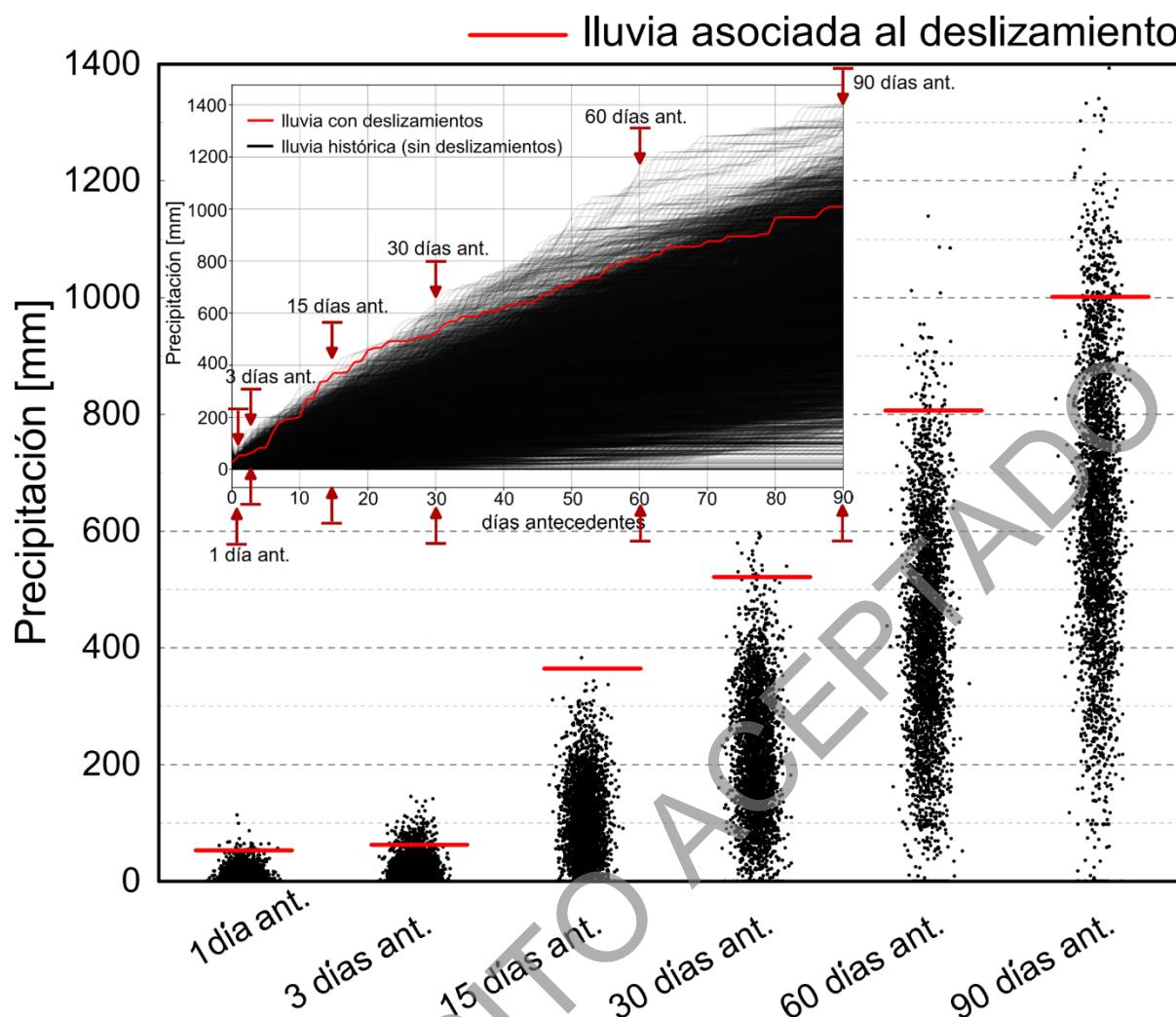
227 **Figura 3.** Curvas de 90 días antecedentes para la estación del IDEAM 24025050 de Charalá, Santander,
228 construidas para el periodo 1981-2019. Se resalta en color rojo la línea de lluvias antecedentes asociadas al
229 deslizamiento reportado en mayo de 2013.

230

231 **Selección de variables antecedentes de lluvia:**

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

240



241
242 **Figura 4.** Curvas de 90 días antecedentes para la estación del IDEAM 24025050 de Charalá, Santander,
243 construidas para el periodo 1981-2019. Se resalta con flechas rojas, las series de lluvia seleccionadas
244 correspondientes a los días de análisis de interés: lluvia diaria, 3, 15, 30, 60 y 90 días acumulados antecedentes.

245
246 **Relación entre lluvias asociadas con deslizamientos respecto al histórico del periodo:**
247 Para conocer la importancia de las lluvias asociadas a los deslizamientos se comparó su valor
248 con lo que históricamente se observó en su respectiva estación, este porcentaje fue
249 denominado “significancia de la lluvia detonante de deslizamientos” y se determina por medio
250 de la Ecuación 1.

251
252
$$\text{Significancia de la lluvia detonante de deslizamientos} = \frac{\sum \text{curvas (puntos) debajo de la línea roja}}{\text{Número total de curvas observadas en la serie}} * 100\% \quad [1]$$

254 **Probabilidad de excedencia de un determinado valor de lluvia:**

255

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

258

259
$$P(X) = \frac{\sum \text{registros de lluvia iguales y superiores al valor } X \text{ de lluvia}}{\text{Número total de registros de lluvia}} * 100\% [2]$$

260

261 **Probabilidades condicionadas de ocurrencia de deslizamientos:**

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

266

267
$$P(D|X) = \frac{\sum \text{registros de lluvia asociados a deslizamiento iguales y superiores al valor } X \text{ de lluvia}}{\text{Número total de registros de lluvia iguales y superiores al valor } X \text{ de lluvia}} * 100\% [3]$$

268

269 **Análisis de los coeficientes en el modelo de regresión logística**

270 Se utilizó el modelo de regresión logística altamente usado en la literatura para relaciones con
271 deslizamientos (Bui et al. 2011, Bui et al. 2016, Muller y Guido 2017, Raja et al. 2017, Géron
272 2019, Merghadi et al. 2020). El modelo de regresión logística es un tipo de modelo linear
273 generalizado (Ecuación 4) y en el cual, mediante la significancia de los coeficientes, puede
274 conocerse la importancia de las variables predictoras por medio del valor de su coeficiente
275 (Raja et al. 2017, Merghadi et al. 2020). La regresión logística asocia la probabilidad de
276 aciertos (en este caso la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos) con una función *Logit*
277 basados en relación con las variables predictoras (Ecuación 5), que, en este caso particular,

278 los aciertos son ocurrencias de deslizamientos y los predictores, las variables de lluvia diaria
279 detonante y antecedentes (coeficientes a_n de la Ecuación 4) (Raja et al. 2017, Merghadi et al.
280 2020).

281

282 $\text{Logit} = \ln\left(\frac{P}{1 - P}\right) = Z = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n$ [4]

283 $P = \frac{1}{1 + e^{-Z}} = \frac{e^Z}{1 + e^Z}$ [5]

284
285 Finalmente, debido a que en este trabajo se utilizó el modelo de regresión logística con
286 enfoque en el análisis de los predictores y no propiamente en la predicción, se seleccionó la
287 librería *StatsModels* desarrollada en *Python* por Skipper y Perktold 2010. La cual permite
288 conocer la significancia de los predictores al proveer información de los coeficientes de
289 regresión, el valor Z y sus respectivos valores-P. Cabe mencionar, que el valor-P corresponde
290 a una medida estadística utilizada para validar o rechazar la hipótesis nula propuesta, en este
291 caso que el coeficiente de las variables es igual a cero. Un valor-P igual o menor a 0,05
292 permite rechazar la hipótesis nula y aceptar que el valor del coeficiente obtenido es
293 estadísticamente significativo (Ramachandran y Tsokos 2020).

294

295

296 RESULTADOS

297

298 Curvas 90 días

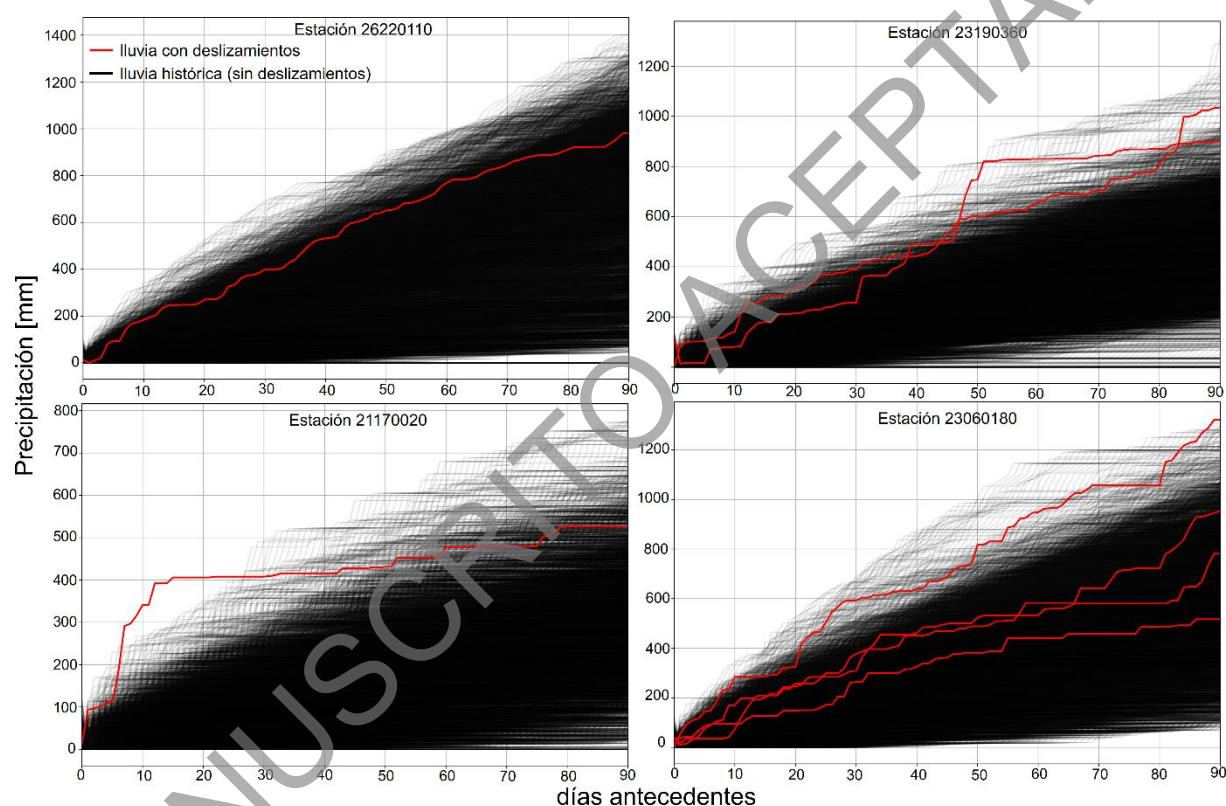
299

300 Análisis de la lluvia antecedente asociada a los deslizamientos:

301 A partir de la revisión de las Curvas 90 días de todas las 396 estaciones y la relación entre las
302 lluvias y los deslizamientos, se observaron particularidades en el comportamiento en cada

303 estación. Por ejemplo, la lluvia acumulada de 15 días antecedentes asociada a algún
304 deslizamiento fue la máxima reportada, pero a su vez, esta serie no presentó altos valores de
305 lluvias antecedentes acumulando más de un mes, como lo es el caso de la estación 21170020
306 mostrada en la Figura 5. Lo que puede deberse a la variabilidad de la lluvia y la diferencia de
307 gradientes climáticos presentes en la zona andina (Valencia et al. 2021). Así mismo, se
308 encontraron eventos de lluvia asociada con deslizamientos que no fueron significativos
309 respecto al histórico reportado en el periodo.

310



311

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

313

314 Por otro lado, se encontraron similitudes en varias de las estaciones, como lo fueron los
315 reportes de deslizamiento en días específicos sin lluvia, pero con registro de lluvias altas de
316 hasta 3 meses atrás (Figura 5). Específicamente, aproximadamente el 10% de los eventos se
317 registraron en días sin lluvia; el 36% ocurrieron en días de hasta 10 [mm] y el 54% en días
318 con lluvia diaria superiores a 10 [mm]. Para interpretar mejor toda esta información en conjunto
319 en la región Andina, y para dar respuesta a qué lluvia antecedente es más importante en la

320 ocurrencia de deslizamientos, fueron escogidas 6 variables específicas abarcando el corto,
321 mediano y largo plazo. Estas fueron: 1 día, 3 días, 15 días, 30 días, 60 días y 90 días
322 antecedentes. Además, el criterio de selección de las variables antecedentes de interés se
323 realizó considerando conclusiones de diferentes autores que mencionan la relación con los
324 deslizamientos y las variables antecedentes de más de un mes en la región (Terlien 1996,
325 Moreno et al. 2006, Suárez 2009, Aristizábal et al. 2010, Aristizábal et al. 2011, Correa et al.
326 2019, Gómez et al. 2021). Con todo, se recomienda para trabajos futuros analizar el
327 comportamiento histórico de las lluvias antecedentes de cada localización en particular.

328

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

330 Con el fin de dar respuesta a las particularidades mencionadas anteriormente en el inicio de
331 la revisión de las *Curvas 90 días* de todas las estaciones, se buscó responder la siguiente
332 pregunta: ¿Fueron significativas las lluvias asociadas a los deslizamientos en relación con el
333 histórico de lluvias registradas en dicha estación?

334 Para esto, a partir de las curvas de las 396 estaciones, se identificó la serie de lluvia
335 correspondiente al deslizamiento (línea en rojo de la Figura 4), y para el valor de lluvia
336 observado en cada día de interés ($x=1$, $x=3$, $x=15$, $x=30$, $x=60$ y $x=90$), se comparó su valor
337 con lo que históricamente se observó en la respectiva estación. Esta comparación se realizó
338 a cada una de las series de lluvia histórica correspondiente a la lluvia diaria y antecedente a
339 corto, mediano y largo plazo (Figura 4) por medio de la Ecuación 1. Por último, estos 6
340 porcentajes para cada día de interés (correspondientes a: $x=1$, $x=3$, $x=15$, $x=30$, $x=60$ y $x=90$)
341 se determinaron para cada deslizamiento; y como se explica en la Figura 3, cada
342 deslizamiento está asociado a una estación de lluvia según su ubicación, la cual tendrá sus
343 propias Curvas 90 días.

344

345 Para visualizar más claramente estos resultados, se ilustran en el mapa de la Figura 6 cada
346 evento de deslizamiento reportado (el cual está relacionado a un evento de lluvia); y
347 representa el porcentaje de eventos de lluvia que superaron en magnitud, en su respectiva

348 estación a lo largo de todo el periodo. En otras palabras, por ejemplo, un punto de alguno de
349 los mapas de la Figura 6 con un valor de 80% quiere decir, que la magnitud del evento de
350 lluvia que ocasionó ese deslizamiento superó el 80% de las lluvias reportadas en todo el
351 periodo. Por lo tanto, estos porcentajes reflejan si la cantidad de lluvia asociada a los
352 deslizamientos, respecto a lo observado históricamente en su estación, fue importante o
353 significativo.

354

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

365

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

372

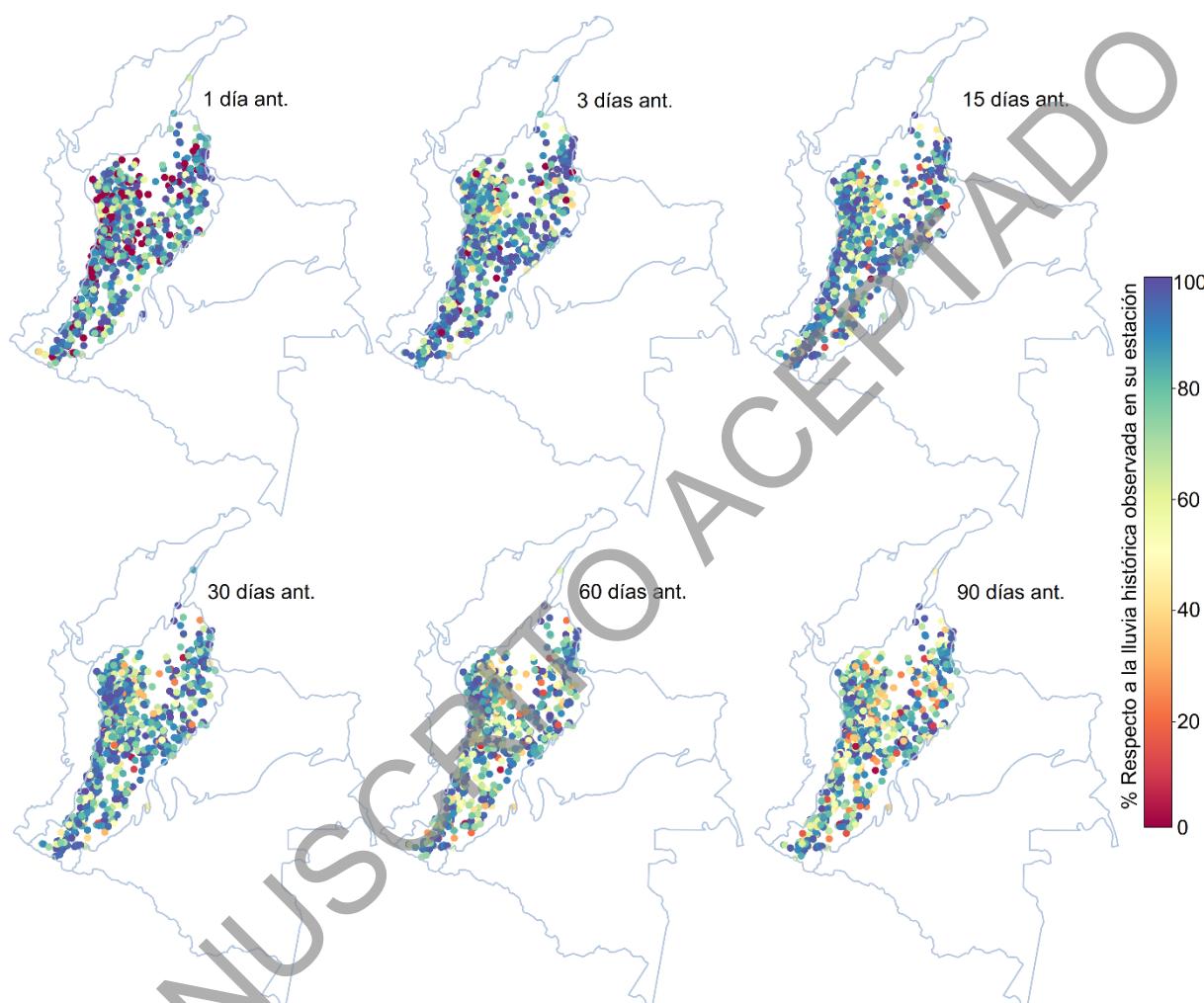
373 **Tabla 1.** Valores medios de lluvias asociadas a los deslizamientos analizada en cada categoría

%	1 día [mm]	3días [mm]	15días [mm]	30días [mm]	60días [mm]	90días [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

374

375



376

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

381

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

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

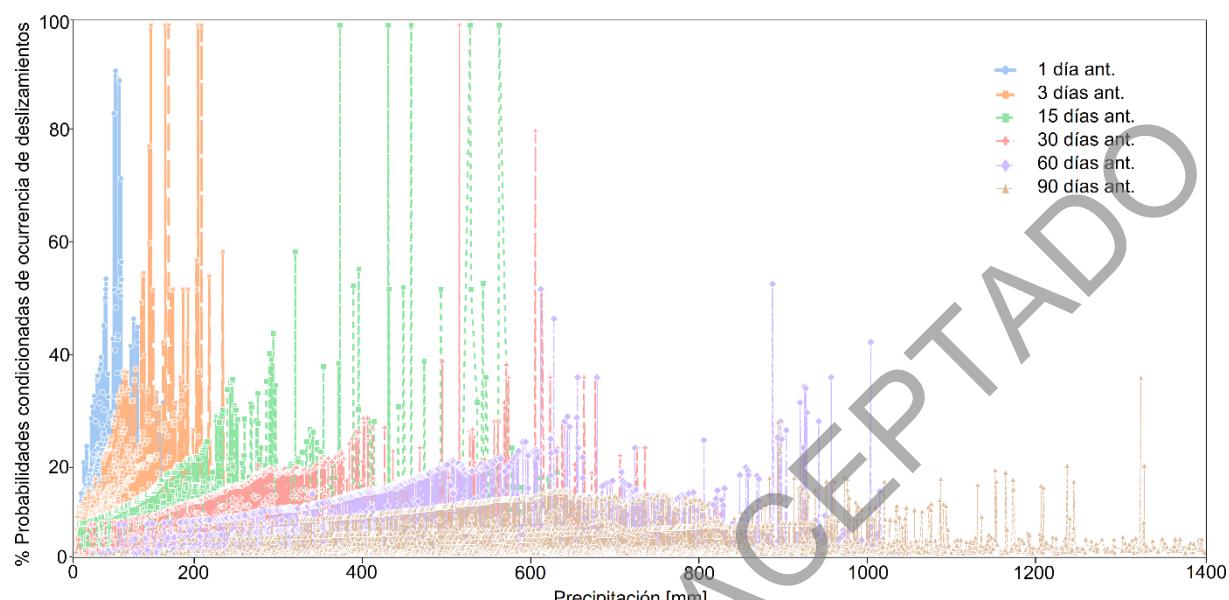
386 Para esto, se asociaron probabilidades a los valores de lluvia que ocasionaron los
387 deslizamientos del inventario, utilizando las *series de lluvia histórica correspondiente a la lluvia*
388 *diaria y antecedente a corto, mediano y largo plazo* (Figura 4) por medio de la Ecuación 3. La
389 cual, determina la probabilidad de ocurrencia condicionada a eventos de lluvia que igualen o
390 superen dichas magnitudes.

391

392 Con el fin de resumir los resultados de todas las probabilidades de ocurrencia asociadas a las
393 lluvias relacionadas con los deslizamientos, estas fueron agrupadas en la Figura 7. Estos
394 resultados indican que las magnitudes de probabilidades son bajas, concentrando
395 aproximadamente el 90% de las lluvias asociadas a los deslizamientos, entre
396 aproximadamente el 0 y el 20% de probabilidad. Esto debido a que en los 38 años de análisis
397 hay más eventos sin deslizamientos asociados; lo que cabe mencionar, puede deberse a que
398 no en todas las regiones se lleva cuenta de estos inventarios. También se observa la
399 tendencia a disminuir la probabilidad de ocurrencia a medida que se aumenta la variable de
400 días antecedentes. Esto confirma las conclusiones preliminares de la revisión de las *Curvas*
401 *90 días*, donde se observaron para ciertas zonas en la región andina lluvias antecedentes de
402 corto plazo altas, pero después del mes estos valores no eran significativos. Esto lleva a dos
403 conclusiones importantes, la primera es que, en la zona Andina, aunque la lluvia antecedente
404 de hasta 90 días atrás puede ser relevante, las que contribuyen con mayor importancia en la
405 ocurrencia de deslizamientos son las variables de corto y mediano plazo. Otra conclusión es
406 la de aplicar esta metodología en diferentes zonas de la región Andina con similitudes en el
407 comportamiento de la lluvia. Cabe mencionar que, a razón de la segunda conclusión, se han
408 venido adelantando diferentes análisis, y resultados preliminares señalan que la importancia
409 de las variables antecedentes difiere entre regiones de la zona Andina. Sin embargo, se

410 conserva el comportamiento encontrado de manera general para toda la zona Andina, esto
411 es, la relevancia va disminuyendo en la medida que se alejan del mes antecedente.

412



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

418

419 **Análisis de los coeficientes en el modelo de regresión logística**

420

421 Para complementar los resultados de la sección inmediatamente anterior, se aplicó otra
422 metodología por medio de un análisis de sensibilidad de los coeficientes de la regresión
423 logística. Esto se realizó entrenando el modelo de regresión logística utilizando únicamente
424 dos variables en cada entrenamiento: la lluvia del día del evento y la variable de lluvia
425 antecedente. En cada entrenamiento se dejó fija la variable de lluvia del día del reporte del
426 deslizamiento y fue cambiando la variable antecedente. Es decir, en el primer modelo se
427 utilizaron las variables: lluvia detonante y lluvia antecedente del día anterior. En el segundo
428 modelo: lluvia detonante y lluvia antecede de 2 días anteriores, y así sucesivamente hasta

429 que el último modelo se entrenó con las variables: lluvia detonante y lluvia acumulada de 90
430 días antecedente. Esto con el fin de conocer la importancia de la variable predictora a través
431 de la significancia del valor-P o el valor del coeficiente producto de la regresión. Para lo cual,
432 fue utilizada la librería *StatsModels* desarrollada en *Python* por Skipper y Perktold 2010, la
433 cual permite visualizar en detalle los resultados de la significancia de los predictores.

434 Para esto, fue necesario construir una base de datos de lluvias para la totalidad del inventario
435 de deslizamientos de la región Andina, por medio de las series de lluvia antecedentes
436 definidas en las *Curvas 90 días* para cada estación que fue asignada a cada deslizamiento
437 por medio de los polígonos de Thiessen (Figura 1). Fueron seleccionadas las variables
438 predictoras de lluvias que ocasionaron deslizamientos (curvas rojas de todas las estaciones)
439 y en la misma proporción, se seleccionaron aleatoriamente series de lluvia que no reportaron
440 deslizamientos (curvas negras).

441

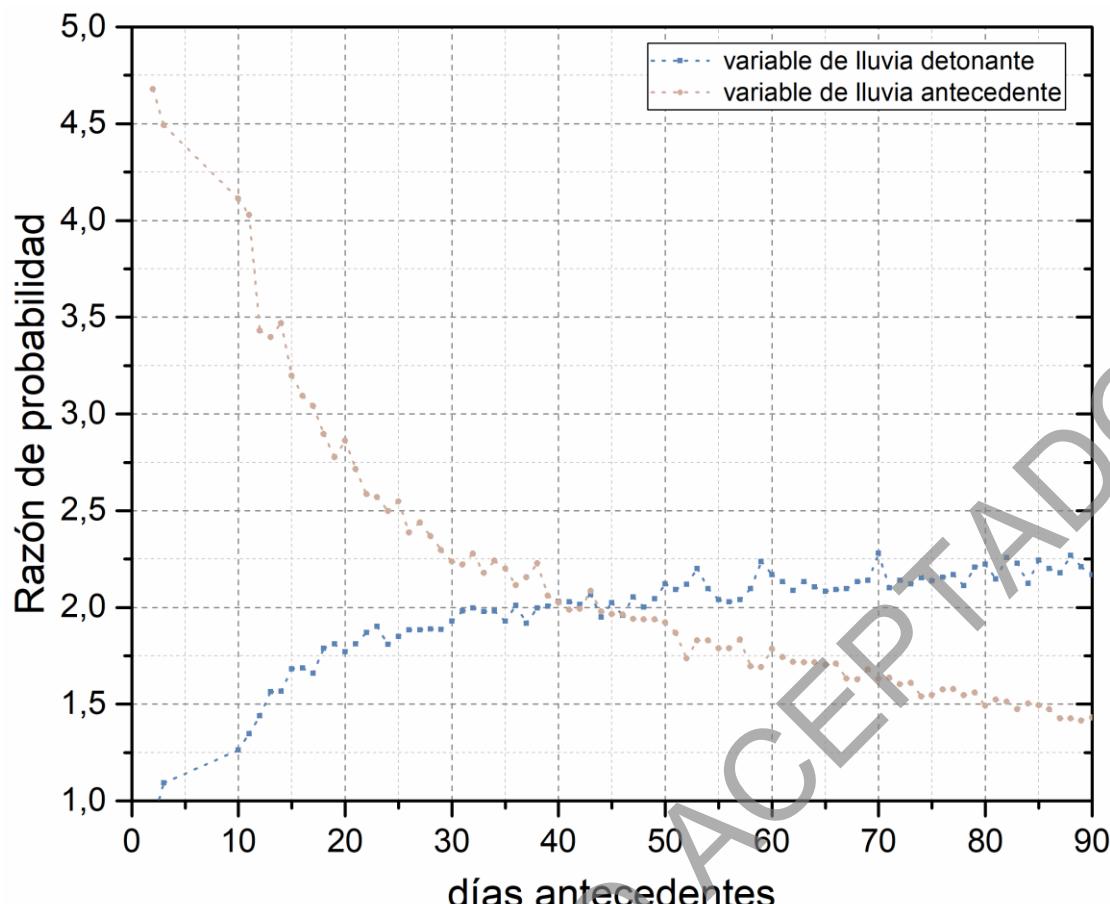
442 En todos los casos, los resultados del valor-P de cada modelo entrenado y cada variable
443 predictora utilizada, fueron significativos (valor-P menor que 0.05). Adicionalmente, aunque
444 no fue el enfoque del presente análisis, cabe mencionar que los modelos de predicción de
445 deslizamientos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

451

452 En la Figura 8 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad de las variables
453 predictoras y su razón de probabilidad. La línea azul ilustra los resultados de la variable
454 detonante (fue utilizada en todos los modelos) y la línea marrón corresponde a las variables

455 predictoras antecedentes que fueron cambiando en cada modelo. Esta figura permite concluir
456 que en primera instancia en todos los casos la razón de probabilidad fue mayor a la unidad,
457 lo que indica que en todos los casos estas variables influyen en el fenómeno natural de interés.
458 Con todo, se puede observar que la importancia de las variables predictoras antecedentes de
459 corto y mediano plazo (hasta aproximadamente 40 días) es mayor que la detonante, y en la
460 medida que los días antecedentes aumentan, la variable detonante tiende a aumentar su
461 importancia mientras que la variable antecedente disminuye. Así mismo, se muestra una
462 diferencia más marcada entre los coeficientes de las primeras dos semanas, indicando que
463 tiene en general más relevancia en la ocurrencia de deslizamientos en la región Andina la
464 lluvia antecedente de corto y mediano plazo (hasta 2 semanas) que la intensidad de la lluvia
465 detonante. También se observó que tienen similar importancia la lluvia detonante y la lluvia
466 antecedente de largo plazo (40 a 50 días). Por último, la lluvia antecedente de 2 a 3 meses
467 influye en menor grado, sin alcanzar a superar la importancia de la lluvia detonante.

468



469

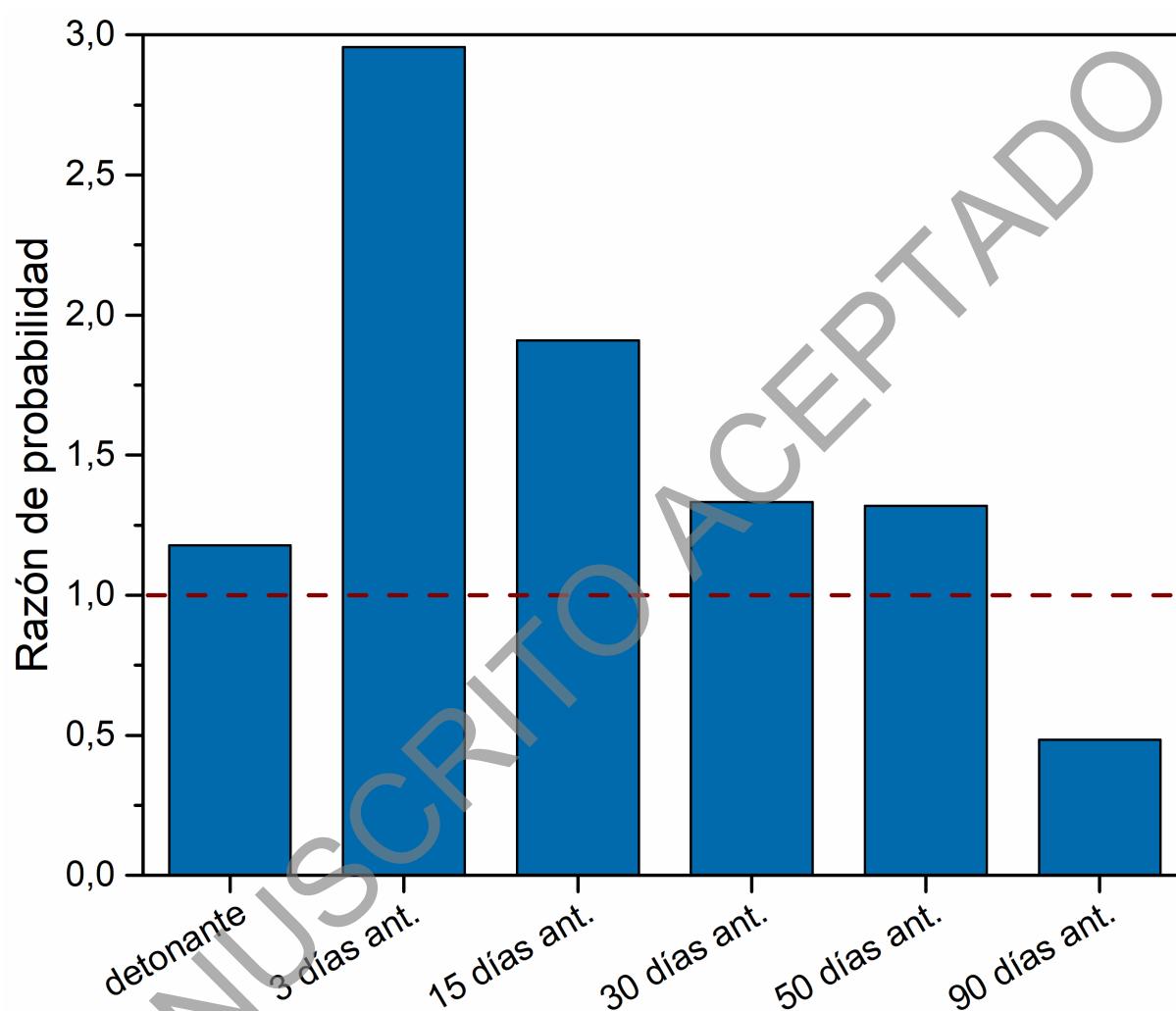
470 **Figura 8.** Resultados del análisis de sensibilidad de los coeficientes del modelo de regresión logística. En esta
471 figura se presentan los resultados de cada uno de los modelos que evaluaron la lluvia diaria detonante y una a una
472 las variables antecedentes de hasta 90 días.

473

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

481 fue menor a la unidad. Finalmente, la variable detonante mostró menor importancia en la
482 ocurrencia del fenómeno en comparación con las variables antecedentes de hasta 50 días,
483 siendo únicamente más relevante que la variable antecedente de 90 días.

484



485
486 Figura 9. Resultados de los coeficientes del modelo de regresión logística evaluando todas las variables de lluvia
487 diaria detonante y antecedentes seleccionadas en el análisis. La línea en trazos se ubica en la unidad del *odd* o la
488 razón de probabilidad, con el fin de diferenciar las variables que aportan información al modelo (razón de
489 probabilidad >1) de las que no, como lo es el caso de la variable antecedente de 90 días.

490

491 Esto confirma la relevancia de la lluvia antecedente de hasta 40 y 50 días y lo también
492 mencionado en las primeras observaciones de las *Curvas 90 días* de todas las estaciones, ya

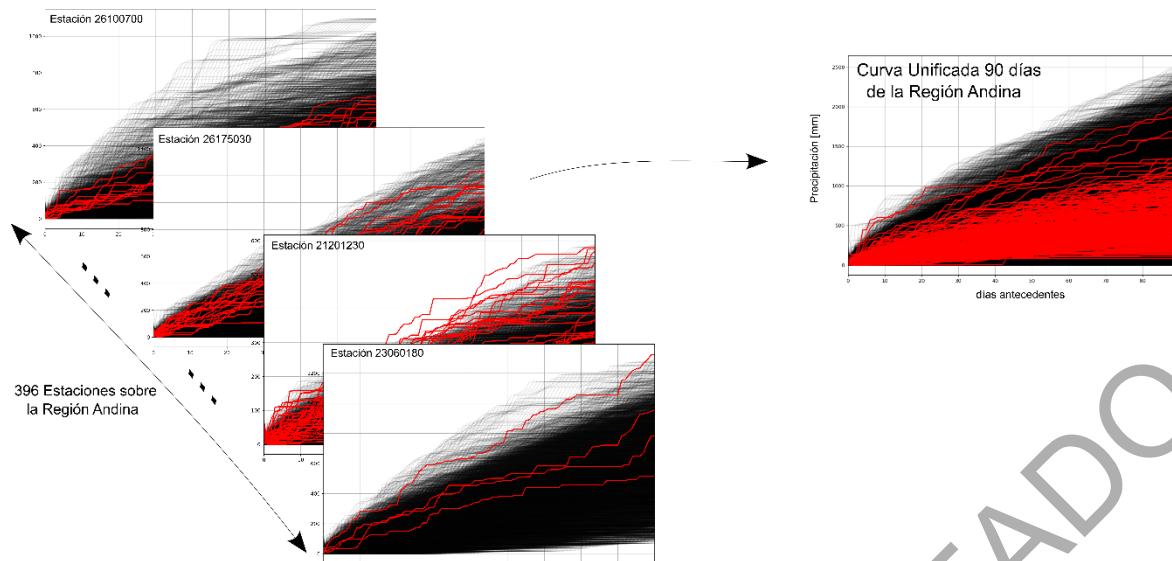
493 que en muchos casos se presentaron deslizamientos sin reportar lluvias significativas
494 específicamente en el día de ocurrencia sino en períodos anteriores (aproximadamente 46%
495 de los reportes en días con lluvias menores a 10 mm).

496

497 ***Definición de umbrales críticos univariados de lluvia antecedente (Curvas 90 días):***

498 Retomando los resultados presentados en la Tabla 1 donde se dio una primera aproximación
499 de valores críticos de lluvia antecedente responsable de deslizamientos, por medio de los
500 valores medios en cada variable. Fue aplicada la misma metodología donde se determinaron
501 las probabilidades condicionadas de ocurrencia de deslizamientos (Ecuación 3), pero en este
502 caso no fueron determinadas únicamente para los valores de lluvia asociados a
503 deslizamientos, ni se determinaron para cada estación independiente. En esta sección, con la
504 intención de determinar probabilidades que puedan ser representativas para toda la región
505 Andina, se reunieron las Curvas 90 días (de las 396 estaciones) en una sola figura llamada
506 *Curva Unificada 90 días de la Región Andina (Figura 10)*; conservando la distinción entre las
507 lluvias que no reportaron deslizamientos (curvas negras) y las asociadas a deslizamientos
508 (curvas rojas). En este análisis las magnitudes de las probabilidades condicionadas
509 disminuyeron en relación con el análisis mostrado en la Figura 7, concentrándose entre 0 y
510 1%. Esto debido a que las curvas negras (lluvias sin deslizamiento en todo el periodo de
511 análisis de todas las estaciones unidas) aumentan en relación con las curvas rojas (lluvias
512 asociadas a los deslizamientos del inventario) como se explica en la Figura 10.
513 Adicionalmente, las probabilidades de ocurrencia se determinaron para diferentes valores de
514 lluvia, de acuerdo con la variable antecedente cada 5 mm como se indica en la Tabla 2.

515



516

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

519

520 **Tabla 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

521

522

523 Así mismo, fue determinada la probabilidad de excedencia de la lluvia (Ecuación 2) y la
524 cantidad de deslizamientos que se presentaron en dichos intervalos, con el fin de encontrar
525 una relación que permitiera en conjunto con las probabilidades de ocurrencia, definir umbrales
526 críticos para cada variable. La Figura 11 presenta los resultados de las probabilidades de
527 ocurrencia dado que se presente o supere cierto valor de lluvia (dadas en la Tabla 2). Así

528 mismo, las probabilidades que dichos valores de lluvia sean excedidos y la cantidad de
529 deslizamientos que han sido registrados para estos valores de lluvia.

530

531 En cuanto al comportamiento de la curva de probabilidades condicionadas de ocurrencia de
532 deslizamientos (Figura 11), los resultados indicaron que estos valores fueron en aumento a
533 medida que la curva de la probabilidad de excedencia disminuía. Luego se estabilizaron en la
534 medida que el reporte de deslizamientos para esos intervalos fue disminuyendo, y finalmente
535 cayeron a cero cuando no se encontraron más registros de deslizamientos. Además, se
536 observó una pendiente mayor en dicha curva de tendencia de las probabilidades cerca del
537 pico de deslizamientos reportados, y adicionalmente se observó este comportamiento cuando
538 la probabilidad de excedencia de dicha lluvia bajaba a un aproximado de 10%. Esto,
539 exceptuando en la variable de 90 días antecedentes, ya que este pico se dio para lluvias con
540 probabilidades de excedencia cerca del 35%.

541

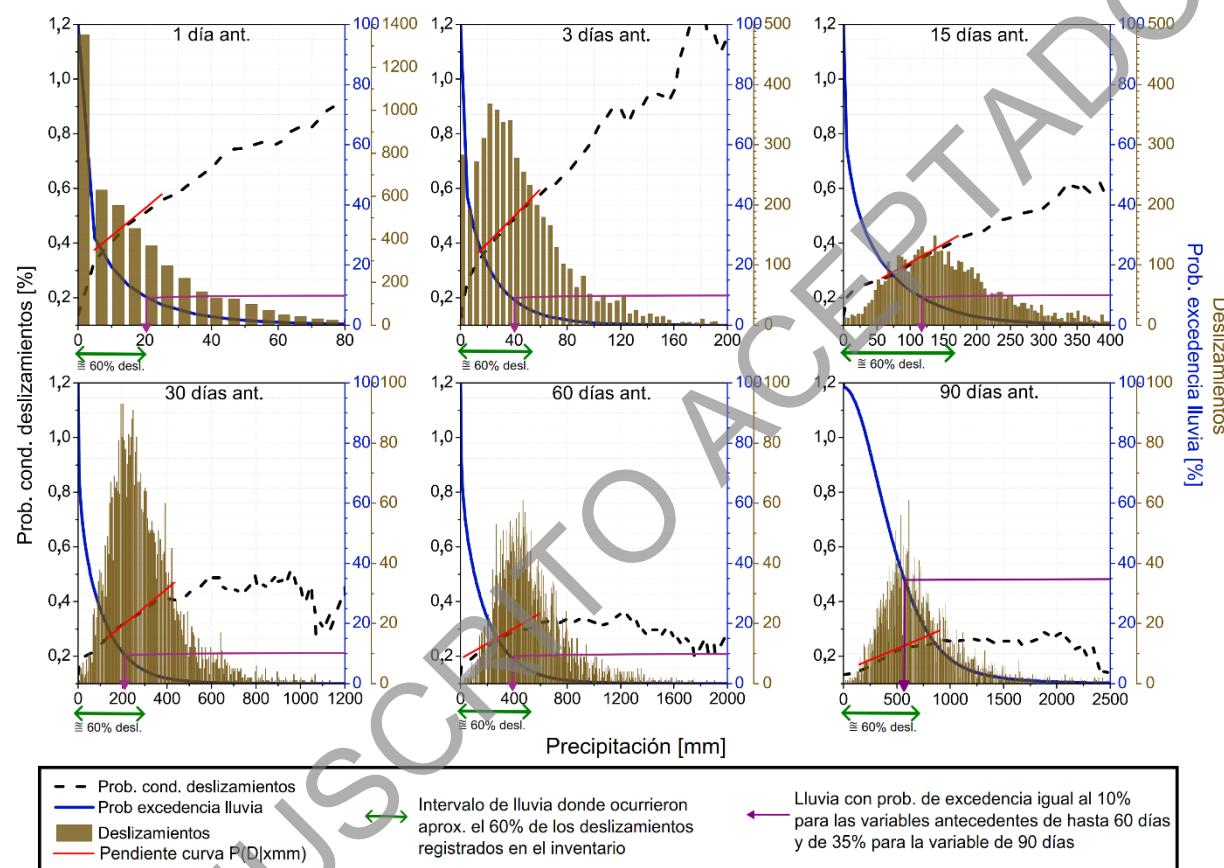
542 Adicionalmente, la variable de lluvia diaria registró aproximadamente el 42% de los
543 deslizamientos con lluvias nulas o inferiores a 5 mm, presentando además una caída en la
544 probabilidad de excedencia entre ese periodo de lluvia (0 a 5 mm) del 100% al
545 aproximadamente 30%. Esto confirma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

548

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

556 crítico determinante de deslizamientos, complementando los resultados de la Tabla 1 y son
 557 mostrados en la Tabla 3. Finalmente, los resultados de la Tabla 3 confirman una vez más que
 558 las variables antecedentes de corto plazo presentan magnitudes de probabilidad mayor y por
 559 tanto mayor influencia en la ocurrencia de deslizamientos, en relación con las variables
 560 antecedentes de largo plazo.

561



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

573 de lluvia en cada variable analizada en la que ocurrieron aproximadamente el 60% de los deslizamientos
574 registrados.

575

576 **Tabla 3.** Valores críticos de lluvias antecedentes en la ocurrencia de deslizamientos. Señalados con las flechas de
577 color púrpura en la Figura 11.

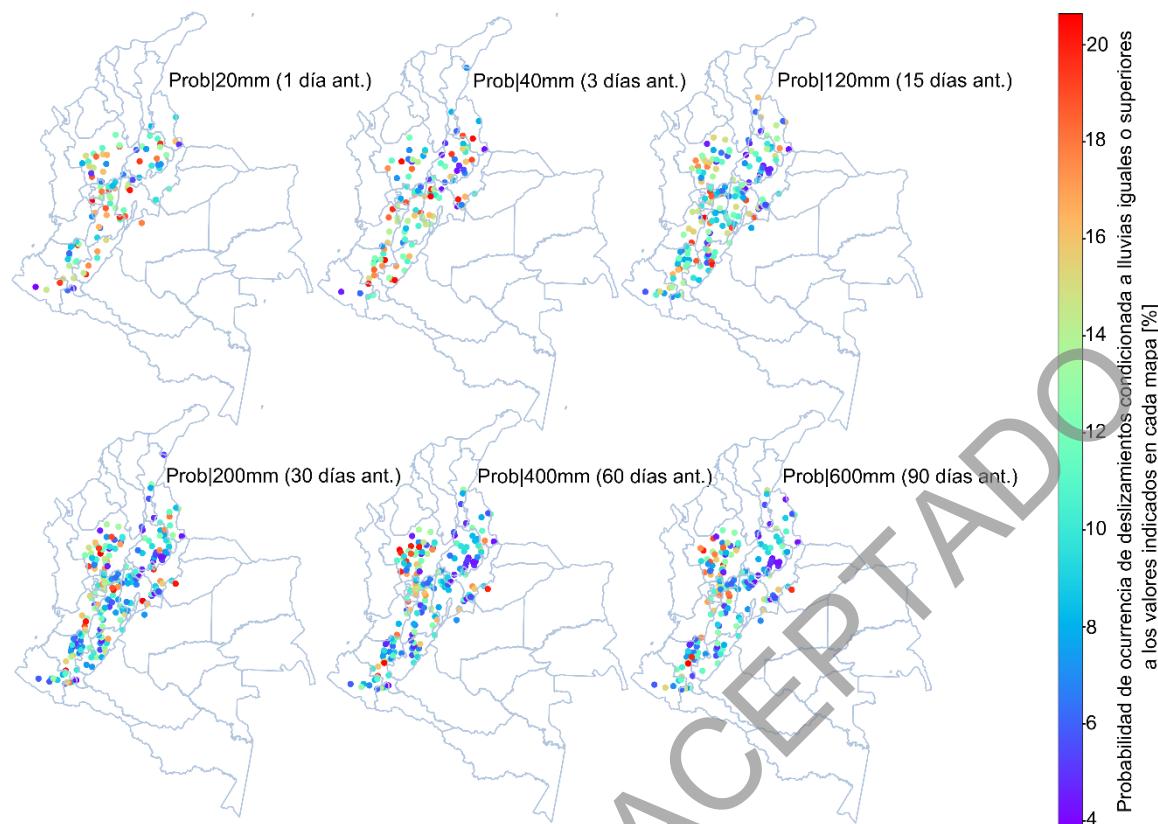
Variable	Valor crítico lluvia [mm]	%P(D Xmm)	%P. Exced.
1día ant.	20	0.51	Lluvia 9.69
3 días ant.	40	0.49	8.51
15 días ant.	120	0.35	8.91
30 días ant.	200	0.32	10.4
60 días ant.	400	0.29	8.0
90 días ant.	600	0.23	31.6

578

579 Finalmente, se encontraron las probabilidades de ocurrencia de deslizamientos dado que se
580 presenten o superen los valores críticos de lluvia propuestos en cada estación en particular,
581 con el fin de especializar las probabilidades de ocurrencia. Estos resultados se presentan en
582 la Figura 12, donde cada punto representa una estación de lluvia con su respectiva
583 probabilidad de ocurrencia. El rango de probabilidades mostrado en la Figura 12 fue
584 seleccionado entre 0 y el 20% con el fin de apreciar con más detalle la diferencia entre las
585 zonas de las estaciones. Esto debido a que, en el análisis realizado para cada estación, las
586 magnitudes de las probabilidades se condensaron en este rango de manera similar a los
587 resultados del análisis previo de cada estación mostrado en la Figura 7.

588

589



605 relevancia en el periodo, así como probabilidades en relación con los deslizamientos, y las
606 probabilidades de excedencia de las lluvias en conjunto. Adicionalmente, permite ser aplicado
607 en detalle en cada estación o zona específica.

608

609 La aplicación de esta metodología señaló que las variables antecedentes en la Región Andina
610 tienen relevancia en la ocurrencia de deslizamientos especialmente las de corto plazo, y en la
611 medida que aumentan los días antecedentes esta relevancia disminuye. Estos resultados
612 fueron complementados por medio del análisis de los coeficientes del modelo de regresión
613 logística, evaluando la importancia de las variables predictoras, lo cual es el primer paso y es
614 determinante para el uso de cualquier modelo estadístico; en este caso en particular, en el
615 estudio de amenaza por movimientos en masa. Este segundo análisis indicó que las variables
616 antecedentes de hasta 30 días son más relevantes que la intensidad diaria en la ocurrencia
617 de deslizamientos. Lo anterior se atribuye a que los suelos tropicales con perfiles profundos
618 de meteorización, como es el caso de la región Andina Colombiana, están asociados con
619 períodos mayores de lluvia y no con eventos particulares de altas intensidades (Suárez 2009).
620 Así mismo, los resultados señalaron que las variables de aproximadamente entre 30 y 40 días,
621 aunque con menos relevancia siguen influenciando y las variables antecedentes mayores a
622 estos valores no influencian más que la intensidad diaria en la ocurrencia de deslizamientos.
623 Adicionalmente, un último análisis fue realizado utilizando la metodología de las Curvas 90
624 días, unificando todas las curvas de la Región Andina con el fin de encontrar valores críticos
625 de lluvia en cada variable antecedente. Estos umbrales críticos se encontraron a partir de la
626 observación en conjunto de las probabilidades condicionadas de ocurrencia (aumento en la
627 pendiente de la curva), las probabilidades de excedencia de la lluvia (en torno al 10%) y la
628 concentración de los registros de deslizamientos en ciertos rangos de lluvia (en torno al 60%).
629 Además, estos resultados permitieron confirmar lo dicho anteriormente respecto a la
630 importancia de la lluvia antecedente en la Región Andina, esto porque las magnitudes de las
631 probabilidades condicionadas de deslizamientos indicaron que la influencia de la lluvia

632 acumulada antecedente es mayor a corto y mediano plazo, y se reduce en la medida que
633 aumentan los días antecedentes. Adicionalmente, el análisis indicó que la lluvia de 3 meses
634 antecedentes no tuvo el mismo patrón que las variables de hasta 2 meses, dificultando la
635 definición del valor crítico, señalando que sólo hasta 2 meses atrás la lluvia estaría
636 influenciando en la ocurrencia de deslizamientos.

637

638 Por último, se recomienda para trabajos futuros aplicar las metodologías mencionadas
639 anteriormente en cada estación o zona específica delimitando el área de estudio con
640 similitudes en el comportamiento de la lluvia. Esto con el fin de reducir la incertezza en el
641 análisis asociada a la localización de los eventos de deslizamientos, al subregistro de
642 inventarios en algunas regiones alterando el balance en los análisis y a la malla de estaciones
643 meteorológicas. Así mismo, se recomienda incluir en trabajos futuros otros factores
644 condicionantes que influyen también en la ocurrencia de deslizamientos en la Región.

645

646 CONCLUSIONES

647

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

657 También se propusieron valores críticos de lluvias antecedentes iguales a 20 mm, 40mm,
658 120mm, 200mm, 400mm y 600mm, para las variables antecedentes de 1, 3, 15, 30, 60 y 90
659 días respectivamente. Finalmente, si bien es cierto que existen otras metodologías más
660 robustas en la definición de umbrales, la simplicidad de la metodología presentada en este
661 análisis ofrece utilidad para las zonas donde aún no se han implementado sistemas de alerta.
662 Estos valores críticos proporcionan un criterio práctico que en momentos de amenaza pueden
663 dar directrices en la decisión de activación de alarmas y acciones por parte de la comunidad.
664 Adicionalmente, estos resultados sirven de base para la selección de variables predictoras de
665 lluvia especialmente en el uso de modelos estadísticos, así como de otros métodos para
666 definición de umbrales más robustos y para diferentes estudios de amenaza.

667

668 AGRADECIMIENTOS

669 Los autores agradecen el apoyo del grupo GII de la Universidad de Antioquia, así como del
670 Grupo GEOHAZARD de la Universidad Nacional-Sede Medellín, por el apoyo en la
671 investigación.

672

673 REFERENCIAS

674

675 Aristizábal, E., Gamboa, M. F. y Leoz, F. J. 2010. Sistema De Alerta Temprana Por
676 Movimientos En Masa Inducidos Por Lluvia Para El Valle De Aburrá, Colombia. Revista EIA
677 (13): 155 -169. <https://doi.org/10.24050/reia.v7i13.239>

678

679 Aristizábal, E., González, T., Montoya, J.D, Vélez, J.I., Martínez, H. y Guerra, A. 2011. Análisis
680 de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de
681 Aburrá, Colombia. Revista EIA (15): 95-111.

682

- 683 Bui, D.T., Lofman, O., Revhaug, I. y Dick, O. 2011. Landslide susceptibility analysis in the Hoa
684 Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards* (59):
685 1413–1444. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9844-2>
- 686
- 687 Bui, D.T., Tuan, T.A., Klempe, H., Pradhan, B. y Revhaug, I. 2016. Spatial prediction models
688 for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector
689 machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model
690 tree. *Landslides* (13): 361–378. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6>
- 691
- 692 Calvello, M., Neiva d'Orsi, R., Piciullo, L., Paes, N., Magalhaes, M. y Alvarenga Lacerda, W.
693 2015. The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: Analysis of
694 performance for the years 2010–2013. *International Journal of Disaster Risk Reduction* (12):
695 3–15, ISSN 2212-4209. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.10.005>.
- 696
- 697 Correa, O., García, F., Bernal, G., Cardona, O. y Rodriguez, C. 2020. Early warning system
698 for rainfall-triggered landslides based on real-time probabilistic hazard assessment. *Natural
699 Hazards* (100): 345–361.
- 700
- 701 Cruden, D. M. y Varnes, D. J. 1996. *Landslide Types and Processes*. Turner, A.K. and Shuster,
702 R.L., Eds. *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special
703 Report (247) 36-75.
- 704
- 705 DANE 2005. [https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-](https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1/sistema-de-consulta-censo-2005)
706 [poblacion/censo-general-2005-1/sistema-de-consulta-censo-2005](https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1/sistema-de-consulta-censo-2005).

- 707
- 708 DesInventar 2022. www.desinventar.org.
- 709
- 710 Eslava, J. 1993. Climatología y diversidad climática de Colombia. Revista de la Academia
711 Colombiana de las Ciencias 18(71): 507–38.
- 712
- 713 Gerón, A. 2019. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow.
- 714
- 715 Gómez, D., García, E. y Aristizábal, E. 2021. Spatial and temporal patterns of fatal landslides
716 in Colombia. SCG-XIII International Symposium on Landslides, Cartagena-Colombia.
- 717
- 718 IDEAM 2004. Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales
719 renovables en Colombia. Bogotá, Colombia.
- 720
- 721 IDEAM 2022. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- 722
- 723 Kellogg, J. N., Vega, V., Stailings, T. C. y Aiken, C. L. V. 1995. Tectonic development of
724 Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System
725 geodetic studies and gravity. Geological Society of America (295):75–90.
- 726
- 727 Kim S. K., Hong W.P. y Kim, Y.M. 1991. Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea.
728 Landslides.
- 729

- 730 Mann, P. y Corrigan, J. 1990. Model for late Neogene deformation in Panama. *Geology*
731 (18):558–562.
- 732
- 733 Mayorga, R. 2003. Determinación De Umbrales De Lluvia Detonante De Deslizamientos En
734 Colombia. *Meteorología Colombiana* (7): 157–168.
- 735
- 736 Merghadi, A., Yunus, A., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D.T., Avtar, R. y
737 Abderrahmane, B. 2020. Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A
738 comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews* (207). ISSN 0012-
739 8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>.
- 740
- 741 Mesa-Sánchez, Ó.J. y Rojo-Hernández, J.D. 2020. On the general circulation of the
742 atmosphere around Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 44(172):857-875. doi:
743 <https://doi.org/10.18257/raccefyn.899>.
- 744
- 745 Molina, E., Cardoso, A. y Nogueira, R. 2015. Relação Precipitação-Deslizamento no Município
746 de São Bernardo do Campo-SP. *Ciência e Natura* 37(1):46-54.
- 747
- 748 Moreiras, S. M. 2005. Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the
749 Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslides* (2): 53–59.
- 750
- 751 Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D. y Rhenals, R. L. 2006. La lluvia y los movimientos
752 en masa de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual
753 y diaria. *Revista EIA* (5): 59-69.
- 754
- 755 Muller, A. y Guido, S. 2017. *Introduction to Machine Learning with Python*.

- 756
- 757 Naidu, S., Sajinkumar, K.S., Oommen, T., Anuja V.J., Samuel, R.A. y Muraleedharan, C. 2018.
- 758 Early warning system for shallow landslides using rainfall threshold and slope stability analysis.
- 759 Geoscience Frontiers 9(6): 1871–1882.
- 760
- 761 Pabon, J.D., Eslava, J. y Gomez, R., 2001. Climatic large –scale characteristics of the tropical
- 762 Americas. Meteorología Colombiana (4): 39–46.
- 763
- 764 Poveda, G., y Mesa, O. J. 2000. On the existence of Lloró (the雨iest locality on Earth):
- 765 Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. Geophysical research letters,
- 766 27(11), 1675-1678.
- 767
- 768 Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O. J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R.I. y Quevedo, D.I. 2007.
- 769 Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the
- 770 drainage network of Colombia. Journal of Hydrologic Engineering 12(1): 4–13.
- 771 [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:1\(4\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(4))
- 772
- 773 Poveda, G., Waylen, P. R. y Pulwarty, R. S. 2006. Annual and inter-annual variability of the
- 774 present climate in northern South America and southern Mesoamerica. Palaeogeography,
- 775 Palaeoclimatology, Palaeoecology 234(1):3–27.
- 776
- 777 Puertas, O. y Carvajal, Y. 2008. Incidencia de El Niño -Oscilación del Sur en la precipitación
- 778 y la temperatura del aire en Colombia, Utilizando el Climate Explorer. Ingeniería & Desarrollo
- 779 (23):104–118.
- 780

- 781 Raja, N.B., Çiçek, I., Türkoğlu, N., Aydin, O. y Kawasaki, A. 2017. Landslide susceptibility
782 mapping of the Sera River Basin using logistic regression model. *Natural Hazards* (85): 1323–
783 1346. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2591-7>.
- 784
- 785 Ramachandran, K. M., y Tsokos, C. P. 2020. Mathematical statistics with applications in R.
786 Academic Press.
- 787
- 788 Salazar, J. F., Villegas, J. C., Rendón, A. M. y Rodríguez, E. 2018. Scaling properties reveal
789 regulation of river flows in the Amazon through a “forest reservoir”. *Hydrology and Earth
790 System Sciences*, 22(3), 1735-1748.
- 791
- 792 Sepúlveda, S. A., y Padilla, C. 2008. Rain-induced debris and mudflow triggering factors
793 assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Natural Hazards*, 47(2), 201–
794 215.
- 795
- 796 Schumann, A.H., 1998. Thiessen polygon. *Encyclopedia of Hydrology and Lakes.*
797 *Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-4497-6_220.
- 799
- 800 SIMMA 2022. <http://simma.sgc.gov.co>
- 801
- 802 Skipper, S. y Perktold, J. 2010. statsmodels: Econometric and statistical modeling with
803 python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*.
- 804

- 805 Soares, F., Ramos, G. 2014. Correlacoes entre movimentos de massa e pluviosidade nas
806 encostas de Joao Pessoa-PB. XVII Congresso Brasileiro de Mecanica dos Solos e Engenharia
807 Geotécnicas, COBRAMSEG. Goiania-Brasil.
- 808
- 809 Suarez, J. 2009. Deslizamientos. ISBN: 978-958-8504-03-2
- 810
- 811 Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H. y Clara Rivera,
812 J.O. 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation
813 (Colombia). Tectonics 19(5): 787–813.
- 814
- 815 Tatizana, C., Ogura, A.T., Cerri, L. E. DA S. y Rocha, M.C.M. 1987a. Análise da correlação
816 entre chuvas e escorregamentos aplicados às encostas da Serra do Mar, município de
817 Cubatão. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. Anais, São
818 Paulo: ABGE. V.2, p.225-236.
- 819
- 820 Tatizana, C., Ogura, A. T., Cerri, L. E. DA S. y Rocha, M. C. M. 1987b. Modelamento numérico
821 de análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do
822 Mar, município de Cubatão. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São
823 Paulo. Anais, São Paulo: ABGE. V.2, p.237-248.
- 824
- 825 Terlien, M.T.J. 1996. Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides:
826 the integration of hydrologic models, slope stability models and geographic information
827 systems for the hazard zonation of rainfall-triggered landslides with examples from Manizales.
828 International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, The Netherlands (32).
- 829

- 830 Trenkamp, R., Kellogg, J. N. y Freymueller, J. T. 2002. Wide plate margin deformation,
831 southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. Journal
832 of South American Earth Science (15): 157–171.
- 833
- 834 Valencia, S., Marín, D., Salazar, J., Villegas, J. y Gómez, D. 2021. Evaluación espacio-
835 temporal de las estimaciones remotas de precipitación a lo largo de gradientes topográficos y
836 climáticos en la Amazonía y Orinoquía Colombiana. *XXIV Seminario Nacional De Hidráulica*
837 *E Hidrología*.
- 838
- 839 Vega, J. y Hidalgo, C. 2016. Quantitative risk assessment of landslides triggered by
840 earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings. *Geomorphology* (273): 217–
841 235.
- 842
- 843 Weng, W., Luedeke, M. K., Zemp, D. C. y Lakes, T. 2018. Aerial and surface rivers: downwind
844 impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System*
845 *Sciences*, 22(1), 911-927.
- 846
- 847 Zhao, B., Dai, Q., Zhuo L., Zhu S., Shen, Q. y Han, D. 2021. Assessing the potential of different
848 satellite soil moisture products in landslide hazard assessment. *Remote Sensing of*
849 *Environment* Volume 264, 112583, ISSN 0034-4257,
850 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112583>.
- 851