

Evaluación de la influencia de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en la
afectación de infraestructura civil por ocurrencia de movimientos en masa en la región
nororiental de Colombia.

Juan Diego León Jaimes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Sandra Rocío Villamizar Amaya, Ph.D.

Profesor Asistente EICI

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo, de manera muy especial, a mis padres que fueron mi principal motor para lograr este éxito; los valores que me han enseñado y el apoyo que me han brindado me han dado la fortaleza para cumplir mis metas.

A mis amigos que, desinteresadamente, me compartieron sus conocimientos y me brindaron su interés y apoyo durante este proceso.

Juan Diego León Jaimes

Agradecimientos

Quiero extender mi más profundo agradecimiento a mi directora de tesis la profesora Sandra Rocío Villamizar; su orientación, paciencia, comprensión y experiencia fueron determinantes para la realización de este trabajo.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por brindarme las herramientas para crecer académica y personalmente. La formación que recibí potenció mis habilidades para la finalización exitosa de mi tesis.

Al IDEAM, SGC, UNGRD, DesInventar; la información publicada en sus bases de datos permitió el desarrollo exitoso de este trabajo.

Juan Diego León Jaimes

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos.....	19
1.1 Objetivo General.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Marco Teórico.....	20
2.1 Fenómeno de oscilación del sur (ENOS Canónico y Modoki).....	20
2.1.1 ENOS Canónico.....	20
2.1.2 ENOS Modoki	25
2.1.3 Teleconexiones	27
2.1.3.1 El Niño Canónico.....	27
2.1.3.2 La Niña Canónica.	28
2.1.3.3 El Niño Modoki.	28
2.1.3.4 La Niña Modoki.....	28
2.2 Bases de datos institucionales de reportes de eventos de movimientos en masa y otros desastres naturales	30
2.2.1 Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA).....	30
2.2.1.1 Inventario de movimientos en masa	30
2.2.1.2 Catálogo de movimientos en masa.	31
2.2.2 Consolidado anual de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD)	31

2.2.3 DesInventar	32
2.3 Anomalías de Precipitación	33
2.3.1 Índice de Precipitación (IP)	33
3. Metodología	35
3.1 Fase 1: Identificación de la afectación histórica de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en los patrones de precipitación en el departamento de Santander.....	36
3.1.1 Selección de los años con ocurrencias de La Niña Canónica y La Niña Modoki.	36
3.1.1.1 Indicadores.....	36
3.1.2 Descarga, procesamiento e imputación de estaciones de precipitación seleccionadas.....	37
3.1.2.1 Descarga de Estaciones y procesamiento de información.	37
3.1.2.2 Imputación de datos de precipitación para estaciones seleccionadas.	38
4.1.3 Series y anomalías de precipitación.....	39
3.2 Fase 2: Caracterización espacial y temporal de los eventos de movimientos en masa reportados con bases de datos institucionales para el departamento de Santander.	40
3.3 Fase 3: Establecimiento de patrones espaciotemporales de correlación entre los movimientos en masa y series históricas de precipitación para determinar el impacto de la fase fría del ENOS sobre la infraestructura civil del departamento.	41
4. Resultados.....	42
4.1 Impacto de la fase La Niña en las precipitaciones del departamento de Santander.	42
4.1.1 Patrones de Precipitación en Santander.	42
4.1.2 Anomalías de precipitación.....	44
4.1.3 Rezago.....	49

4.2 Caracterización espacio temporal de la afectación a infraestructura civil por movimientos en masa en Santander.....	53
4.3 Patrones espaciotemporales entre IP y afectaciones a la infraestructura civil.....	59
5. Discusión.....	63
6. Conclusiones.....	66
7. Recomendaciones	68
Referencias Bibliográficas	69
Apéndices.....	85

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Indicadores ENSO	24
Tabla 2. Interpretación del índice de precipitación (IP).	35
Tabla 3. Años en los que se presentó el fenómeno de La Niña Canónica y Modoki.	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Dinámicas de las anomalías de la circulación de Walter durante los fenómenos del EL Niño y La Niña.....	21
Figura 2. Mapa de localización de boyas del sistema TAO-TRITON.....	22
Figura 3. Regiones donde se determinan los indicadores ENOS.....	23
Figura 4 Dinámica ENOS Modoki.	26
Figura 5. Regiones empleadas para determinar EMI.....	27
Figura 6. Teleconexiones a nivel global del ENOS.....	29
Figura 7. Valores de los índices ONI y EMI para la ventana de tiempo junio 1998 – mayo 2023.	37
Figura 8. Estaciones IDEAM (136) con datos de precipitación para la ventana de tiempo.	39
Figura 9. Superficies de precipitación promedio multianual y mensual en el departamento de Santander para la ventana 1998 - 2023.	43
Figura 10. Promedios Mensuales de precipitación para estaciones seleccionadas.	44
Figura 11. Número de estaciones con IP>120% en la escala anual.....	47
Figura 12. Número de estaciones con IP>120% en la escala mensual.	48
Figura 13. Promedio de rezagos de precipitación anómala positiva por La Niña en Santander..	51
Figura 14. Clasificación de Movimientos en masa en Santander (1998 – 2023) ocurridos por precipitación.....	54
Figura 15. Ocurrencia espaciotemporal de los movimientos en masa causados por precipitación (1998-2023).....	55

Figura 16. Afectaciones a infraestructura civil por movimientos en masa a causa de precipitación.
..... 56

Figura 17. Distribución espacial mensual de los Movimiento en masa ocurridos en años La Niña.
..... 58

Figura 18. Total de afectaciones mensuales a infraestructura. 59

Figura 19. Correlaciones anuales entre IP promedio, movimientos en masa y afectaciones a
infraestructura civil (vías, acueductos y viviendas)..... 60

Figura 20. Correlaciones mensuales entre IP promedio, movimientos en masa y afectaciones a
infraestructura civil (vías, acueductos y viviendas) en para diciembre (mes seco) y abril (mes
lluvioso). 61

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. ENOS Indicadores	85
Apéndice A1. ONI	85
Apéndice A2. EMI	85
Apéndice B. Tablas Resumen	85
Apéndice C. Base de Datos Movimientos en Masa	85
Apéndice C1. Registro Total.....	85
Apéndice C2. Registro Precipitación	85
Apéndice D. Estaciones	85
Apéndice D1. Localización Estaciones (Imágenes).....	85
Apéndice D2. Estaciones Seleccionadas.....	85
Apéndice E. IP- Anomalías.....	85
Apéndice E1. Mapas IP años La Niña	85
Apéndice E2. Anomalías	85
Apéndice F. Rezago	85
Apéndice F1. Mapas Rezago	85
Apéndice G. Movimientos en Masa.....	85
Apéndice G1. Movimientos en masa totales.....	85
Apéndice G2. Movimientos en masa precipitaciones.....	85
Apéndice G3. Localización Movimientos en masa afectaciones.....	85

INFLUENCIA DEL ENOS EN LA AFECTACION DE INFRAESTRUCTURA CIVIL POR
OCURRENCIA DE MOVIMIENTOS EN MASA EN SANTANDER 11

Apéndice H. Correlaciones 85
Apéndice I. Mapas 85

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

Glosario

Anomalía de precipitación: indica la desviación de la precipitación con respecto a los promedios históricos para un periodo y un lugar determinado (NOAA, 2024b).

Caída de rocas: son movimientos en masa que consisten en la caída de bloques de rocas y piedras por acción de la gravedad a lo largo de taludes de gran inclinación (Corpoboyacá, 2020; IDIGER, 2024).

Circulación de Walker: hace mención de la circulación que ocurre de este a oeste del océano Pacífico tropical; donde en el oeste se eleva el aire de las regiones más cálidas del océano y desciende hacia el este donde se concentran las zonas más frías del océano (BoM, 2024; Di Liberto, 2014).

Deslizamientos de tierra: son movimientos en masa que consisten en la caída de tierra, vegetación y piedras que descienden por un talud de gran inclinación. Pueden ser de dos formas, rotacionales (la masa deslizada tiende a auto estabilizarse) o gravitacionales (progresa hacia abajo del talud/ladera) (Corpoboyacá, 2020).

El Niño-Oscilación del sur (ENOS): o ENSO en inglés, es un patrón climatológico que ocurre en el Pacífico ecuatorial, que presenta dos fases, una de calentamiento (El Niño) y otra de enfriamiento (La Niña) (NOAA, 2023a).

Flujos: son movimientos en masa que consisten en partículas de suelo, piedras y material vegetal que se desplaza entre velocidades muy lentas a muy rápidas y que pueden contar con presencia o ausencia de agua (IDIGER, 2024).

Movimientos en masa: es el proceso por el cual una cantidad de material compuesto por rocas, suelos, detritos y vegetación se desplaza por un talud por acción de la gravedad. Se pueden clasificar en cinco tipos básicos de movimientos: caída, volcamiento, deslizamiento, flujos y propagación lateral. La causa de que de los movimientos en masa ocurran pueden estar determinadas por las lluvias, la pendiente del terreno, la cobertura del suelo, las características de los materiales, la actividad tectónica y los factores antrópicos (UNGRD, 2020).

Precipitación: es la caída de partículas de agua, ya sea de forma líquida o sólida, que se originan en la atmósfera y llegan hasta la superficie. Todas las formas de precipitación se miden sobre la base de una columna de agua midiéndola en milímetros (mm) de lluvia. Un milímetro de precipitación es la altura que alcanza el agua sobre una superficie, que equivale a un litro de agua por metro cuadrado de superficie. La precipitación se estudia a partir de sus valores totales y promedios (Benavides, 2020).

Teleconexiones: es la conexión existente entre los cambios en la circulación atmosférica que se presenta en lugares muy distantes del planeta (NOAA, 2024c).

Resumen

Título: Evaluación de la influencia de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en la afectación de infraestructura civil por ocurrencia de movimientos en masa en la región nororiental de Colombia.*

Autor: Juan Diego León Jaimes**

Palabras Clave: La Niña, IP, Anomalía de Precipitación, Movimientos en masa, Infraestructura Civil.

Descripción: En los últimos 30 años se ha reconocido el fuerte impacto que tiene el Fenómeno de la Oscilación del Sur (ENOS) en el clima global. Dependiendo de la fase (El Niño o La Niña) y de las teleconexiones, el ENOS afecta los patrones de precipitación y temperatura, exacerbando las sequías o inundaciones lo que ha generado afectaciones a los ecosistemas naturales y antrópicos. A la fecha no existe una caracterización clara de las afectaciones históricas del ENOS en Colombia. Este estudio contribuye a esta caracterización usando el departamento de Santander como caso típico de la región Andina Colombiana. Específicamente, se analiza el efecto de La Niña en la infraestructura del Departamento. Se identificó la afectación específica de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en los patrones de precipitación, se caracterizó espacial y temporalmente los eventos de movimientos en masa reportados por bases de datos institucionales y se establecieron patrones espaciotemporales de correlación entre los movimientos en masa y series históricas de precipitación. El análisis de las anomalías de precipitación por medio del índice de precipitación (IP) a nivel anual, confirma el efecto de La Niña en las anomalías positivas de precipitación pues, más del 20% de las estaciones seleccionadas registró excesos de precipitación durante los años de ocurrencia del fenómeno, distribuyéndose sin un patrón espacial claro en diferentes regiones del Departamento. A nivel mensual, el análisis es un poco más complejo pues se evidencia que, además del ENOS, existen otros fenómenos climáticos que producen anomalías positivas de precipitación. Se identificaron 1676 eventos de movimientos en masa que ocurrieron en el Departamento de los cuales 363 fueron por consecuencia de la precipitación; la distribución de estos eventos se concentró hacia la zona nororiental, donde la cordillera Oriental presenta una topografía más escarpada y se concentra la mayor concentración demográfica del departamento. La correlación entre el índice de precipitación (IP) y afectaciones a la infraestructura civil a nivel de promedios anuales, evidencia un mejor ajuste cuando solo se evalúan las afectaciones registradas en los años La Niña en comparación con el registro total, cumpliéndose para IP (fracción) vs. Número de Movimientos en Masa ($R^2=0.47$ vs. $R^2=0.01$), IP (fracción) vs Afectaciones a vías ($R^2=0.45$ vs. $R^2=0.03$), IP (fracción) vs Afectaciones a Acueductos ($R^2=0.44$ vs. $R^2=0.30$). Este estudio contribuye al mejor entendimiento de los efectos de La Niña en el Departamento, ya que ayudó a conocer los patrones de precipitación y cómo estos cambian con la presencia del fenómeno, espacial y temporalmente; a su vez, permitió confirmar el papel de las anomalías positivas de precipitación en la afectación de infraestructura civil. Los resultados de este estudio soportan la necesidad de mantener sistemas de monitoreo de alta calidad que contribuyan a la comprensión de los fenómenos naturales y antrópicos que afectan el territorio y ofrecen información valiosa para la incorporación en sistemas institucionales de planificación, alertas tempranas, de manejo y mitigación del riesgo.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil.
Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya.

Abstract

Title: Evaluation of the influence of the cold phase of the ENSO (Canonical and Modoki) in the affectation of civil infrastructure due to mass movements in the northeastern region of Colombia.*

Author: Juan Diego León Jaimes**

Key Words: La Niña, IP, Precipitation Anomaly, Mass Movements, Civil Infrastructure.

Description: In the last 30 years, the strong impact of the Southern Oscillation Phenomenon (ENSO) on the global climate has been recognized. Depending on the phase (El Niño or La Niña) and the teleconnections, ENSO affects precipitation and temperature patterns, exacerbating droughts or floods, which has affected natural and anthropic ecosystems. To date, there is no clear characterization of the historical effects of ENSO in Colombia. This study contributes to this characterization using the department of Santander as a typical case of the Colombian Andean region. Specifically, it analyzes the effect of La Niña on the Department's infrastructure. The specific effect of the cold phase of ENSO (Canonical and Modoki) on precipitation patterns was identified, the mass movement events reported by institutional databases were characterized spatially and temporally, and spatiotemporal patterns of correlation between mass movements and historical precipitation series were established. The analysis of precipitation anomalies by means of the precipitation index (PI) at the annual level confirms the effect of La Niña on the positive precipitation anomalies, since more than 20% of the selected stations recorded excess precipitation during the years of occurrence of the phenomenon, distributed without a clear spatial pattern in different regions of the Department. At the monthly level, the analysis is a little more complex because it is evident that, in addition to ENSO, there are other climatic phenomena that produce positive precipitation anomalies. A total of 1676 mass movement events were identified in the Department, of which 363 were due to precipitation; the distribution of these events was concentrated in the northeastern zone, where the Eastern Cordillera has a steeper topography and where the greatest demographic concentration of the Department is concentrated. The correlation between the precipitation index (PI) and damage to civil infrastructure at the level of annual averages shows a better fit when only the damage recorded in La Niña years is evaluated in comparison with the total record, being fulfilled for PI (fraction) vs. Number of Mass Movements ($R^2=0.47$ vs. $R^2=0.01$), IP (fraction) vs Affectations to roads ($R^2=0.45$ vs. $R^2=0.03$), IP (fraction) vs Affectations to Aqueducts ($R^2=0.44$ vs. $R^2=0.30$). This study contributes to a better understanding of the effects of La Niña in the Department, since it helped to know the precipitation patterns and how they change with the presence of the phenomenon, spatially and temporally; at the same time, it allowed confirming the role of positive precipitation anomalies in the affectation of civil infrastructure. The results of this study support the need to maintain high quality monitoring systems that contribute to the understanding of natural and anthropic phenomena that affect the territory and offer valuable information for incorporation into institutional systems for planning, early warning, risk management and mitigation.

* Degree Work

** School of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering.
Director: Sandra Roció Villamizar Amaya.

Introducción

La infraestructura civil construida (vías, puentes, embalses, viviendas, sistemas de abastecimiento y saneamiento, etc.) proporciona servicios que mejoran la calidad de vida de las personas beneficiadas por dichas obras. No obstante, los fenómenos extremos de clima como el ENOS (Fenómeno El Niño Oscilación del Sur) inducen la ocurrencia de desastres naturales (inundaciones, deslizamientos de tierra y rocas, avenidas torrenciales, incendios, sequías, etc.) que, en muchos casos, resultan en daños o pérdidas totales de estas obras, afectando los servicios que estas infraestructuras proveen (Catalayud & Camacho, 2024).

A nivel global no existe un cuerpo de literatura robusto sobre la afectación del ENOS en el ambiente construido (K. Kim et al., 2021) aunque sí existen diferentes reportes institucionales que discuten la temática del riesgo y consecuencias ante diferentes desastres naturales (incluido el ENOS), y la resiliencia que se debe alcanzar (CEPAL, 2020). Para el caso de Perú (Ríos-Serrano, 2020) y Estados Unidos (K. Kim et al., 2021) existen estudios particulares que discuten aspectos como qué tipo de infraestructura se podía ver más afectada ante presencia del ENOS y los reportes de las afectaciones durante el ENOS en eventos específicos en la región de Lambayeque en Perú.

Para Colombia, la situación es similar. Existen documentos que reportan las afectaciones que el ENOS ha tenido en las infraestructuras en el caso de eventos específicos (Campos García et al., 2011) (CEPAL et al., 2013) (Fernández Lopera et al., 2016), pero no hay literatura científica que consolide esta información. Durante los dos últimos fenómenos de intensidad fuerte de El

Niño (2015-2016) y La Niña (2010-2011) se han reportado afectaciones en diferentes infraestructuras que han resultado en un costo al país de alrededor de \$11.2 billones de pesos de los cuales \$3.200.000.000 millones de pesos fueron para afrontar los gastos en la infraestructura vial del país (CEPAL et al., 2013).

La localización geográfica de Colombia y el hecho de que la mayoría de su población se encuentra asentada sobre los Andes (cordilleras Occidental, Central y Oriental) se traducen en un muy alto riesgo para la infraestructura clave del país ante los eventos climáticos extremos provocados por el ENOS (Garcia-Delgado et al., 2022). Los paisajes montañosos escarpados del macizo de Santander (cordillera Oriental) con su alta actividad tectónica y la confluencia de numerosas fallas (Falla de Bucaramanga, Falla del Río Suratá, Falla de Lebrija etc.) hacen del departamento de Santander una zona de alta probabilidad de deslizamientos que, ante la Influencia del ENOS, tendrán mayor posibilidad de ocurrencia generando mayores impactos sobre las infraestructuras.

Aunque existen diferentes mecanismos por los que el clima extremo puede afectar las infraestructuras, este trabajo se enfoca en el análisis de la influencia de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en la ocurrencia de movimientos en masa, específicamente para el departamento de Santander, por ser un área representativa de las condiciones de gradiente climático, geomorfológico y de ocupación del territorio de Colombia. Para el análisis se escogió la ventana temporal entre junio de 1998 y mayo de 2023, ya que se cuenta con información pertinente relacionada con la ocurrencia de eventos y sus impactos, como son la base de datos del

Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (SGC, 2022), el consolidado anual de emergencias de la Unidad de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) (UNGRD, 2024) y el catálogo del Sistema de Inventario de Desastres de DesInventar (Corporación OSSO, 2020). Esta información, en conjunto con registros históricos de precipitación en el Departamento, permitió: (1) identificar las afectaciones históricas específicas de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en los patrones de precipitación del departamento; (2) caracterizar espacial y temporalmente los eventos de movimientos en masa reportados de la base de datos institucionales; y (3) establecer patrones espaciotemporales de correlación entre los movimientos en masa y series históricas de anomalías de precipitación. Se espera que los resultados de este trabajo puedan servir de apoyo para estructurar diferentes sistemas de valoración, mitigación y alertas tempranas ante estos desastres.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la influencia de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en la afectación de la infraestructura civil por ocurrencia de movimientos en masa en la región nororiental de Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar la afectación histórica específica de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en los patrones de precipitación en el departamento de Santander.

Caracterizar espacial y temporalmente los eventos de movimientos en masa reportados en bases de datos institucionales para el departamento de Santander.

Establecer patrones espaciotemporales de correlación entre los movimientos en masa y series históricas de precipitación para determinar el impacto del ENOS sobre la infraestructura civil del departamento.

2. Marco Teórico

2.1 Fenómeno de oscilación del sur (ENOS Canónico y Modoki)

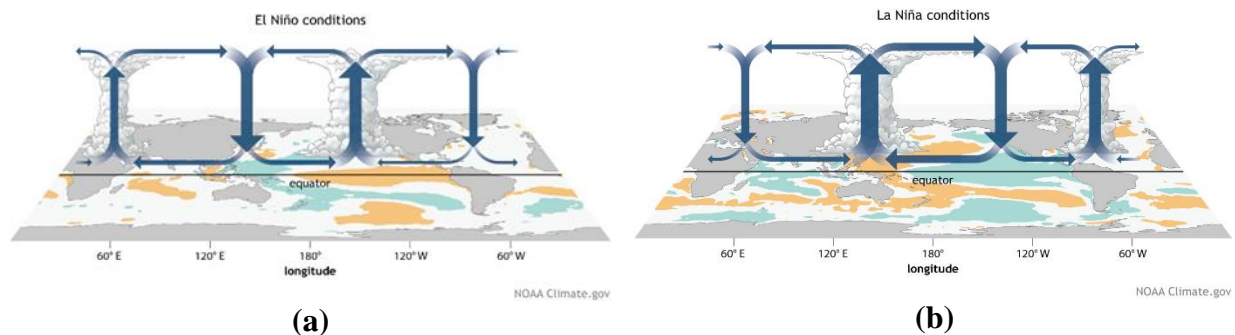
2.1.1 ENOS Canónico

Se define como un fenómeno de variabilidad climática producto de la interacción oceánica y atmosférica en la zona tropical del Pacífico que produce fuertes perturbaciones en la circulación atmosférica global, resultando en afectaciones ambientales y socioeconómicas en casi todo el planeta (NOAA, 2023a). Se asocia el ENOS a la ocurrencia de aguas más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) de lo normal en el Pacífico tropical central y oriental frente a las costas del norte del Perú. Estas alteraciones se asocian al desplazamiento del núcleo de convección profunda del océano Pacífico tropical (del oeste al centro) y al debilitamiento de los vientos alisios que fluyen típicamente de este a oeste (Bocanegra, 2014); el fenómeno implica, entonces, variaciones en las temperaturas del océano y en la presión atmosférica, alterando a su vez los patrones de precipitación definidos por las células de circulación de aire Walker. Durante El Niño se presenta aumentos notorios en las temperaturas del océano sobre el Pacífico tropical, repercutiendo en el descenso de la velocidad de los vientos alisios que en dados casos invierten su dirección, llevando aguas cálidas a la costa Sudamericana; la circulación de aire de Walker es arrastrada presentando hundimientos anómalos de las condiciones de aire húmedo sobre América del Sur repercutiendo en menos precipitaciones, mientras el movimiento ascendente de la circulación de aire de Walker sobre el Océano Pacífico central aumenta las precipitaciones (Figura 1 (a)). En tanto durante La Niña, que es la fase contraria, se presentan descensos significativos en las temperaturas del océano sobre el Pacífico tropical oriental y un incremento en la fuerza de los vientos alisios; la circulación

de aire de Walker es acelerada presentando ascensos anómalos de aire cálido y húmedo sobre América del Sur aumentando la precipitación, mientras el movimiento descendente de la circulación de aire de Walker producto de las bajas temperaturas del Océano sobre el Pacífico tropical oriental resulta en menor precipitación (Figura 1 (b)) (Fernández Lopera et al., 2016), (Guimarães Nobre et al., 2019), (Pabón Caicedo & Montealegre Bocanegra, 2017), (Di Liberto, 2014),(Climate.gov, 2016).

Figura 1

Dinámicas de las anomalías de la circulación de Walter durante los fenómenos del EL Niño y La Niña.



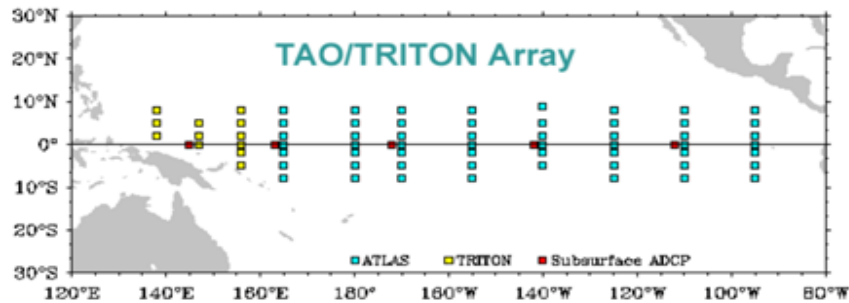
Nota. El Niño conditions (Condiciones El Niño) (a), La Niña conditions (Condiciones La Niña). (b). Tomado de The Walker Circulation: ENOS's atmospheric buddy, por NOAA Climate.gov de Fiona Martin, 2021, NOAA Climate.gov.

El sistema dedicado a realizar las mediciones de variables relevantes en aire (temperatura, velocidad del viento, presión atmosférica, etc.) y en la columna de agua (temperatura, velocidad de las corrientes, etc.) es denominado TAO-TRITON. Consiste en un sistema de boyas sobre el

Pacífico ecuatorial (Figura 2), administrado por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la Agencia Japonesa para la Ciencia y la Tecnología Marinas y Terrestres (JAMSTEC) (NOAA, 2024e). Se miden siete variables atmosféricas (velocidad y dirección del viento, humedad relativa, precipitación, radiación de onda corta y onda larga, y presión barométrica) y siete variables oceánicas (temperatura superficial -SST- y subsuperficial, salinidad, presión hidrostática, velocidad y dirección de la corriente oceánica y rumbo) (NOAA, 2024d; US Department of Commerce, 2016).

Figura 2.

Mapa de localización de boyas del sistema TAO-TRITON

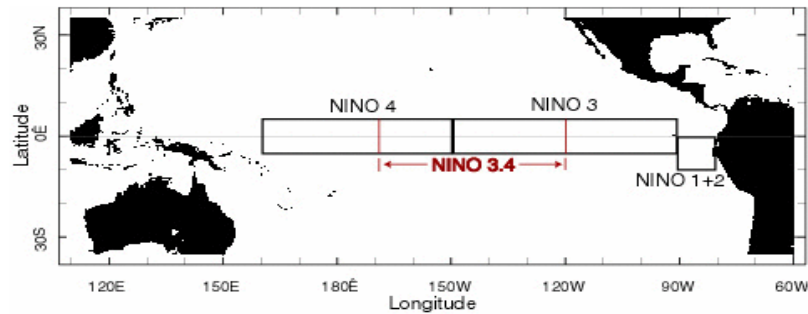


Nota. Tomado de TAO/TRITON Mapa | Conjunto global de boyas amarradas tropicales. Global Tropical Moored Buoy Array (GT MBA). <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/taotriton-map>

Las anomalías relacionadas con los indicadores del ENOS se miden en cuatro regiones a lo largo del pacífico tropical (Figura 3). Se ha propuesto una serie de indicadores de la ocurrencia del fenómeno que se basan en una única variable o la combinación de estas (NOAA, 2023a). La Tabla 1 muestra los diferentes indicadores utilizados para determinar la ocurrencia del ENOS Canónico.

Figura 3

Regiones donde se determinan los indicadores ENOS.



Nota. Tomado de El Niño/Southern Oscillation (ENSO) undefined.

<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/>

El índice del Niño Oceánico (ONI) es el principal insumo usado por la NOAA para monitorear el componente oceánico del ENOS. Se calcula analizando las anomalías de SST en la región Niño 3.4. Se considera que existe anomalía si se calcula una diferencia mayor a 0.5 °C entre promedios móviles de tres meses y sus correspondientes promedios históricos. La ocurrencia del fenómeno se declara cuando ocurren 5 periodos consecutivos de anomalía; es decir, cuando se supera el umbral de $\geq +0.5$ °C durante 5 periodos consecutivos de la media móvil de tres meses para el caso de El Niño y <-0.5 °C para el caso de La Niña (NOAA, 2023b) (NOAA, 2024a). El Apéndice A1 muestra la ocurrencia de fenómenos El Niño o La Niña durante el período 1950 – 2023, que es el registro histórico completo, usando el indicador ONI (Center, 2024). Esta clasificación de ocurrencias del Fenómeno se denomina ENOS Canónico.

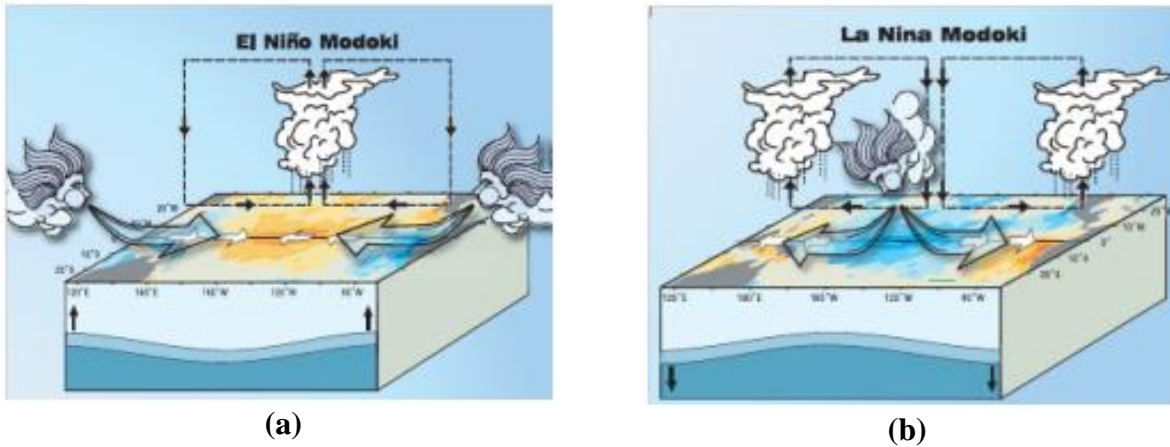
Tabla 1*Indicadores ENSO.*

ÍNDICE	DEFINICIÓN
ÍNDICE TRANS-NIÑO (TNI)	Indica la anomalía de temperatura del agua superficial del océano (SST) entre NIÑO 4 y NIÑO 1+2.
ÍNDICE DE MODO DIPOLO DEL OCEANO ÍNDICO (IODMI)	Indica la anomalía de SST entre el oeste (50°E–70°E, 10°S–10°N) y el sureste (90°E–110°E, 10°S a ecuador) del Océano Índico tropical.
ÍNDICE DE MODO DIPOLO SUBTROPICAL (SDI)	Indica la anomalía de SST entre el oeste (50°E – 70°E, 10°S - 10°N) y el sureste (90°E-110°E, 10°S a ecuador) del Océano Índico tropical.
ÍNDICE DEL NIÑO OCEÁNICO (ONI)	Indica la anomalía de SST en la región 3.4 para el monitoreo, evaluación y predicción del ENOS.
ÍNDICE MULTIVARIADO ENSO (MEI – MEL.V2)	Indica la anomalía usando 5 variables: la presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, SST, temperatura del aire en la superficie, y la fracción de nubosidad total del cielo sobre el Pacífico tropical (30°S-30°N y 100°E-70°W).
ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR (SOI)	Indica la anomalía mediante el cálculo de diferencias de presión atmosférica entre Tahití y Darwin (Australia).

Nota. La tabla muestra la definición de los indicadores ENOS más utilizados. Adaptado por el autor a partir de El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11). <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>.

2.1.2 ENOS Modoki

Se define como un fenómeno de interacción oceánica y atmosférica que se evidencia en anomalías cálidas/frías en el Pacífico Central; al igual que el ENOS Canónico, produce fuertes perturbaciones que desencadenan en afectaciones socioeconómicas a nivel global (Liang et al., 2021), (Ashok et al., 2007), (Beniche et al., 2024). El término Modoki proviene del japonés y significa “iguales pero diferentes” y fue introducido por Toshio Yamagata en el año 2004 para explicar las condiciones anormales que se producían en Japón en ese año (Ashok et al., 2007). Durante El Niño Modoki se crea una zona de baja presión sobre el Pacífico Central que produce la interrupción de la circulación de Walker. Los vientos y las corrientes oceánicas fluyen desde las zonas de mayor presión y menor temperatura, localizadas cerca de las plataformas continentales de Suramérica y Australia, hacia la zona de baja presión; estas aguas desplazadas son remplazadas por aguas más frías del interior del océano, mientras que en el Pacífico central se concentran las aguas más cálidas. En esta fase ocurre mayor precipitación sobre esta zona del Pacífico central mientras que en Australia y Suramérica se presentan sequías (Figura 4 (a)) (Ashok et al., 2007), (Zeta Axis, 2023), (JAMSTEC, 2012). La Niña Modoki desencadena el proceso contrario; se crea una zona de alta presión en el Pacífico central y zonas de baja presión hacia Australia y Suramérica. Las aguas cálidas del Pacífico central son desplazadas por la fuerza de los vientos a ambas direcciones del Pacífico y son remplazadas por aguas frías provenientes del interior del océano. En esta fase se reducen las precipitaciones en el Pacífico central mientras que se presenta aumento de estas hacia las plataformas continentales del Pacífico tropical (Figura 4 (b)) (Ashok et al., 2007), (Zeta Axis, 2023), (JAMSTEC, 2012).

Figura 4*Dinámica ENOS Modoki.*

Nota. El Niño Modoki (a), (b) La Niña Modoki (b). Tomado de

Investigación sobre la predicción del clima en latitudes bajas | JAMSTEC.

https://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/e/elnmmodoki/about_elnm.html

El Niño Modoki tiene anomalías positivas de SST en el Pacífico central y anomalías negativas en el este y oeste; la Niña Modoki se caracteriza por presentar anomalías de enfriamiento (negativas) en el Pacífico central y anomalías positivas de SST en el este y oeste (Ashok et al., 2007) (JAMSTEC, 2012) (Weng et al., 2009). Para la identificación de los eventos ENOS Modoki se utiliza el índice EMI, formulado por (Ashok et al., 2007) de la siguiente manera:

Ecuación 1

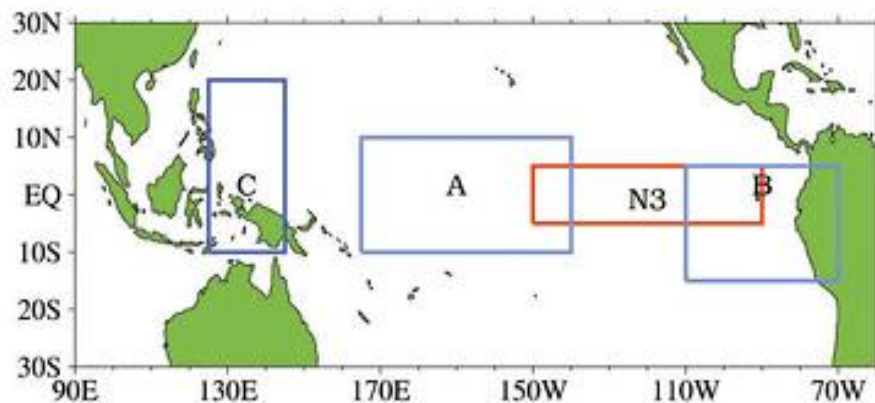
$$EMI = [SSTA]_A - 0.5[SSTA]_B - 0.5[SSTA]_C \quad (1)$$

En la Ecuación 1 los términos de la derecha representan el promedio por área de la anomalía de SST en cada una de las regiones A (165°E–140°W, 10°S–10°N), B (110°W–70°W, 15°S–5°N)

y C (125°E–145°E, 10°S–20°N) (Figura 5). Se determina la existencia de El Niño Modoki cuando el EMI para un trimestre es $\geq + 0.7$ y La Niña Modoki cuando el EMI es < -0.7 (Ashok et al., 2007).

Figura 5

Regiones empleadas para determinar EMI.



Nota. Tomado de The El Niño–Southern Oscillation (ENSO) Modoki signal in the stratosphere.

Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 117(D4), 15.

El Apéndice A2 muestra la ocurrencia de fenómenos El Niño o La Niña durante el período 1982 - 2023 (registro histórico completo) usando el indicador EMI (JAMSTEC, 2024). Esta clasificación de ocurrencias del Fenómeno se denomina ENOS Modoki.

2.1.3 Teleconexiones

Las repercusiones climáticas a nivel global del ENOS se conocen como teleconexiones.

2.1.3.1 El Niño Canónico. Presenta un aumento en la precipitación en el sector tropical del océano Pacífico, Estados Unidos, norte de México, el norte de Europa, Ecuador, Perú, sur de

Brasil, norte de Argentina, Chile y Uruguay. A la vez, se presentan condiciones de baja precipitación en Australia, Indonesia, Filipinas, sector tropical del Pacífico occidental, Colombia, norte de Brasil, el suroriente de África y el África Ecuatorial (Guimarães Nobre et al., 2019) (Pabón Caicedo & Montealegre Bocanegra, 2017) (Wiedermann et al., 2021) (Figura 6).

2.1.3.2 La Niña Canónica. Presenta un aumento en la precipitación en el Pacífico occidental (Indonesia, Filipinas, Australia, etc.), mayor parte de Colombia, norte de Brasil, el suroriente de África y el África Ecuatorial. Simultáneamente, se da una reducción significativa en la precipitación en el Pacífico oriental tropical (costa sur de Colombia, Ecuador y norte de Perú), Uruguay, Argentina, Chile, sur de Estados Unidos y norte de México (Guimarães Nobre et al., 2019), (Pabón Caicedo & Montealegre Bocanegra, 2017), (Wiedermann et al., 2021) (Figura 6).

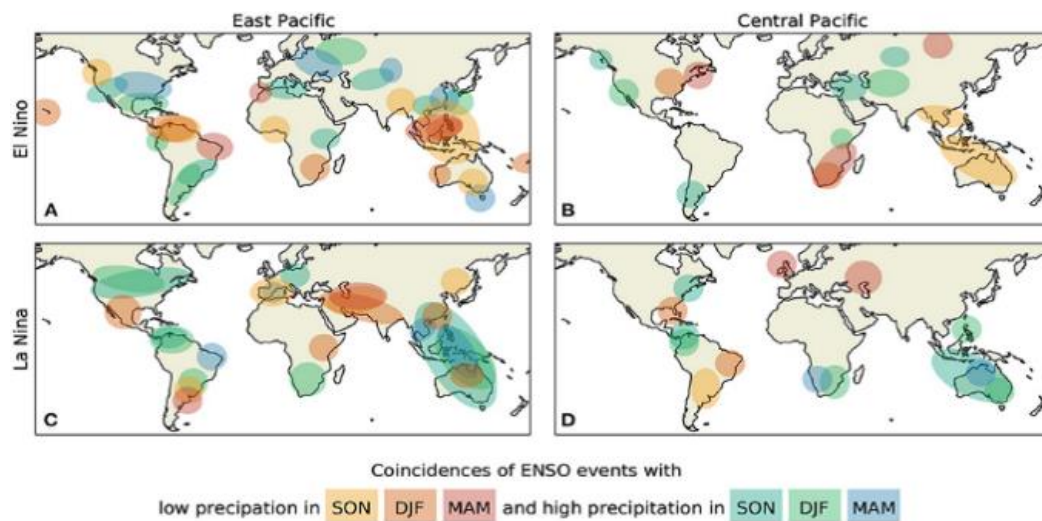
2.1.3.3 El Niño Modoki. Presenta un déficit de precipitación en el Sudeste Asiático, Australia y el Pacífico oriental ecuatorial hasta el norte de Suramérica, mientras que se presentan anomalías positivas de precipitación en Pakistán, sur de Suramérica y la costa occidental de América del Norte (Ashok et al., 2007), (Córdoba-Machado et al., 2015; D.-W. Kim et al., 2012; Navarro-Monterroza et al., 2019; Wiedermann et al., 2021) (Figura 6).

2.1.3.4 La Niña Modoki. Presenta anomalías negativas de precipitación en el Pacífico oriental ecuatorial que se extienden latitudinalmente hasta la costa occidental de América del Norte. También se presentan sequías en el Pacífico occidental cubriendo, latitudinalmente extensiones entre sur del Japón y sur de Australia, y longitudinalmente, afectando a Sri Lanka y el

sur de la India. A la vez, se presentan anomalías positivas de precipitación en Australia y el Pacífico central oriental que se extienden por el sureste hasta el norte de Suramérica (Ashok et al., 2007), (Córdoba-Machado et al., 2015; D.-W. Kim et al., 2012; Navarro-Monterroza et al., 2019; Wiedermann et al., 2021) (Figura 6).

Figura 6

Teleconexiones a nivel global del ENOS.



Nota. Izquierda (A-C): East Pacific (EP) o ENOS canónico. Derecha (B-D): Central Pacific (CP) o ENOS Modoki. Las siglas (SON, DJF, MAM) hacen referencia a los meses en que ocurre el fenómeno, SON (septiembre-octubre-noviembre), DJF (diciembre-enero-febrero), MAM (marzo-abril-mayo). Tomado de Differential Imprints of Distinct ENSO Flavors in Global Patterns of Very Low and High Seasonal Precipitation. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.618548>

***2.2 Bases de datos institucionales de reportes de eventos de movimientos en masa y otros
desastres naturales***

2.2.1 Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)

Es un sistema de información desarrollado por el Consorcio SGC-SIMMA y administrado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) que permite cargar y consultar los registros de movimientos en masa ocurridos en el país, además de consultar los diferentes estudios de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2022). Las consultas se pueden realizar a nivel nacional, departamental, municipal o a escalas específicas, y se pueden obtener reportes cartográficos (formato “.shp”) o alfanuméricos (formato “.pdf “ o “.xlsx”) (SGC, 2022). Al filtrar y buscar la información en el SIMMA, se obtienen resultados de dos tipos de información, el inventario de movimientos en masa y el catálogo de movimientos en masa.

2.2.1.1 Inventario de movimientos en masa. Son los movimientos en masa ocurridos en el país que fueron registrados y caracterizados por el INGEOMINAS o el SGC. Para el departamento de Santander hay 469 eventos registrados desde el año 1954 hasta el 2018. El inventario cuenta con 38 descriptores de información para cada evento: tipo de movimiento, fecha de evento, departamento, municipio, vereda, altura, referente geográfico, altitud, longitud, causas del movimiento, cobertura del suelo, uso del suelo, daños, encuestador, erosión, deformación, estado del movimiento, fuente, fecha de reporte, geoforma, importancia, morfometría, notas, número de heridos, número de muertos, número de desaparecidos, número de personas, número de familias, tipo de material, total daños. económicos, total daños ambientales, total daños

infraestructura, total daños, código SIMMA, anexo fotográfico, descripción litología-estructura, sitio, origen de suelo.

2.2.1.2 Catálogo de movimientos en masa. Son los movimientos en masa ocurridos en el país que fueron reportados por instituciones gubernamentales diferentes al SGC tales como el INVIAS, PONAL, etc., además de periódicos, radio, televisión, universidades, personas, entre otras. En el departamento de Santander se registran 1127 eventos desde el año 1939 hasta el 2023. Cada evento catalogado cuenta con 26 descriptores: tipo de movimiento, fecha del evento, departamento, municipio, vereda, altura, referente geográfico, altitud, longitud, importancia, fuente, notas, fecha de reporte, número de heridos, número de muertos, número de desaparecidos, número de personas, número de familias, tipo de material, total daños económicos, total daños ambientales, total daños infraestructura, total daños, código SIMMA, anexo fotográfico y sitio.

2.2.2 Consolidado anual de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD)

Son todas las emergencias que se presentan a lo ancho y largo del país que son reportadas y registradas por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). Este consolidado cuenta con reportes de emergencia desde el año 1998 hasta el 2023 (UNGRD, 2024). Los datos se descargan en formato tabla de Excel (“.xlsx”) y presentan información sobre diferentes tipos de emergencias como deslizamientos, movimiento en masa, inundación, sismo, incendio forestal, avenida torrencial, sequía, desabastecimiento de agua, huracán, tormenta eléctrica, entre otras. Los registros presentan y clasifican la información en descripción y ubicación

(fecha, departamento, municipio, evento, localización), afectaciones (número de heridos, número de muertos, número de desaparecidos, número de personas, número de familias, viviendas destruidas, viviendas averiadas, vías, puentes vehiculares, puentes peatonales, acueductos, alcantarillados, centros de salud, centros comunitarios, centros educativos), apoyo del fondo nacional de calamidades (FNGRD) (menajes, apoyos alimentarios, materiales de construcción, sacos, otros, economía y total), decretos de calamidad pública y observaciones.

2.2.3 DesInventar

El Sistema de Inventario de Desastres ofrece información gráfica y alfanumérica sobre desastres ocurridos en países de Latinoamérica (Corporación OSSO, 1996). Para Colombia existe información desde el año 1914 hasta el 2018 con registros de desastres ocurridos por deslizamientos, inundaciones, terremotos, incendios forestales, avenida torrencial, sequía, lluvias, tormentas eléctricas, entre otros. Estos registros cuentan con los siguientes campos de información: año, fecha, departamento, municipio, fuente, observaciones, tipo de evento, localización, número de heridos, número de muertos, número de desaparecidos, número de personas, número de familias, viviendas destruidas, viviendas averiadas, vías, puentes vehiculares, puentes peatonales, acueductos, alcantarillados, centros de salud, centros comunitarios, centros educativos. Esta información está discretizada hasta el nivel municipal y se puede descargar en formato tabla (“.csv”).

2.3 Anomalías de Precipitación

2.3.1 Índice de Precipitación (IP)

Este indicador relaciona la precipitación total recibida con la precipitación media multianual para un período (mensual o anual) y en un sitio particular. El IP permite identificar anomalías de precipitación y, por lo tanto, puede ser usado para evaluar el efecto del ENOS u otros fenómenos atmosféricos en un sitio específico (Benavides, 2020).

El índice de Precipitación (IP) se calcula como:

Ecuación 2

$$IP = \frac{Pt}{\bar{P}t_m} * 100 \quad (2)$$

donde :

IP Índice de precipitación mensual o anual en porcentaje (%).

Pt Precipitación total mensual o anual en (mm).

$\bar{P}t_m$ Precipitación promedio mensual o anual multianual en *m* años (mm).

La precipitación total mensual o anual (*Pt*) se calcula:

Ecuación 3.

$$Pt = \sum_{i=1}^n Ca_i \quad (3)$$

donde,

Pt Precipitación total mensual o anual en (mm),

Ca_i Cantidad de agua que ha llovido durante un lapso definido,

n numero total de lapsos de tiempo para los cuales se ha contabilizado la precipitación.

Son 28- 30-31 días para mes y 12 meses para el año.

La precipitación promedio mensual o anual multianual en m años ($\bar{P}t_m$) se calcula:

Ecuación 4

$$\bar{P}t_m = \left(\sum_{j=1}^m P_t \right) / m \quad (4)$$

donde,

$\bar{P}t_m$ Precipitación promedio mensual o anual multianual en m años (mm),

P_t Precipitación total mensual (mm),

m numero total de años para los que se ha contabilizado el valor de precipitación mensual.

Los resultados obtenidos de la Ecuación 2 se pueden interpretar de acuerdo con la Tabla 2. Según la definición del indicador, se presentan condiciones normales cuando el valor está entre 80% y 120%. Entre mayor sea el valor, por encima de 120%, más alto es el excedente de precipitación para la estación de monitoreo y su área de influencia. Dependiendo de la zona puede haber un aumento de niveles en ríos, quebradas y embalses, y un mayor riesgo por inundación o movimientos en masa. Entre más bajo sea el valor de 80%, mayor es el déficit de agua precipitada, por lo que en la zona puede haber disminución de niveles en ríos, quebradas y embalses, sequías, y daños ecosistémicos y socioeconómicos (Benavides, 2020).

Tabla 2

Interpretación del índice de precipitación (IP).

Índice de Precipitación (%)	Calificación
<40	Muy Por debajo de lo Normal (Déficit severo)
40 - 80	Por debajo de lo Normal (Déficit)
80 - 120	Normal
120 - 160	Por encima de lo Normal (Excedente)
>160	Muy por encima de lo Normal (Excedente severo)

Nota. Tomado de Hoja Metodológica del indicador Índice de Precipitación (p. 15) [Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Servicio de Información Ambiental.]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

3. Metodología

La evaluación de la influencia de la fase fría del ENOS en el desencadenamiento de movimientos en masa que afectan la infraestructura civil del departamento de Santander se realizó mediante tres fases: i) identificación de la afectación histórica específica de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en los patrones de precipitación en el departamento de Santander; ii) caracterización espacial y temporal de los eventos de movimientos en masa reportados con bases de datos institucionales para el departamento de Santander; iii) establecimiento de patrones

espaciotemporales de correlación entre los movimientos en masa y series históricas de precipitación para determinar el impacto de la fase fría del ENOS sobre la infraestructura civil del departamento.

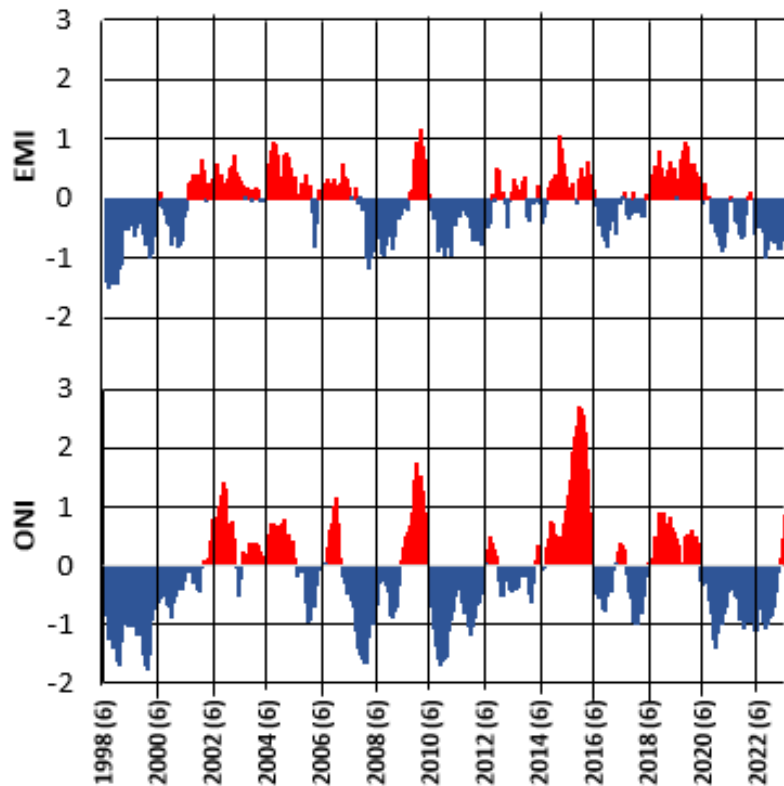
3.1 Fase 1: Identificación de la afectación histórica de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en los patrones de precipitación en el departamento de Santander.

3.1.1 Selección de los años con ocurrencias de La Niña Canónica y La Niña Modoki.

3.1.1.1 Indicadores. Se usó el indicador ONI de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) (NOAA, 2024a) para determinar los años La Niña canónica y el indicador EMI de la Agencia Japonesa para la Ciencia y la Tecnología Marinas y Terrestres (JAMSTEC) (JAMSTEC, 2012) para determinar los años La Niña Modoki. La descarga de los valores de los indicadores ONI y EMI se realizó a través de los portales NWS de la NOAA (Center, 2024) y VirtualEarth de JAMSTEC (JAMSTEC, 2024); estos sitios ofrecen datos en formato “.txt” y “.csv” desde 1950 – presente para el ONI, y desde 1982 – presente para el EMI. Sin embargo, el período de análisis del estudio se estableció entre junio de 1998 y mayo de 2023 teniendo en cuenta que es para este periodo que se cuenta con información de registros de movimientos en masa de afectación a infraestructuras en el país. La (Figura 7) presenta los valores de los indicadores para la ventana de estudio.

Figura 7

Valores de los índices ONI y EMI para la ventana de tiempo junio 1998 – mayo 2023.



Nota. Arriba: índice EMI; Abajo: índice ONI. El color rojo representa la fase cálida (El Niño) y el color azul la fase fría (La Niña). Adaptado por el autor a partir de los datos de (Center, 2024; JAMSTEC, 2024).

3.1.2 Descarga, procesamiento e imputación de estaciones de precipitación seleccionadas.

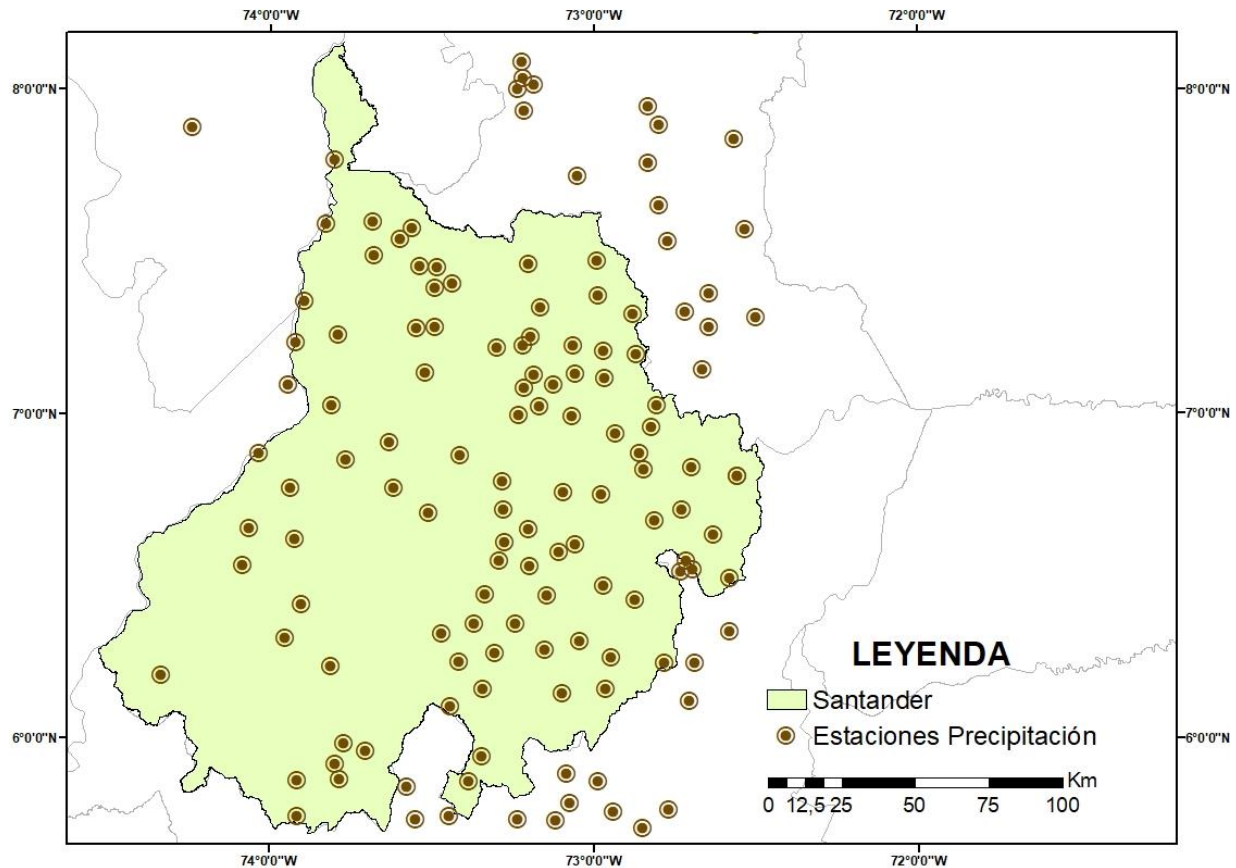
3.1.2.1 Descarga de Estaciones y procesamiento de información. La descarga de los archivos de precipitación diaria se realizó a través del portal DHIME del IDEAM (IDEAM, 2021) considerando la ventana temporal de 01/01/1998 a 31/06/2023. Se descargó información de (136) estaciones (Figura 8) en formato “.csv” en grupos de 10 estaciones. Para descomprimir, separar y

organizar la información de las estaciones en archivos “.csv” se adaptaron los códigos de programación en R, generados por García y Moreno (García Rivera & Moreno Ortiz, 2024). El código también permitió generar una tabla resumen para analizar atributos importantes de cada estación como la localización (latitud, longitud y altitud) y disponibilidad de datos, entre otras (Apéndice B). En este caso, se usó una adaptación de la librería “IdeamR” (Apaico, 2021/2023).

3.1.2.2 Imputación de datos de precipitación para estaciones seleccionadas. Se trabajó con las estaciones del IDEAM que tuvieran un porcentaje de disponibilidad de datos mayor al 80% para la ventana temporal de junio de 1998 – mayo de 2023, y de estas estaciones, solo se trabajó con aquellas que tuvieran vacíos consecutivos de máximo cinco días. El código desarrollado por García y Moreno (García Rivera & Moreno Ortiz, 2024) permitió identificar los datos faltantes en la serie de tiempo de cada estación e implementar una estrategia de imputación consistente en interpolación usando el método Spline para vacíos de un día e imputación manual para vacíos entre 2 y 5 días consecutivos (García Rivera & Moreno Ortiz, 2024) . Para lograr una buena distribución espacial de estaciones en todo el Departamento, fue necesario incluir en el estudio 9 estaciones que no cumplieron con el requisito de máximo cinco días de vacíos. En estos casos no se utilizó para los cálculos la información de los meses en que existían los vacíos.

Figura 8

Estaciones IDEAM (136) con datos de precipitación para la ventana de tiempo.



Nota. Adaptado por el autor a partir de los datos de (IDEAM, 2021)

4.1.3 Series y anomalías de precipitación

Para las estaciones de precipitación seleccionadas, se procedió a transformar los datos diarios de precipitación a totales mensuales y anuales usando un período de análisis entre 1 de junio a 31 de mayo, para así facilitar el análisis. Es importante resaltar que, para el cálculo de los

totales mensuales y anuales de precipitación, solo se tuvieron en cuenta aquellos meses y años con la totalidad de los datos para dicho periodo. También se calcularon los promedios mensuales y anuales para la ventana de estudio, para sí proceder a calcular el IP mensual y anual de cada estación. Siguiendo la definición de (Benavides, 2020) se consideraron valores anómalos todos aquellos con $IP > 120\%$.

El análisis incluyó la evaluación del tiempo de respuesta del régimen de lluvias anómalas para cada evento La Niña (Canónica y Modoki). Se calculó el tiempo de rezago entre el inicio de la señal del fenómeno evidenciado por los indicadores ONI (>-0.5) y EMI (>-0.7), y el inicio de la anomalía, definido por el IP mayor de lo normal ($IP > 120\%$). Se estimó el promedio de tiempos de rezago para cada estación con respecto a los dos tipos de evento. Finalmente, se utilizó el método de interpolación IDW para representar los patrones espaciales de precipitación, anomalías y promedios de rezagos en el departamento.

3.2 Fase 2: Caracterización espacial y temporal de los eventos de movimientos en masa reportados con bases de datos institucionales para el departamento de Santander.

La caracterización espacial y temporal de los eventos de movimientos en masa y sus afectaciones se realizó a partir de los insumos provistos por el catálogo y el inventario de movimientos en masa del SIMMA (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2022), el catálogo de ocurrencias de desastres del DesInventar (Corporación OSSO, 2020), y el consolidado anual de emergencias de la UNGRD (UNGRD, 2024), descritos en la sección 2.2 de este documento. Primero, se revisó detalladamente estos insumos para identificar y eliminar los eventos repetidos. Posteriormente, se consolidó una tabla de eventos (deslizamientos de tierra, caídas de rocas, flujos)

ocurridos en el departamento de Santander entre junio de 1998 a mayo de 2023. Esta tabla general incluye información de ubicación y descripción de cada evento así: año, fecha, municipio, vereda, tipo de movimiento, causas del movimiento, fuente, latitud y longitud, afectaciones (viviendas destruidas y averiadas, vías, puentes vehiculares y peatonales, acueductos, alcantarillados, centros de salud, centros comunitarios y educativos), apoyo a damnificados (menajes, alimentos, materiales de construcción, sacos y total apoyo) y comentarios. Finalmente, se usó el campo de causas del movimiento para filtrar y trabajar únicamente con los eventos que fueron reportados como consecuencia de la precipitación (Apéndices C1 y C2). Se totalizó el número de eventos y las afectaciones anuales (entre junio – mayo) y mensuales durante la ventana temporal de análisis para las dos tablas consolidadas. Se usaron mapas y gráficas para presentar la distribución espacial y temporal de estos resultados.

3.3 Fase 3: Establecimiento de patrones espaciotemporales de correlación entre los movimientos en masa y series históricas de precipitación para determinar el impacto de la fase fría del ENOS sobre la infraestructura civil del departamento.

Para cada movimiento en masa reportado como resultado de un evento de precipitación (Apéndice C2) se seleccionó una estación del IDEAM que se encontrara en el área de influencia del movimiento en masa que contara con datos de alta calidad y en la ventana de tiempo del estudio, de acuerdo con las consideraciones descritas por Bedoya y otros (Bedoya et al., 2019). Se determinó la correlación existente entre las precipitaciones y la ocurrencia de movimientos en masa para toda la ventana temporal de análisis, como también para los años de asignación La Niña. Además de esto, se correlacionaron los eventos de movimientos en masa y las series de

precipitaciones con las afectaciones a infraestructuras en el departamento reportadas (viviendas averiadas, viviendas destruidas, vías y acueductos), para así determinar la influencia del fenómeno de La Niña en la ocurrencia de estos eventos en la afectación de la infraestructura civil en el departamento de Santander.

4. Resultados

4.1 Impacto de la fase La Niña en las precipitaciones del departamento de Santander.

4.1.1 Patrones de Precipitación en Santander.

La evaluación de la influencia de la fase fría del ENSO en el departamento de Santander requirió primero reconocer los patrones de precipitación anual y estacional. Los promedios anuales de precipitación, usando las 26 estaciones seleccionadas (Apéndice D2), muestran que en el Departamento hay una distribución de precipitación que alcanza valores de hasta 3500 mm; hay mayores precipitaciones en el suroccidente del departamento (2500 - 3500 mm), mientras que los menores rangos se encuentran al nororiente (700 – 2000 mm) (Figura 9). Se confirma la existencia del régimen bimodal de precipitación a lo largo del departamento, con las mayores precipitaciones ocurriendo entre los meses de septiembre-octubre-noviembre (SON) y marzo-abril-mayo (MAM) (Figura 10). El rango de precipitaciones mensuales observado está entre < 50 mm y hasta 350 mm. Especialmente, en los meses de mayor precipitación (SON y MAM) se alcanzan rangos de 250 – 350 mm hacia el sur y oeste del departamento, mientras en el nororiente se encuentran los menores rangos (50 – 200 mm). Entre los meses diciembre-enero-febrero (DEF), la época de menor precipitación del año, los rangos de precipitación se encuentran entre 0 - 200 mm, siendo enero el

mes de menor precipitación en el cual los rangos de precipitación no superan los 50 mm (< 50 mm) en todo el departamento (Figura 9).

Figura 9

Superficies de precipitación promedio multianual y mensual en el departamento de Santander para la ventana 1998 - 2023.

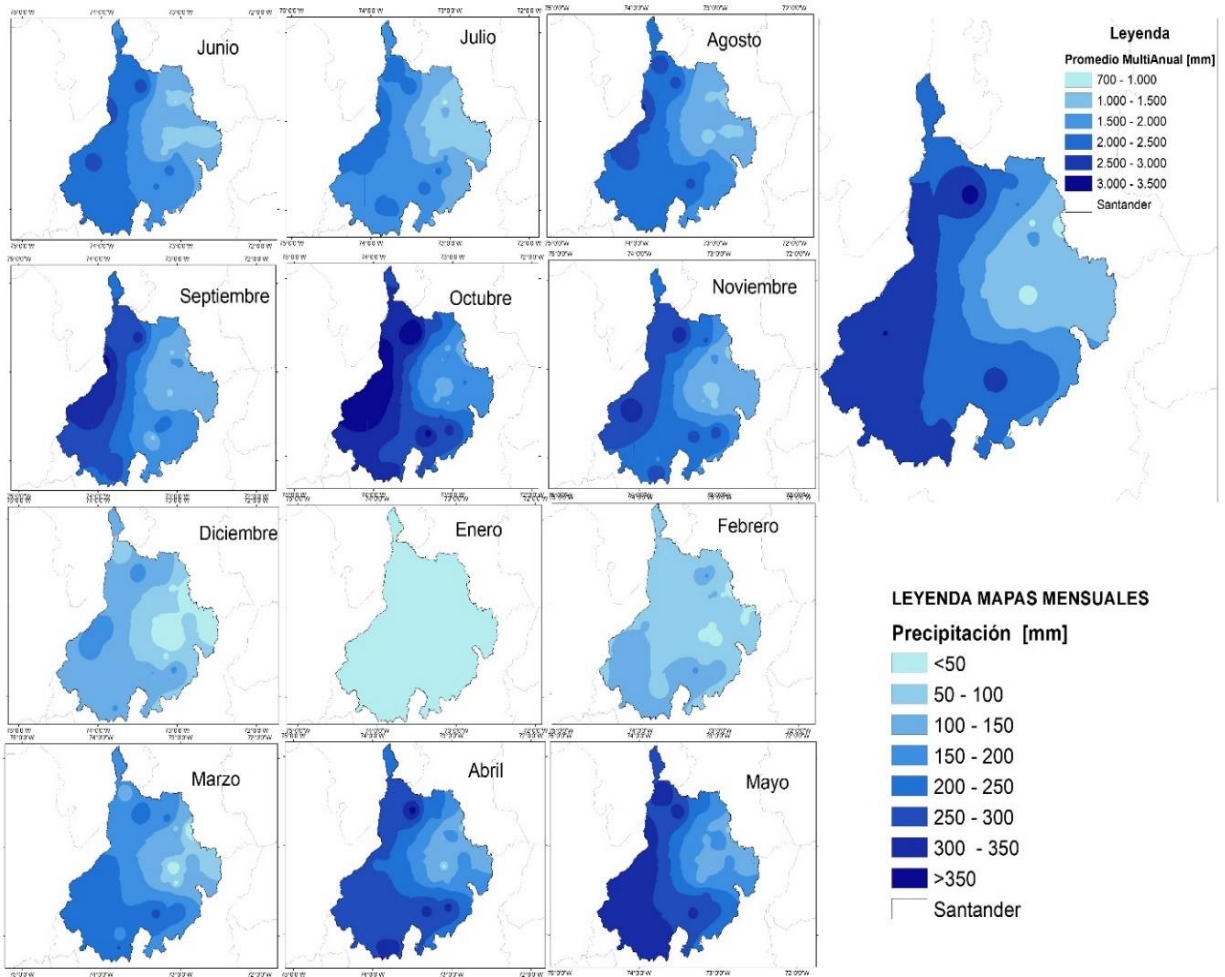
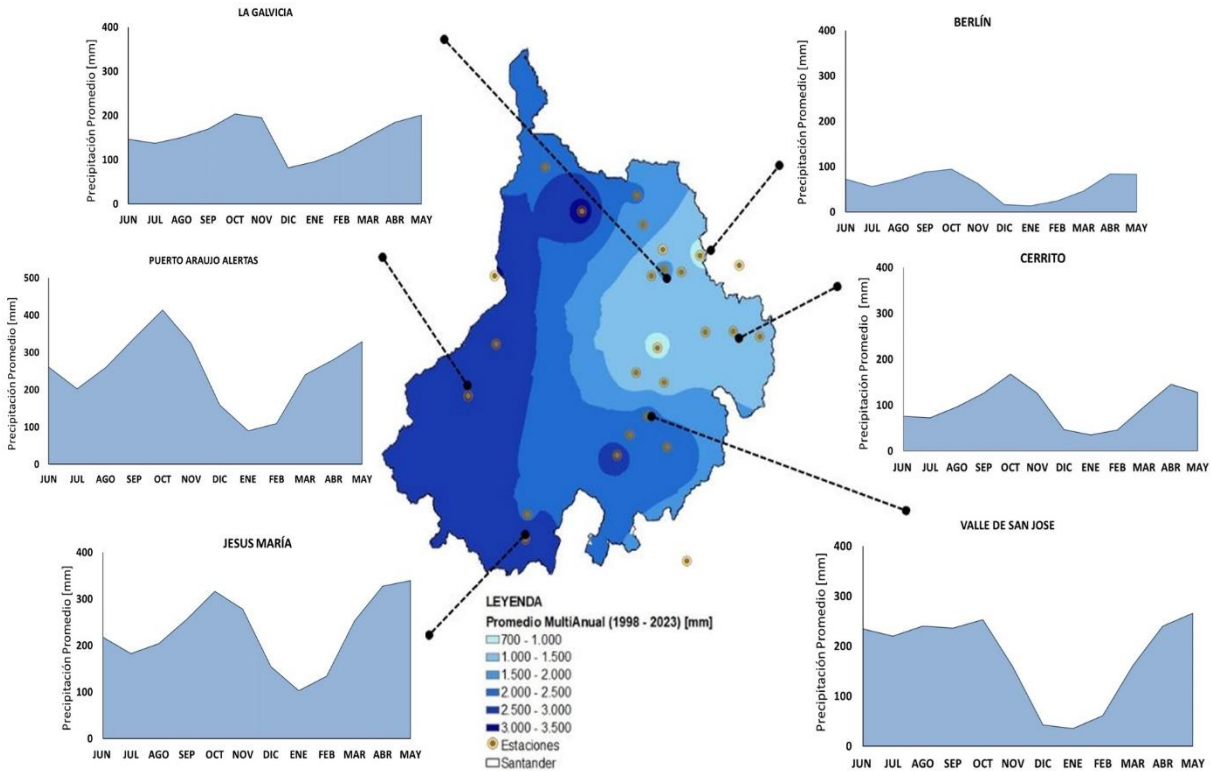


Figura 10

Promedios Mensuales de precipitación para estaciones seleccionadas.



4.1.2 Anomalías de precipitación.

Los eventos Niña Canónica y Modoki que ocurrieron en la ventana de tiempo del estudio se muestra en la Tabla 3. Dentro de los 25 años de análisis (1998-2023), se identificaron 14 años con ocurrencia de La Niña Canónica y 10 años con ocurrencia de La Niña Modoki, coincidiendo entre las dos fases para 10 años.

Tabla 3

Años en los que se presentó el fenómeno de La Niña Canónica y Modoki.

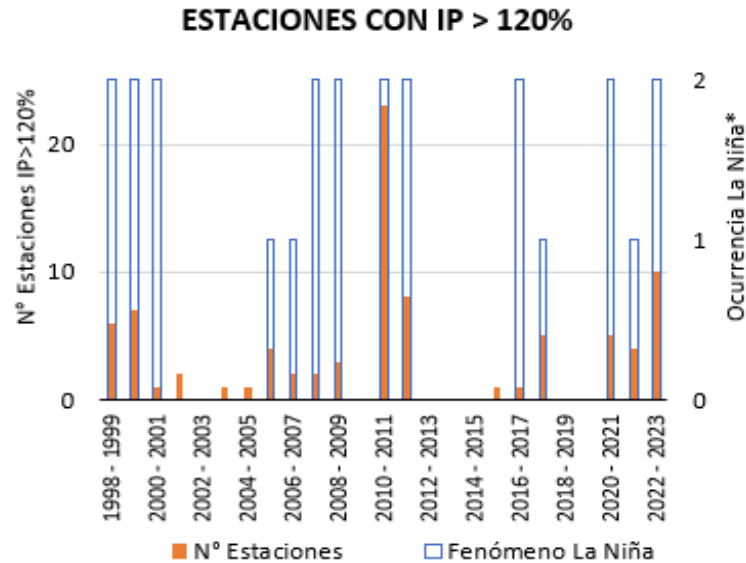
Año Inicio	Año Fin	LA NIÑA CANÓNICA				LA NIÑA MODOKI			
		JJA	SON	DEF	MAM	JJA	SON	DEF	MAM
1998	1999	X	X	X	X	X	X	X	X
1999	2000	X	X	X	X			X	X
2000	2001		X	X				X	X
2001	2002								
2002	2003								
2003	2004								
2004	2005								
2005	2006			X					
2006	2007				X				
2007	2008	X	X	X	X			X	X
2008	2009		X	X	X	X	X	X	
2009	2010								
2010	2011	X	X	X	X		X	X	X
2011	2012	X	X	X	X			X	X
2012	2013								
2013	2014								
2014	2015								
2015	2016								
2016	2017	X	X	X			X	X	
2017	2018		X	X	X				
2018	2019								
2019	2020								
2020	2021	X	X	X	X		X	X	
2021	2022	X	X	X	X				
2022	2023	X	X	X			X	X	X

Nota. Las siglas JJA, SON, DEF, MAM hacen referencia a la primera letra de todos los meses del año; donde JJA (junio-julio-agosto), SON (septiembre-octubre-noviembre), DEF (diciembre-enero-febrero).

El cálculo de anomalías positivas de precipitación a través del índice IP ($IP > 120\%$) para las 26 estaciones seleccionadas permitió estudiar el efecto de ocurrencia del fenómeno La Niña en la precipitación del Departamento. Al analizar las anomalías en la escala anual (Figura 11), se confirma el efecto de La Niña en las anomalías positivas de precipitación pues, en promedio, más del 20% de las estaciones seleccionadas (6) registró excesos de precipitación durante estos años. Vale la pena resaltar que 23 estaciones tuvieron excesos de precipitación durante el año 2010-2011 y que hubo años en los que, a pesar de no haber señal de La Niña, un número menor de estaciones (menos de 3) registraron anomalías. Estos resultados se aprecian espacialmente en el (Apéndice E1) que usa como ejemplo la distribución del IP durante los 14 años con ocurrencia de La Niña. Mientras que durante el año 2010-2011 la anomalía positiva de precipitación ocurre en todo el departamento, en los otros años presentados en el apéndice la anomalía se distribuye sin un patrón espacial claro en diferentes regiones del Departamento.

Figura 11

Número de estaciones con IP > 120% en la escala anual.



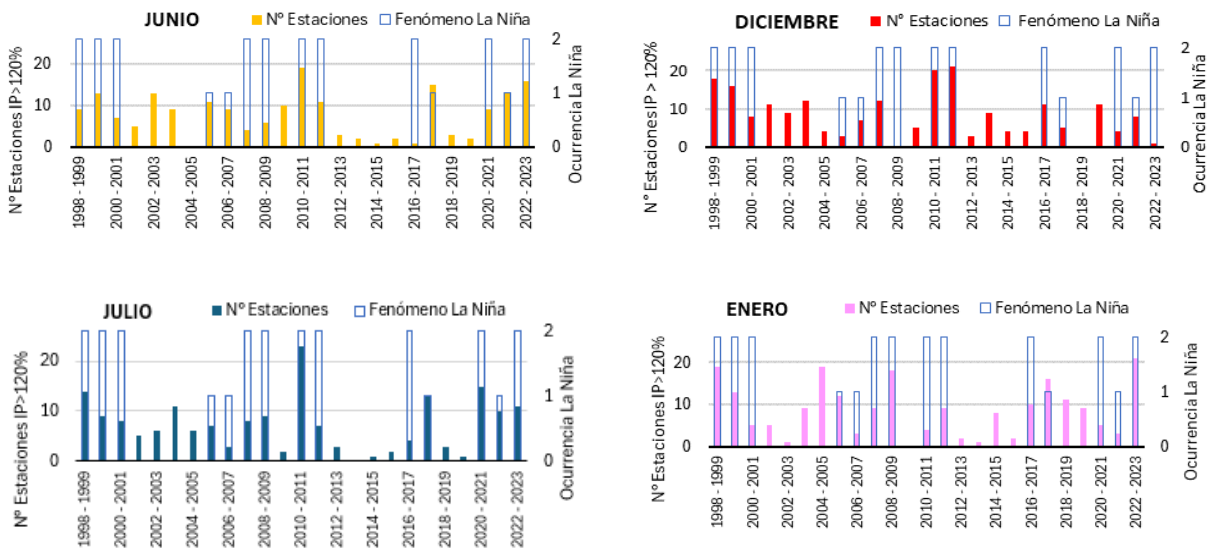
Nota. En el eje vertical derecho (*) 0: año sin ninguna ocurrencia de La Niña, 1: año con ocurrencia de La Niña Canónica, 2: año con ocurrencia de La Niña Canónica y Modoki.

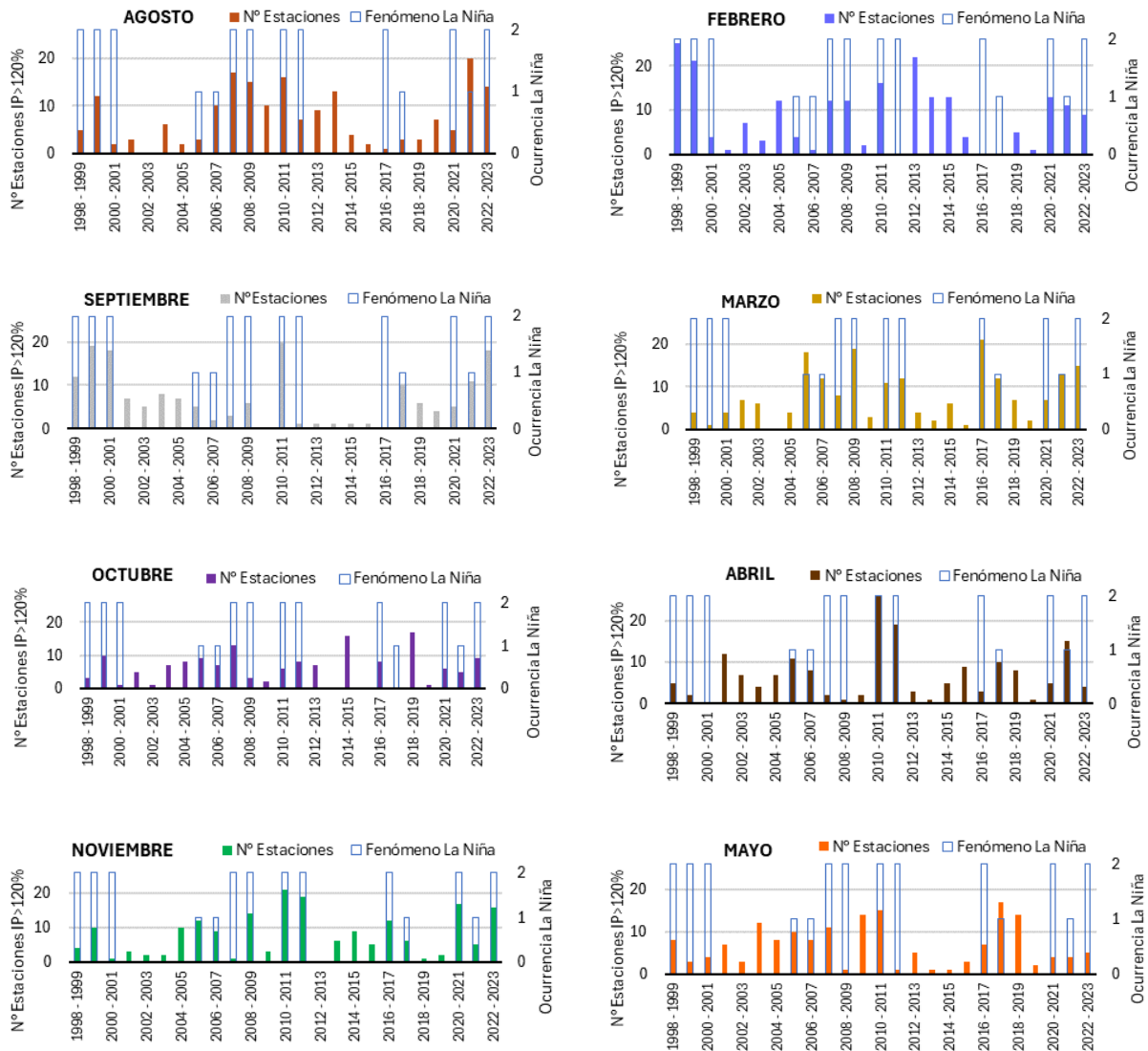
El análisis de anomalías a nivel mensual es un poco más complejo pues se evidencia que, además del ENOS, existen otros fenómenos climáticos (ciclones tropicales, entre otros) que producen anomalías positivas de precipitación cuyo estudio debe ser integrado en futuros análisis (Figura 12). La revisión de las anomalías positivas de precipitación para los años La Niña indica un mayor impacto del fenómeno en los períodos secos en términos del número de estaciones que registran excesos de precipitación: en promedio, 37.9% (JJA) y 37.5% (DEF) de las 26 estaciones registraron excesos de precipitación en los períodos secos del año, mientras que 33.4% (SON) y 33.5% (MAM) de las 26 estaciones registraron excesos de precipitación en los períodos lluviosos del año.

Estos porcentajes son mucho mayores que los promedios calculados usando todos los meses de la serie de tiempo (28.9% (JJA), 32.4% (DEF), 26.3% (SON) y 27.5% (MAM)). Los años para los que el fenómeno generó los mayores promedios de porcentajes de estaciones con anomalías positivas de precipitación a lo largo de todos sus meses fueron 2010-2011 (16 estaciones, 63.1%), 2022-2023 (12 estaciones, 44.6%), y 1999-2000 (11 estaciones, 41.3%). Finalmente, los mayores registros mensuales de números de estaciones reportando anomalías positivas de precipitación ocurrieron siempre durante años La Niña, exceptuando el mes de Octubre (2018-2019 y 2014-2015) que reportó los máximos valores en años no Niña (Apéndice E2).

Figura 12

Número de estaciones con $IP > 120\%$ en la escala mensual.





Nota. En el eje vertical derecho 0: año sin ninguna ocurrencia de La Niña, 1: año con ocurrencia de La Niña Canónica, 2: año con ocurrencia de La Niña Canónica y Modoki.

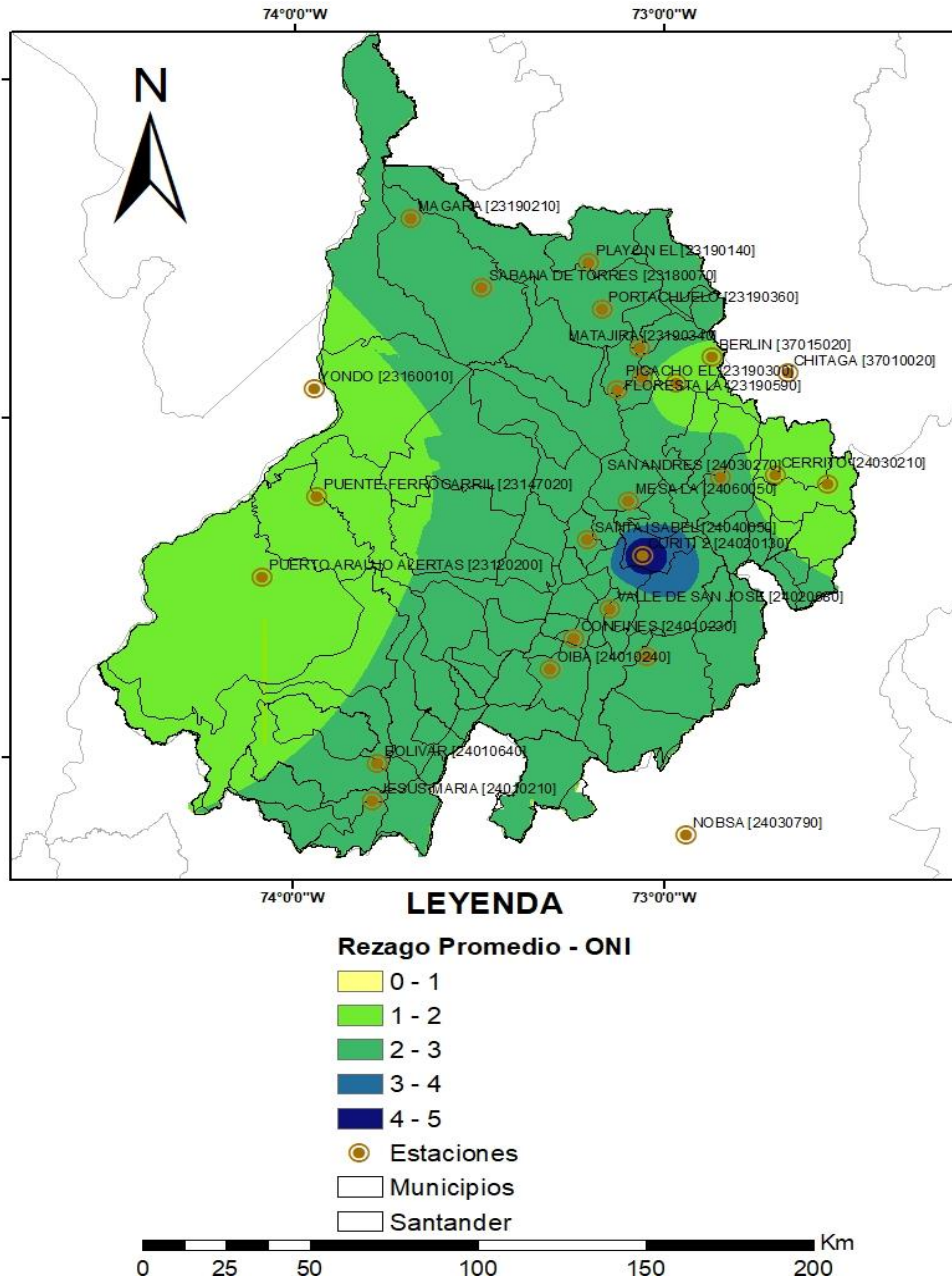
4.1.3 Rezago

Los tiempos de respuesta del inicio del régimen de lluvias anómalas positivas con respecto al inicio de la señal de los indicadores ONI – EMI en Santander están, en un rango promedio, entre

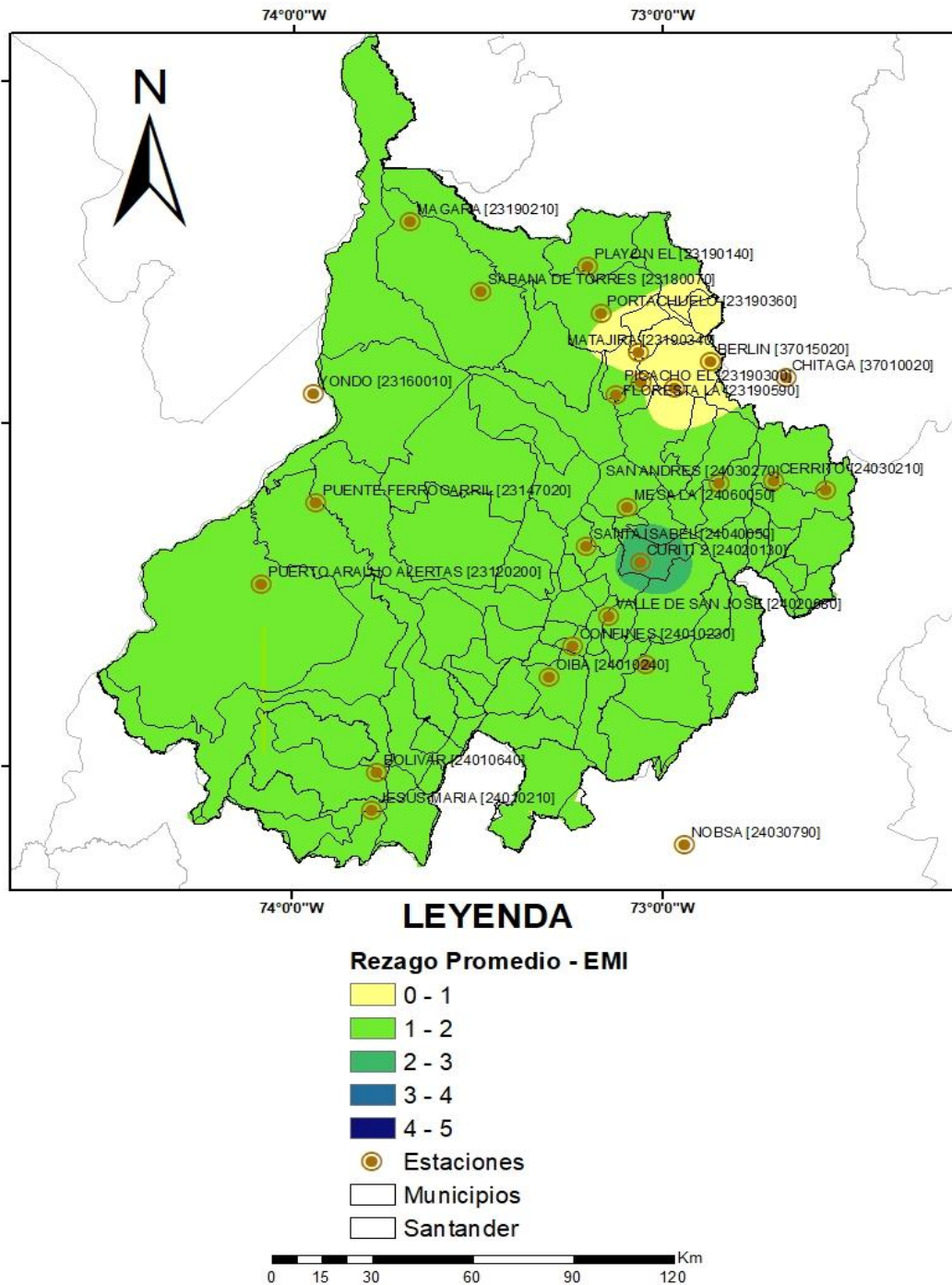
1-3 meses. Para La Niña Canónica el rezago es, en promedio, de 2 - 3 meses (2.1 meses) (Figura 13 (a)) y para La Niña Modoki de 1 - 2 meses (1.3 meses) (Figura 13 (b)). Espacialmente, con respecto al inicio de la señal de La Niña Canónica, el rezago promedio más largo se da hacia la franja central del Departamento y llama la atención un rezago promedio de 5 meses para los registros de precipitación de la estación CURITI 2 [24020130]. Al revisar los promedios de rezago con respecto al inicio de la señal de La Niña Modoki, se repite un mayor tiempo de rezago (aunque menor) para la estación CURITI 2 y un tiempo de rezago mínimo para la zona del nororiente del Departamento (0-1mes). Para las 26 estaciones estudiadas, el rezago según ONI siempre es igual o mayor que el rezago según (EMI) y durante el año 2010 – 2011, la intensidad fuerte del fenómeno resultó en un rezago de tan solo 0-1 mes para La Niña Canónica y La Niña Modoki. También cabe destacar que algunas estaciones presentaron rezagos de más de 6 meses en algunos años; en el caso de La Niña Canónica, se encuentran la estación Curití 2 [24020130], Coromoro [24020120], El Playón [23190140], La Floresta [23190590], y Valle de San José [24020080]. Para La Niña Modoki estos rezagos se presentaron en las estaciones Curití 2 [24020130], San Andrés [24030270], y La Floresta [23190590] (Apéndice F).

Figura 13

Promedio de rezagos de precipitación anómala positiva por La Niña en Santander.



(a)



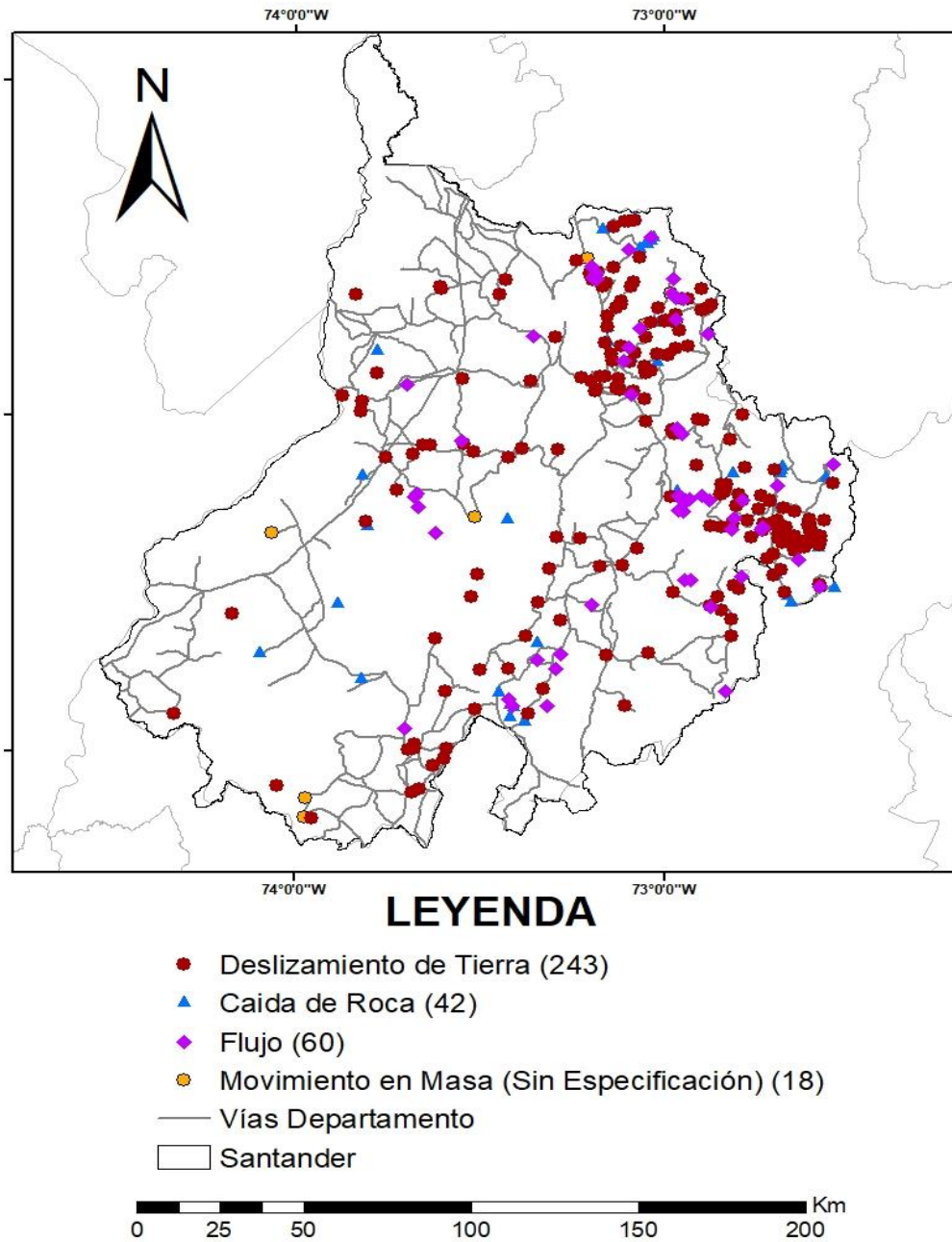
Nota. (a) La Niña Canónica, (b) La Niña Modoki.

4.2 Caracterización espacio temporal de la afectación a infraestructura civil por movimientos en masa en Santander.

En el Departamento se reportaron 1676 movimientos en masa durante la ventana temporal de análisis de los cuales 1266 (75.54%) fueron reportados como deslizamientos de tierra, 126 (7.52%) como caídas de rocas, 126 (7.52%) como flujos y los 158 (9.42%) restantes se encuentran reportados como movimientos en masa sin especificación de tipo (Apéndice G1). Los años con mayor número de reportes de movimientos en masa corresponden al año 2011-2012 con 221 (13.19%), 2010- 2011 con 154 (9.19%) y 2013 - 2014 con 144 (8.58%). De los 363 movimientos en masa reportados como consecuencia de precipitación, 243 (66.94%) fueron deslizamientos de tierra, 42 (11.57%) caídas de rocas, 60 (16.53%) flujos y 18 (4.96%) no tuvieron especificación (Figura 14). La mayor cantidad de reportes de movimientos en masa por causa de precipitación se han dado entre 1 junio de 2010 y 31 mayo de 2014; 62 eventos (17.08%) en 2010-2011, 23 eventos (6.34%) en 2011-2012, 46 eventos (12.67%) en 2012-2013 y 101 eventos (27.8%) en 2013-2014 (Figura 15 (a)). Los dos primeros años (2010- 2012) fueron clasificados como La Niña según los indicadores ONI y EMI. La diferencia significativa entre el número de eventos reportados durante esta ventana de tiempo con respecto a la serie de tiempo completa puede ser debida al fuerte impacto que tuvo el Fenómeno La Niña en el país; sin embargo, no se puede descartar otro tipo de factores como la capacidad institucional para mantener la dinámica de recolección de información durante los 25 años. La distribución espacial de los movimientos en masa causados por precipitación deja ver que el impacto del fenómeno fue importante en todo el Departamento (Figura 15 (b)). El sesgo espacial en el reporte de los eventos seguramente está definido por la ubicación de la población en el territorio.

Figura 14

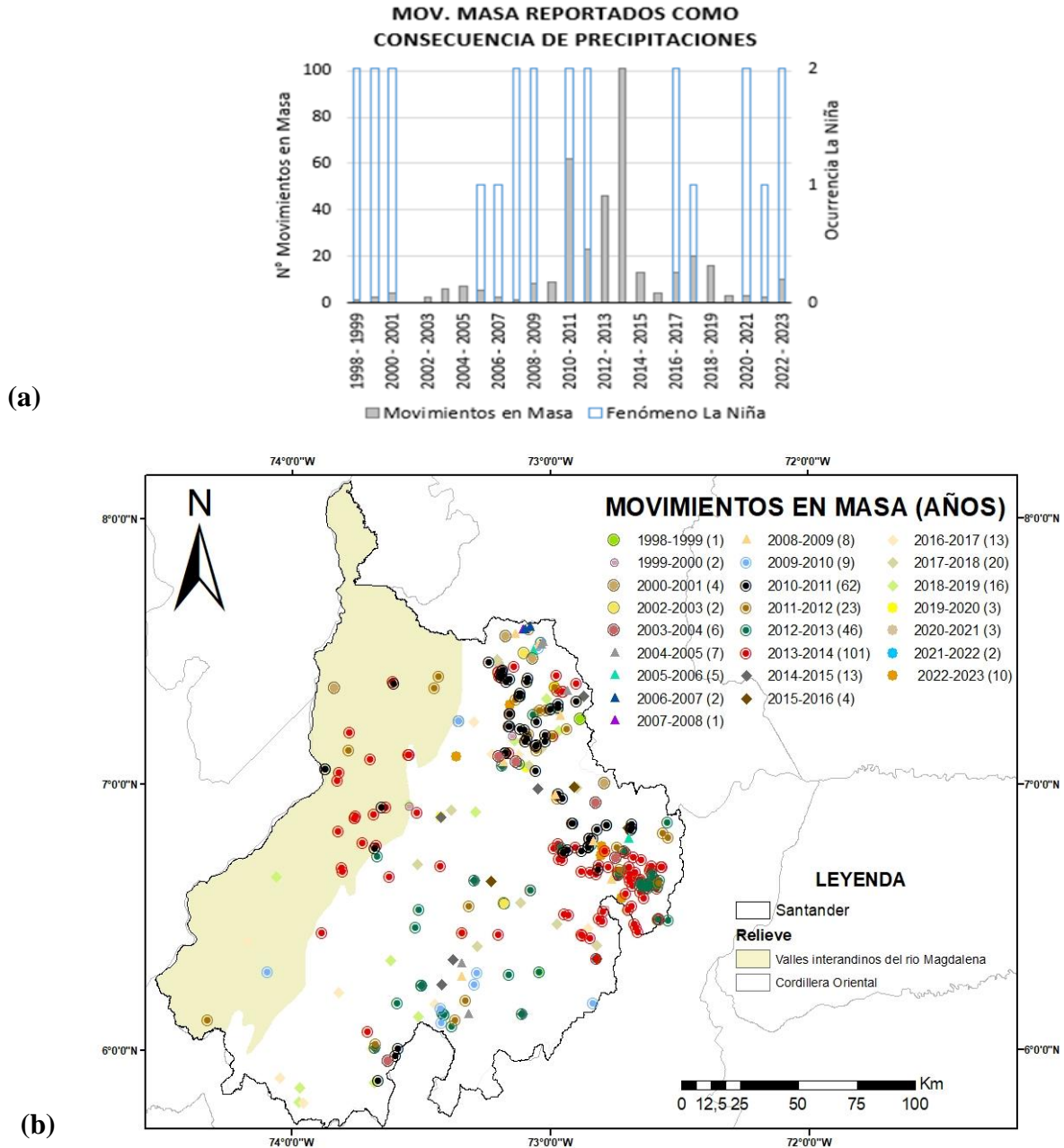
Clasificación de Movimientos en masa en Santander (1998 – 2023) ocurridos por precipitación.



Nota. Para referencia, se muestra la malla vial del departamento. Adaptado por el autor a partir de información del SIMMA-SGC.

Figura 15

Ocurrencia espaciotemporal de los movimientos en masa causados por precipitación (1998-2023).

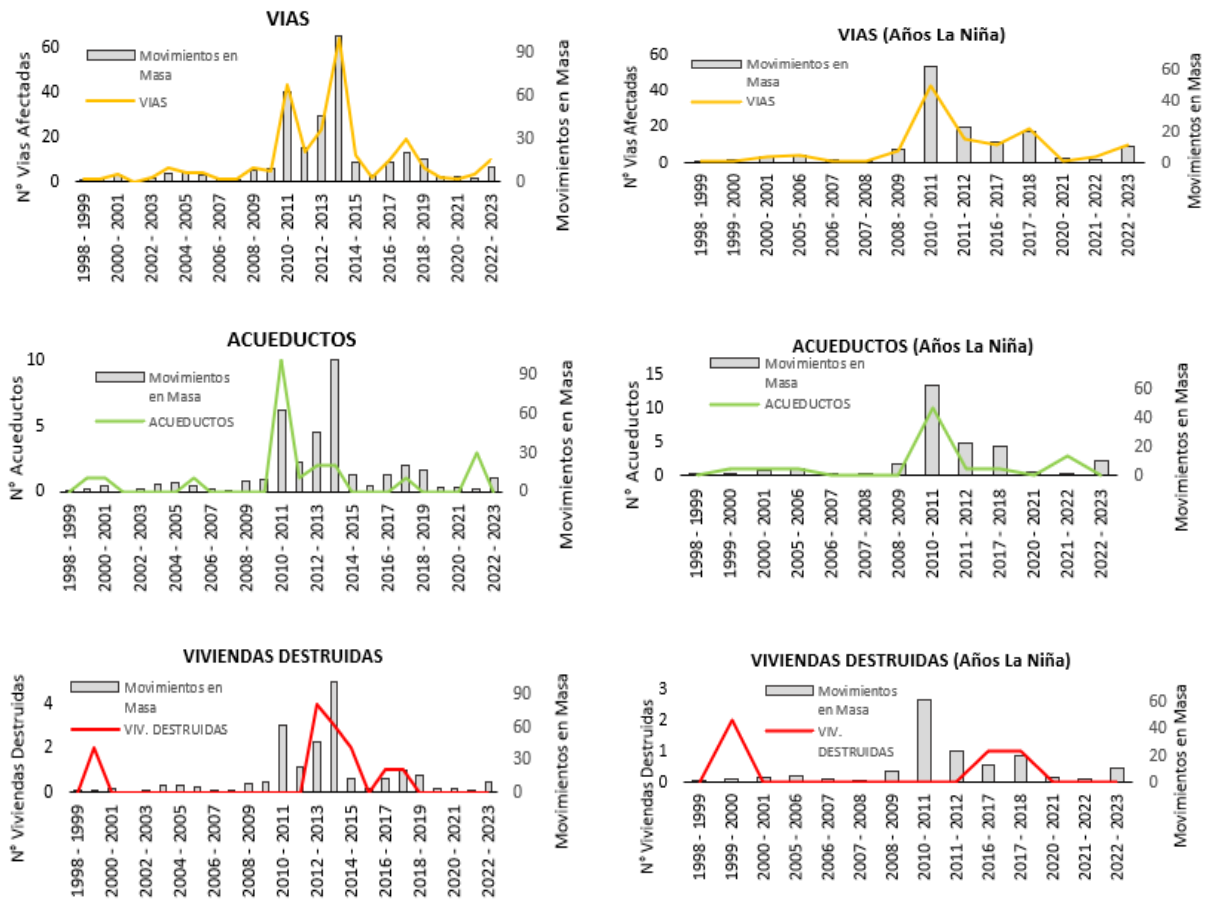


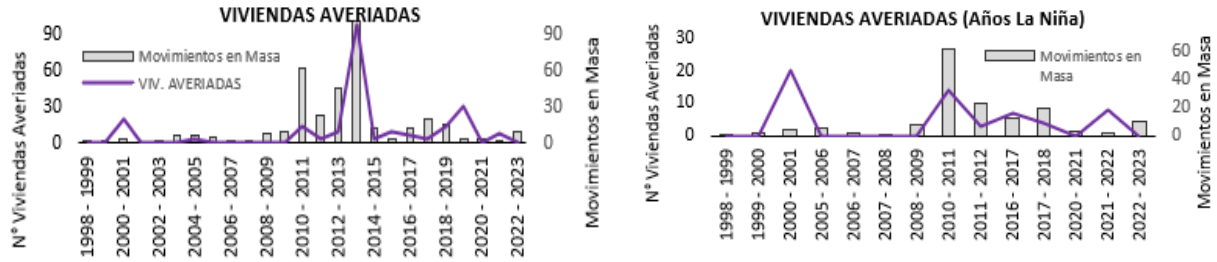
Nota. Adaptado por el autor a partir de información del SIMMA-SGC.

Las afectaciones de los 363 eventos detonados por precipitación incluyeron 242 vías, 22 acueductos, 224 viviendas averiadas y 123 viviendas destruidas; siendo los años 2010-2011 y 2013-2014 los años con mayores reportes de afectaciones (Figura 16) y (Apéndice G2).

Figura 16

Afectaciones a infraestructura civil por movimientos en masa a causa de precipitación.





Se observa que en los años de ocurrencia de La Niña, en los meses de agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre los movimientos en masa registrados para esos años se concentrados hacia la zona nororiental del departamento, mientras en junio, julio, marzo, abril y mayo los movimientos en masa registrados están distribuidos por el departamento (Figura 17). El análisis de afectaciones a nivel mensual indica que, usando la serie de tiempo total, los mayores números de reportes de movimientos en masa coinciden con el régimen bimodal de precipitaciones que se presenta en el departamento, siendo los meses de octubre (70) y mayo (52) los que presentan más eventos (Figura 18 (a)). Al analizar solo los años con asignación La Niña, se observa que el régimen bimodal de precipitaciones coincide con los meses de mayores ocurrencias de movimientos en masa, los cuales se presentan hacia noviembre (28) y mayo (23), además de un pico de eventos en el mes de agosto (27) (Figura 18 (b)). Al analizar las afectaciones de infraestructura tanto los acueductos, las viviendas averiadas y destruidas; no siempre coinciden en los meses que se presentan sus mayores reportes de afectaciones con los meses de más ocurrencia de movimientos en masa y mayores precipitaciones. Caso contrario ocurre con las vías, los mayores reportes de afectaciones ocurren en los meses en los que se producen las mayores precipitaciones (SON – MAM) y ocurrencia de movimientos en masa; los meses de mayor registro son; para los años La Niña noviembre (19) y mayo (22) y para toda la ventana octubre (49) y mayo

(42). La localización de los movimientos en masa con reportes de afectaciones a vías para la serie de tiempo total presenta una distribución a lo largo del departamento, mientras con los años de asignación La Niña la ocurrencia de estos se concentra hacia el nororiente del departamento (Apéndice G3); para el caso de los movimientos en masa con reportes de afectación a acueductos y viviendas, estos se encuentran distribuidos por todo el departamento, donde en el año 2010 – 2011 la mayoría de estos se concentraron hacia el nororiente del departamento (Apéndice G3).

Figura 17

Distribución espacial mensual de los Movimiento en masa ocurridos en años La Niña.

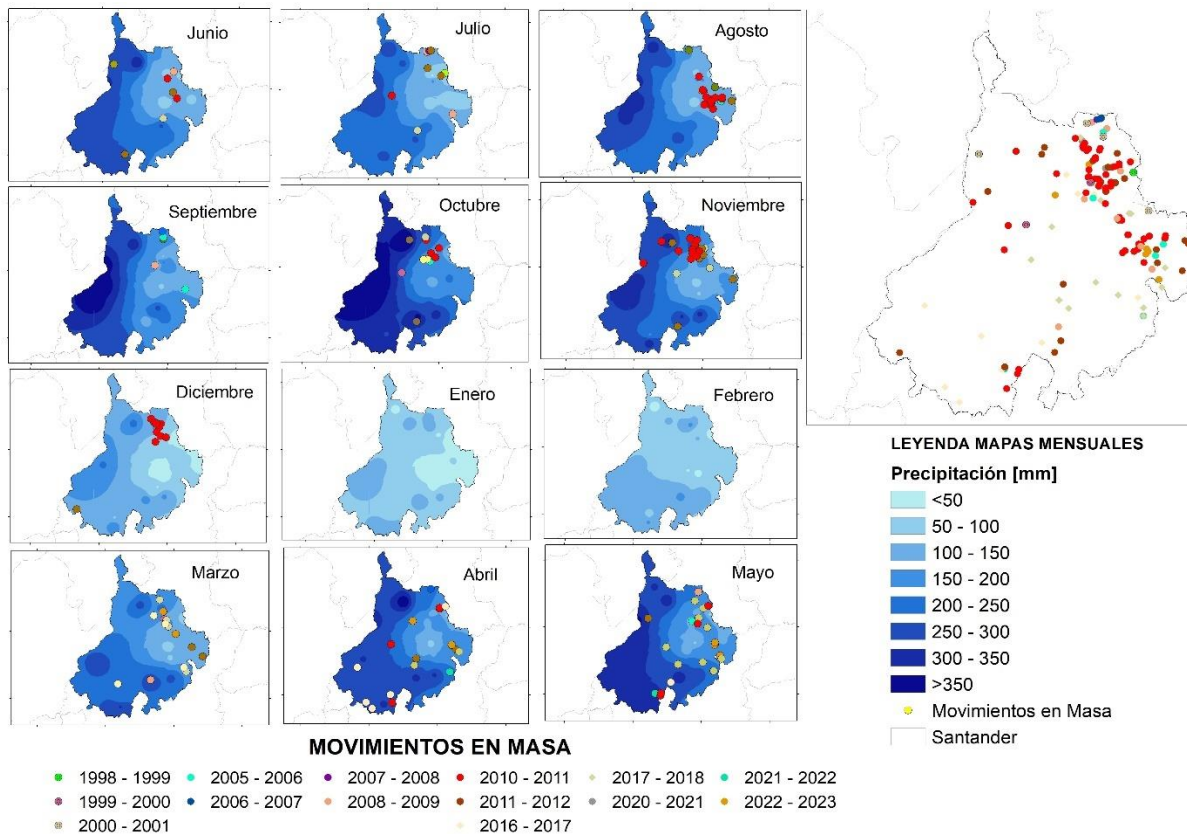
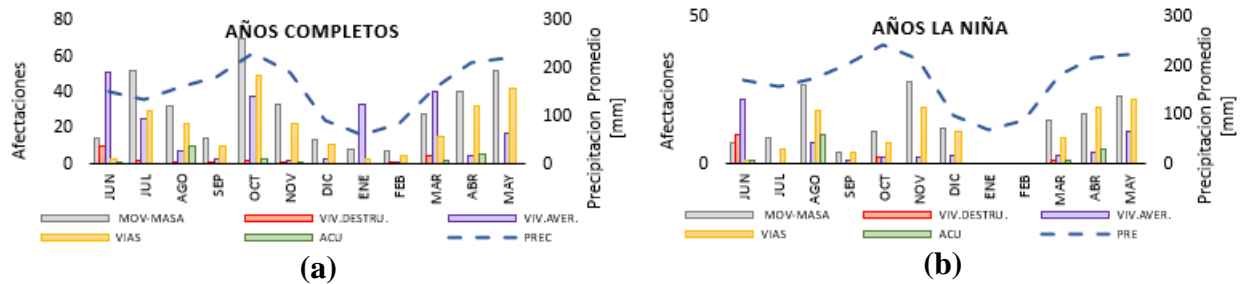


Figura 18

Total de afectaciones mensuales a infraestructura.



Nota. A la izquierda: Ventana Completa (a); a la derecha: años La Niña (b).

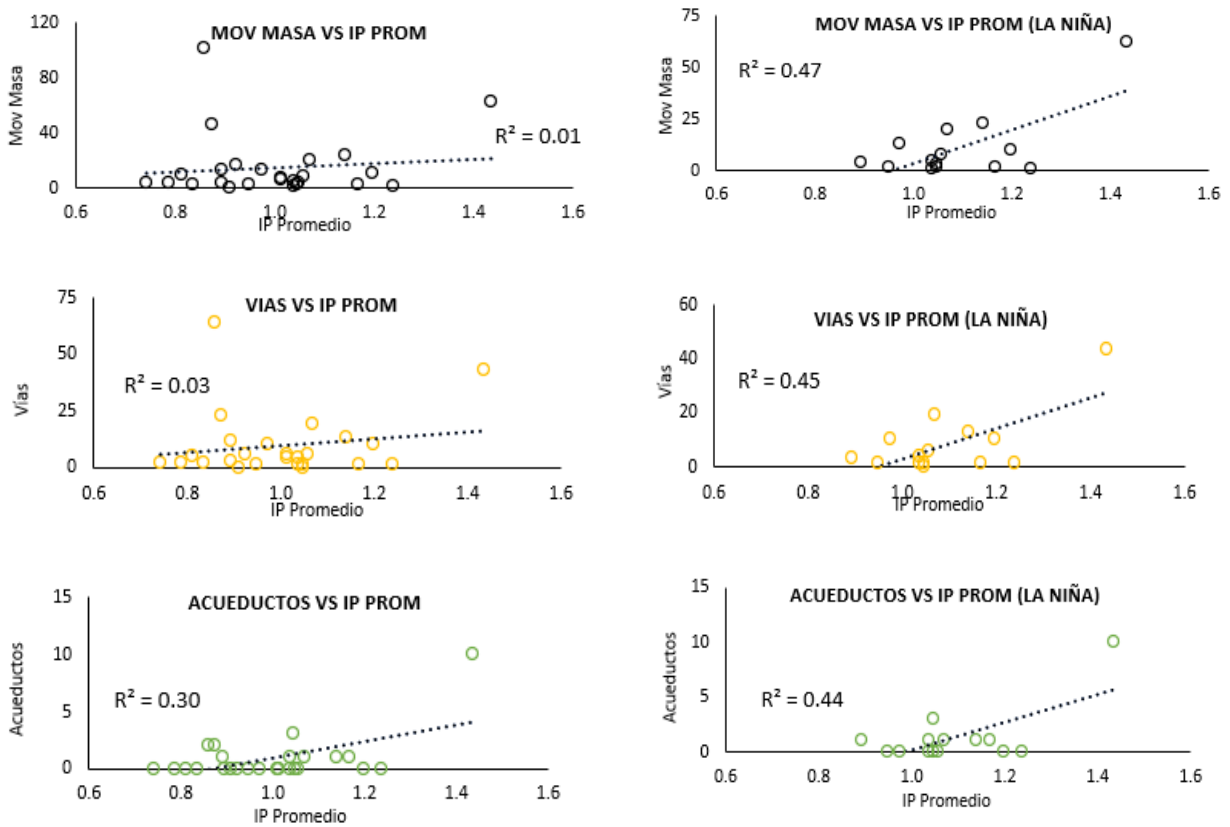
4.3 Patrones espaciotemporales entre IP y afectaciones a la infraestructura civil.

La correlación entre el índice de precipitación (IP) y afectaciones a la infraestructura civil a nivel de promedios anuales refleja un mejor ajuste cuando solo se evalúan las afectaciones registradas en los años La Niña en comparación con el registro completo. Esto se cumple para IP (fracción) vs. Número de Movimientos en Masa ($R^2=0.47$), Afectaciones a vías ($R^2=0.45$) y Afectaciones a Acueductos ($R^2=0.44$), pero no para Afectaciones a Viviendas ($R^2=0.001$). Para el caso de la serie completa, el ajuste se afecta significativamente: IP (fracción) vs. Número de Movimientos en Masa ($R^2=0.01$), Afectaciones a vías ($R^2=0.03$), Afectaciones a Acueductos ($R^2=0.30$) y Afectaciones a Viviendas ($R^2=0.07$) (Figura 19). A nivel mensual, a excepción de los meses de enero-febrero (no se encuentran registros de afectaciones para años La Niña), agosto - septiembre (mejor ajuste en el registro completo); se evidencia un mejor ajuste en todos los meses cuando solo se evalúan las afectaciones registradas en los años La Niña en comparación con el

registro completo (Apéndice H). Como ejemplo, en los meses de diciembre y abril la relación IP (fracción) vs Afectaciones se ajusta mejor en años La Niña que en los registros completos (Figura 20).

Figura 19

Correlaciones anuales entre IP promedio, movimientos en masa y afectaciones a infraestructura civil (vías, acueductos y viviendas).



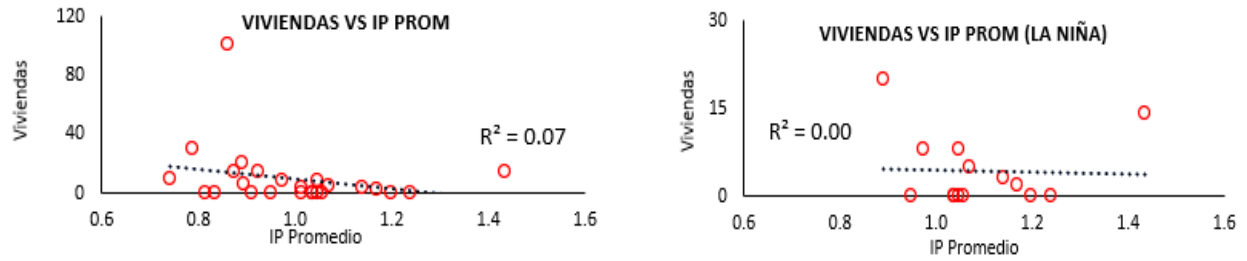
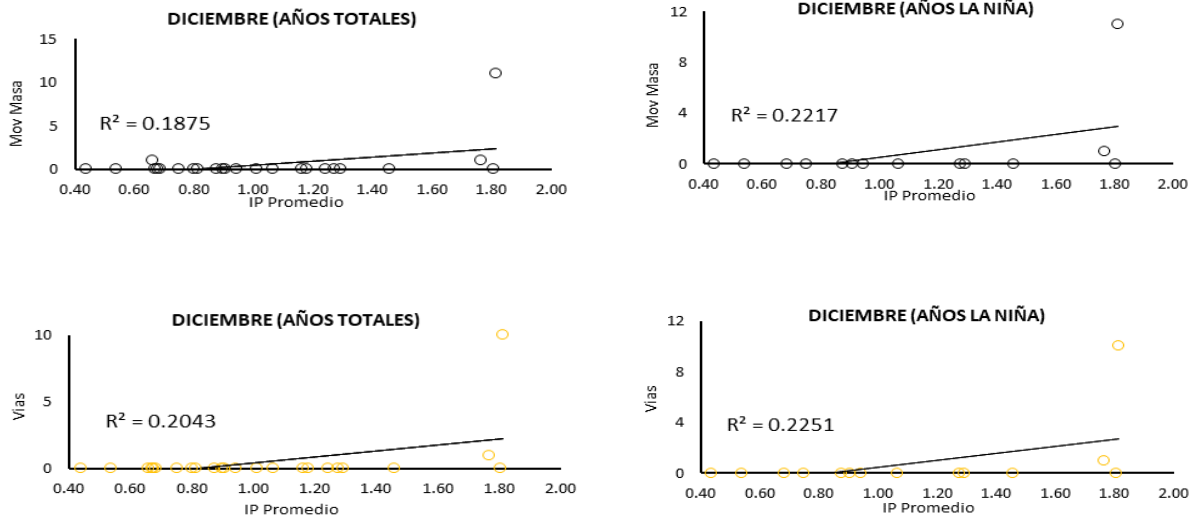
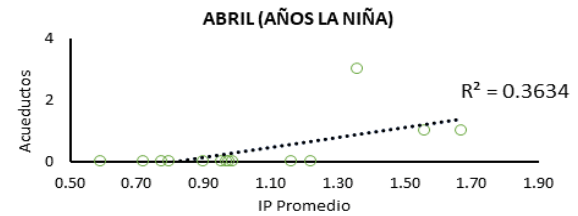
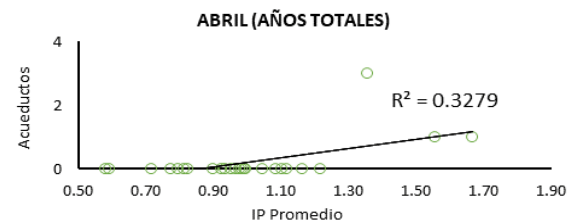
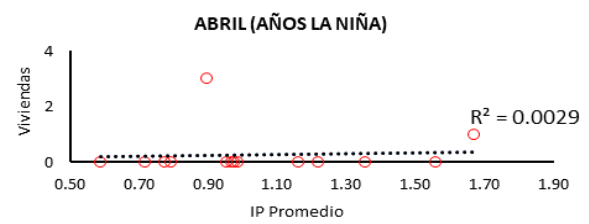
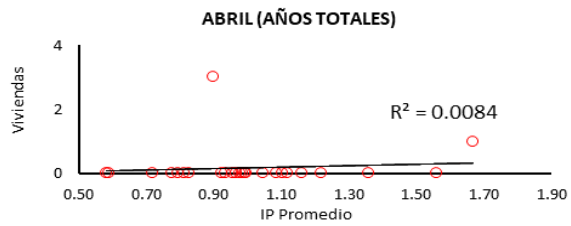
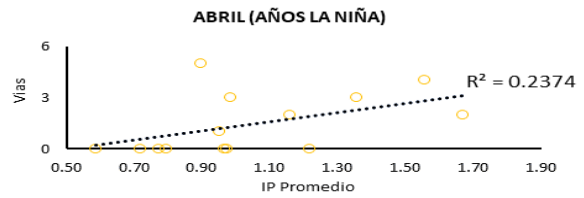
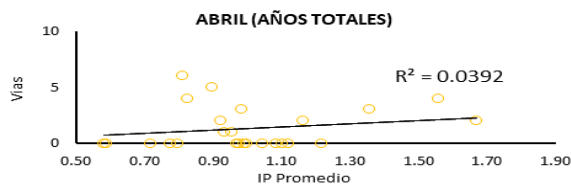
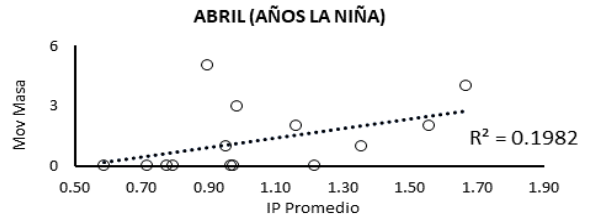
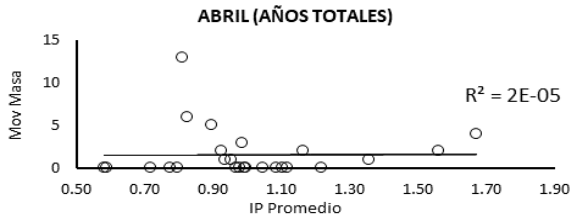
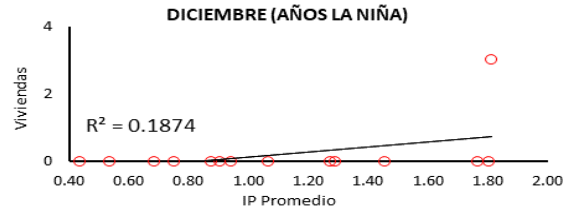
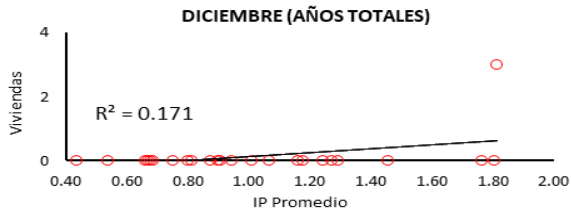


Figura 20

Correlaciones mensuales entre IP promedio, movimientos en masa y afectaciones a infraestructura civil (vías, acueductos y viviendas) en para diciembre (mes seco) y abril (mes lluvioso).





5. Discusión

En el territorio colombiano en el último tiempo ha sido estudiada y establecida la relación existente entre la precipitaciones y los movimientos en masa como lo demuestran algunos estudios (García-Delgado et al., 2022), (Bedoya et al., 2019), (Emberson et al., 2021), (Vega et al., 2024). Sin embargo, no se ha establecido la relación de estos hacia las afectaciones a infraestructura civil. Cabe mencionar que este estudio se centra en el análisis para el departamento de Santander.

En este estudio se observó, que en el departamento de Santander se presenta un comportamiento bimodal de precipitaciones, donde las mayores precipitaciones se presentan hacia los trimestres MAM y SON. La fase fría del ENOS (La Niña) en el departamento afecta tanto en la distribución como en las cantidades de precipitaciones (Poveda et al., 2011); en la cual se presenta un aumento en las precipitaciones durante todo el año en comparación con los años sin ninguna incidencia de La Niña. Las anomalías de precipitación a nivel anual y mensual, mostraron que cuando hay una incidencia del fenómeno un número de estaciones registran mayores precipitaciones excedentes de lo normal, pero no son todas, pero para el año 2010 – 2011 en su totalidad las estaciones utilizadas para el análisis registraron estos excesos, lo que hace entender que la intensidad con la que se haya categorizado el fenómeno de La Niña, repercute en que ocurran menores o mayores precipitaciones que se excedan de los registros normales. Sin embargo, en algunos meses de años no categorizados como La Niña, ocurrieron estas anomalías las cuales pudieran estar relacionadas a lluvias puntuales o eventos climatológicos extremos como una temporada de huracanes, entre otros. Para conocer los tiempos de respuesta de las anomalías de

precipitación y las señales de los indicadores que indican la presencia del fenómeno (La Niña) se utilizaron los indicadores ONI y EMI, obteniendo un tiempo promedio de respuesta menor cuando ocurre un La Niña Modoki. Cabe mencionar, que el área de influencia de la estación Curití 2 [24020130], presenta un rezago promedio mayor al rezago promedio que se presenta en el departamento para las dos señales (ONI/EMI), lo que hace pensar que pudieron existir problemas o errores en las tomas de los datos de precipitación de la estación.

En los catálogos de los registros de movimientos en masa utilizados para la conformación de la base de datos, se observó que el número de registros de ocurrencia de movimientos en masa y los reportes de afectaciones iban aumentando mientras transcurrían los años, siendo el pico de registros los años 2010 y 2011. Este estudio confirmó que la influencia de la fase fría del ENOS tanto Canónico como Modoki repercute en la ocurrencia de movimientos en masa, coincidiendo con los resultados obtenidos por otros estudios (García-Delgado et al., 2022),(Bedoya et al., 2019),(Vega et al., 2024),(Sepúlveda & Petley, 2015). La ocurrencia de los movimientos en masa coincidió con el comportamiento bimodal de precipitaciones, siendo noviembre y mayo los meses con mayor número de reportes con algunos picos de ocurrencias en los meses de julio y agosto. Además, la distribución de estos eventos se concentró hacia la zona nororiental del departamento (provincias Metropolitana, Soto Norte y García Rovira) donde la cordillera Oriental presenta una topografía más escarpada y se concentra la mayor concentración demográfica del departamento.

Además, se confirmó la influencia de la fase fría del ENOS en la ocurrencia de movimientos en masa en las afectaciones a infraestructura civil, las vías representan los mayores

reportes de afectación, además que estas presentan un comportamiento bimodal, al igual que al descrito anteriormente con los movimientos en masa, esto puede estar desencadenado en que la mayoría de reportes que se realizan de eventos de ocurrencia de movimientos en masa afectaron las vías; en los acueductos el 82% de los registros utilizados para el análisis se presentaron en años La Niña de los cuales el 50% ocurrieron en el año 2010 - 2011. En las viviendas no se pudo lograr apreciar esta tendencia, sin embargo en los registros totales los años con mayores registros de afectaciones en viviendas fueron 2010 - 2011 y 2011 - 2012 años con ocurrencia del fenómeno de La Niña.

6. Conclusiones

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia de la fase fría del ENOS (Canónico y Modoki) en la afectación de la infraestructura civil por ocurrencia de movimientos en masa en la región nororiental de Colombia; para lo cual se utilizaron datos de registros de movimientos en masa desde junio de 1998 a mayo de 2023. Con los resultados obtenidos, se concluye:

Este estudio contribuye al mejor entendimiento de los efectos del fenómeno de La Niña en el Departamento de Santander a través del análisis de anomalías de precipitación y su correlación con afectaciones a la infraestructura civil del departamento.

Se verificó el comportamiento bimodal de la precipitación en el Departamento y su distribución espacial; sin embargo, una mejor distribución y densidad espacial de las estaciones de monitoreo de clima a lo largo del Departamento (y el País) permitirían comprender con mayor claridad las tendencias espaciales de los patrones de precipitación y sus anomalías.

El índice de precipitación (IP) permitió identificar espacial y temporalmente las anomalías de precipitación ocurridas en la ventana de tiempo del estudio (1998-2023). Usando el IP anual se verificó que para los años La Niña (Canónica y Modoki) las 26 estaciones seleccionadas registraron excesos de precipitación, aunque sin un patrón espacial consistente durante estos años. A nivel mensual, se evidencia que, además del ENOS, existen otros fenómenos climáticos que producen anomalías positivas de precipitación. Sin embargo, sí se evidencia el efecto de La Niña

a esta escala, pues los porcentajes promedio de excesos de precipitación son mayores cuando solo se analizan los periodos La Niña.

El análisis del inicio de la señal vs. el inicio de la anomalía de precipitación permitió establecer un rezago promedio entre 1-3 meses, siendo más corto para el caso de la señal de La Niña Modoki (1-2 meses).

La caracterización temporal y espacial de los movimientos en masa permitió identificar que la ocurrencia de eventos de movimientos en masa en Santander está estrechamente relacionada con las precipitaciones coincidiendo los mayores registros con los picos de precipitaciones en el departamento (trimestres MAM y SON), incrementándose cuando hay ocurrencia de un fenómeno de La Niña. La distribución de los movimientos en masa causados por precipitación deja ver que el impacto del fenómeno fue importante en todo el Departamento, pero está sesgada por las características del relieve y la ubicación de los asentamientos poblacionales.

Las correlaciones entre series de precipitación (anomalías) y afectaciones arrojaron que, se observan mejores relaciones tanto a nivel anual como mensual, cuando se evalúan los años La Niña; cumpliéndose para IP (fracción) vs. Número de Movimientos en Masa, Afectaciones a vías y Afectaciones a Acueductos, pero no para Afectaciones a Viviendas.

7. Recomendaciones

Como se ha expresado en este documento, es necesario que en futuros estudios se integren, se analicen y se logren identificar que fenómenos climáticos, además del ENOS repercuten a que se produzcan anomalías positivas de precipitación a nivel mensual en el departamento.

Se espera que en estudios posteriores se aborden nuevas metodologías en las cuales se pueda comprender de mejor manera las tendencias espacio temporales de los patrones de precipitación como sus anomalías tanto en el departamento como en el país.

Se desea que este estudio sirva como un catalizador para que se sigan realizando estudios de este tipo en todas las regiones del país, para así lograr desarrollar un consolidado histórico a nivel nacional de las afectaciones a la infraestructura civil por movimientos en masa cuando hay incidencia de la fase fría del ENOS.

Como es conocido, cuando se presenta un fenómeno hidro climático como el ENOS, especialmente la fase fría (La Niña) que en nuestro país genera un exceso de precipitaciones se presentan desastres diferentes a los movimientos en masa como pueden ser las inundaciones, avalanchas, entre otros. Se espera que en próximos estudios estos desastres se tengan en cuenta para nutrir el consolidado histórico de afectaciones a infraestructura por incidencia del ENOS, y que además se pueda considerar el factor económico tanto directo como indirecto que generaron estas afectaciones.

Referencias Bibliográficas

- Álvarez-Villa, O. D., Vélez, J. I., & Poveda, G. (2011). Improved long-term mean annual rainfall fields for Colombia. *International Journal of Climatology*, 31(14), 2194-2212.
- Apaico, G. P. (2023). *GeomarPerales/ideamR* [R]. <https://github.com/GeomarPerales/ideamR> (Obra original publicada en 2021)
- Aristizábal, E., Gamboa, M. F., & Leoz, F. J. (2010). SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA POR MOVIMIENTOS EN MASA INDUCIDOS POR LLUVIA PARA EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA. *Revista EIA*, 13, 155-169.
- Aristizábal, E., García, E., & Martínez, C. (2015). Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains. *Natural Hazards*, 78(1), 621-634. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1736-4>
- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131), 209-227.
- Aristizábal, E., Riaño, F., & Jiménez-Ortiz, J. (2022). Rainfall thresholds as triggering factor in the Central cordillera of the Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 44(2), 183-197. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n2-2022009>
- Aristizábal, E., & Sánchez, O. (2020). Spatial and temporal patterns and the socioeconomic impacts of landslides in the tropical and mountainous Colombian Andes. *Disasters*, 44(3), 596-618. <https://doi.org/10.1111/disa.12391>

- Ashok, K., Behera, S. K., Rao, S. A., Weng, H., & Yamagata, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C11).
<https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Ashok, K., & Yamagata, T. (2009). The El Niño with a difference. *Nature*, 461(7263), 481-484.
<https://doi.org/10.1038/461481a>
- Bedoya, K. N., Giraldo, E. V. A., & Rodelo, J. A. M. (2019). Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias en la región Andina. *Ingeniería y Ciencia*, 15(29), Article 29.
<https://doi.org/10.17230/ingciencia.15.29.1>
- Bedoya-Soto, J. M., Poveda, G., Trenberth, K. E., & Vélez-Upegui, J. J. (2019). Interannual hydroclimatic variability and the 2009–2011 extreme ENSO phases in Colombia: From Andean glaciers to Caribbean lowlands. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3), 1531-1544. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2452-2>
- Benavides, H. O. (2020). *Hoja Metodológica del indicador Índice de Precipitación* (p. 15) [Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Servicio de Información Ambiental.]. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- Beniche, M., Vialard, J., Lengaigne, M., Voltaire, A., Srinivas, G., & Hall, N. M. J. (2024). A distinct and reproducible teleconnection pattern over North America during extreme El Niño events. *Scientific Reports*, 14(1), 2457. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52580-9>

- Bocanegra, J. E. M. (2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño Y La Niña en Colombia*. Bogotá DC: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM9).
- BoM. (2016, agosto). *¿Qué es La Niña y cómo afecta a Australia?* (Australia). Bureau of Meteorology Australian; scheme=AGLSTERMS.AglsAgent; corporateName=Australian Government - Bureau of Meteorology. <http://www.bom.gov.au/climate/updates/articles/a020.shtml>
- BoM. (2024). *Acerca del clima australiano* (Australia). Bureau of Meteorology Australian; scheme=AGLSTERMS.AglsAgent; corporateName=Australian Government - Bureau of Meteorology. <http://www.bom.gov.au/climate/about/australian-climate-influences.shtml?bookmark=walkercirculation#page-top>
- Campos García, A., Holm-Nielsen, N., Diaz G., C., Rubiano Vargas, D. M., Costa P., C. R., Ramirez Cortes, F., & Dickson, E. (2011). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: Un aporte para la construcción de políticas públicas - Resumen Ejecutivo (Vol. 1)*. <http://hdl.handle.net/10986/12308>
- Catalayud, C., & Camacho, J. (2024, febrero 23). Cambio climático y transporte: Escenarios para las principales infraestructuras de la región. *Moviliblog*. <https://blogs.iadb.org/transporte/es/cambio-climatico-y-transporte-escenarios-para-las-principales-infraestructuras-de-la-region/>
- Center, N. C. P. (2024). *NOAA's Climate Prediction Center*. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

CEPAL. (2020, abril 20). *The resilience of infrastructure services in Latin America and the Caribbean: A first approach*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/items/0d2c39d9-e6b5-4fb1-a724-c32b386a9b3e>

CEPAL, N., BID, & Planeación, C. D. N. de. (2013). *Valoración de daños y pérdidas: Ola invernal en Colombia 2010-2011*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/37958>

Climate.gov. (2016, enero 18). *El Niño y La Niña: Preguntas frecuentes* / NOAA Clima.gov. Climate.gov (NOAA). <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-frequently-asked-questions>

Córdoba-Machado, S., Palomino-Lemus, R., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2015). Assessing the impact of El Niño Modoki on seasonal precipitation in Colombia. *Global and Planetary Change*, 124, 41-61. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.003>

Corpoboyacá. (2020, noviembre 27). *ABC Lo que debes saber sobre los movimientos en masa*. Corpoboyacá. <https://www.corpoboyaca.gov.co/noticias/abc-lo-que-debes-saber-sobre-los-movimientos-en-masa/>

Corporación OSSO. (1996). *DesInventar—Perfil*. <https://www.desinventar.net/DesInventar/profiletab.jsp?countrycode=col&continue=y>

Corporación OSSO. (2020, agosto). *DesInventar Project—Official Website*. DesInventar. <https://www.desinventar.org/>

Di Liberto, T. (2014, agosto 1). *La circulación de Walker: El compañero atmosférico de ENSO* / NOAA Clima.gov. Climate.gov (NOAA). <http://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy>

- Dou, H., Wang, R., Wang, H., & Jian, W. (2023). Rainfall early warning threshold and its spatial distribution of rainfall-induced landslides in China. *Rock Mechanics Bulletin*, 2(3), 100056. <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2023.100056>
- Emberson, R., Kirschbaum, D., & Stanley, T. (2021). Global connections between El Nino and landslide impacts. *Nature Communications*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22398-4>
- Enrriquez de Salamanca Sánchez-Cámara, Á. (2017). *Consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras lineales de transporte.*
- Fernández Lopera, C. C., Castro Rivera, J. A., & Desastres, U. N. para la G. del R. de. (2016). Fenómeno El Niño, Análisis comparativo 1997-1998 // 2014-2016. *instname:Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.* <http://172.16.10.183/handle/20.500.11762/20564>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Fustos, I., Abarca-del-Rio, R., Moreno-Yaeger, P., & Somos-Valenzuela, M. (2020). Rainfall-Induced Landslides forecast using local precipitation and global climate indexes. *Natural Hazards*, 102(1), 115-131. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03913-0>
- García Rivera, K. M., & Moreno Ortiz, D. R. (2024). *Estudio espacial de los campos de precipitación y temperatura para el departamento de Santander usando información observacional y satelital o de reanálisis.* <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15913>

- García-Delgado, H., Petley, D. N., Bermúdez, M. A., & Sepúlveda, S. A. (2022). Fatal landslides in Colombia (from historical times to 2020) and their socio-economic impacts. *Landslides*, 19(7), 1689-1716. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01870-2>
- García-Delgado, H., Villamizar-Escalante, N., & Bernet, M. (2019). Recent tectonic activity along the Bucaramanga Fault System (Chicamocha River Canyon, Eastern Cordillera of Colombia): A geomorphological approach. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 199-215. <https://doi.org/10.1127/zfg/2019/0630>
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Gómez, D., Aristizábal, E., García, E. F., Marín, D., Valencia, S., & Vásquez, M. (2023). Landslides forecasting using satellite rainfall estimations and machine learning in the Colombian Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 125, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104293>
- Guimarães Nobre, G., Muis, S., Veldkamp, T. I. E., & Ward, P. J. (2019). Achieving the reduction of disaster risk by better predicting impacts of El Niño and La Niña. *Progress in Disaster Science*, 2, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100022>
- Guo, Z., Ferrer, J. V., Hürlimann, M., Medina, V., Puig-Polo, C., Yin, K., & Huang, D. (2023). Shallow landslide susceptibility assessment under future climate and land cover changes: A case study from southwest China. *Geoscience Frontiers*, 14(4), 101542. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101542>
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., & Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme

- weather event. *Applied Geography*, 39, 16-25.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>
- IDEAM. (2021). *Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos*.
<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IDIGER. (2024, junio 13). *Riesgo por Movimientos en Masa—IDIGER*.
<https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS) (Ed.). (2002).
*Catálogo Nacional de Movimientos en Masa: Instituto Nacional de Investigaciones
Geológico Mineras (INGEOMINAS)*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico
Mineras (INGEOMINAS).
- Iskandar, I., Lestari, D. O., & Masumoto, Y. (2022). La Niña Modoki Enhanced Summer-Autumn
Precipitation over the Indonesian Region. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*,
58(4), 507-517. <https://doi.org/10.1007/s13143-022-00271-8>
- JAMSTEC. (2012). *Investigación sobre la predicción del clima en latitudes bajas / JAMSTEC*.
https://www.jamstec.go.jp/aplinfo/sintexf/e/elmodoki/about_elnm.html
- JAMSTEC. (2024). *JAMSTEC :: Visualización*.
<https://www.jamstec.go.jp/virtualearth/general/en/index.html>
- Kim, D.-W., Choi, K.-S., & Byun, H.-R. (2012). Effects of El Niño Modoki on winter precipitation
in Korea. *Climate Dynamics*, 38(7), 1313-1324. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1114->

- Kim, K., Chowdhury, R., Pant, P., Yamashita, E., & Ghimire, J. (2021). Assessment of ENSO risks to support transportation resilience. *Progress in Disaster Science*, *12*, 100196. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2021.100196>
- Kirschbaum, D., Adler, R., Adler, D., Peters-Lidard, C., & Huffman, G. (2012). Global Distribution of Extreme Precipitation and High-Impact Landslides in 2010 Relative to Previous Years. *Journal of Hydrometeorology*, *13*(5), 1536-1551. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-02.1>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, *249*, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., & Takahashi, K. (2015). The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, *93*(1), 5-48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Larkin, N. K., & Harrison, D. E. (2005). Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophysical Research Letters*, *32*(16). <https://doi.org/10.1029/2005GL022860>
- L'Heureux, M. L., Tippett, M. K., Takahashi, K., Barnston, A. G., Becker, E. J., Bell, G. D., Di Liberto, T. E., Gottschalck, J., Halpert, M. S., Hu, Z.-Z., Johnson, N. C., Xue, Y., & Wang, W. (2019). Strength Outlooks for the El Niño–Southern Oscillation. *Weather and Forecasting*, *34*(1), 165-175. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0126.1>

- Liang, X. S., Xu, F., Rong, Y., Zhang, R., Tang, X., & Zhang, F. (2021). El Niño Modoki can be mostly predicted more than 10 years ahead of time. *Scientific Reports*, *11*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97111-y>
- Marathe, S., & Karumuri, A. (2021). 4—The El Niño Modoki. En S. K. Behera (Ed.), *Tropical and Extratropical Air-Sea Interactions* (pp. 93-114). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818156-0.00009-5>
- Marcillo-Delgado, J. C., Alvarez-Garcia, A., & García-Carrillo, A. (2022). Communication strategies on risk and disaster management in South American countries. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *76*, 102982. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.102982>
- Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Gariano, S. L., Roccati, A., & Guzzetti, F. (2018). A tool for the automatic calculation of rainfall thresholds for landslide occurrence. *Environmental Modelling & Software*, *105*, 230-243. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.024>
- Mendoza Ramírez, J., & Aristizábal, E. (2017). 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*, *13*(26).
- meteoiberia. (s. f.). Teleconexiones Climáticas (NAO/AO/ENSO/MJO). *meteoiberia*. Recuperado 3 de agosto de 2024, de <https://meteoiberia.es/teleconexiones/>
- Moreiras, S. M. (2005). Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. *Landslides*, *2*(1), 53-59. <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0046-4>

- Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., Vieira, S. C., Navarro-Monterroza, E., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2019). El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(166), 120-132. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.704>
- Ngecu, W. M., & Mathu, E. M. (1999). The El-Nino-triggered landslides and their socioeconomic impact on Kenya. *Environmental Geology*, 38(4), 277-284. <https://doi.org/10.1007/s002540050425>
- NOAA. (2023a). *El Niño/Southern Oscillation (ENSO)* undefined. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/>
- NOAA. (2023b). *ENSO: Recent Evolution, Current Status and Predictions* (p. 32). Climate Prediction Center (NCEP). https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf
- NOAA. (2024a). *Administración Nacional Oceánica y Atmosférica*. <https://www.noaa.gov/>
- NOAA. (2024b). *NOAA's National Weather Service—Glossary*. <https://forecast.weather.gov/glossary.php?letter=a>
- NOAA. (2024c). *NOAA's National Weather Service—Glossary*. <https://forecast.weather.gov/glossary.php?letter=t>
- NOAA. (2024d). *Océano Pacífico—TAO | Conjunto global de boyas amarradas tropicales*. Global Tropical Moored Buoy Array (GT MBA). <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/pmel-theme/pacific-ocean-tao>

- NOAA. (2024e). *TAO/TRITON Mapa | Conjunto global de boyas amarradas tropicales*. Global Tropical Moored Buoy Array (GT MBA). <https://www.pmel.noaa.gov/gtmmba/taotriton-map>
- Pabón Caicedo, J. D., & Montealegre Bocanegra, J. E. (2017). *Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos*. <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/113>
- Poveda, G. (2004). LA HIDROCLIMATOLOGÍA DE COLOMBIA: UNA SÍNTESIS DESDE LA ESCALA INTER-DECADAL HASTA LA ESCALA DIURNA. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), Article 107. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.28\(107\).2004.1991](https://doi.org/10.18257/raccefyn.28(107).2004.1991)
- Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. A. (2011). 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*, 36(11), 2233-2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., & van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2020.00162>
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonally in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169-2178. <https://doi.org/10.1029/2000WR900395>

- Poveda, G., & Mesa, Ó. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1), Article 1.
- Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675-1678. <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. A., Moreno, H. A., Vieira, S. C., Agudelo, P. A., Toro, V. G., & Alvarez, J. F. (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. <https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>
- Poveda, G., Mesa, O. J., & Waylen, P. R. (2003). Nonlinear Forecasting of River Flows in Colombia Based Upon ENSO and Its Associated Economic Value for Hydropower Generation. En H. F. Diaz & B. J. Morehouse (Eds.), *Climate and Water: Transboundary Challenges in the Americas* (pp. 351-371). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3_15
- Poveda, G., & Salazar, L. F. (2004). Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 391-401. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.001>
- Puente-Sotomayor, F., Egas, A., & Teller, J. (2021). Land policies for landslide risk reduction in Andean cities. *Habitat International*, 107, 102298. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102298>

- Ren, H.-L., Zuo, J., & Deng, Y. (2019). Statistical predictability of Niño indices for two types of ENSO. *Climate Dynamics*, 52(9), 5361-5382. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4453-3>
- Restrepo, C., Walker, L. R., Shiels, A. B., Bussmann, R., Claessens, L., Fisch, S., Lozano, P., Negi, G., Paolini, L., Poveda, G., Ramos-Scharrón, C., Richter, M., & Velázquez, E. (2009). Landsliding and Its Multiscale Influence on Mountainscapes. *BioScience*, 59(8), 685-698. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.8.10>
- Ríos-Serrano, D. E. (2020). *Deconstrucción social y económica del fenómeno de El Niño en Lambayeque: Un estudio de caso en Perú | Publicación monográfica*. International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP.ORG). <https://www.ijsrp.org/monograph/Social-and-Economic-deconstruction-preface.php>
- Rosi, A., Peternel, T., Jemec-Auflič, M., Komac, M., Segoni, S., & Casagli, N. (2016). Rainfall thresholds for rainfall-induced landslides in Slovenia. *Landslides*, 13(6), 1571-1577. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0733-3>
- Salas, H. D., Builes-Jaramillo, A., Boers, N., Poveda, G., Mesa, Ó. J., & Kurths, J. (s. f.). Precipitation over northern South America and the far-eastern Pacific during ENSO: Phase synchronization at inter-annual time scales. *International Journal of Climatology*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1002/joc.8443>
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483-1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 | UNDRR*. (2015, junio 29). <http://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

Sepúlveda, S. A., & Petley, D. N. (2015). Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(8), 1821-1833.

Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., & Vargas, G. (2006). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International*, 158(1), 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.031>

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2022). *SIMMA - SGC*. <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>

SGC. (2022). *Inventario nacional de movimientos en masa y SIMMA*. <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/Paginas/Inventario-nacional-de-movimientos-en-masa-y-SIMMA.aspx>

Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2001). Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697-1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2)

UNESCO. (2012, febrero). *Guía para la implementación y sostenibilidad de Sistemas de Alerta Temprana ante Deslizamientos (SATD) en América Central—UNESCO Biblioteca Digital*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000227590>

UNGRD. (2020, agosto 19). *Riesgo por movimientos en masa en Colombia*. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>

UNGRD. (2021). *Lo que usted debe saber sobre deslizamientos*. <https://pubhtml5.com/pxou/anpe/basic/>

- UNGRD. (2024). *Consolidado Atención de Emergencias*.
<https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55(5), 4149-4162. <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- US Department of Commerce, N. O. and A. A. (2016). *NDBC TAO: Sensors*.
https://tao.ndbc.noaa.gov/proj_overview/sensors_ndbc.shtml
- Vanguardia. (2023, octubre 5). *Tres dolorosas historias de pérdidas económicas que deja el derrumbe en la vía a Barrancabermeja*. www.vanguardia.com.
<https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/tres-dolorosas-historias-de-perdidas-economicas-que-deja-el-derrumbe-en-la-via-a-barrancabermeja-FB7704304>
- Vega, J., Barco, J., & Hidalgo, C. (2024). Space-time analysis of the relationship between landslides occurrence, rainfall variability and ENSO in the Tropical Andean Mountain region in Colombia. *Landslides*, 21(6), 1293-1314. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02225-9>
- Villegas-González, P. A., Ramos-Cañón, A. M., González-Méndez, M., González-Salazar, R. E., & De Plaza-Solórzano, J. S. (2017). Territorial vulnerability assessment frame in Colombia: Disaster risk management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 21, 384-395. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.01.003>
- Weng, H., Behera, S. K., & Yamagata, T. (2009). Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dynamics*, 32(5), 663-674. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0394-6>

- Wiedermann, M., Siegmund, J. F., Donges, J. F., & Donner, R. V. (2021). Differential Imprints of Distinct ENSO Flavors in Global Patterns of Very Low and High Seasonal Precipitation. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.618548>
- Zeta Axis (Director). (2023, abril 20). *El nino Modoki and La nina Modoki | UPSC | Geography* [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=EYaCrESnh4U>
- Zhang, T., Hoell, A., Perlwitz, J., Eischeid, J., Murray, D., Hoerling, M., & Hamill, T. M. (2019). Towards Probabilistic Multivariate ENSO Monitoring. *Geophysical Research Letters*, 46(17-18), 10532-10540. <https://doi.org/10.1029/2019GL083946>
- Zubiaurre, I., & Calvo, N. (2012). The El Niño–Southern Oscillation (ENSO) Modoki signal in the stratosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D4), 15. <https://doi.org/10.1029/2011JD016690>

Apéndices

Se muestra la organización de los apéndices del trabajo los cuales se encuentran adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

- **Apéndice A.** ENOS Indicadores
 - **Apéndice A1.** ONI
 - **Apéndice A2.** EMI
- **Apéndice B.** Tablas Resumen
- **Apéndice C.** Base de Datos Movimientos en Masa
 - **Apéndice C1.** Registro Total
 - **Apéndice C2.** Registro Precipitación
- **Apéndice D.** Estaciones
 - **Apéndice D1.** Localización Estaciones (Imágenes)
 - **Apéndice D2.** Estaciones Seleccionadas
- **Apéndice E.** IP- Anomalías
 - **Apéndice E1.** Mapas IP años La Niña
 - **Apéndice E2.** Anomalías
- **Apéndice F.** Rezago
 - **Apéndice F1.** Mapas Rezago
- **Apéndice G.** Movimientos en Masa
 - **Apéndice G1.** Movimientos en masa totales
 - **Apéndice G2.** Movimientos en masa precipitaciones
 - **Apéndice G3.** Localización Movimientos en masa afectaciones
- **Apéndice H.** Correlaciones
- **Apéndice I.** Mapas