

Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa desencadenados por lluvias en la región Andina colombiana

Karolina Naranjo Bedoya¹, Edier Vicente Aristizábal Giraldo² y José Alfred Morales Rodelo³

Recepción: 19-12-2018 | Aceptación: 03-04-2019 | En línea: 31-05-2019

doi:10.17230/ingciencia.15.29.1

Resumen

Los movimientos en masa desencadenados por lluvia han dejado un gran número de pérdidas humanas y económicas en Colombia, especialmente en el departamento de Antioquia. De acuerdo con la base de datos DesInventar, entre los años 1900 y 2017 se han registrado en el territorio Antioqueño 3478 movimientos en masa que han dejado un saldo de 2065 muertos y 74654 viviendas afectadas. El presente trabajo estudia la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en las nueve subregiones del departamento de Antioquia y su relación con la ocurrencia histórica de movimientos en masa bajo la influencia del fenómeno ENSO. Para dicho análisis se utilizaron 27 estaciones meteorológicas del IDEAM con información diaria y un total de 5368 movimientos en masa reportados en los catálogos del SIMMA y DesInventar, con una ventana temporal de análisis de 32 años (1985-2016). Se realizaron análisis de series temporales de lluvia

¹ Universidad Nacional de Colombia, knaranjobe@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6484-0709>, Medellín, Colombia.

² Universidad Nacional de Colombia, evaristizabalg@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-2648-2197>, Medellín, Colombia.

³ Universidad Nacional de Colombia, josamoralesrod@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-3072-5486>, Medellín, Colombia.

y correlaciones con la ocurrencia de movimientos en masa a escala diaria, mensual e interanual. Los resultados presentan un comportamiento bimodal en la ocurrencia de movimientos en masa de acuerdo con la variabilidad temporal de la precipitación y la fuerte influencia de la fase fría del ENSO (La Niña), de igual manera los movimientos en masa también son sensibles a la variabilidad espacial de la lluvia en las subregiones de Antioquia. El entendimiento de la variación espacio temporal de la lluvia en ambientes tropicales montañosos es un elemento fundamental para una adecuada gestión del riesgo y, específicamente, para el diseño e implementación de sistemas de alerta temprana por fenómenos hidrometeorológicos.

Palabras clave: Movimientos en masa; lluvia; región Andina; ENSO; ambientes tropicales.

Influence of the ENSO on the spatio-temporal variability rainfall triggered landslides in the Andean region

Abstract

Landslides triggered by rain have caused many human and economic losses in Colombia, especially in the department of Antioquia. According to DesInventar database since 1900 until 2017, 3478 landslides were recorded in the territory of Antioquia and these have left over 2065 fatalities and 74654 damaged homes. This paper presents spatial and temporal rainfall variability and their relationship with historical landslides events under the influence of ENSO in the nine sub-regions of Antioquia. For this purpose, daily rainfall data obtained from 27 IDEAM weather station and 5368 landslides reported in SIMMA and DesInventar database were used in a time window analysis between 1985 and 2016 (32 years). Also, temporal analyses and correlations were performed in daily, monthly and annual scale. According to the results of this study, the occurrence of landslides exhibits bimodal behavior according to temporal rainfall variability, and the strong effect of the cold phase of the ENSO (La Niña) has a strong influence on them. Moreover, landslides showed significant sensitivity to the time-series of rainfall linked to the different sub-regions of Antioquia. The understanding of spatial-temporal rainfall variability in tropical mountains environments is a key element for an appropriate risk management and early warning system implementation and design for hydro-meteorological hazards.

Keywords: Landslides; rain; Andean region; ENSO; tropical environments.

1 Introducción

Los movimientos en masa son una de las amenazas de origen natural más comunes y devastadores en el mundo, que causan miles de muertes y pérdidas económicas a la propiedad cada año [1],[2]. De acuerdo con las estadísticas presentadas por la [3], en el año 2017 ocurrieron 318 desastres por fenómenos de origen natural alrededor del mundo, donde el 8.2% corresponde a movimientos en masa, ubicándose como la segunda causa con el mayor número de víctimas humanas después de las inundaciones. Cerca del 90% de las muertes estuvieron asociadas a desastres originados por fenómenos climatológicos, hidrológicos o meteorológicos. En términos económicos, el año 2017 presentó pérdidas por US \$314 billones, siendo el segundo año más costoso desde 1900 después del año 2011 [3]. Y aunque las pérdidas económicas tienden a concentrarse en los países industrializados y desarrollados, las pérdidas humanas son mayores en los países menos desarrollados y densamente poblados, como Colombia [2],[4].

Específicamente los movimientos en masa provocados por lluvias son una de las causas más frecuentes de desastres por fenómenos naturales en los países tropicales y montañosos de la región circumpacífica [4],[5]. Más del 89% de las muertes por movimientos en masa alrededor del mundo han sido el resultado de movimientos en masa provocados por precipitaciones [2]. En el caso particular del departamento de Antioquia, y de acuerdo con los datos registrados en la base de datos DesInventar (www.desinventar.org) en el periodo comprendido entre 1900 y 2017 se han registrado 3660 movimientos en masa, ocasionando la muerte de 2167 personas.

Pocos estudios se han realizado en los Andes que analicen la relación de la lluvia con la ocurrencia de movimientos en masa y la influencia del ENSO (El Niño Southern Oscillation, por sus siglas en inglés). Para el sur de los Andes suramericanos, [6] señala la influencia que tienen las condiciones climáticas, como las fases extremas del ENSO en la ocurrencia de movimientos en masa, analizando la precipitación como factor detonante de los eventos y su lluvia antecedente. En los Andes Colombianos, [7] analizan la relación de la ocurrencia de movimientos en masa con la precipitación y a su vez, la influencia que tiene el fenómeno del ENSO en el departamento de Antioquia. Para lo cual utilizan 41 estaciones pluviométricas y 405 registros de movimientos en masa con el fin de definir umbrales críticos de

lluvia. [8] analizan el registro de emergencias y desastres que tienen como origen fenómenos naturales y antrópicos ocurridos en la región central de los Andes Colombianos desde 1880 hasta 2007, en el que se tienen registrados alrededor de 7000 eventos, señalando que los movimientos en masa son el segundo fenómeno natural con mayor recurrencia (35 % en términos de proporción con respecto al total de eventos) y el mayor número de pérdidas humanas (75 % en términos de proporción con respecto al total de pérdidas). Adicionalmente estos autores señalan la relación directa entre los movimientos en masa y la distribución bimodal de lluvias en el Valle de Aburrá. [9], a través del análisis de series temporales de movimientos en masa en Bogotá, observan una relación directa con el ONI (Oceanic Niño Index) de la fase La Niña, al igual que una correlación rezagada entre la lluvia y la ocurrencia de los movimientos en masa, donde la mayor cantidad de movimientos en masa son desencadenados semanas después de los valores altos de precipitación.

Considerando esta estrecha relación entre la lluvia y los movimientos en masa, los sistemas de alerta temprana basados en umbrales se consideran actualmente como una de las medidas más prácticas y efectivas para la reducción de desastres [10],[11],[12],[13]; sin embargo la compleja dinámica espacio-temporal de la precipitación en ambientes tropicales y montañosos como los Andes Colombianos [14] exige una adecuada comprensión en la relación entre la lluvia y los movimientos en masa, en términos espaciales y temporales a diferentes escalas.

En este trabajo se explora en el departamento de Antioquia, ubicado sobre los Andes Colombianos, la relación de la precipitación con la ocurrencia histórica de los movimientos en masa para el período comprendido entre 1985 y 2016, y la influencia del ENSO, con análisis en escalas temporales diaria, mensual e interanual, y escalas espaciales agregada para todo el departamento y por regiones.

2 Metodología

2.1 Área de estudio

Colombia, ubicada en el extremo norte de Sudamérica, es un país tropical de topografía montañosa con una fuerte variabilidad hidroclimática [15],

bajo una geología compleja y tectónica activa. Además de estas complejas condiciones naturales, durante las últimas décadas el crecimiento de la población y la creciente urbanización de áreas propensas a los movimientos en masa han aumentado las condiciones de riesgo [16].

La región andina colombiana cubre un área de 282540 km², que constituyen el 30 % del país. Es la región más poblada de Colombia, con una población de alrededor de 34 millones de personas [17] y una densidad de 120 habitantes/km². Los centros urbanos y económicos más importantes se encuentran en las tierras altas y los valles de los Andes. El presente trabajo se concentra en el departamento de Antioquia, dividido en nueve subregiones o subdivisiones territoriales, las cuales están conformadas por municipios con cierto grado de afinidad, en términos de su vocación económica, lazos culturales, conexión vial, accidentes geográficos, entre otros [18].

La subregión Norte cuenta con 17 municipios en los que se concentra el 4.1 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 12.2 % del departamento, con alturas entre los 1100 y 2600 m.s.n.m. La subregión del Bajo Cauca cuenta con 6 municipios en los que se concentra el 4.3 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 13.1 % del departamento y posee alturas entre los 30 y 150 m.s.n.m. La subregión del Nordeste cuenta con 10 municipios en los que se concentra el 3 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 13.3 % del departamento, y alturas entre los 650 y 1975 m.s.n.m [19]. La subregión del Magdalena Medio cuenta con 6 municipios en los que se concentra el 1.8 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 7.5 % del departamento, y alturas entre los 1000 y 1975 m.s.n.m [20]. La subregión Oriente cuenta con 23 municipios en los que se concentra el 9.3 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 11.2 % del departamento, y alturas entre los 1000 y 2500 m.s.n.m [21]. La subregión del Suroeste cuenta con 24 municipios en los que se concentra el 6.5 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 10.1 % del departamento. Posee un amplio rango de temperaturas (desde 13°C hasta 28°C) y de precipitación (desde 781 mm hasta 4060 mm) debido a la variedad de pisos térmicos presentes en esta región [22]. La subregión del Occidente cuenta con 18 municipios en los que se concentra el 3.5 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 12.3 % del

departamento, en su geografía las alturas de las cabeceras municipales van desde 450 hasta 1925 m.s.n.m [23]. La subregión del Urabá cuenta con 11 municipios en los que se concentra el 9 % de la población de Antioquia, su extensión territorial representa el 18.6 % del departamento [23]. Finalmente, la subregión del Valle de Aburrá cuenta con 10 municipios en los que se concentra el 58.5 % de la población de Antioquia, y tan solo el 1.8 % del territorio. Está enmarcado por una topografía irregular y pendiente, con alturas que oscila entre 1300 y 2800 m.s.n.m., es un valle estrecho, de unos 30 km de ancho promedio con una precipitación media anual de 1540 mm [24]. La Tabla 1 presenta el número de movimientos en masa registrado, el área y población de cada una de las subregiones.

Tabla 1: Subregiones del departamento de Antioquia*. Movimientos en masa (MenM), habitantes (hab).

Subregión	MenM	Área (km ²)	MenM/km ²	Población*	MenM/100000 hab
Norte	363	7690	0.05	233852	155
Bajo Cauca	126	8269	0.02	246189	51
Nordeste	240	8421	0.03	169718	141
Magdalena Medio	87	4730	0.02	99461	87
Oriente	943	7111	0.13	529977	178
Valle de Aburrá	2594	1129	2.3	3'316370	78
Suroeste	519	6400	0.08	371495	140
Occidente	355	7771	0.05	195825	181
Urabá	67	11750	0.01	508802	13
Total	5294	63271		5'671689	

*[25]

Geológicamente el norte de la región Andina colombiana se caracteriza por un núcleo de rocas metamórficas que componen el basamento de la cordillera Central, y que desarrollan generalmente suelos finos, intruído por cuerpos graníticos que desarrollan suelos arenosos [26]. La cordillera Occidental está conformada por rocas volcánicas con sedimentos turbidíticos, emplazadas por rocas ofiolíticas y metamórficas, con intrusivos tonalíticos y subvolcánicos. Todos estos materiales tienden a desarrollar suelos finos [27]. Los terrenos de bajo relieve están representados por sedimentos de origen continental en las cuencas de los ríos Cauca y Magdalena, y de origen marino a transicional continental en la región del Urabá [26],[27].

La Figura 1 presenta la localización del departamento de Antioquia, dividido en sus 9 subregiones, con la ubicación de las estaciones de lluvia

utilizadas en el presente estudio y los registros de movimientos en masa utilizados.

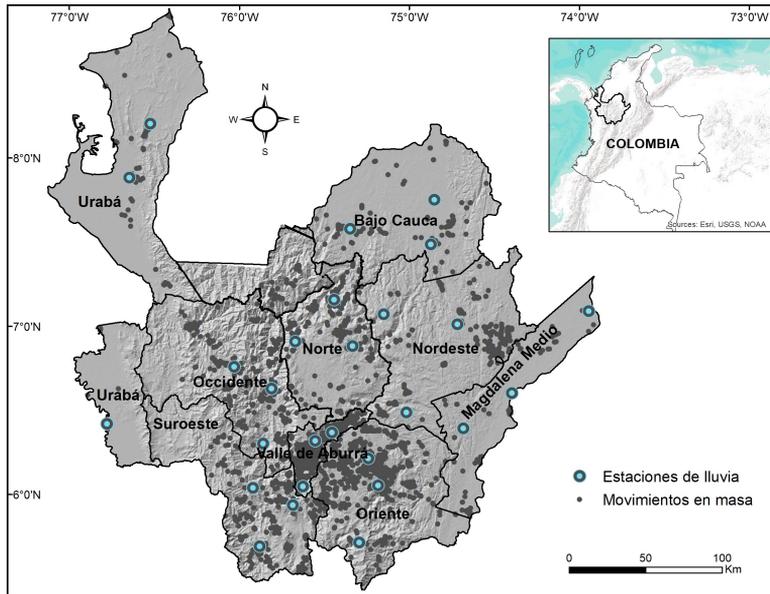


Figura 1: Localización del área de estudio, con los registros de movimientos en masas y estaciones de lluvia utilizadas.

2.2 Condiciones de lluvia en los Andes colombianos

La distribución espacio-temporal de la lluvia sobre los Andes tropicales tiene una alta variabilidad, debido a las fuertes características orográficas del país [28], entre las cuales se destaca la presencia de tres cordilleras con elevaciones que superan los 5000 m.s.n.m. y valles interandinos con direcciones norte-sur [29]. Esta configuración topográfica induce circulaciones atmosféricas locales que potencian la convección profunda [14],[15],[30],[31], como mecanismo fundamental en la formación de la lluvia tropical [29].

La lluvia en Colombia está controlada a escalas interanual e intraanual principalmente por ambas fases del ENSO [6],[15],[32]. El ENSO en Colombia se manifiesta en la fase El Niño por una disminución en la precipitación

y en los caudales medios mensuales de los ríos de Colombia, así como una disminución en la humedad del suelo y en la actividad vegetal [32], mientras que en la fase La Niña se presenta con anomalías positivas de la precipitación [14],[29],[32]. En general, los efectos de El Niño son más fuertes y más inmediatos sobre el occidente que sobre el oriente de Colombia.

En el departamento de Antioquia, el comportamiento bimodal del ciclo anual de la precipitación se expresa principalmente en el centro y oeste del país, cuyos picos máximos se marcan en los meses de marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON), mientras que los picos mínimos se marcan en los meses de diciembre-enero-febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA), resultado del doble paso de la ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical) sobre la región [15], [32]. La ZCIT tiene una alta relación con patrones de circulación atmosférica sobre el mar Caribe, el este del Océano Pacífico y la cuenca del río Amazonas [15], y en particular con el Chorro del Chocó, el cual es una serie de vientos que penetran por el occidente colombiano. Estos vientos están ausentes durante los meses de feb-mar y su núcleo máximo de velocidad está en los meses de oct-nov, lo que genera una fuerte advección húmeda desde el Océano Pacífico hacia Colombia [30],[14],[33].

Adicional a estos procesos individualmente complejos se presenta una coexistencia y mezcla de diferentes escalas temporales en la lluvia, entre fenómenos macroclimáticos como el ENSO con interacciones no lineales con la ZCIT y Chorro del Chocó, generando los complejos patrones de variabilidad hidroclimática en los Andes colombianos [14].

2.3 Datos

2.3.1 Base de datos de movimientos en masa. La base de datos de movimientos en masa registrados en el departamento de Antioquia se compiló a partir de los catálogos de SIMMA (www.simma.sgc.gov.co) y DesInventar (www.desinventar.org) con registros históricos a escala temporal diaria desde 1985 a 2016, donde se obtuvo un total de 5368 eventos, incluyendo flujos, deslizamientos y caídas de roca. El catálogo de DesInventar ha sido utilizado por varios autores [7],[34],[35],[36],[37], en estudios a nivel del Valle de Aburrá, de Antioquia y de Colombia.

Esta base de datos fue depurada de acuerdo con el nivel de incertidumbre en la localización de los movimientos en masa y la ventana temporal de observación. Sólo la subregión del Valle de Aburrá presenta registros con un bajo nivel de incertidumbre, es decir, registros que permiten su ubicación con coordenadas geográficas. Las otras subregiones presentan niveles de incertidumbre a nivel de manzana, vereda o municipio en algunos casos. Con respecto a la ventana temporal de observación se seleccionaron los registros a partir del año 1985, debido a que a partir de este año se observa un aumento notorio de reportes de movimientos en masa, posiblemente por el mayor control y coordinación en la entrada de datos a las plataformas. Considerando que la lluvia es el principal factor detonante de movimientos en masa en ambientes tropicales y zonas de montaña, y debido a que las bases de datos no especifican el factor detonante del movimiento, se asume para el presente estudio que todos los eventos fueron desencadenados por lluvia.

2.3.2 Base de datos de precipitación. La base de datos, suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), consiste en valores de precipitación diaria en 27 estaciones pluviométricas con registros durante 32 años (del 1 de enero de 1985 al 30 de julio de 2016)(Tabla 2 y Figura 1. Los porcentajes de datos de lluvia no reportados representan menos del 2 % del total de los registros.

La selección de las estaciones (tres estaciones en cada subregión), se hace de forma manual, y considerando los siguientes criterios propuestos por [38]: i) presentar una distribución espacial representativa a lo largo de cada subregión, ii) existencia de la serie temporal de lluvia, en lo posible, completa para cada uno de los años, iii) presentar una localización cercana a las mayores concentraciones de movimientos en masa.

El área de influencia de cada estación fue determinada a partir de los polígonos de Thiessen, generados en ArcGis y ajustada a las características topográficas, con base a un Modelo de Elevación Digital (DEM) de 12.5 m x 12.5 m del departamento de Antioquia. Se asume para toda el área de influencia una distribución homogénea de la lluvia.

Tabla 2: Caracterización de las estaciones de lluvia seleccionadas en las subregiones de Antioquia. Porcentaje de datos faltantes (%NaN).

Subregión	Nombre de estación	Coordenadas		Altitud (m.s.n.m.)	Intervalo de registro		%NaN
		N	W				
Norte	San Andrés	6°54'35"	75°40'12"	1600	Ene/1985	Jun/2016	0.4
	Santa Isabel	7°09'26"	75°26'32"	1132	Ene/1985	May/2016	0.6
	Angostura	6°52'59"	75°19'57"	1650	Ene/1985	Jun/2016	0.3
Bajo Cauca	Cáceres	7°34'45"	75°20'52"	95	Ene/1985	Mar/2016	3.2
	La Esmeralda	7°45'4"	74°00'11"	100	Ene/1985	Mar/2016	8.9*
	Zaragoza	7°29'10"	74°52'21"	50	Ene/1985	Mar/2016	0.3
	San Roque	6°29'15"	75°01'01"	820	Ene/1985	Jun/2016	1
	Anorí	7°04'19"	75°09'02"	1601	Ene/1985	Abr/2016	4.7
Magdalena Medio	Virginias	6°23'37"	74°40'55"	975	Ene/1985	May/2016	0.7
	Murillo	6°36'11"	74°23'43"	130	Ene/1985	Jul/2016	3.7
	Yondo	7°05'22"	73°56'39"	85	Ene/1985	Jul/2016	0.3
Oriente	Cocorna	6°03'12"	75°10'57"	1455	Ene/1985	Jun/2016	1.3
	El Peñol	6°12'51"	75°14'29"	2047	Ene/1985	Jun/2016	3.6
	Sonsón	5°42'55"	75°17'40"	2180	Ene/1985	Jun/2016	0.7
Valle de Aburrá	La Cuchilla	6°22'06"	75°27'13"	1600	Ene/1985	Abr/2016	0.4
	Tulio Ospina	6°19'11"	75°33'12"	1453	Ene/1985	Jul/2016	2.5
	La Salada	6°02'54"	75°37'29"	1923	Ene/1985	Abr/2016	0.9
Suroeste	Ita andes	5°41'28"	75°52'49"	1180	Ene/1985	Jun/2016	2.1
	Fredonia	5°56'12"	75°41'06"	1650	Ene/1985	May/2016	2
	Concordia	6°02'22"	75°55'10"	2006	Ene/1985	Jun/2016	1.8
Occidente	Cañasgordas	6°45'29"	76°01'47"	1294	Ene/1985	Jun/2016	5.2
	Anzá	6°18'11"	75°51'33"	550	Ene/1985	Jun/2016	0.09
	Olaya	6°37'43"	75°48'39"	575	Ene/1985	Jun/2016	0.06
Urabá	Buchado	6°25'12"	76°46'45"	18	Ene/1985	Jul/2016	2
	El Casco	7°53'04"	76°38'52"	18	Ene/1985	Abr/2016	0.6
	Pueblo Bello	8°12'15"	76°31'29"	10	Ene/1985	Abr/2016	0.1

*sin datos en el año 2013

El cálculo de la lluvia diaria promedio de cada subregión se realizó a través del promedio ponderado en función del área que representan los polígonos de Thiessen en cada subregión, ya que en la mayoría de éstas confluyen polígonos de estaciones localizadas en subregiones adyacentes. En los casos donde no se cuenta con el dato específico de un día en cierta estación, el promedio ponderado es calculado a partir del área de influencia de las estaciones que tienen datos disponibles.

2.3.3 Base de datos del MEI. Para evaluar la posible correlación entre cada fase del ENSO con la lluvia y los movimientos en masa en todo el departamento de Antioquia es necesario seleccionar un índice del ENSO que cuantifique la magnitud de la fase del ENSO. Debido a que dichos índices son en general a escala mensual, es necesario adicionalmente establecer para cada año la fase del ENSO que predomina.

Como índice se utilizó el Índice Multivariado del ENSO (MEI por sus siglas en inglés) a escala mensual [39]. El MEI en su modelo maneja seis

variables: la presión del nivel del mar, las componentes zonal y meridional del viento superficial, la temperatura superficial del mar, la temperatura del aire superficial y la fracción total de nubosidad [40], lo cual permite que integre mayor información que otros índices, reflejando de mejor manera el sistema de acople entre el océano y la atmósfera, además de ser menos vulnerable a errores técnicos ocasionales en los ciclos mensuales de actualización [39].

Los valores negativos del MEI representa la fase fría del ENSO (La Niña), mientras que los valores positivos representan la fase cálida (El Niño). La clasificación de cada uno de los meses en cuanto a la fase del ENSO, se realizó con base a los rangos bimestrales del MEI, cuyo menor valor es 1 (La Niña más fuerte) y mayor valor 69 (El Niño más fuerte). La definición de cada una de las fases a partir del índice se realiza con percentil de 30 (P30), lo cual indica que se están considerando las condiciones más fuertes y más débiles para ambas fases del ENSO, es decir, el rango 1-21 señala fuertes a débiles condiciones de La Niña y el rango 49-69 señala condiciones débiles a fuertes de El Niño [39].

La definición de la fase del ENSO que predomina en cada año se obtuvo a partir del índice JMA SST de la Agencia Meteorológica Japonesa, debido a la buena selección de los eventos ENSO. Se considera fase El Niño si durante seis meses consecutivos el índice tiene un aumento de valores mayores o iguales a 0.5°C y se considera La Niña si también durante seis meses el índice tiene un descenso igual o mayor a -0.5°C [41],[42],[43].

3 Resultados

Para el análisis de la influencia de la lluvia en la ocurrencia de movimientos en masa en los Andes Colombianos se consideraron diferentes escalas temporales interanual, mensual y diaria. En cuanto a la escala espacial se analizó en conjunto el departamento de Antioquia, e individualmente cada una de las subregiones que lo componen.

3.1 Departamento de Antioquia

3.1.1 Escala interanual. En la Figura 2 se presenta la variación interanual de la lluvia con los movimientos en masa y el ENSO. Para el periodo analizado se registró una lluvia media multianual de 3018 mm, con dos picos máximos en el año 1999 (3609 mm) y el año 2011 (3537 mm), y valores mínimos de 2352 mm en el año 1991 y 2395 mm en el año 1997. A partir del año 1985 ha dominado la presencia de años neutros, 17 en total, seguidos por años El Niño, 9 años, y 5 años La Niña. En los últimos 3 años se observa una marcada caída hasta 2783 mm en el año 2015. Se observa que el año 1997, al igual que el año reciente de 2015, clasificado como años El Niño, correlacionan con la disminución marcada de los movimientos en masa, con uno de los menores números de eventos registrados en todo el periodo analizado. Por otra parte, años como 1998 y 1999 coinciden con fases de La Niña y picos máximos en los registros de movimientos en masa. Sin embargo, se observan años como 2000, 2008, 2011, y 2012 con picos importantes en los registros de eventos que corresponden a años neutros.

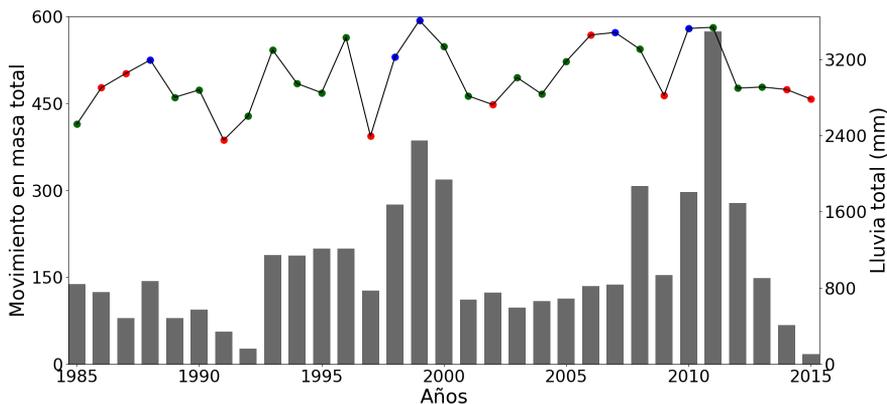


Figura 2: Variación interanual de la lluvia y los movimientos en masa en el departamento de Antioquia, asociado a las fases del ENSO, a partir del índice JMA SST. Los puntos rojos significan años El Niño, los puntos azules años La Niña, y puntos verdes años neutros.

3.1.2 Escala mensual. En la Figura 3 se presenta la variación mensual de la lluvia y los movimientos en masa para todos los años agregados (3A), y analizados de acuerdo con la fase del ENSO, años El Niño (3B), La Niña (3C) y neutro (3D). Para todos los años agregados (3A) se presenta un comportamiento bimodal de la lluvia y los movimientos en masa, con picos que coinciden en los meses de mayo y octubre. Este comportamiento bimodal y correlación entre la lluvia y los registros de movimientos en masa se acentúa para los años El Niño (3B), y se conserva ligeramente para los años La Niña (3C). Por el contrario, para los años neutros (3D), aunque la lluvia conserva un comportamiento bimodal, los registros en los movimientos en masa presentan un comportamiento unimodal con un pico en el mes de mayo, seguido por una ligera tendencia decreciente hasta los meses de diciembre, enero y febrero, donde se presenta el menor número de registros.

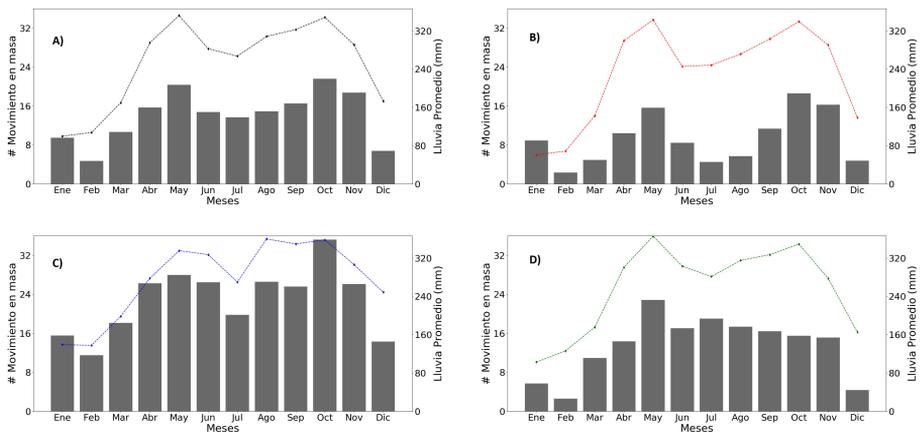


Figura 3: Variación mensual de la lluvia y los movimientos en masa promedio en el departamento de Antioquia total (A), El Niño (B), La Niña (C) y neutro (D).

El ciclo anual de los años El Niño (3B) conserva bimodalidad, pero se caracteriza por valles más pronunciados (DEF y JJA) y picos más agudos que los de la fase La Niña, lo cual significa transiciones más marcadas entre los periodos lluviosos (MAM y SON) y los periodos de menos lluvias (DEF y JJA). A diferencia del ciclo anual de los años La Niña (3C), que se

caracteriza por picos amplios, pero con valles (DEF y JJA) por encima del promedio multianual, con transiciones suaves lo que refleja un ciclo bimodal más suavizado. Es decir, los resultados señalan que la diferencia entre el ciclo anual de la precipitación de acuerdo con el ENSO no se presenta en los picos de lluvias, sino en la presencia de más lluvias en los meses secos (DEF y JJA).

Los movimientos en masa responden a estos cambios generados por la influencia del ENSO. Para los periodos lluviosos en los años La Niña se han registrado un número de movimientos en masa superior al promedio multianual, al igual que en los periodos secos. Y para los años El Niño, el valor mínimo de movimientos en masa es marcadamente inferior en los periodos secos.

El ciclo anual de la precipitación en años neutros (3D) se asemeja al comportamiento de El Niño en los valores máximos. En cuanto a los registros de movimientos en masa, desaparece el pico del mes de octubre manteniéndose un pico ligeramente superior en el mes de mayo y valles ligeramente inferiores en los meses de diciembre, enero y febrero, pero con un porcentaje de registros similar entre los meses de junio y noviembre.

En la Figura 4 se presenta la proporción de los movimientos en masa registrados en cada fase del ENSO en escala mensual, donde se observa que domina la ocurrencia de movimientos en masa en la fase de La Niña con porcentajes en general superiores al 50%. De forma similar como lo señala la Figura 3, dicha diferencia se marca principalmente en los periodos secos.

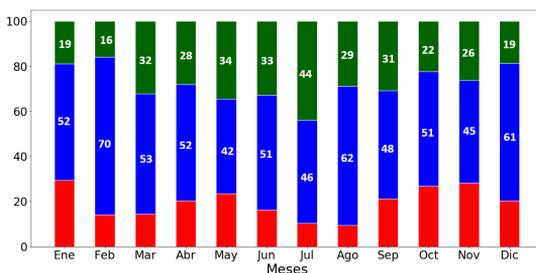


Figura 4: Proporción (%) mensual de los movimientos en masa en el departamento de Antioquia, de acuerdo con la fase del ENSO: El Niño (rojo), La Niña (azul), neutro (verde).

3.1.3 Escala diaria. La Figura 5 presenta la variación diaria de la lluvia y los movimientos en masa para todos los años agregados (5A), en la fase El Niño (5B), La Niña (5C) y neutro(5D). Se observa nuevamente el patrón de bimodalidad en la lluvia, pero con una amplia variabilidad de la lluvia diaria, aparentemente marcada en los años El Niño y La Niña comparados con los promedios totales (5A). En el ciclo anual de los años El Niño a escala diaria se observa una bimodalidad más marcada y un ligero desfase entre los picos de lluvia y movimientos en masa. Para los años La Niña, tanto en la precipitación como en el registro de movimientos en masa, se pierde la bimodalidad, con un incremento en la precipitación diaria a partir del mes de mayo constante hasta el mes de diciembre cuando desciende, sin embargo, los registros de movimientos en masa presentan un incremento a partir del mes de agosto. Para la fase de años neutros en el mes de julio, donde ocurre la mínima precipitación, se presenta el mayor reporte de movimientos en masa.

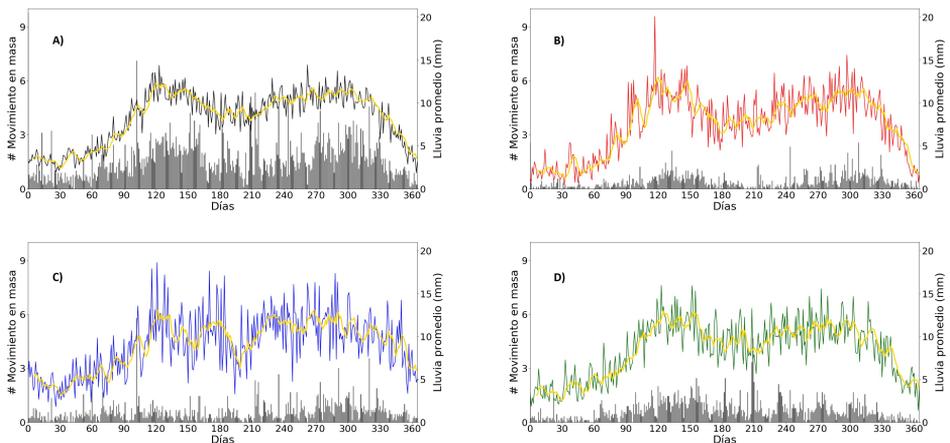


Figura 5: Variación diaria de la lluvia y los movimientos en masa en el departamento de Antioquia, total (A), El Niño (B), La Niña (C) y neutro (D). Para cada curva se presenta en color amarillo la media móvil de 7 días.

3.2 Análisis por subregiones

3.2.1 Escala interanual. En la Figura 6 se presenta la variación anual de la lluvia y los registros de movimientos en masa en las nueve subregiones del departamento de Antioquia, donde se observa que los registros históricos de las lluvias más bajas se presentan en el Valle de Aburrá y el Occidente y máximas en la zona del Bajo Cauca. En 1997, año fuerte de El Niño, se observa un descenso brusco en la precipitación, marcada principalmente en las subregiones del Norte, Oriente y Occidente antioqueño. En cuanto a las lluvias acumuladas anuales, en todas las subregiones se observa la influencia del ENSO. Los años de mayores lluvias corresponden a años La Niña, y los años por debajo de las lluvias promedio corresponde a años El Niño.

La Figura 6 permite observar los contrastes en cuanto al registro de movimientos en masa de cada subregión, donde el Valle de Aburrá, que presenta las menores lluvias registra a su vez el mayor número de eventos reportados. Por el contrario, las subregiones del Bajo Cauca, Magdalena Medio y Urabá presentan altas precipitaciones, pero muy pocos registros, como resultado de la baja susceptibilidad de dichos terrenos a la ocurrencia de movimientos en masa en estas tres subregiones. Para el Valle de Aburrá, el gran número de registros se puede explicar por la elevada densidad poblacional en comparación con las demás regiones lo que señala la importante influencia antrópica en la ocurrencia de los movimientos en masa. En gran medida la ocupación de las vertientes del valle de Aburrá se ha realizado informal sin un proceso de planeación, lo cual ha permitido cortes en las laderas sin las condiciones técnicas necesarias lo que desconfinan y aumentan la susceptibilidad de dichos terrenos a deslizarse, además de la infiltración de las aguas vertidas en asentamientos no consolidados sin redes de alcantarillado. Esta condición también puede explicar la ocurrencia de un número importante de movimientos en masa y que no guardan relación directa con la precipitación. Finalmente, la sobreexposición a los medios de comunicación de los municipios del Valle de Aburrá es también un factor para considerar para entender el gran número de reportes.

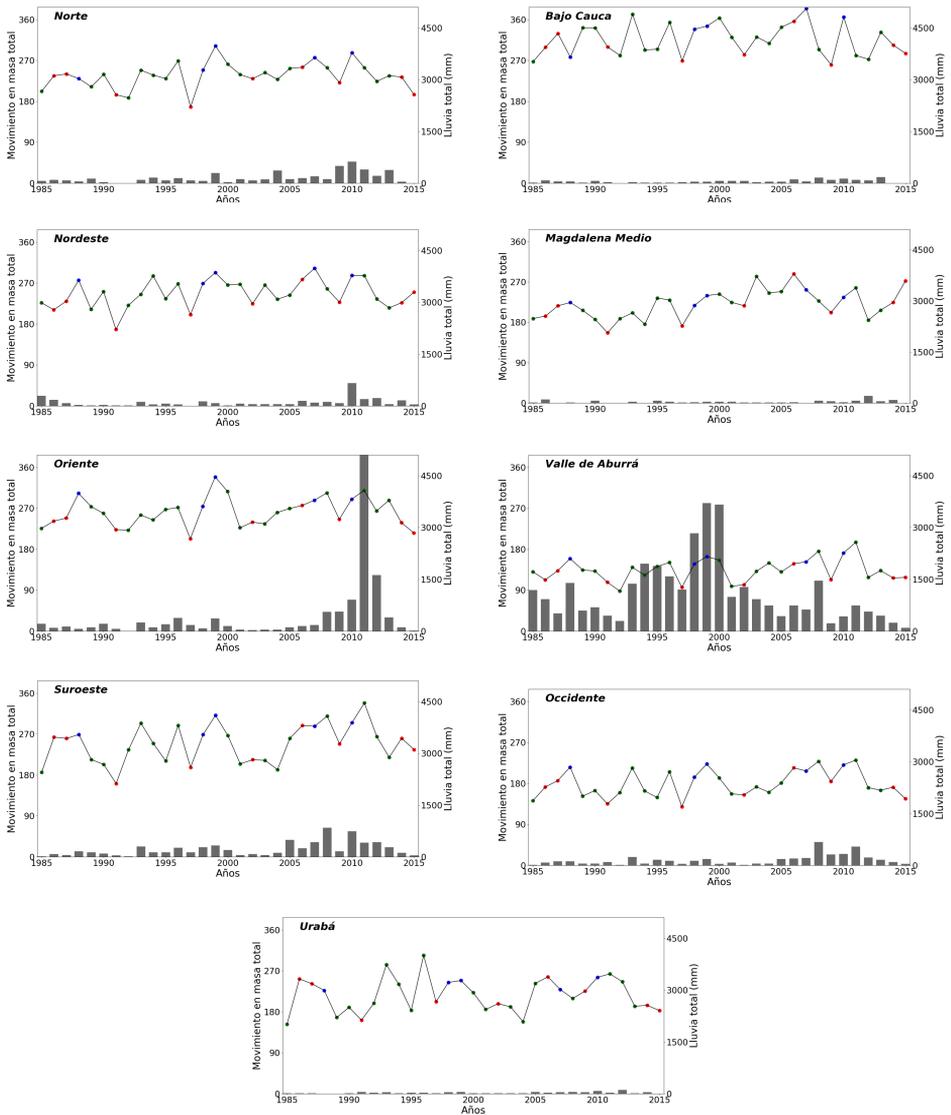


Figura 6: Variación interanual de la lluvia y los movimientos en masa total en las subregiones del departamento de Antioquia, asociado a las fases del ENSO. Los puntos rojos representan los años El Niño, los puntos azules los años La Niña y los puntos verdes los años neutros.

3.2.2 Escala mensual. La Figura 7 presenta la variación mensual de la lluvia y los movimientos en masa en las nueve subregiones del departamento de Antioquia. El patrón bimodal con picos de lluvia en los periodos MAM y SON se observa en seis de las nueve subregiones. En el Norte, Bajo Cauca y Urabá presentan tendencias más uniformes con tendencia unimodal, con pico máximo en el mes de mayo para el Norte y Urabá, y en el mes de agosto para la subregión del Bajo Cauca, y dos valles o meses de menores lluvias en los meses de mayo y octubre. En el Valle de Aburrá los picos de las precipitaciones máximas en ambos periodos son los más marcados de las subregiones. En el Nordeste y Suroeste se presenta la menor diferencia entre los picos y el valle de la precipitación bimodal.

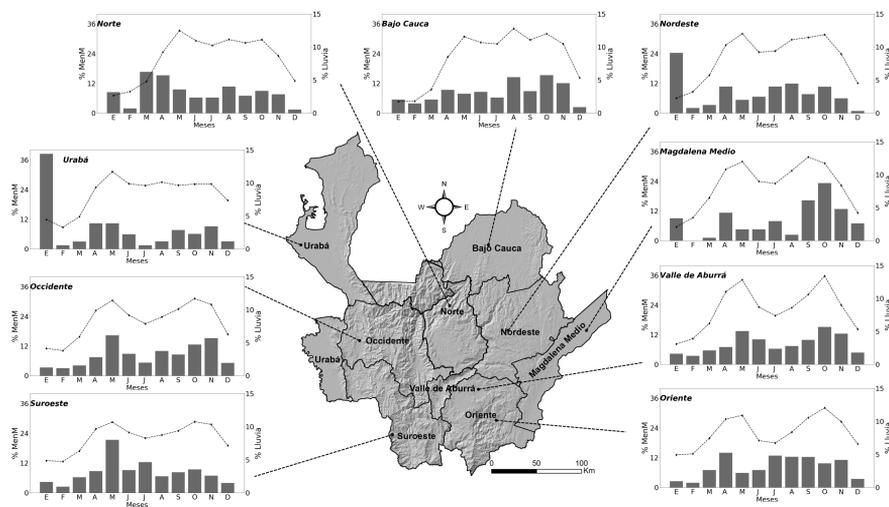


Figura 7: Variación mensual porcentual de la lluvia y los movimientos en masa en las subregiones del departamento de Antioquia.

De igual forma los registros de movimientos en masa presentan en general un comportamiento bimodal para las subregiones, con un patrón más marcado en las subregiones como el Valle de Aburrá, Occidente, y el Suroeste, pero con subregiones que presentan una alta variabilidad en los registros de movimientos en masa a escala mensual, como Urabá, Nordeste, y Magdalena Medio. En todas las subregiones los picos en los registros de movimientos en masa corresponden con picos lluviosos en el ciclo anual,

a excepción de la región Norte y Urabá donde los picos de registros están dos y cuatro meses desplazados, respectivamente.

En la Figura 8 se presenta la variación mensual de la lluvia y los movimientos en masa separados de acuerdo con la fase del ENSO del MEI en los 32 años de análisis.

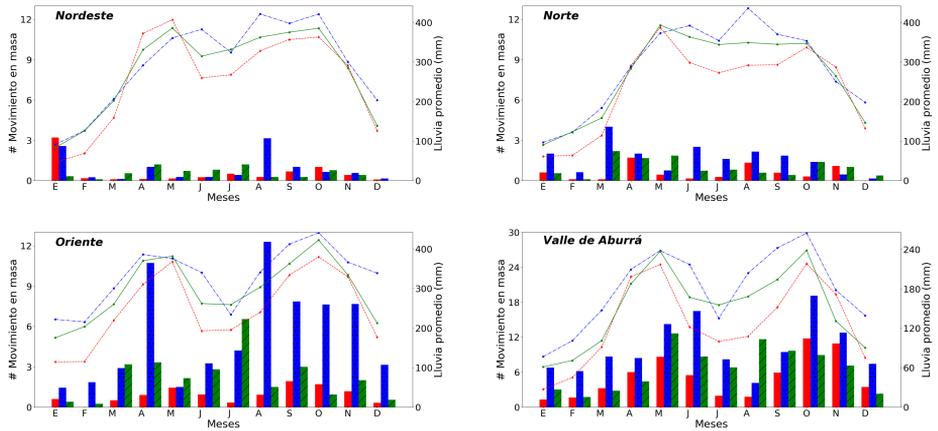


Figura 8: Variación mensual de la lluvia y los movimientos en masa porcentual en subregiones del departamento de Antioquia, en la fase de El Niño (rojo), La Niña (azul) y neutro (verde).

Aunque se elaboraron y analizaron todas las subregiones, la Figura 8 solo presenta aquellas subregiones que reportan un número considerable de registros, de forma tal que permita una comparación con los registros de lluvia. Sin embargo, se observa para todas las subregiones que la fase El Niño del ENSO marca la bimodalidad en el ciclo de lluvias anuales, a excepción de la subregión del Urabá donde no se observa bimodalidad ni en las lluvias ni en los registros de movimientos en masa. El comportamiento de la lluvia en la fase de La Niña en las subregiones del Norte, Bajo Cauca y Urabá no presenta un régimen bimodal a diferencia de las otras subregiones en las que además se observa como rasgo común la fuerte transición del periodo seco de mitad de año (JJA), lo que genera valles profundos debido al rápido descenso y ascenso de la precipitación durante esta fase. En el caso del Nordeste y Oriente se presentan transiciones fuertes en el primer periodo de lluvias del mes de mayo y transiciones moderadas para el segun-

do periodo de lluvias en el mes de octubre, mientras que en el Magdalena Medio la transición entre el periodo seco y de lluvia se observa en el mes de mayo. En la fase de La Niña las crestas se observan amplias y constantes a lo largo de los meses de abril-mayo-junio y agosto-septiembre-octubre. También se observa que la segunda temporada de lluvias alcanza mayores valores.

En términos generales, los registros de movimientos en masa durante años La Niña no presentan un comportamiento bimodal tan marcado como en la fase de El Niño, tienden a ser constantes, con valores mayores a los registrados en la fase de El Niño.

En la Figura 9 se presenta para cada subregión la proporción de movimientos en masa a escala mensual según la fase del ENSO. En general, se observa un mayor número de registros de movimientos en masa en años La Niña, y una disminución de los registros en la fase cálida del ENSO en todas las subregiones. Con excepciones para algunos meses en las regiones de Bajo Cauca, Nordeste, Magdalena Medio, Occidente y Urabá.

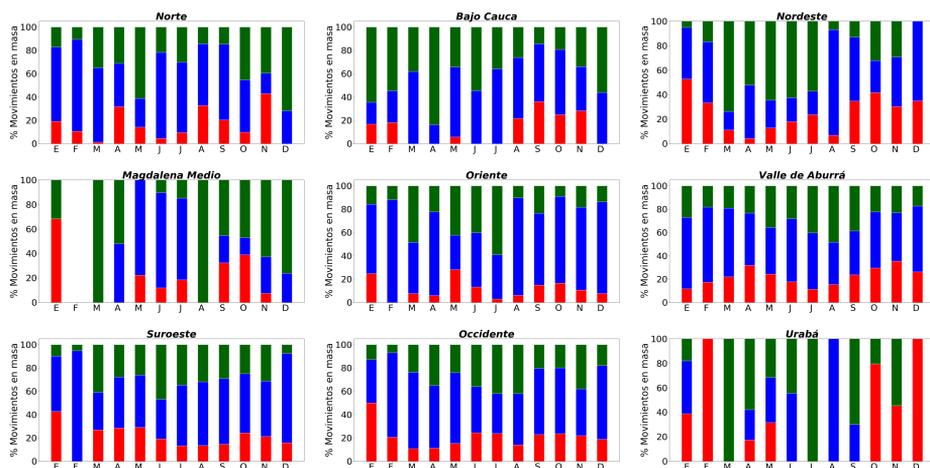


Figura 9: Proporción (%) mensual de los movimientos en masa en las subregiones del departamento de Antioquia, de acuerdo a la fase del ENSO.

Se realizaron correlaciones mensuales para las diferentes subregiones entre los registros de movimientos en masa y lluvias con los valores del

MEI con rezagos entre cero y seis meses. En términos hidrometeorológicos las correlaciones con rezagos temporales se refieren al procedimiento de correlacionar dos variables con una ventana temporal predefinida (rezago), lo cual permite identificar si la respuesta de una de las variables con respecto a la otra no se presenta simultáneamente sino posterior, en este caso establecer si las condiciones de lluvia y ocurrencia de movimientos en masa en el departamento de Antioquia responden a la fase del ENSO inmediatamente (rezago=0 meses) o posterior (rezagos de 1 a 6 meses). La Figura 10 presenta como ejemplo los resultados de las subregiones Oriente, Occidente y Nordeste, la línea azul corresponde al coeficiente de correlación de la precipitación mensual y la línea morada el coeficiente de correlación de los registros de movimientos en masa. En general se observan correlaciones muy bajas (± 0.2) entre la lluvia mensual y los registros de movimientos en masa con el MEI, pero que conservan una tendencia similar durante los tres primeros meses de rezago.

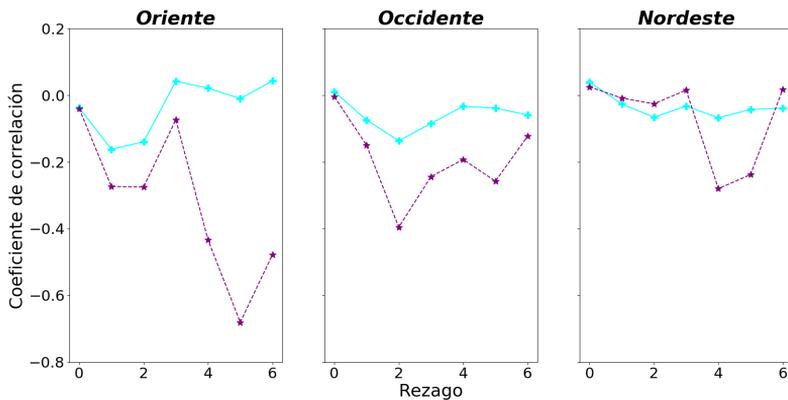


Figura 10: Correlaciones mensuales entre los datos de lluvia (línea azul) y movimientos en masa (línea morada) con el MEI en rezagos de 0-6 meses para las regiones Oriente, Occidente y Nordeste.

Las correlaciones del MEI con los registros de movimientos en masa, en su mayoría, son negativas señalando que a mayor número de registros menor valor del MEI, asociado a la fase de La Niña. Para el caso de la región Oriente en el mes de rezago 5 se presenta la mayor correlación negativa para

todas las subregiones (-0.7). En la Figura 11 se presenta como ejemplo la correlación de los registros de movimientos en masa (línea morada) y la lluvia (línea azul) con el MEI de acuerdo con la fase del ENSO para las subregiones del Valle de Aburrá y Suroeste. Para los años El Niño (11A) se observa en todas las subregiones una correlación negativa con la lluvia con valores máximos en el mes cuatro de rezago.

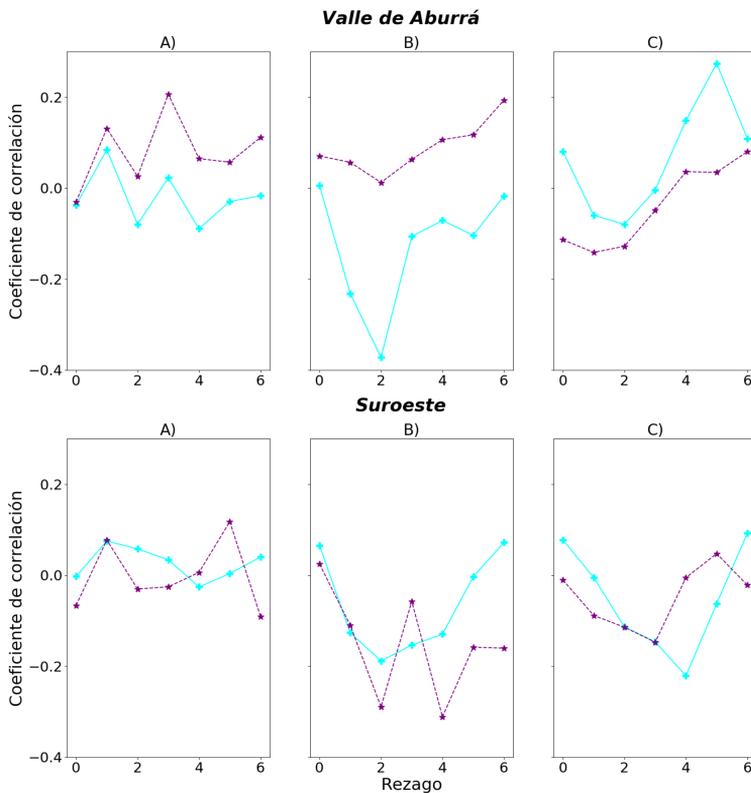


Figura 11: Correlaciones mensuales entre los datos de lluvia y movimientos en masa con el MEI de acuerdo con las fases del ENSO en rezagos de 0-6 para la región del Valle de Aburrá y Suroeste. El Niño(A), La Niña(B), neutro(C).

Como se observa en la Figura 11 en la región del Valle de Aburrá estas correlaciones presentan valores similares y a medida que aumentan los meses de rezago aumenta dicha diferencia. Los años La Niña presentan co-

rrrelaciones negativas altas (-0.7) en el Oriente y Nordeste con los rezagos de 4 y 5 meses, respectivamente. Para el Valle de Aburrá en general se presentan correlaciones bajas, negativas para la lluvia y positivas para los registros de movimientos en masa. En los años neutros no se observa simetría entre las correlaciones de la lluvia y los registros de movimientos con el MEI.

3.2.3 Escala diaria. En la Figura 12 se presenta como ejemplo el ciclo anual diario de la lluvia y los movimientos en masa de acuerdo con la fase del ENSO para la región del Valle de Aburrá. Para los años El Niño (12A) se observan comportamientos similares a los descritos en las figuras anteriores, en lo que tiene que ver con la variación bimodal de la lluvia y los movimientos en masa. Para la región del Valle de Aburrá se observa que el pico de la lluvia en los periodos lluviosos (MAM y SON) no coincide con los picos máximos de los movimientos en masa, la mayor cantidad eventos se da luego de presentarse el pico máximo de lluvias (Figura 14), señalando la fuerte influencia de la lluvia antecedente en la ocurrencia de movimientos en masa. Para el ciclo anual a escala diaria de los años La Niña (12B) y neutros (12C) se presenta un pico principal en el mes de abril y mayo. En general para todas las subregiones se observa una bimodalidad en los años La Niña y neutros, el cual se pierde en los años La Niña.

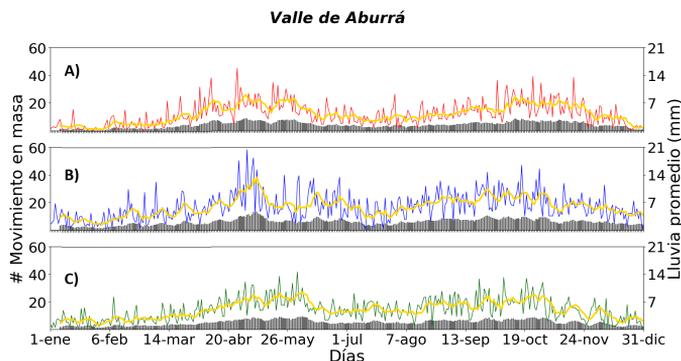


Figura 12: Variación diaria de la lluvia y los movimientos en masa en la subregión del Valle de Aburrá con las fases del ENSO, El Niño(A), La Niña(B), neutro(C). Las barras en color negro representan el número de movimientos en masa diarios registrados, y la línea en color amarillo la media móvil de 7 días de la precipitación.

4 Discusión

El ciclo mensual en el departamento de Antioquia, y en la mayoría de las subregiones, presentan un comportamiento bimodal característico de la región Andina de Colombia [29],[32], con valores máximos porcentuales de la lluvia en los meses de MAM y SON, y valores mínimos en el trimestre DEF y JJA [29],[33]. En las subregiones de Norte, Bajo Cauca y Urabá, al norte del departamento, el comportamiento bimodal no se observa, en estas regiones predominan valores altos de precipitación durante los meses de mayo-octubre generalmente, indicando un comportamiento de lluvia unimodal.

Este comportamiento de la lluvia se refleja en los registros de movimientos en masa del departamento, confirmando la fuerte influencia directa de la precipitación en la ocurrencia de movimientos en masa registrados, lo cual coincide con los resultados reportados por [7],[34] para el Valle de Aburrá y el departamento de Antioquia (Figura 13).

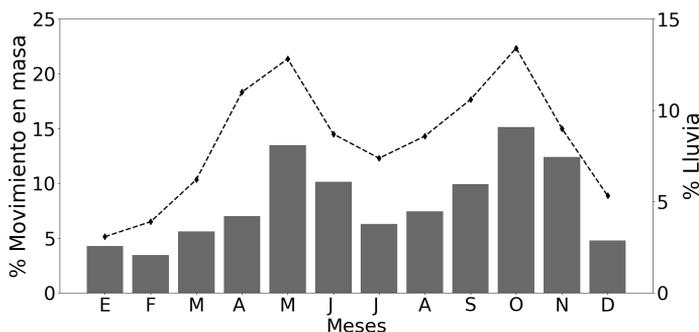


Figura 13: Variación mensual de la lluvia (línea no continua) y los movimientos en masa porcentual (barras) en el Valle de Aburrá.

Cuando la relación entre la precipitación y los registros de movimientos en masa se analiza a escala diaria, se observa que existe un desfase entre los valores máximos de registros de movimientos y los valores máximos de precipitación, donde el pico de movimientos es precedido por el pico de lluvia (Figura 14). Este efecto de rezago ha sido explicado por otros autores como el resultado de la lluvia antecedente y almacenamiento del agua en

el suelo [7], que depende de propiedades dominantes como las características hidráulicas y la succión [44] produciendo la reducción progresiva de la resistencia de los geomateriales [34]. Este rezago es mayor para el primer periodo de lluvias (MAM), lo cual posiblemente se debe a que al primer periodo de lluvia lo antecede tres meses en los que se presentan los valores más bajos de precipitación, mientras que al segundo periodo lo precede el trimestre de JJA donde la lluvia, aunque es menor, es más alta que en el trimestre DEF, y de esta forma no permite una mayor disipación de la presión de poros especialmente en suelos finos.

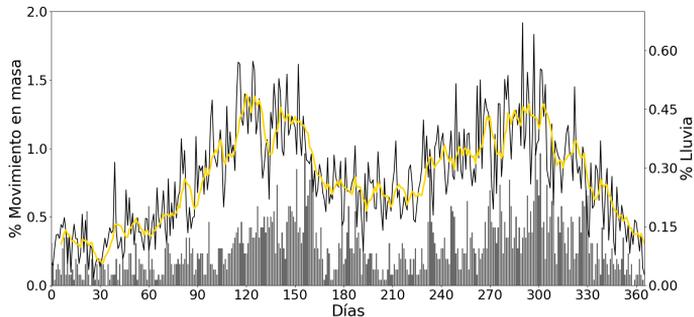


Figura 14: Variación diaria de la lluvia (línea negra continua) y los movimientos en masa porcentual (barras) en el Valle de Aburrá. La línea de color amarillo representa la media móvil de 7 días.

Existen diferencias entre las fases del fenómeno ENSO en el comportamiento de la lluvia y por lo tanto en los registros de movimientos en masa a la escala anual y diaria. En la fase de El Niño el comportamiento bimodal de la lluvia es más marcado, con periodos de transición fuertes, incluso en las subregiones del Norte y Bajo Cauca. Por su lado el comportamiento de la lluvia en la fase de La Niña tiene crestas con formas amplias, con picos de mayor amplitud (30% mayor que en la fase El Niño), lo que significa lluvia considerable y constante a lo largo del año, en cuanto a la precipitación mínima la fase de El Niño tiene los menores valores. La segunda temporada de lluvias registra mayores precipitaciones que la primera temporada [32],[33], principalmente durante la fase de La Niña, como resultado al acoplamiento de la ZCIT con la dinámica del Chorro del Chocó y sistemas convectivos

de mesoescala sobre la costa Pacífica, y el paso de las ondas tropicales del este durante el otoño y verano boreal [32]. Lo cual se refleja en el mayor registro de movimientos en masa.

Los resultados obtenidos para las regiones del departamento de Antioquia corroboran que el fenómeno del ENSO afecta las cantidades [14],[29] y modo de distribución de la lluvia, por ejemplo en la amplitud, [14] principalmente a escala anual y diaria, lo cual impacta directamente la ocurrencia de movimientos en masa en la región. Durante la fase La Niña los movimientos en masa son más frecuentes y se presentan a lo largo del año, mientras que en años El Niño se presentan especialmente en los meses de mayo y octubre, cuando se presentan los picos de lluvias.

Finalmente, se destaca que las regiones del norte del departamento, Bajo Cauca, Norte y Urabá, presentan un comportamiento diferente al resto del departamento, con una distribución de lluvias mensual de forma unimodal, que no correlaciona con los registros de movimientos en masa ni con el MEI, lo que señala que la ocurrencia de movimientos en masa en estas regiones se presenta por factores detonantes diferentes a los eventos de lluvia.

Aunque de acuerdo con los resultados la ocurrencia de movimientos en masa en el departamento de Antioquia responde a las condiciones de lluvia, es importante considerar que el registro de eventos de movimientos en masa por regiones presenta sesgos asociados a la sobreexposición a los medios de la región del Valle de Aburrá, y por lo tanto a un mayor número de registros. Esta condición puede reducirse considerando sólo los movimientos en masa con muertes asociadas, ya que dichos eventos independiente de la región son registrados en los medios. A nivel del departamento, el 9% de los movimientos en masa reportados presenta muertes asociadas. Aunque en la Figura 6 se muestra a la subregión del Valle de Aburrá con el mayor número de reportes de movimientos en masa, el porcentaje de eventos que ocasionan muertes es solo del 10 %, mientras que en la subregión Norte el valor asciende al 13 %.

5 Conclusiones

En el presente estudio se evalúa en la región central de los Andes colombianos la relación de la lluvia con los registros de movimientos en masa de acuerdo con el fenómeno ENSO para el período comprendido entre 1985 y 2016, a escala interanual, mensual y diaria.

A escala mensual los resultados señalan la influencia directa entre la ocurrencia de movimientos en masa con ciclo anual de la precipitación, evidenciado en un comportamiento bimodal para las regiones hacia el centro y sur del departamento de Antioquia con picos en los períodos de MAM y SON, y comportamiento unimodal para las regiones del norte del departamento, como resultado de la ZCIT y el Chorro del Chocó. Este ciclo anual es caracterizado por un mayor pico de lluvias durante el segundo periodo (SON) que explica el mayor registro de movimientos en masa en ese mismo periodo, como consecuencia del acoplamiento de la ZICT con el chorro del chocó y sistemas convectivos de mesoescala sobre la costa del Pacífico y el paso de las ondas tropicales del este [32].

A escala diaria se destaca para las regiones con un comportamiento bimodal, que los picos de lluvia anteceden a los picos de los movimientos en masa, lo cual señala la importancia de la lluvia antecedente en la ocurrencia de movimientos en masa y explica la mayor cantidad de movimientos en masa al final de los periodos de lluvia cuando se da inicio a la transición a un periodo seco.

A escala interanual domina la influencia del ENSO en el ciclo anual con una marcada mayor cantidad de movimientos en masa en los años La Niña que se presentan a lo largo del año, a diferencia de los años El Niño, donde, aunque se presentan movimientos en masa asociados a picos de lluvia a escala mensual, los valores se reducen con respecto a los años La Niña y años neutros, y además se concentran en los periodos de lluvias (MAM y SON) a diferencia del ciclo de los años La Niña, cuando se presentan a lo largo del año. Los resultados del presente estudio ayudan a entender el patrón espacial y temporal en la ocurrencia de movimientos en masa en los Andes Colombianos como paso inicial para la implementación de sistemas de alerta temprana por movimientos en masa, y herramienta fundamental para la reducción de pérdidas humanas por movimientos en masa desencadenados por lluvia.

Agradecimientos

Esta investigación es el producto final de la modalidad trabajo de grado para optar al título en el programa de Ingeniería Geológica en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín- Facultad de Minas, en ella participó como asesor el profesor Edier Aristizábal a quien agradezco sus sugerencias, correcciones y seguimiento constante.

Referencias

- [1] M. Dille, R. S. Chen, U. Deichmann, A. L. Lerner-Lam, and M. Arnold, “Natural Disaster Hotspots A Global Risk Analysis,” *The World Bank, Hazard Management Unit*, vol. 98, no. 5, 2005. 13
- [2] D. Petley, “Global patterns of loss of life from landslides.” *Geol Soc Am*, vol. 40, pp. 923–970, 2012. 13
- [3] C. Cred, “Natural disasters in 2017: Lower mortality, higher cost,” *Tech. Rep.* 50, 2018. [Online]. Available: <https://cred.be/sites/default/files/CredCrunch.pdf> 13
- [4] S. Sepúlveda and D. Petley, “Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean.” *Nat Hazards Earth Syst Sci*, no. 15, pp. 1821–1833, 2015. 13
- [5] D. J. Varnes, “Slope-stability problems of circum-Pacific region as related to mineral and energy resources,” in *Energy Resources of the Pacific Region*, 12th ed. AAPG Special Volumes, 1981, pp. 489–505. 13
- [6] S. M. Moreiras, “Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina,” *Landslides*, vol. 2, no. 1, pp. 53–59, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0046-4> 13, 17
- [7] H. A. Moreno, M. V. Vélez, J. D. Montoya, and R. L. Rhenals Garrido, “La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria,” *Revista EIA*, vol. 5, pp. 59–69, 2006. [Online]. Available: <http://revista.eia.edu.co/articulos5/art45.pdf> 13, 18, 34, 35
- [8] E. Aristizábal and J. Gómez, “Inventario de emergencias y desastres en el Valle De Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007,” *Gestión y Ambiente*, vol. 10, no. 2, pp.

- 17–30, 2008. [Online]. Available: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/1409/2022> 14
- [9] A. M. Ramos-Cañón, L. F. Prada-Sarmiento, M. G. Trujillo-Vela, J. P. Macías, and A. C. Santos-R, “Linear discriminant analysis to describe the relationship between rainfall and landslides in Bogotá, Colombia,” *Landslides*, vol. 13, no. 4, pp. 671–681, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0593-2> 14
- [10] R. Bell, J. Mayer, J. Pohl, S. Greiving, and T. Glade, *Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS): Monitoring, Modellierung, Implementierung [Integrative Early Warning Systems for Gravitational Mass Movements (ILEWS): Monitoring, Modeling, Implementation]*. Klartext-Verlag, 2010. 14
- [11] F. Guzzetti, S. Peruccacci, M. Rossi, and C. P. Stark, “Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe,” *Meteorology and atmospheric physics*, vol. 98, no. 3-4, pp. 239–267, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7> 14
- [12] J. Zêzere, T. Vaz, S. Pereira, S. C. Oliveira, R. Marques, and R. A. C. Garcia, “Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal : a state of the art,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 73, no. 6, pp. 2917–2936, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3672-0> 14
- [13] M. Melillo, M. T. Brunetti, S. Peruccacci, S. L. Gariano, A. Roccati, and F. Guzzetti, “A tool for the automatic calculation of rainfall thresholds for landslide occurrence,” *Environmental Modelling and Software*, vol. 105, pp. 230–243, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.024> 14
- [14] G. Poveda, D. M. Álvarez, and Ó. A. Rueda, “Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth’s most important biodiversity hotspots,” *Climate Dynamics*, vol. 36, no. 11-12, pp. 2233–2249, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y> 14, 17, 18, 36
- [15] O. D. Álvarez Villa, J. I. Vélez, and G. Poveda, “Improved long-term mean annual rainfall fields for colombia,” *International Journal of Climatology*, vol. 31, no. 14, pp. 2194–2212, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/joc.2232> 14, 17, 18
- [16] É. Aristizábal and S. Yokota, “Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá,” *Dyna*, vol. 73, no. 149, pp. 5–16, 2006. 15

- [17] Universidad del Rosario, “Boletín No. 1 ¿Cómo vamos en las regiones?” 2015. [Online]. Available: <http://www.urosario.edu.co/Home/Principal/boletines/Ediciones-OPIP-Regionales/Edicion01-Regiones/Como-vamos-en-las-regiones/> 15
- [18] L. Gómez Giraldo, D. C. Sanchez Zapata, D. Correa Gutiérrez, and J. D. Goyes Garzón, “El municipio y las fronteras interdepartamentales de Antioquia en las propuestas territoriales actuales.” *Historia y Sociedad*, no. 27, pp. 241–268, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15446/hys.n27.44653> 15
- [19] IPC, “Regiones,” 2017. [Online]. Available: <http://ipc.org.co/index.php/regiones/> 15
- [20] ALIANDES, “Diagnóstico socioeconómico de municipios productivos en el Magdalena Medio Colombiano,” 2001. [Online]. Available: <http://www.angelfire.com/ia2/ingenieriaagricola/madalenamedio.htm> 15
- [21] CCOA, “Oriente Comercial Digital,” 2018. [Online]. Available: <https://www.orientecomercialdigital.com/sitio/actividades.php> 15
- [22] E. M. González Agudelo, “La Universidad de Antioquia y su pertinencia en la región del Suroeste antioqueño,” pp. 1–16, 2011. [Online]. Available: <http://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/4a427876-83f0-4fb8-80f0-5b081d487fe6/2.+Pertinencia+de+la+UdeA+en+Suroeste.pdf?MOD=AJPERES> 15
- [23] G. Girardo Buitrago, “Proyecto sistema nacional de capacitación municipal,” 2002. 16
- [24] Gobernación de Antioquia, “Regiones de Antioquia,” 2018. [Online]. Available: <http://antioquia.gov.co/index.php/antioquia/regiones> 16
- [25] —, “Contexto Socioeconómico y de competitividad de Antioquia,” 2007. 16
- [26] INGEOMINAS, “Mapa geológico del Departamento de Antioquia,” Tech. Rep., 2001. 16
- [27] F. Cediél and R. P. Shaw, *Geology and tectonics of Northwestern South America, the Pacific, Caribbean, Andean conjunction*, F. Cediél and R. P. Shaw, Eds. Springer, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76131-2> 16
- [28] G. Poveda, “Mixed memory, (non) Hurst effect, and maximum entropy of rainfall in the tropical Andes,” *Advances in Water Resources*, vol. 34, no. 2, pp. 243–256, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.11.007> 17

- [29] G. Poveda, O. J. Mesa, P. A. Agudelo, J. F. Álvarez, P. A. Arias, H. A. Moreno, L. F. Salazar, and V. G. Toro, “Diagnóstico del ciclo diurno de precipitación en los Andes tropicales de Colombia,” 2002. 17, 18, 34, 36
- [30] G. Poveda and O. Mesa, “On the existence of lloro (the rainiest locality on earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low level jet,” *Geophysical Research Letters*, vol. 27, pp. 1675–1678, 06 2000. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/1999GL006091> 17, 18
- [31] G. Poveda, “Escala de información, escala de fluctuación y entropía de las lluvias en el Valle de Aburrá, Colombia,” *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias exactas, físicas y naturales*, vol. 33, no. 128, pp. 339–356, 2009. 17
- [32] —, “La Hidroclimatología De Colombia : Una Síntesis Desde La Escala Inter-Decadal Hasta La Escala Diurna,” *Ciencias de la Tierra*, pp. 201–222, 2004. 17, 18, 34, 35, 36, 37
- [33] M. Bedoya, “Coherent annual and (shifting-phase) diurnal cycles of rainfall on a region of Colombia ’ s Central Andes,” *International Journal of Climatology*, 2008. 18, 34, 35
- [34] E. Aristizábal, T. González, J. D. Montoya, J. I. Vélez, H. Martínez, and A. Guerra, “Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia,” *Revista EIA*, pp. 95–111, 2011. 18, 34, 35
- [35] C. Polanco and G. B. Sanmiguel, “Compilación y análisis de los desastres naturales reportados en el departamento de Antioquia exceptuando los municipios del Valle de Aburrá,” *Ingeniería y ciencia*, vol. 1, no. 1, pp. 45–65, 2005. 18
- [36] C. Velázquez and F. Ramírez, “Los desastres en Colombia. Una visión desde Desinventar, OSSO,” pp. 60–61, 2000. 18
- [37] J. Mendoza Ramírez and E. Aristizábal, “Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales . Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia , Antioquia,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, no. 26, pp. 173–206, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.7> 18
- [38] S. Segoni, L. Picciullo, and S. L. Gariano, “A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence,” *Landslides*, no. October 2017, pp. 1–19, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4> 19

- [39] NOAA, “MEI Index,” 2018. [Online]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei.old/table.html> 20, 21
- [40] —, “Multivariate ENSO Index (MEI),” 2018. [Online]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/> 21
- [41] Golden Gate Weather Services, “El Niño and La Niña Years and Intensities,” 2018. [Online]. Available: <http://ggweather.com/enso/oni.htm> 21
- [42] The Florida State University, “ENSO Index According to JMA SSTA (1868-present),” 2016. [Online]. Available: <http://coaps.fsu.edu/jma> 21
- [43] J. Null, “Años El Niño - La Niña,” 2004. [Online]. Available: <http://www-atmo.at.fcen.uba.ar/enso/consenso.htm> 21
- [44] E. Aristizábal, H. Martínez, and J. I. I. Vélez, “Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias,” *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, vol. 34, no. 53, pp. 209–227, 2010. 35