



**Identificación de emergencias naturales que tienen relación con sistemas convectivos
de mesoescala en Antioquia de 2008 a 2020.**

Miguel Ángel Ospina Bedoya

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor

Juan José Henao, Doctor (PhD) en Ingeniería Ambiental

Co-Asesora

Ángela María Rendón, Doctora (PhD) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita

(Ospina Bedoya, 2024)

Referencia

Ospina Bedoya, M. A. (2024). *Identificación de emergencias naturales que tienen relación con sistemas convectivos de mesoescala en Antioquia de 2008 a 2020*.

Estilo APA 7 (2020)

[Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Coordinador de prácticas:
Guillermo León Sepulveda



Centro de documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi abuela, que cuando la visitaba siempre me agradecía por acordarme de ella y ahora yo le agradezco por siempre acordarse en el cielo de mí.

Agradecimientos

A mi mamá por su cariño y entrega, a mi papá por su amor y abnegación. Todo lo que logre en la vida es gracias a ustedes, y lo que no logre sé que será acompañado por su aliento y amor. No me alcanzarán las palabras de gratitud para decirles que todo se los debo.

A mi hermana, que estando a 10000 kilómetros me seguía compartiendo su presencia y complicidad. No se lo digo mucho, pero la amo con toda el alma.

A Mar, que me sostuvo en el camino de construcción y reconstrucción de esta tesis.

A mi asesor Juan José por compartirme su gran conocimiento, por la paciencia -muchas veces más de la justa y necesaria- y su sentida vocación por la enseñanza.

A todos mis amigos incondicionales que me hicieron sentir que la universidad eran ellos.

A la Universidad de Antioquia, por forjarme de disciplina, paciencia, humildad y fortaleza. Donde quiera que esté llevaré tu valía y el honor por la pertenencia.

A Vanessa Robledo, y su equipo de trabajo en el proyecto “Implementación de un sistema de investigación y pronóstico meteorológico de corto plazo con el modelo WRF, para apoyo a sistemas de comando y control de la Fuerza Aérea Colombiana” por la información que hizo posible esta tesis.

Tabla de contenido

1.Introducción	2
2. Planteamiento Del Problema	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1 Objetivo General:	7
4.2 Objetivos Específicos:	7
5. Hipótesis	8
6. Marco Teórico	8
6.1 Sistemas Convectivos De Mesoescala (Mcss):	9
6.2 Algoritmo Atrackcs:	11
6.3 Relación Entre Mcss Y Desastres Naturales:	12
6.4 Definición Desastres Naturales	14
6.5 Desastres Naturales En Colombia.	14
6.5.1¿Qué Es La Unidad Nacional De Gestión Del Riesgo De Desastres?	14
6.6 Desastres Naturales En Antioquia.	16

	5
7. Metodología	17
7.1 Zona De Estudio:	18
7.2 Descarga De Datos Sobre Emergencias Debido A Desastres Naturales:	19
7.3 Periodo De Estudio	19
7.4 Selección De Categorías Relacionadas A Desastres Naturales	20
7.5 Información Base De Datos Algoritmo Atrackcs:	21
7.6 Análisis De La Información.	22
7.6.2 Análisis De Correspondencia Mcss Con Desastres Naturales	22
7.6.3 Determinación Mcs-Ad Y Mcs-Noad	25
7.6.4 Enfoque De Correspondencia Según El Tipo De Desastre.	26
7.6.5 Casos De Estudio.	28
8. Resultados:	29
8.1 Identificación De Desastres Naturales En Antioquia.	29
8.2 Determinación De Correspondencia Entre Desastres Naturales Y Mcss.	34
8.2.1 Desastres Naturales Con Presencia De Mcs.	36
8.2.2 Presencia De Mcs En Los Desastres.	43
8.2.3 Análisis Temporal De Los Desastres Naturales Y Mcss En Antioquia.	49
8.3 Características De Los Mcss(Pol) Asociados A Desastres Naturales Y Los Mcss(Pol) No Asociados.	51
8.4 Casos de Estudio.	56
8.4.1. Vendaval, Caucasia 28 de julio de 2016.	57
8.4.2. Movimiento en Masa, Itagüi 25 de diciembre de 2020.	60

	6
8.4.3. Avenida Torrencial, Salgar 18 de mayo de 2015.	64
9.Discusión.	69
10.Conclusiones.	73
11. Referencias Bibliográficas	74

Siglas, acrónimos y abreviaturas

MCSs	Sistemas Convectivos de Mesoescala (Meso-scale Convective Systems)
MCS	Sistema Convectivo de Mesoescala (Meso-scale Convective System)
UNGRD	Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres

Resumen

Los sistemas convectivos de mesoescala (MCSs) son sistemas atmosféricos que se extienden cientos de kilómetros y que generan grandes cantidades de precipitación. Específicamente en Colombia, estos sistemas generan aproximadamente el 40% del volumen de precipitación total a pesar de que representan menos del 1% del total de sistemas de precipitación. Asimismo, se evidencia que los MCSs están asociados a inundaciones, movimientos en masa y vendavales. Sin embargo, en Suramérica la investigación relacionada a MCSs es limitada y demanda un mayor desarrollo. Este estudio analiza la relación entre los desastres naturales y los MCSs ocurridos en el departamento de Antioquia, Colombia para el periodo 2008-2020 por medio del algoritmo ATRACKCS para la obtención de datos de MCSs y la base de datos de la Unidad Nacional de Riesgo de Desastres (UNGRD) para la información de emergencias naturales. Los resultados muestran que en promedio en el 43% de los desastres naturales estudiados hay participación de MCSs. Las zonas con mayor correspondencia de MCSs y desastres son los municipios del nororiente y noroccidente del departamento, con presencia de MCSs en más del 65% de los desastres ocurridos. Los municipios del Valle de Aburrá también son de especial interés por registrar el mayor número de fallecidos y por la población que habita en zonas de alto riesgo. Este estudio propicia la comprensión de las dinámicas de los MCSs en el territorio y contribuye al mejoramiento de la gestión del riesgo por medio de la caracterización de sistemas que pueden generar desastres naturales.

Palabras clave: Sistema convectivo de mesoescala (MCS), desastre natural, gestión del riesgo, precipitación, ATRACKCS, inundación, deslizamiento, departamento de Antioquia, UNGRD.

1.Introducción

Los sistemas convectivos de mesoescala (MCSs, por sus siglas en inglés) son fenómenos climáticos que, a pesar de no estar muy presentes en la conciencia colectiva de las personas, son cruciales en el ciclo hidrológico de la tierra debido a que generan una enorme cantidad de precipitación en los sitios donde se presentan (Houze, 2018). Estos sistemas son conjuntos de nubes que se extienden en cientos de kilómetros y poseen una zona de precipitación de al menos 100 km de longitud (Schumacher & Rasmussen, 2020). El tipo de precipitación convectiva es característica de estos sistemas, al igual que la lluvia estratiforme (Jirak & Cotton, 2007) que además es asociada ampliamente a las inundaciones (Houze, 2018).

Las inundaciones debidas a los MCSs obedecen principalmente a las precipitaciones extremas que causan (Schumacher & Rasmussen, 2020), generando a su vez otros tipos de desastres naturales como deslizamientos o tormentas eléctricas (Hunt & Dimri, 2021). Dichos desastres naturales tienen un impacto preponderante en Suramérica, a consecuencia de que es en los países con ingresos bajos y medios donde se dan mayores pérdidas humanas por estos fenómenos (Palharini et al., 2022). Además, con la influencia del cambio climático se espera que las precipitaciones extremas se agudicen y sean más frecuentes, incrementando a su vez el número de personas afectadas (García et al., 2009).

Los impactos de los desastres naturales son un objeto de estudio importante en Colombia debido a que la geografía que la compone la hacen propensa a ser afectada por estos eventos naturales (Ayala & Ospino, 2023). Específicamente, Antioquia es el departamento de Colombia que más desastres naturales registra según la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), siendo ocasionados principalmente por fenómenos hidrometeorológicos (Ayala & Ospino, 2023). Es evidente entonces la necesidad que tiene el departamento de

Antioquia de identificar y categorizar a profundidad el tipo de fenómenos naturales relacionados a los eventos hidrometeorológicos que causan los desastres naturales.

Este estudio se basa precisamente en la identificación de emergencias debidas a fenómenos naturales que tiene relación con sistemas convectivos de mesoescala en un período de 12 años (2008 a 2020) en el departamento de Antioquia, con el objetivo de poder categorizar cuales son los tipos de desastres asociados a MCSs, qué porcentaje de cada tipo de desastre se asocia a los sistemas convectivos de mesoescala y cuál es su frecuencia. Este tipo de estudios son fundamentales para los organismos de atención y prevención del riesgo ya que permitirán brindar una atención oportuna a las zonas vulnerables por medio del monitoreo de los MCSs y la pronta respuesta ante su detección, lo que puede mejorar los protocolos de prevención, así como la disminución de pérdidas humanas y materiales.

2. Planteamiento del problema

Los desastres naturales tienen un impacto trascendental a nivel global. En 2023 se estima que unos 93,1 millones de personas resultaron afectadas por desastres naturales, de las cuales 86 mil personas murieron. Adicionalmente, las pérdidas económicas se estiman de más de 202,7 billones de dólares (CRED, 2024).

Para Colombia, el panorama no es más alentador ya que por sus características geográficas enfrenta niveles altos de riesgo frente a desastres naturales (Ayala & Ospino, 2023). Como muestra, en 2019 hubo 3852 desastres naturales, que dejaron 145 fallecidos (UNGRD, 2020b). Precisamente, el departamento de Antioquia es uno de los que más padecen las consecuencias de los desastres naturales, ya que de 1998 a 2021 fue la región de Colombia donde más personas murieron por los desastres naturales. Los eventos de desastre se relacionaron principalmente con

efectos hidrometeorológicos, donde las fuertes precipitaciones determinaron la ocurrencia de los eventos de emergencia (Ayala & Ospino, 2023).

Debido a la relación entre eventos con precipitación intensa y los desastres naturales en el departamento, se hace imprescindible el estudio de los sistemas que generan lluvia, y obtener más información que permita abordar de una manera amplia la relación de dichos sistemas con los desastres naturales.

Uno de los tipos de sistemas vinculados con altas cantidades de precipitación, son los (MCSs). Los MCS son sistemas con áreas de precipitación de más de 100 km² y suceden principalmente en áreas tropicales y subtropicales (Houze, 2004). Estos sistemas cobran especial relevancia ya que generan aproximadamente el 40% del volumen total de lluvia en el país (Jaramillo et al., 2017), sumado a que están ligados a lluvias intensas en múltiples casos (Schumacher & Rasmussen, 2020).

Se torna relevante entonces establecer relaciones de los MCSs con los desastres naturales para entender mejor su ocurrencia, comportamiento y participación en la generación de desastres naturales. A nivel internacional estos esfuerzos han resultado fructíferos ya que, por ejemplo, en Estados Unidos se han cuantificado el porcentaje de MCSs involucrados en inundaciones, tormentas eléctricas y tornados (Houze, 2018). Sin embargo, en Colombia, a pesar de que hay investigaciones respecto a MCSs, aún hay un amplio vacío de conocimiento respecto a sistemas convectivos, y se requiere una mayor investigación que pueda categorizar y evidenciar la influencia de los MCSs en Colombia y específicamente en el departamento de Antioquia.

El presente estudio adquiere especial relevancia ya que analiza la relación entre los MCSs y los desastres naturales en Antioquia, y busca establecer la influencia de los MCSs en los diferentes tipos de eventos de desastre relacionados a las precipitaciones y vientos asociados a

los MCSs, por lo cual contribuye de manera esencial al entendimiento de la ocurrencia de desastres naturales y por consiguiente a la mejora en la prevención del riesgo.

3. Justificación

La comprensión de los desastres naturales y los factores que lo rodean es un ejercicio crucial en el contexto de crisis ambiental que se experimenta a nivel planetario. La crisis ambiental global tiene importantes repercusiones y una de las más preocupantes es el favorecimiento de las condiciones que propician la ocurrencia de los desastres naturales, como las precipitaciones intensas y duraderas (Cooper et al., 2021).

Es fundamental poder categorizar a fondo las condiciones, las características y la composición de los elementos que tienen relación con sistemas ambientales involucrados en el favorecimiento de los desastres naturales, como los sistemas de precipitación. Un tipo de sistema que es imperativo estudiar son los (MCSs) por el protagonismo que tiene en el volumen de precipitación que contiene para las latitudes tropicales y subtropicales principalmente (Fritsch & Forbes, 2001).

Es primordial, además, el desarrollo de estudios que midan el impacto y la influencia de los MCSs dentro de los territorios de Suramérica, ya que la investigación continúa estando muy limitada en estas zonas (Schumacher & Rasmussen, 2020).

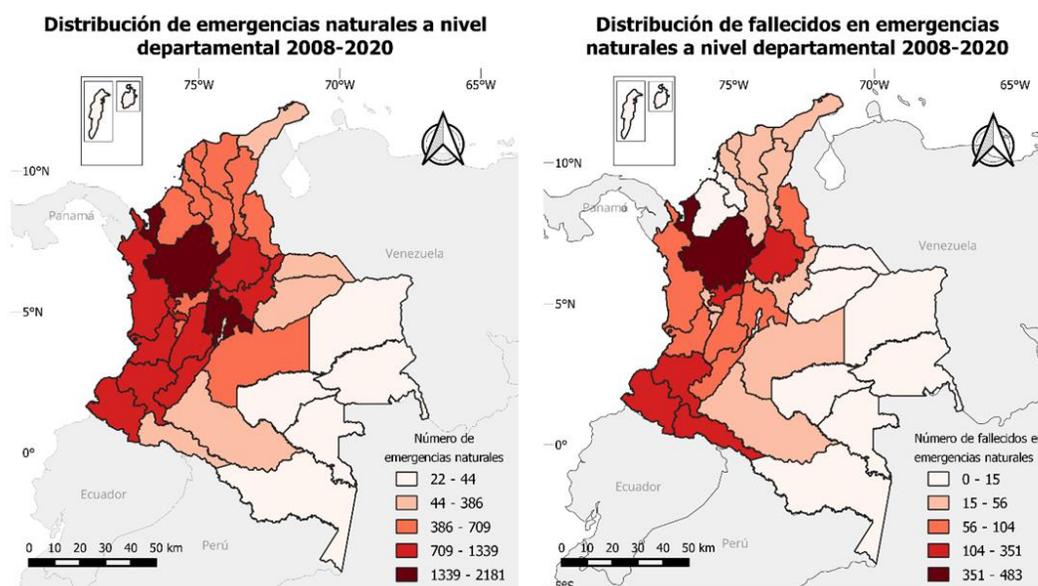
En Colombia, hay estudios que han analizado la presencia de MCSs en el territorio, como el de Jaramillo et al. (2017), el de Robledo (2023) y el de Mejía & Poveda (2005). Sin embargo, aún hay vacíos de conocimiento latentes en lo que respecta a la relación de los MCSs con los desastres naturales en Colombia, y más aún si se realiza una observación para los territorios específicos, como lo es el departamento de Antioquia.

El departamento de Antioquia sobresale en lo que concierne a los desastres naturales en Colombia. Según se indica en la Figura 1, el departamento no solo registra la segunda mayor cantidad de eventos, sino que también ha presentado el mayor número de fallecidos por desastres naturales de 2008 a 2020 (UNGRD, 2020a). Sumado a esto, se encuentran factores críticos que podrían incrementar el riesgo de desastres naturales, como:

- El aumento de las precipitaciones en intensidad y duración debido a la crisis climática (Trenberth, 2011), con incrementos en MCSs reportados en otras latitudes (Song et al., 2022)
- Un incremento en la población asentada en las zonas de alto riesgo (Urbam, 2012).

Figura 1:

Distribución de emergencias y fallecidos a nivel departamental por desastres naturales en Colombia entre 2008 y 2020.



Nota: El gráfico evidencia que en el periodo de 2008 a 2020 el departamento de Antioquia tuvo el registro más alto de personas fallecidas y está entre los dos departamentos con más incidentes de desastres naturales. Datos de *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020, Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres.

Tomando en consideración el vacío de conocimiento concerniente a MCSs en Colombia, y la relevancia que adquiere para el departamento de Antioquia el análisis de los desastres naturales en el territorio, el presente estudio realiza un aporte esencial para el entendimiento de la relación entre los MCSs y los desastres naturales en Antioquia, ya que determina en qué tipo de desastres naturales hubo presencia de MCSs, en qué porcentaje y los municipios de mayor correspondencia.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General:

Analizar la relación entre la ocurrencia de sistemas convectivos de mesoescala y las emergencias debidas a fenómenos naturales ocurridas en Antioquia.

4.2 Objetivos Específicos:

- Caracterizar los tipos de emergencias debidas a fenómenos naturales que pueden estar relacionados con sistemas convectivos de mesoescala.
- Identificar las emergencias por fenómenos naturales que ocurrieron en presencia de sistemas convectivos de mesoescala en el período de 2008 al 2020 en Antioquia.
- Evaluar la relación entre tipos de emergencias por fenómenos naturales y sistemas convectivos de mesoescala en Antioquia.

5. Hipótesis

La relación entre los sistemas convectivos de mesoescala (MCSs) y los desastres naturales que suceden en Antioquia, Colombia es una relación estrecha. Primero, en confirmación de lo mencionado por Jaramillo et al. (2017) acerca del volumen de precipitación generada por los MCS (aproximadamente 40%); y segundo, por el factor de la precipitación extrema (presente en los MCSs) siendo la causante principal de los desastres naturales en el departamento de Antioquia (Ayala & Ospino, 2023).

En congruencia con la literatura existente, los MCSs y los desastres naturales en el periodo de estudio (2008-2020) tienen una correspondencia total del 30%. Es decir, para 100 desastres naturales vinculados a fenómenos hidrometeorológicos, en 30 de ellos hay presencia de sistemas convectivos de mesoescala.

Asimismo, el tipo de desastre natural donde se encuentra una mayor prevalencia de MCSs son las inundaciones debido a la precipitación extrema presente en estos sistemas, y además, por la acumulación de lluvia que logra desencadenar estos eventos de emergencia (Palharini et al., 2022). A su vez, para la presente investigación, los vendavales son el tipo de desastre donde hay menor presencia de MCSs -el 20% de los eventos registrados por la UNGRD- puesto que el algoritmo ATRACKCS se enfoca en sistemas de más de 2000 km² y los vendavales pueden ser provocados por sistemas de menor tamaño (Sánchez & Calderón, 2015). Por otra parte, los municipios donde se evidencia una mayor influencia de los MCSs en el departamento son los pertenecientes a la región de Urabá por la cercanía al océano pacífico, que presenta una de las mayores ocurrencias de MCSs en la región (Jaramillo et al., 2017; Robledo, 2023).

6. Marco Teórico

6.1 Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCSs):

Desde el inicio del estudio de los sistemas convectivos de mesoescala, fundamentalmente con el surgimiento de la época de los radares en los años 60's (Houze, 2018), han surgido y se han transformado también distintas definiciones para los sistemas convectivos de mesoescala (MCSs por sus siglas en inglés: Mesoscale convective system). Una de las definiciones que mejor aborda los MCSs es la de Houze (2004), que establece que un MCS “Es un sistema de nubes del tipo cumulonimbus que produce un área de precipitación continua con una extensión de al menos 100 km”.

Por lo tanto, una de las características más representativas de los MCSs es su extensión (Schumacher & Rasmussen, 2020). Además de la extensión de al menos 100 km para precipitación, también hay otras características que son constantes independientemente del lugar donde se dé el MCS, como por ejemplo la precipitación estratiforme y la precipitación convectiva (Jirak & Cotton, 2007). Es decir, a pesar de las diferencias geomorfológicas o de regímenes de lluvia entre los territorios donde suceden los MCSs, la precipitación estratiforme y la precipitación convectiva siempre van a estar presentes en estos sistemas (Houze, 2018).

Así como las características principales, es fundamental entender que la formación de los MCSs requieren de la convergencia de diversos factores, como lo son: la humedad, para que suceda la formación de nubes y precipitación; el ascenso, que es el mecanismo por el cual el aire es forzado a dirigirse hacia arriba (como un terreno inclinado); la inestabilidad atmosférica, que permite que las masas de aire sean menos densas que el ambiente que los contiene y puedan continuar el ascenso; y el cortante vertical del viento, que es la diferencia de la velocidad del viento entre dos niveles de altura de la atmósfera terrestre (Schumacher & Rasmussen, 2020). La reunión en conjunto de dichas condiciones es necesaria para que un MCS se desarrolle.

A partir del desarrollo de los MCSs se ha identificado y documentado ampliamente en la literatura que los lugares donde suceden típicamente los MCSs son las zonas continentales tropicales y subtropicales de Sur América, África, el sur de Asia y el continente marítimo (Schumacher & Rasmussen, 2020). Debido a la presencia de los MCSs, se produce una contribución significativa a la precipitación total en los territorios donde estos se distribuyen. Colombia experimenta una presencia notable de MCSs, especialmente en la región del Pacífico (Houze, 2018; Jaramillo et al., 2017; Robledo, 2023), que es una de las zonas más lluviosas del mundo (Mejia et al., 2021; Poveda & Mesa, 2000).

En esencia, los MCSs en los trópicos adquieren especial relevancia, fundamentalmente en Colombia, ya que a pesar de que los MCSs representan menos del 1% de los sistemas de precipitación totales en la región, contribuyen aproximadamente al 40% de la lluvia volumétrica total continental (Jaramillo et al., 2017). Es decir, pese a que es uno de los sistemas de precipitación que menos ocurre, aporta casi la mitad del volumen de lluvia en Colombia.

Adicional a los MCSs, en el estudio de Jaramillo et al. (2017) y otros también se identificaron otros sistemas de precipitación con áreas mayores a 75 km² que aportan al acumulado volumétrico de la lluvia y que se presentan con mayor regularidad en comparación con los MCSs. Estos sistemas son:

-Wois: sistemas de precipitación sin presencia de hielo.

-Wis: sistemas de precipitación con presencia de hielo.

Es importante tener presente la existencia de estos sistemas por su aporte a la precipitación tanto desde el punto de la intensidad y el aporte a los acumulados totales de lluvia (Jaramillo et al., 2017; Nesbitt et al., 2000).

Con base en el aporte a la precipitación de los diferentes sistemas involucrados en la precipitación, específicamente de los MCSs, cobra especial relevancia el estudio de este fenómeno en relación con la crisis ambiental global, ya que se prevé que las condiciones que permiten la formación y propagación de los MCSs sean favorables en un contexto de calentamiento climático, lo que podría incrementar tanto su frecuencia como su intensidad (Schumacher & Rasmussen, 2020). De manera que la representación, la generación de modelos climáticos que puedan ahondar en el estudio de los MCSs y el estudio local de los fenómenos convectivos es clave para la tipificación de los efectos de los MCSs (Houze, 2018).

Aún con el aumento de la investigación con un enfoque en los MCSs, existen todavía numerosas oportunidades de estudio respecto a los MCSs, incluyendo estudios que se necesitan con urgencia, en especial en Suramérica, África y diferentes zonas tropicales (Schumacher & Rasmussen, 2020). En efecto, uno de los vacíos de conocimiento más notables actualmente es respecto al impacto y efectos de los MCSs en dichas regiones, con lo cual es de vital importancia el enfoque en los desastres que puede generar la presencia de los MCS en los lugares de influencia de este fenómeno, particularmente en Colombia y en Antioquia (Polanco & Bedoya, 2005). Asimismo, es fundamental que el monitoreo y el pronóstico de MCS se sigan refinando y perfeccionando para mejorar la atención de desastres y la prevención del riesgo (Dimri et al., 2016).

6.2 Algoritmo ATRACKCS:

Los modelos y algoritmos para el monitoreo y seguimiento de los MCSs son una herramienta primordial para el desarrollo de la climatología aplicada a sistemas convectivos. Por

tanto, estos se hacen necesarios a la hora de realizar estudios que involucren la ubicación y la evolución de los MCSs (Sakamoto et al., 2011). Uno de los algoritmos creados para hacer el seguimiento de los MCSs es el descrito por Robledo (2023), en el cual se desarrolló un algoritmo para rastrear e identificar los MCSs en el noroccidente de Suramérica, con un enfoque lagrangiano. Este algoritmo utiliza dos conjuntos de datos satelitales de alta resolución espacial y temporal para rastrear los MCSs: datos de temperatura de brillo (Tb) y datos de precipitación (P) (Robledo, 2023).

De igual manera, para la aplicación del algoritmo se plantean criterios de definición de un MCS, como el tamaño, su temperatura de brillo máxima para ser clasificados, entre otros para facilitar el seguimiento y rastreo de estos, además de poder tener una información de mejor calidad. Estos criterios son:

- 1) Sistemas de nubes frías con un umbral de temperatura máximo ($T_b < 225K$) y un área mínima ($\text{área} > 2000 \text{ Km}^2$).
- 2) Debe haber al menos cinco píxeles en los sistemas de nubes frías seleccionados en el criterio 1) con una tasa de precipitación ($p > 2 \text{ mm/h}$).
- 3) Los criterios 1 y 2 deben ocurrir de manera continua durante más de 5 horas.

6.3 Relación entre MCSs y desastres naturales:

A la hora de analizar los MCSs, uno de los factores críticos es la precipitación extrema que generan, dado que es precisamente la precipitación extrema la que contribuye de manera fundamental a que se produzcan desastres naturales (Palharini et al., 2022). Uno de los desastres naturales mejor documentados a nivel global asociados con los MCSs son las inundaciones, donde se tiene evidencia que los MCSs son uno de los principales causantes (Houze, 2004). Por

ejemplo, Schumacher & Johnson (2005) identificaron que “el 65% de los eventos de precipitación definida como ‘extrema’ en los Estados Unidos están asociados con MCSs”. A su vez, estos sistemas generalmente producen granizo, fuertes vientos e incluso tornados (Houze, 2018).

Partiendo de la precipitación extrema también podemos asociar diferentes desastres naturales, como los deslizamientos que documenta Jeong et al. (2016), que fueron condicionados o detonados por un MCS.

Asimismo, las tormentas eléctricas también están presentes frecuentemente en los lugares donde se desarrollan MCSs (Schumacher & Johnson, 2005; Schumacher & Rasmussen, 2020), dado que estos sistemas tienen grandes desarrollos verticales y generalmente producen hielo. En esta lista se incluyen otros desastres naturales que, a pesar de no estar documentados ampliamente por la literatura, se relacionan indirectamente con los MCSs a través de la asociación de los desastres con la precipitación extrema que generan, los cuales son: las avenidas torrenciales, los vendavales y las crecientes súbitas. Como caso concreto se encuentra Latinoamérica, donde la principal causa de desastres naturales se asocia a las lluvias intensas (García et al., 2009).

Por lo tanto, a pesar de que los MCSs son sistemas cruciales y necesarios para el ciclo hidrológico, también generan condiciones climatológicas severas en los entornos donde tienen presencia (Fritsch & Forbes, 2001). En consecuencia, la comprensión de los desastres naturales vinculados a MCSs pueden permitir a los organismos de prevención y atención del riesgo tener mejores procedimientos y protocolos para su atención (Jirak & Cotton, 2007). Estos sistemas deben tener especial relevancia en el territorio colombiano, ya que los MCSs son bastante

frecuentes en algunas regiones, hay poca investigación, y además el país pertenece a los países de ingresos bajos y medios, que es donde ocurren el 95% de las muertes ligadas a desastres naturales (Palharini et al., 2022).

6.4 Definición desastres naturales

Los desastres naturales o las emergencias debido a fenómenos naturales se refieren a “eventos meteorológicos o climáticos extremos que se producen en cualquier lugar del mundo y ocasionan destrucción de vidas o bienes de la población” (IDEAM, 2010). Es decir, que para que un fenómeno natural sea un desastre natural debe tener una afectación sobre la vida de las personas, ya sea en sus bienes materiales o su integridad.

6.5 Desastres naturales en Colombia.

Las emergencias debidas a fenómenos naturales en Colombia han tenido un papel protagónico en cuanto al ordenamiento del territorio y la prevención del desastre debido a que las características geográficas que presenta el país tienen altos niveles de riesgo de desastres naturales, desde los movimientos en masa y avenidas torrenciales en las cordilleras de la región andina, hasta las inundaciones en la región llanera (Ayala & Ospino, 2023) y diversas zonas urbanas en el país.

6.5.1 ¿Qué es la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres?

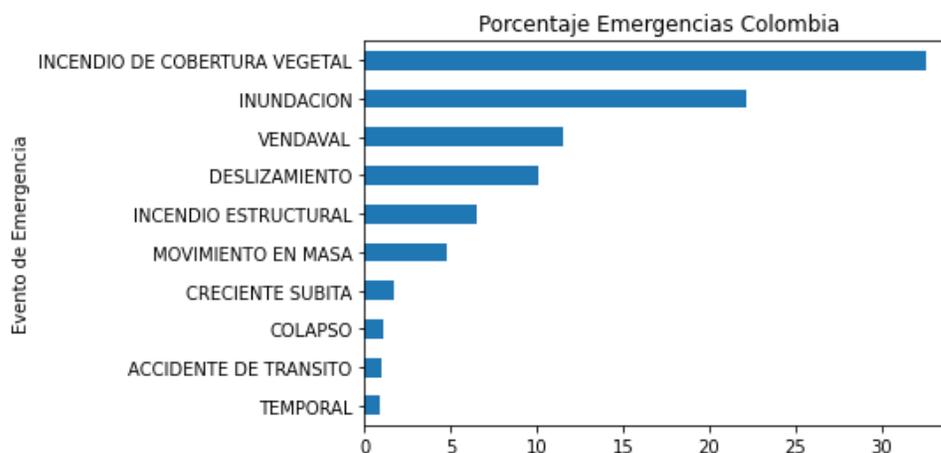
Precisamente, en Colombia la entidad encargada de gestionar el riesgo es la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), organización responsable de registrar la información relacionada con los desastres naturales ocurridos en Colombia, así como las

afectaciones y efectos que generan. A la fecha, de esta información se tiene acceso desde los registros del año 1998 hasta el 2021.

Teniendo en cuenta la información de la UNGRD se tiene que “...entre enero de 1998 y diciembre de 2021 se habían registrado en el país un total de 21,5 millones de personas afectadas, 3.690 fallecidos, 675 desaparecidos y 6.173 heridos como consecuencia de desastres naturales” (Ayala & Ospino, 2023). La principal razón que se reporta como causante de los desastres naturales son los fenómenos hidrometeorológicos (como las precipitaciones intensas), seguida por las actividades antrópicas (como los asentamientos en laderas de alto riesgo) (Polanco & Bedoya, 2005). Adicionalmente, en los años de registro contenidos en la base de datos de la UNGRD, los incendios de cobertura vegetal se ubican en primer lugar de emergencias reportadas, representando casi el 35% de las emergencias totales (Figura 2). Vale la pena resaltar que dentro de estos incendios se incluyen los incendios provocados por causas naturales y antrópicas, y que este tipo de desastre no será analizado en esta investigación por no estar relacionado directamente con los MCS. Seguidamente se encuentran las inundaciones, los vendavales y los deslizamientos (Figura 2), todos ellos involucrados con fenómenos hidrometeorológicos relevantes para la presente investigación.

Figura 2:

Registro de las emergencias más frecuentes en Colombia y su porcentaje de ocurrencia (2008 – 2020).



Nota: El gráfico exhibe los 10 tipos de emergencias de mayor registro en Colombia entre los años 2008 y 2020. A excepción de los incendios, los primeros 5 puestos lo ocupan eventos relacionados a fenómenos hidrometeorológicos con interés para el presente estudio. Datos del *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020, Unidad Nacional de Gestion de Riesgo de Desastres.

6.6 Desastres naturales en Antioquia.

Antioquia es el departamento donde los eventos naturales extremos son más frecuentes, y el que presenta el mayor número de afectados graves, con un 18 % a nivel nacional para el periodo entre 1998 y 2020 analizado en el estudio de (Ayala & Ospino, 2023). Además, para este mismo periodo de estudio, Antioquia es también el departamento donde mayor cantidad de muertes por desastres naturales se reportan, como se evidenció en la Figura 1.

Es menester entonces, con énfasis en Antioquia, categorizar los diferentes fenómenos climatológicos que ocasionan los desastres naturales, donde se deben incluir con especial interés los MCSs, partiendo de la base de que una de las causas principales para los desastres naturales son las precipitaciones intensas. Por lo tanto, con el desarrollo de una identificación de los

desastres naturales generados por MCSs, se puede mejorar notablemente la atención del riesgo, la inversión inteligente de los recursos públicos y la disminución de personas afectadas por medio del monitoreo de MCSs y la identificación de los desastres naturales que se pueden generar. Tomando en cuenta además que Antioquia no es un departamento que se destaque por ser uno de los mayores inversores en prevención de desastres ni tampoco en la atención de los mismos (Ayala & Ospino, 2023).

El monitoreo de MCSs es un aspecto clave para el desarrollo del entendimiento de estos sistemas, ya que permite conocer el comportamiento, la composición y las características fundamentales vinculadas a los MCSs. Asimismo, el rastreo y la observación de los MCSs proporciona una herramienta para establecer relaciones con diferentes fenómenos ambientales, como los desastres naturales. Este aspecto es importante ya que, debido a las características de los MCSs respecto al área que lo constituye, se facilita el seguimiento de estos sistemas y se torna más asequible la previsión de su desplazamiento (en hasta 6 horas previas). Por ende, la posibilidad de tener una ventana de antelación para la presencia de un MCS en una zona específica es un aspecto clave para la prevención del riesgo (Camacho, 2022; Robledo, 2023)

7. Metodología

Para el desarrollo de este estudio se utiliza una climatología de MCS obtenida con el algoritmo ATRACKCS desde un enfoque lagrangiano, es decir, que se enfoca en el rastreo del movimiento y la evolución de los MCSs. La utilización de esta climatología permite analizar la presencia de los MCSs en los 125 municipios del departamento de Antioquia en el periodo de 2008 a 2020. Más precisamente, basado en la climatología recopilada, se obtiene la ubicación de los MCSs de acuerdo con las coordenadas de los polígonos que lo componen, y por medio de

geolocalización se determina si el polígono está dentro de los límites geográficos de algún municipio del departamento de Antioquia.

Adicionalmente se utilizan los datos abiertos del portal de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) para identificar los desastres naturales que han ocurrido en el departamento de Antioquia y de esta forma poder observar la relación que existe entre los eventos que involucran MCSs y los desastres naturales. Esta relación se lleva a cabo detectando la conjunción en tiempo y espacio de los MCSs con la ocurrencia de los eventos de desastres naturales, es decir que se evidencia en qué municipios hubo un MCS que concuerda con la eventualidad de un desastre natural en ese mismo día o en días posteriores según su análisis.

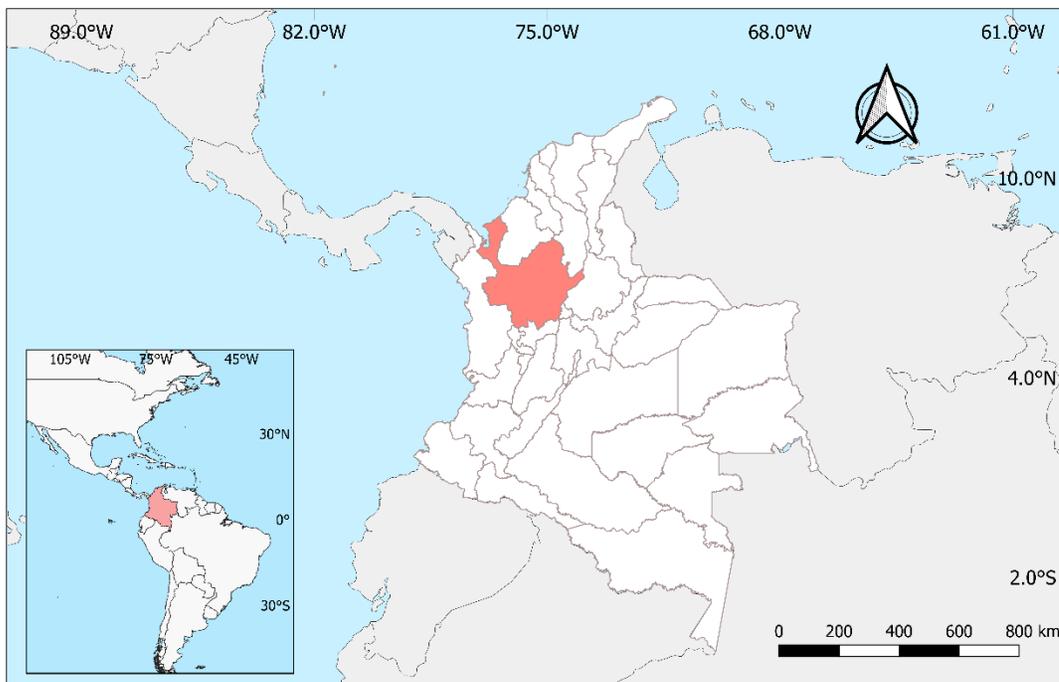
7.1 Zona de Estudio:

La zona de estudio es el departamento de Antioquia en Colombia, específicamente los 125 municipios que lo componen. Según lo expuesto en la Figura 3, el departamento está en el noroeste del país y tiene una extensión de 64.000 km² (Gobernación de Antioquia, 2023). Sumado a ello, Antioquia es el segundo departamento con mayor PIB y el segundo departamento con mayor población (DANE, 2018). Asimismo, Antioquia está conformada por 9 subregiones que son: Urabá, Occidente, Suroeste, Norte, Bajo Cauca, Nordeste, Oriente y Magdalena medio (Gobernación de Antioquia, 2023).

Figura 3

Ubicación del departamento de Antioquia en Colombia (Zona de estudio)

Mapa de ubicación de Antioquia



7.2 Descarga de Datos Sobre Emergencias Debido a Desastres Naturales:

Para la descarga de datos de emergencia se utiliza el portal de datos abiertos de la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), la cual, a la fecha (2023) incluye datos desde 1998 hasta 2021. De este portal se extrae la información más relevante para el caso de estudio, como lo es: tipo de evento, fecha, municipio donde se presentó la emergencia, número de fallecidos, número de heridos y viviendas afectadas. Se enfatiza en el número de fallecidos por el mayor impacto en la población.

7.3 Periodo de Estudio

A pesar de la disponibilidad de los registros desde 1998, se considera pertinente que el periodo de estudio sea de 2008 hasta 2020, ya que es desde 2008 cuando se observa una calidad aceptable de los datos en términos de estandarización de los términos de emergencias, disponibilidad de información y respaldo. Por lo tanto, la ventana temporal del estudio es de 12 años, iniciando el 1 de enero de 2008 y finalizando el 31 de diciembre de 2020.

7.4 Selección de Categorías Relacionadas a Desastres Naturales

Dentro de los registros de emergencias de la UNGRD se encuentran 41 tipos de emergencias diferentes, de las cuales se consideran las que se ubiquen en la categoría de desastres naturales, documentada por la UNGRD (2012). Se descartan del análisis las categorías que no cumplen un mínimo de 20 ocurrencias en el periodo de estudio para analizarlas.

Por tanto, para la selección de las categorías se utiliza la literatura existente que relaciona los MCSs con los diferentes tipos de desastres naturales, y a su vez que cumpla la condición establecida del número mínimo de ocurrencias.

Por tanto, finalmente se obtienen 7 de tipos de emergencias naturales a las cuales se les realizará el análisis para verificar la relación con la ocurrencia de MCSs en los diferentes municipios de Antioquia. Los 7 tipos de emergencias a analizar se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1:

Categorías de emergencias naturales seleccionadas para realizar el análisis y su definición.

Eventos seleccionados de desastres naturales.
Inundación: Acumulación temporal de agua fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje (naturales y construidas)
Vendaval: Perturbación atmosférica que genera vientos fuertes y destructivos en una sola dirección, con velocidades entre 50 y 80 Km, en intervalos cortos de tiempo y de afectación local
Movimiento en masa: Son desplazamientos del terreno (suelos y/o rocas) por laderas o taludes debido a la fuerza de la gravedad.
Deslizamiento: Movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca a lo largo de un plano o superficie redondeada por donde se falla o quiebra el material.
Creciente súbita: Son un tipo de inundación que tienen un potencial destructivo mayor.
Avenida torrencial: Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor que 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada
Tormenta eléctrica: Descarga brusca de electricidad atmosférica que se manifiesta por un resplandor breve (relámpago) y por un ruido seco o un estruendo sordo (trueno)

Nota: definiciones tomadas de *identificación de escenario de riesgo*, por UNGRD en (2018).

Es importante resaltar que los deslizamientos son un subgrupo de los movimientos en masa (Alcaldía de Medellín, 2014), pero que en este análisis están en una categoría individual y no en la categoría de movimientos en masa, ya que la UNGRD ha realizado reportes individuales tanto para movimiento en masa como para deslizamiento. Apenas a partir de 2019 se utiliza ampliamente el término “Movimiento en masa” en los informes de emergencia, por lo cual se consideran en categorías distintas para el presente estudio.

7.5 Información base de datos algoritmo ATRACKCS:

Con base en la utilización del algoritmo ATRACKCS, se obtiene la información de rastreo de los MCSs sucedidos en el período de estudio (2008 a 2020) en forma de base de datos

provenientes de Robledo (2023). Esta base de datos se utiliza para la evaluación de la correspondencia entre los MCSs y los desastres naturales.

7.6 Análisis de la Información.

Con base en la información de rastreo proporcionada por el algoritmo ATRACKCS, se realiza un análisis de información para encontrar la convergencia de desastres naturales registrados por la UNGRD y la ocurrencia de MCSs (datos ATRACKCS) en los diferentes municipios del departamento de Antioquia.

A partir de allí se realiza una evaluación de los MCSs y desastres naturales que han sucedido de manera simultánea. Además, se categoriza el tipo de desastre natural que ocurrió, las veces que se presentó cada tipo de desastre y qué porcentaje de ellos pueden asociarse a los MCSs.

7.6.1 Polígonos de los MCSs para caracterización de la información:

Es importante anotar que la información de la climatología de MCSs está constituida por la identificación de dichos sistemas y a cada MCS lo componen polígonos que representan su comportamiento en el tiempo. Los polígonos contienen información de ubicación, área, dirección, duración y precipitación de los MCSs según su evolución cada hora. Debido a las diferencias que pueden tener los polígonos y ya que el estudio se basa en áreas específicas (municipios), se analiza principalmente los polígonos que componen a los MCSs y no cada sistema como tal, ya que permite una mejor verificación de la influencia en los MCSs en cada municipio de Antioquia.

Siguiendo lo dicho anteriormente, este estudio refiere a los polígonos de MCS como MCS(pol).

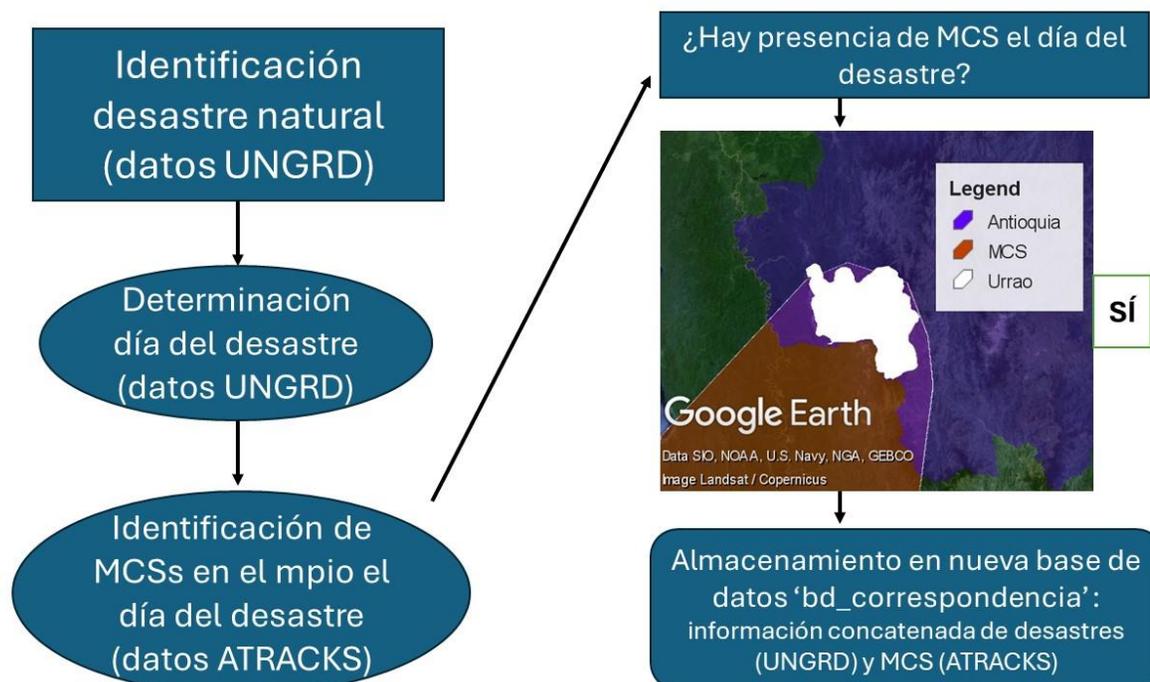
7.6.2 Análisis de Correspondencia MCSs con Desastres Naturales

A la ocurrencia de manera simultánea de los MCSs y los desastres naturales se le nombra “correspondencia”. Se considera que hubo correspondencia entre el desastre natural y el MCS si en el mismo día en el que sucedió el desastre natural también hubo presencia de uno o varios sistemas convectivos convectivos de mesoescala en el mismo municipio. Este análisis se realiza a escala diaria y de municipio, porque a pesar de que los datos del algoritmo ATRACKCS tienen una resolución horaria y coordenadas específicas del MCS, los datos proporcionados por la UNGRD están disgregados solo por día y por municipio. Por lo tanto, los datos de desastres no contienen información ni de una hora específica en la que ocurrió la emergencia natural ni del lugar exacto del mismo. Es importante detallar este sesgo en el análisis debido a las características de la información utilizada. Sin embargo, la larga duración y extensión espacial de los MCS ayudan a que este sesgo no tenga una importancia mayor.

Por consiguiente, para cada municipio del departamento de Antioquia se analizan los desastres naturales (contenidos en la base de datos de la UNGRD) ocurridos en el periodo de 12 años seleccionado (2008 a 2020). Si en un municipio hubo un desastre natural, entonces se verifica si el día en el que sucedió el desastre hay presencia de uno o varios MCS (con la base de datos proporcionada por el algoritmo ATRACKCS) dentro de sus límites territoriales. Si esta condición se cumple, entonces los datos del desastre natural y los datos concernientes al MCS se concatenan y se almacenan en una nueva base de datos llamada “bd_correspondencia”. Este proceso se ilustra de forma clara en la Figura 4.

Figura 4.

Representación del proceso que se lleva a cabo para determinar la correspondencia entre desastres naturales y MCSs en los municipios de Antioquia.



Nota: La ilustración representa el proceso de análisis que se ejecuta para determinar si en un día de desastre natural para el municipio donde sucedió el evento hubo presencia de MCSs. A modo de ejemplo se utiliza el municipio de Urrao (en color blanco), y un MCS que ocurre el día del desastre natural. En este caso en particular se cumplen las condiciones para que la información del MCS (contenida en la base de datos del algoritmo ATRACKCS) y la del desastre natural (contenida en la base de datos de la UNGRD) se almacene de forma concatenada en una nueva base de datos llamada “bd_correspondencia” con la información de los desastres con correspondencia de MCSs. Mapa Tomado de *Google Earth Pro*, por Google Inc, 2024.

Tanto la verificación de las fechas de emergencia (datos UNGRD), la identificación de presencia de MCSs (datos ATRACKCS), y el almacenamiento en la nueva base de datos “bd_correspondencia” se realiza por medio de Python, que es un lenguaje de alto nivel de programación (Python org, 2024). Principalmente, se utilizan librerías como “Geopandas” para

el análisis geoespacial de los polígonos (por medio de sus coordenadas) que representan los MCSs; y Seaborn, pandas y matplotlib para la evaluación, procesamiento y muestra de resultados.

7.6.3 Información de las variables presentes en la base de datos de MCS (ATRACKCS)

La información que se almacena de parte de los MCSs cuando se cumple una correspondencia con los desastres naturales viene dada por el algoritmo ATRACKCS y contiene datos en relación con las características del MCS. Las variables que se consideran para el estudio son: El identificador del MCS, que es un número único para cada sistema; la temperatura de brillo, la hora de ocurrencia, el área asociada a la temperatura de brillo máxima para que sea MCS, la temperatura de brillo promedio, la precipitación máxima y media del MCS, y la distancia recorrida.

Estas variables se analizan con el fin de realizar la comparación y el contraste de los MCSs asociados a desastres y los MCSs que no están asociados a desastres. Añadiendo la rigurosidad gracias a la evaluación de dichas variables se obtiene información relevante para diferenciar los MCSs y de esta forma encaminar el futuro de la investigación orientada a la relación de los MCSs y los desastres naturales en Antioquia y Colombia.

7.6.3 Determinación MCS-AD y MCS-NoAD

Con base en la explicación observada en la Figura 4, se muestra claramente un ejemplo de los MCSs asociados a desastres (MCS-AD), que son los MCSs con presencia en el municipio del desastre natural el mismo día de la ocurrencia. A dichos MCSs, almacenados en la base de datos “bd_correspondencia” se les da el nombre de “MCS-AD”. A su vez, es útil aclarar que el

mismo MCS puede pertenecer a la categoría MCS-AD en distintos municipios debido al área que ocupan los MCS.

Por su parte los MCS-NoAD son aquellos MCSs que no tienen presencia en el municipio del desastre para el mismo día en el que se da su ocurrencia. Resulta valiosa la consideración de los MCS-NoAD, ya que pueden brindar información crucial desde el aspecto de las variables presentes en los MCSs (detallado en el **punto 7.6.2**) y obtener estadísticas que distingan los MCSs asociados con desastres naturales de los no asociados.

Es importante recordar que, ya que el análisis se realiza para cada municipio individualmente, un MCS puede estar en la categoría de MCS-NoAD para un municipio en el norte del departamento y al mismo tiempo estar en la categoría de MCS-AD para un municipio en el suroeste del departamento.

7.6.4 Enfoque de Correspondencia Según el Tipo de Desastre.

Como se menciona a lo largo del Capítulo 7.6.4, el análisis de correspondencia se realiza mediante la observación de los MCSs que suceden el día que se presenta un desastre natural en un municipio en específico. Sin embargo, también existen otros enfoques para un análisis más profundo de los datos. Los tipos de enfoques son los siguientes:

7.6.4.1 Enfoque Análisis Día del Desastre.

Este enfoque es el enfoque principal del estudio, ya que determina el día de ocurrencia del desastre natural y realiza la búsqueda de MCSs que ocurrieron el día del desastre en el municipio correspondiente.

7.6.4.2 Enfoque Análisis 1, 2 y 3 Días Antes Del Desastre Para Movimientos en Masa y Deslizamientos.

Un enfoque adicional importante es el utilizado para movimientos en masa y deslizamientos. Este enfoque se concentra en encontrar MCSs en el municipio del desastre el día del evento, pero además en los 3 días previos al desastre.

El análisis de días previos es debido a que, para los movimientos en masa (incluidos los deslizamientos), según los estudios de Gomez & Aristizabal (2023) y Urbam (2012), la lluvia antecedente¹ tiene una influencia crucial debido al aporte en el acumulado de lluvia en los sitios donde se presentan los movimientos en masa. Para Medellín y Antioquia, se determina que el umbral de tiempo decisivo para tener en cuenta son 3 días antecedentes al día del evento.

Por consiguiente, se decide que para las 2 categorías de eventos relacionados a movimientos en masa (DESLIZAMIENTOS y MOVIMIENTOS EN MASA), el análisis se realiza tomando en cuenta los 3 días antecedentes al evento. Cabe destacar que las demás categorías de eventos que no están vinculados a movimientos en masa continúan teniendo un enfoque de análisis de 1 día.

7.6.4.3 Enfoque Análisis 1, 2 y 3 días después del desastre:

Con el objetivo de contrastar la información obtenida en los 2 enfoques de análisis anteriores, se realiza un tercer enfoque, destinado principalmente a contrastar el análisis de los 2 enfoques anteriores para verificar el comportamiento de los MCSs posterior a la tragedia. Este enfoque posibilita evaluar la diferencia en las variables (precipitación máxima, precipitación

¹ La lluvia antecedente es la lluvia que ocurre días antes a un evento específico, principalmente se usa para considerar la cantidad de precipitación previa a la ocurrencia de movimientos en masa (Finlay et al., 1997).

promedio, área de temperatura de brillo, entre otras) de los MCSs que suceden los días posteriores a la tragedia en comparación con los MCSs sucedidos el día de la tragedia.

Con base en este enfoque y con el respaldo del análisis de comparación entre MCS-AD y MCS-NoAD mencionados en el capítulo 7.6.3, se pueden validar las características de los MCSs vinculados a desastres y por consiguiente obtener los principales aspectos de los MCSs que en general se asocian a los desastres.

7.6.5 Casos de estudio.

Con el fin de proporcionar un acercamiento más claro al lector acerca del análisis que se realiza en cada uno de los desastres, se muestran casos de estudio que permiten la observación del proceso que se realiza de una manera práctica.

Para los casos de estudio se utiliza la información de las bases de datos de UNGRD y ATRACKCS, y adicionalmente se utilizan artículos periodísticos que detallaron el desastre natural sucedido, así como estaciones meteorológicas para observar la congruencia de los datos de precipitación con los almacenados en la base de datos de ATRACKCS. Este análisis permite generar una mejor correspondencia ya que se puede determinar con mayor exactitud la hora de ocurrencia del desastre y su ubicación. A su vez, se realiza una ilustración satelital a los MCSs asociados al desastre estudiado. Además, para días previos y posteriores al estudio, se exponen los MCSs presentes en el municipio donde sucedió el desastre natural.

Por último, se hace una evaluación del número de MCS por día (MCS-AD/día) cuando se presentaron desastres naturales en el municipio del caso de estudio y se comparan con el número de MCS por día (MCS-NoAD) cuando no se presentaron desastres.

8. Resultados:

Los resultados del estudio se dividen en varias secciones. La primera se centra en la identificación de los desastres naturales en los 125 municipios de Antioquia en el periodo de estudio (2008-2020). La primera sección permite comprender la localización de las zonas y municipios donde ocurren mayor cantidad de desastres y el mayor número de fallecidos en desastres naturales.

Siguiendo el primer apartado, la segunda sección determina los desastres naturales que tuvieron correspondencia con MCSs. Esta relación se ilustra por medio de tablas con cada una de las categorías de desastres naturales seleccionadas y a través de mapas que permiten la observación de la influencia de los MCSs en los desastres ocurridos en los distintos municipios de Antioquia.

La tercera sección detalla las diferencias encontradas entre los MCS asociados a desastres y los no asociados. Se realiza una observación de las variables que componen a los MCSs y se obtienen estadísticas que permiten realizar comparaciones entre ambos grupos. Además, se incluyen casos de estudio seleccionados para un mejor entendimiento del análisis que se realiza en esta investigación.

8.1 Identificación de desastres naturales en Antioquia.

Para los 125 municipios que componen al departamento de Antioquia se realiza el análisis de ocurrencias de desastres para los 12 años del estudio (2008-2020).

Primero se observa la distribución de los desastres naturales sucedidos en cada municipio del departamento como lo ilustra la Figura 5. En la categoría 5 (de 40 a 119 desastres), encabezando la lista con más ocurrencias se encuentran Medellín y Bello, dos municipios

centrales en el departamento y ubicados en el Valle de Aburrá, región que alberga el 60% de la población de Antioquia (AMVA, 2018).

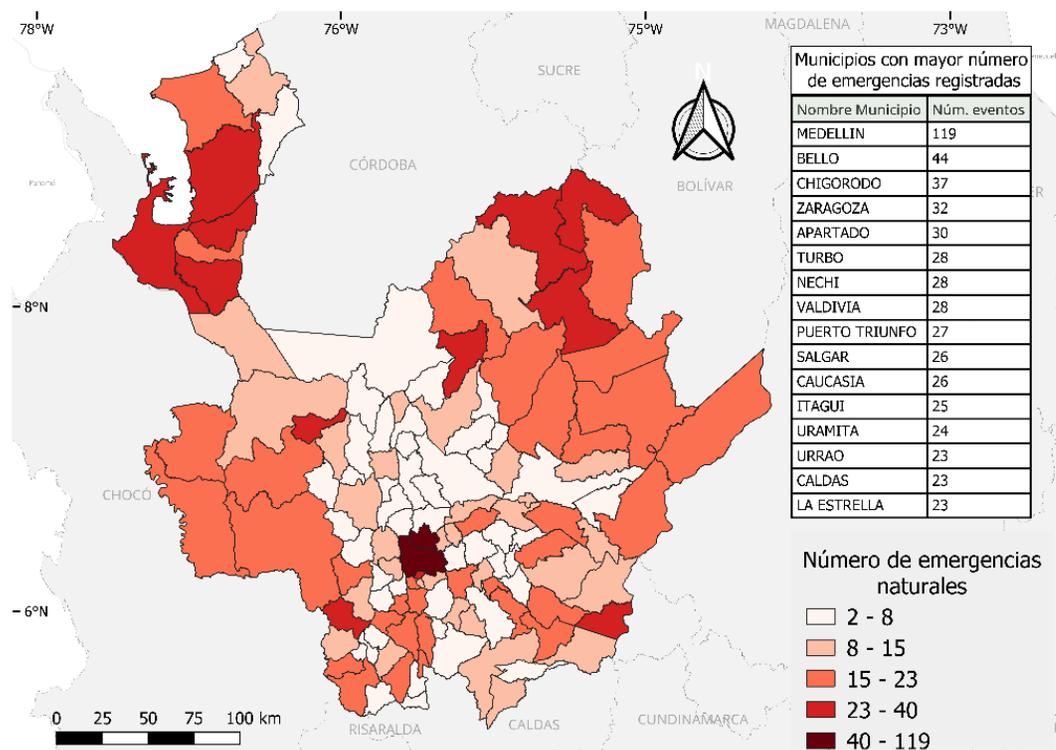
En la Figura 5 se destaca el caso de Medellín, ya que se ubica en primer lugar de la lista, casi triplicando el número de ocurrencias del segundo municipio. Además, Medellín es particularmente crucial dado que es el municipio que alberga más habitantes en Antioquia y enfrenta un mayor riesgo de desastres naturales debido a su densidad poblacional y la presencia de numerosos asentamientos informales en áreas de alto riesgo (AMVA, 2018; Urbam, 2012).

Igualmente, en la Figura 5 se observa un número importante de ocurrencias en los municipios del Nororiente (correspondientes a las subregiones de Bajo Cauca, Nordeste y Magdalena Medio) y del Noroccidente (correspondientes al Urabá Antioqueño), donde algunos municipios alcanzan la cuarta categoría en el número de desastres (de 23 a 40 desastres naturales).

Figura 5.

Distribución de emergencias naturales en los 125 municipios del departamento de Antioquia para el período de 2008-2020.

Distribución de emergencias naturales en Antioquia 2008-2020



Nota: El mapa de distribución de emergencias exhibe la cantidad de desastres naturales que se presentaron para el periodo 2008-2020 en los municipios de Antioquia por medio de un mapa de coropletas dividido en 5 categorías ubicadas de forma ascendente en la parte inferior derecha, siendo la primera categoría (color blanco – 2 a 8 desastres) la que presenta menor cantidad de desastres y la quinta categoría (color vino tinto – 0 a 119 desastres) la de mayor cantidad. Además, se presenta en el costado derecho una tabla que muestra los primeros 20 municipios con más desastres naturales. La primera columna representa el nombre del municipio y la segunda columna el número de desastres naturales registrados. Datos de *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020, Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres.

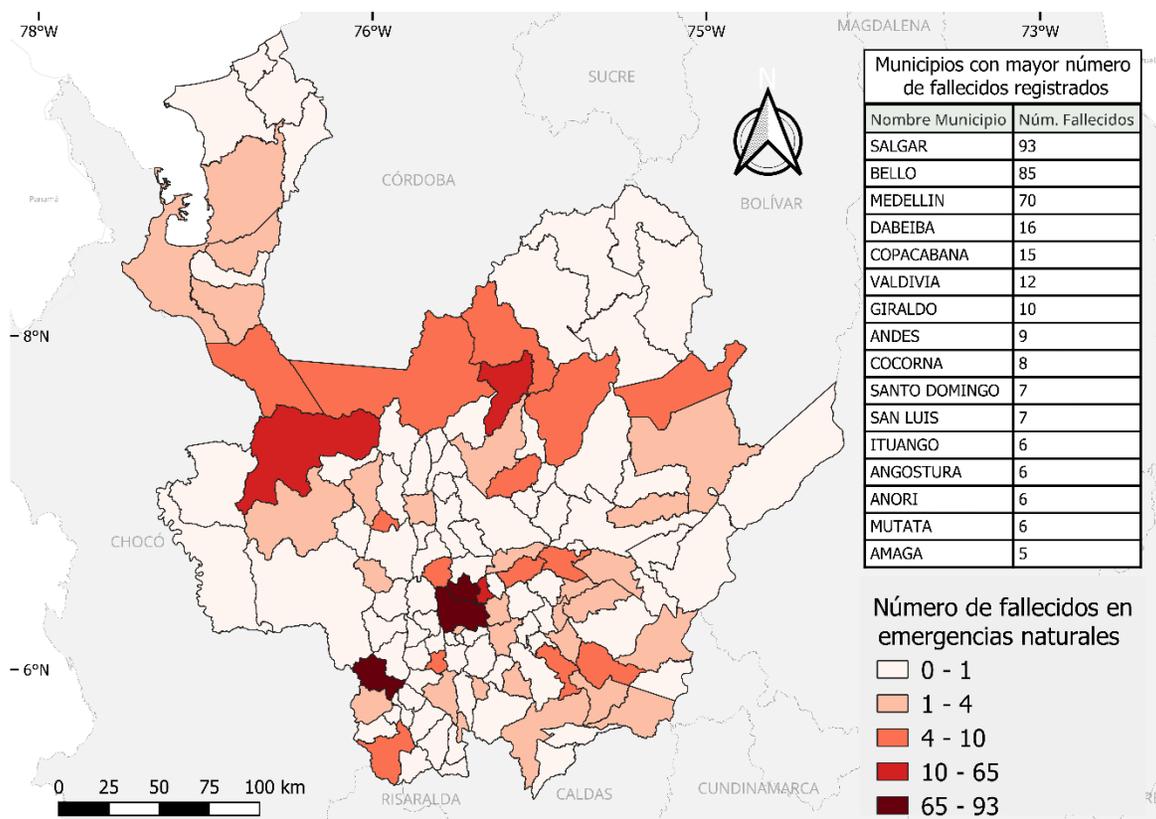
Complementando el análisis del número de emergencias presentadas en cada uno de los municipios de Antioquia, es importante considerar el número de fallecidos por municipios en los eventos naturales presentados, ya que permite apreciar la severidad del impacto que tiene en el municipio y a su vez identificar las áreas más vulnerables.

Precisamente, la Figura 6 hace posible el reconocimiento de la letalidad de los desastres naturales, ya que presenta el número de fallecidos en dichos eventos de 2008 a 2020. El municipio de Salgar fue el que mayor número de fallecidos registró, aunque dichos fallecidos se presentaron en un mismo desastre natural en 2015 (Hoyos et al., 2019) .Siguiendo la lista, Bello y Medellín registran 85 y 70 fallecidos respectivamente. En Bello, los 85 fallecimientos ocurrieron en dos desastres naturales distintos. Por otro lado, Medellín mostró una distribución más uniforme de las fatalidades, con fallecidos en 12 eventos diferentes.

Figura 6.

Distribución de fallecidos en emergencias naturales en los 125 municipios del departamento de Antioquia para el período de 2008-2020.

Distribución de fallecidos en emergencias naturales en Antioquia 2008-2020



Nota: En concordancia con el formato de la figura 5 el mapa de distribución de fallecidos exhibe la cantidad de fallecimientos a causa de desastres naturales que se presentaron para el periodo 2008-2020 en los municipios de Antioquia. Datos de *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020, Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres.

Realizando la observación de los mapas de las Figuras 5 y 6, se evidencia que los municipios con mayor coincidencia entre el número de desastres naturales que se presentan y el número de fallecidos registrados son los municipios de Medellín, Bello y Valdivia. Estos municipios tienen especial relevancia para la caracterización del riesgo, ya que su vulnerabilidad ante el riesgo los hace un foco de mayor preocupación desde distintas perspectivas, como la destinación de

recursos para la gestión del riesgo, la identificación de zonas de amenaza por eventos naturales y el desarrollo de investigación para el entendimiento de la vulnerabilidad (González & London, 2021).

8.2 Determinación de correspondencia entre desastres naturales y MCSs.

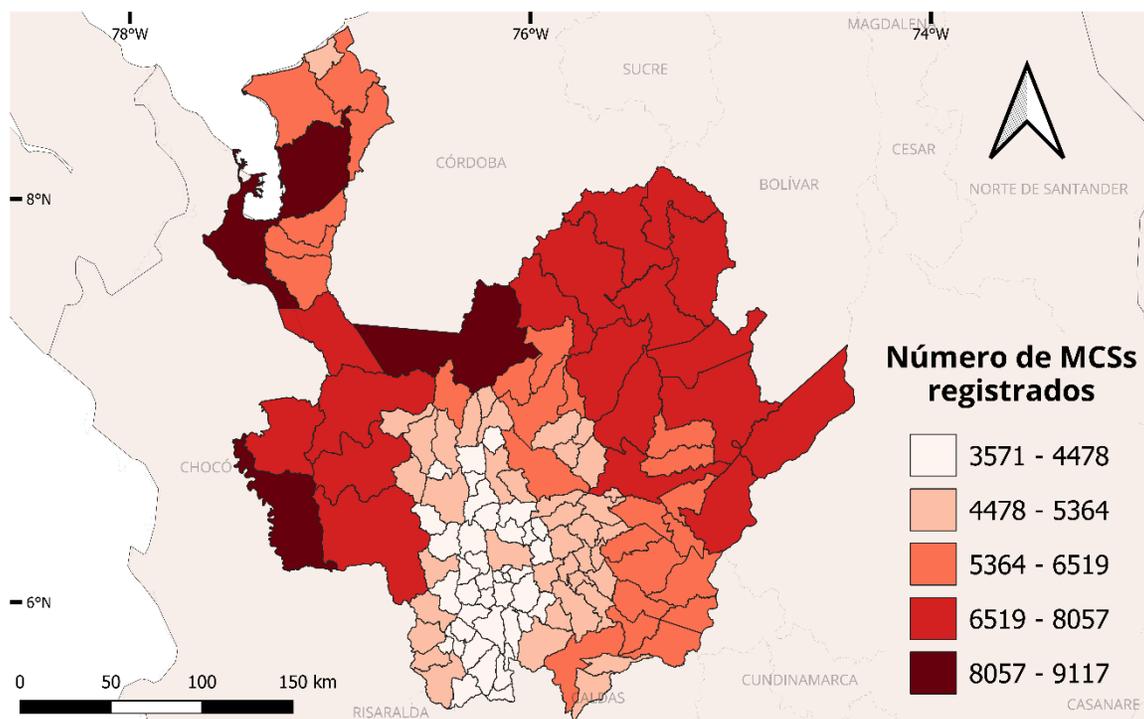
Para el abordaje correcto de los MCSs, se considera fundamental conocer su distribución en el departamento, así como se determina la distribución de desastres naturales en el área de estudio. La Figura 7 muestra la distribución espacial por municipio de la ocurrencia de los polígonos de MCSs, que permite comprender en qué lugares hay mayor presencia de estos sistemas. Se evidencia de manera clara que hay una mayor presencia de MCSs(pol) en dos zonas en específico, el nororiente y el noroccidente. Justamente, en el noroccidente es donde se encuentran los únicos 3 municipios que pertenecen a la quinta categoría (color Vinotinto – 8057 a 9117), que es la de mayor número de MCSs(pol). La zona del Magdalena medio tiene un número importante de MCSs(pol), que es una zona reconocida por tener una ocurrencia importante de tormentas grandes e intensas (Zipser et al., 2006)

Asimismo, se constata que la zona del centro del departamento es la que menos registros de MCSs(pol) obtiene para los 12 años de estudio, ubicándose la mayoría de los municipios en la primera categoría de número de MCSs(pol). Allí se incluyen los 10 municipios del Valle de Aburrá, contando a Medellín y Bello, que habían sido incluidas como zonas de interés en el capítulo 8.1 debido a la cantidad de desastres que presentan y al número de fallecidos registrados en dichos desastres.

Figura 7.

Distribución de los polígonos de MCSs ocurridos en Antioquia en el periodo de 2008 a 2020.

Distribución de sistemas convectivos de mesoescala en Antioquia (2008-2020)



Nota: El mapa evidencia la distribución de los polígonos de MCSs en la zona de estudio. Se constata que la zona del noroccidente de Antioquia es la que presenta mayor número de polígonos de MCSs, seguida por los municipios del nororiente. Además, el centro del departamento se caracteriza por tener menor cantidad de MCSs (polígonos) registrados en el periodo de estudio (2008-2020). Datos de la climatología de MCSs con el *Algoritmo ATRACKCS* (Robledo, 2023).

Con base en lo comentado anteriormente, para evaluar la correspondencia de MCSs con desastres naturales se considera pertinente el abordaje desde dos perspectivas diferentes: La primera es desde la cantidad de desastres en donde hubo participación de los MCSs, y la segunda es desde la cantidad de MCSs registrados en los desastres naturales ocurridos.

8.2.1 Desastres naturales con presencia de MCS.

Este enfoque se concentra en evaluar en cuántos desastres naturales hubo participación de MCSs. Por lo tanto, el desastre natural es el evento de interés y no se concentra en la cantidad de MCSs que participaron sino en determinar si hubo presencia de al menos un MCS el día del desastre (o días anteriores según el análisis).

Para analizar la presencia de MCSs en los desastres naturales, primero se determina la cantidad total y se caracterizan según el tipo de evento de desastre sucedido como lo representa la Tabla 2. Allí se evidencia que para el periodo de 2008 a 2020 se registraron un total de 1746 eventos, de los cuales sobresalen las inundaciones con 781 ocurrencias, que corresponden al 45% del total de los eventos. Los vendavales ocupan el segundo lugar de la lista con el 20% de las ocurrencias, seguidamente están los deslizamientos con el 19%, y los movimientos en masa con el 10% de las ocurrencias. Entre dichas 4 categorías suman el 95% de las ocurrencias totales de desastres naturales.

Tabla 2.

Ocurrencias totales de desastres naturales en Antioquia según el tipo de desastre registrado en el periodo 2008-2020.

Registro de desastres naturales en Antioquia por tipo de evento (2008-2020)		
Tipo de Evento	Número de Ocurrencias	Porcentaje de ocurrencias
Inundación	781	45%
Vendaval	351	20%
Deslizamiento	334	19%
Movimiento en masa	180	10%
Creciente súbita	40	2%
Avenida torrencial	40	2%
Tormenta eléctrica	20	1%
TOTAL	1746	

Nota: La tabla evidencia la cantidad de ocurrencias y su porcentaje para cada tipo de categoría de desastre natural seleccionado. Datos del *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020, Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres.

Conociendo la cantidad de eventos registrados en cada categoría, se determina si hay presencia de al menos un MCS en los desastres naturales ocurridos.

Para el enfoque de análisis del mismo día se obtiene el resultado mostrado por la Tabla 3. En ella se constata que el porcentaje de correspondencia más bajo es del 35%. Esto quiere decir que independientemente de la categoría que se considere, por cada 100 desastres naturales presentados en al menos 35 de ellos hay sistemas convectivos de mesoescala el día en el que sucede el desastre.

Asimismo, en los registros de la tabla 3 se puede visualizar que los porcentajes de correspondencia más altos los registra la categoría de “Creciente súbita”, que exhibe que en más de la mitad de las crecientes súbitas registradas hubo presencia de MCSs el día del desastre.

Igualmente, en más de la mitad de los eventos del tipo vendaval hubo presencia de MCSs, así como en el 50% de tormentas eléctricas.

Por su parte, las inundaciones (categoría con más altos registros) registro una presencia de MCSs en el 42% de los eventos, mismo porcentaje que para la categoría de movimientos en masa. Para los deslizamientos se observó que para el enfoque de análisis del mismo día tuvo la correspondencia más baja con el 36.5% de participación de MCSs.

Se determina también a partir de la Tabla 3 que el promedio de participación de MCSs en desastres naturales fue del 43% contabilizando cada una de las categorías de análisis consideradas.

Tabla 3.

Desastres naturales que tuvieron presencia de MCSs para el periodo 2008-2020 - Análisis mismo día del desastre.

Registro de desastres naturales en Antioquia por tipo de evento con correspondencia de MCs en el mismo día (2008-2020)		
Tipo de Evento	Número de Ocurrencias	Porcentaje de coincidencia con total de eventos
Inundación	325	41.6%
Vendaval	180	51.3%
Deslizamiento	122	36.5%
Movimiento en masa	76	42.2%
Creciente súbita	21	52.5%
Avenida torrencial	16	40.0%
Tormenta eléctrica	10	50.0%
TOTAL	750	43.0%

Nota: La tabla muestra los desastres naturales que tuvieron presencia de MCSs con un enfoque de análisis del mismo día. Por lo cual, el desastre se incluye en esta lista si hay presencia de al menos un MCS en el municipio del evento el día en que se presentó el desastre. Datos del

consolidado de emergencias, por UNGRD, 2020 y Datos de la climatología de MCSs con el *Algoritmo ATRACKCS* (Robledo, 2023).

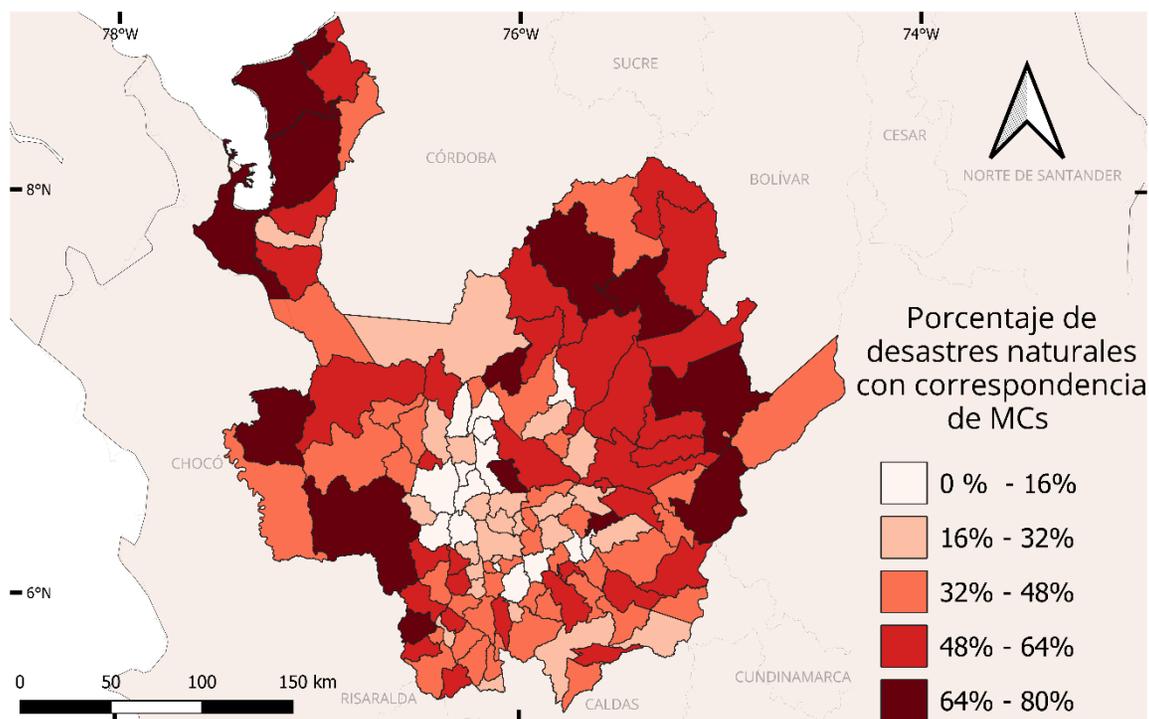
En conjunto con el análisis según la categoría, es valioso considerar la distribución de los municipios donde los desastres naturales tuvieron más o menos presencia de MCSs. Esto permite una observación tácita de los datos espaciales y una comprensión expedita de la influencia de los MCSs en el territorio. Precisamente, la Figura 8 identifica la participación de los MCSs en cada uno de los municipios de Antioquia y se evidencia en que porcentaje de los desastres naturales hubo presencia de MCSs. Por ejemplo, para los municipios pertenecientes a la quinta categoría (color Vinotinto de 64% a 80%), como mínimo en el 64% de los desastres del municipio hubo presencia de al menos un MCS el día del evento.

Realizando una evaluación de la Figura 8, se observa que el centro del departamento contiene los porcentajes más bajos de correspondencia de desastres con MCSs, influenciado además por la poca cantidad de desastres registrados en estos municipios (exceptuando al Valle de Aburrá) y la baja ocurrencia de MCSs (7). Asimismo, se observa que las zonas con mayores porcentajes de correspondencia están ubicadas al Noroccidente del departamento, al Oriente y Nororiente. Justamente las zonas de interés definidas para las ocurrencias de desastres en la Figura 5 tienen una alta concordancia con las zonas de mayor porcentaje de correspondencia de desastres con MCSs, a excepción de Medellín y Bello que se encuentran en un nivel de correspondencia de segunda categoría en el rango de 16% a 32%.

Figura 8.

Desastres naturales con correspondencia de MCSs para el periodo 2008-2020. Enfoque de Análisis día del desastre.

Desastres naturales con correspondencia de MCSs en Antioquia (2008-2020) - Análisis día del desastre



Nota: La Figura 8 muestra el porcentaje de desastres naturales que tuvieron presencia de al menos un MCS para el día en el que se presentó el desastre natural en el periodo 2008-2020 en los municipios de Antioquia. Es decir, en los municipios de la quinta categoría (color vinotinto 64% -80%) la mayoría de desastres naturales tuvieron presencia de MCSs. Adaptado de *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020, y Datos de la climatología de MCSs con el *Algoritmo ATRACKCS* (Robledo, 2023).

Adicional al análisis del mismo día, es importante observar las ocurrencias con un enfoque de análisis de 3 días antes para movimientos en masa y deslizamientos. Esto se retrata en la Tabla 4 que extiende la determinación de presencia de MCSs para 3 días antes del evento

natural. Por ende, la ocurrencia y los porcentajes permanecen igual para los eventos distintos a movimientos en masa y deslizamientos.

La tabla 4 expone que cuando se analizan hasta 3 días previos al desastre, el porcentaje de presencia de MCSs en desastres naturales aumenta hasta 74.3% en deslizamientos y 80.6% para movimientos en masa. Dicho de otro modo, para 3 desastres naturales que se presenten del tipo movimiento en masa o deslizamiento, en al menos 2 de ellos hay presencia de MCSs realizando un análisis de 3 días previos al desastre.

Tabla 4.

Desastres naturales que tuvieron presencia de MCSs para el periodo 2008-2020 - Análisis 3 días previos al desastre para movimientos en masa y deslizamientos

Registro de desastres naturales en Antioquia por tipo de evento con correspondencia de MCs - Análisis de 3 días para movimientos en masa y deslizamientos (2008-2020)		
Tipo de evento	Número de ocurrencias	Porcentaje de coincidencia con total de eventos
Inundación		
Deslizamiento	248	74.3%
Vendaval		
Movimiento en masa	145	80.6%
Creciente súbita		
Avenida torrencial		
Tormenta eléctrica		
TOTAL	393	

Nota: La tabla muestra los desastres naturales que tuvieron presencia de MCSs con un enfoque de análisis de hasta 3 días previos al evento natural. Este análisis se aplica para los movimientos en masa y deslizamientos por la importancia que tiene la lluvia antecedente en dichos desastres. Adaptado de *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020 y Datos de la climatología de MCSs con el *Algoritmo ATRACKCS* (Robledo, 2023).

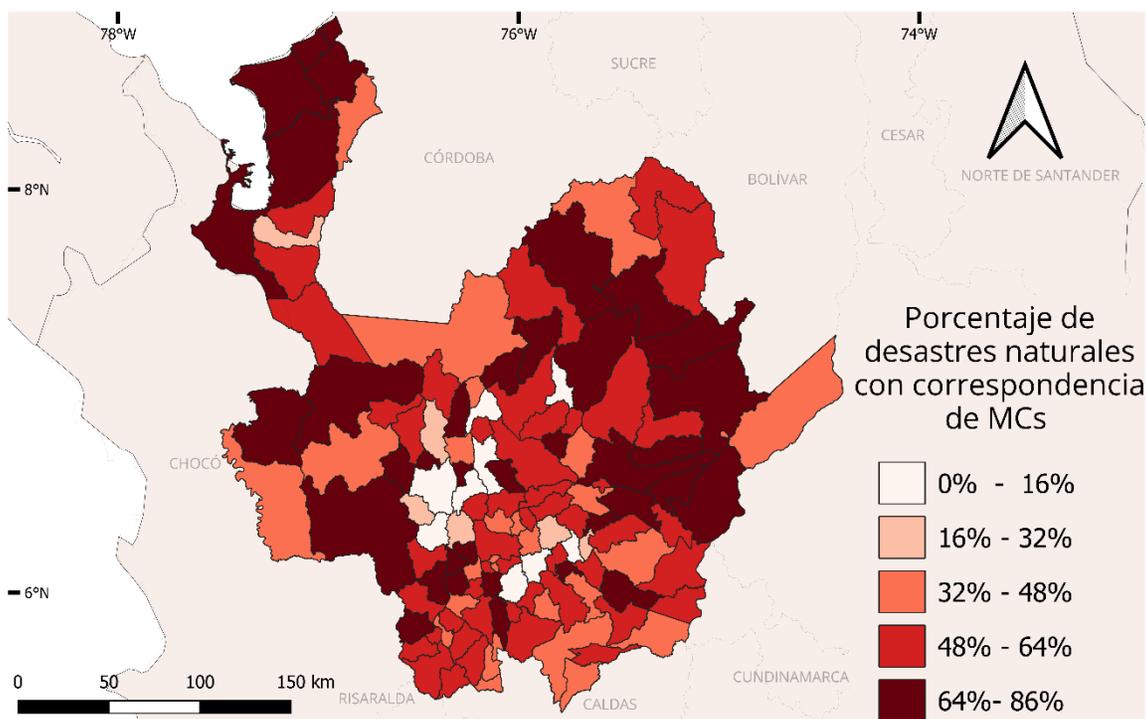
Para el enfoque de análisis de 3 días es igualmente importante la observación de la distribución de los porcentajes de desastres naturales con correspondencia de MCSs para considerar los cambios que puedan existir respecto a la Figura 8 con el análisis del mismo día. Dicho análisis se constata en la Figura 9, donde se observa el aumento de municipios con la categoría más alta de correspondencia, sobre todo en las zonas de interés observadas en el análisis del mismo día (Figura 8) correspondientes al noroccidente, oriente y nororiente del departamento.

Además, el incremento más destacable observado es el de la región central, en particular en los municipios del Valle de Aburrá. Estos pasaron de una clasificación en la segunda categoría (rango de 16% a 32%) para 6 de los 10 municipios, a una clasificación superior a la tercera categoría (rango 32% a 48%) para los 10 municipios que lo conforman, con 5 de ellos en la cuarta categoría (rango 48% a 64%) y un municipio en la categoría 5 (rango 64% a 86%). Esto indica que, en los municipios del Valle de Aburrá, como mínimo el 32% de los desastres naturales registrados en estos municipios estuvieron asociados con la presencia de MCSs en un análisis de 3 días previos al desastre para deslizamientos y movimientos en masa.

Figura 9

Desastres naturales con correspondencia de MCSs para el periodo 2008-2020. Enfoque de Análisis de 3 días antes del desastre para movimientos en masa y deslizamientos

Desastres naturales con correspondencia de MCSs en Antioquia (2008-2020) - Análisis 3 días previos al desastre



Nota: La Figura 9 muestra el porcentaje de desastres naturales que tuvieron presencia de al menos un MCS para el día en el que se presentó el desastre natural en el periodo 2008-2020 en los municipios de Antioquia. Es decir, en los municipios de la quinta categoría (color vinotinto 64% -80%) la mayoría de los desastres naturales tuvieron presencia de MCSs. Datos de *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020, y Datos de la climatología de MCSs con el *Algoritmo ATRACKCS* (Robledo, 2023).

8.2.2 Presencia de MCS en los desastres.

Este enfoque se centra en analizar los MCSs sucedidos en los desastres naturales, en comparación del enfoque mostrado en la sección 8.2.1, donde el estudio se basa en la determinación de los desastres naturales que tuvieron presencia de MCSs. Por lo cual, el centro

de este enfoque no es el observar si en los desastres naturales sucedidos hay presencia de al menos un MCS, sino que analiza en detalle los MCSs que sucedieron en los desastres naturales, tanto la cantidad como la distribución en los municipios de Antioquia.

Como muestra la Tabla 5, para Antioquia se presentaron un total de 5,094 MCSs en los 12 años analizados, dando un promedio de 424.5 MCSs por año. Igualmente, se muestra un total de 580 MCSs en los desastres naturales con un análisis para el mismo día y de 1425 MCSs con análisis de 3 días para movimiento en masa y deslizamientos, sin tener en cuenta los MCSs que pueden tener presencia en distintos eventos de desastre.

Tabla 5.

Datos principales de los MCSs presentados en el periodo 2008-2020 para la zona de estudio

Estadísticas de MCSs sucedidos en los desastres naturales ocurridos en Antioquia en el periodo 2008- 2020	
Total MCSs en Antioquia	5094
Total MCSs que coinciden con desastres en Antioquia - Analisis mismo día:	580
Total MCSs que coinciden con desastres en Antioquia - Analisis de 3 días para movimiento en masa, mismo día para otros eventos	1425
Total MCSs que coinciden con desastres en Antioquia - 1 día despues:	480
Total MCSs que coinciden con desastres en Antioquia - 2 día despues:	487
Total MCSs que coinciden con desastres en Antioquia - 3 día despues:	522

Nota: La tabla muestra los datos principales relacionados a los MCSs sucedidos en el periodo de estudio. Se incluye el dato de los MCSs en el norte de Suramérica para proporcionar un contexto

más amplio de la ocurrencia de los MCSs. Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

Adicionalmente, es crucial considerar los polígonos de los MCSs por separado debido a los diferentes municipios donde puede tener presencia según la evolución de cada MCSs. Dichos datos de los polígonos de MCSs se observan en la Tabla 6,

Tabla 6.

Datos principales de los polígonos de MCSs presentados en el periodo 2008-2020 para la zona de estudio.

Estadísticas de MCSs sucedidos en los desastres naturales ocurridos en Antioquia en el periodo 2008- 2020	
Total MCSs(pol) en Antioquia	5094
Total MCSs(pol) que coinciden con desastres en Antioquia - Analisis mismo día:	580
Total MCSs(pol) que coinciden con desastres en Antioquia - Analisis de 3 días para movimiento en masa, mismo día para otros eventos	1425
Total MCSs(pol) que coinciden con desastres en Antioquia - 1 día despues:	480
Total MCSs(pol) que coinciden con desastres en Antioquia - 2 día despues:	487
Total MCSs(pol) que coinciden con desastres en Antioquia - 3 día despues:	522

Nota: La tabla muestra los datos principales relacionados a los MCSs(pol) sucedidos en el periodo de estudio. Se incluye el dato de los MCSs(pol) en el norte de Suramérica para proporcionar un contexto más amplio de la ocurrencia de los MCSs(pol). Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

Considerando el número de MCSs (pol) mostrado en la Tabla 6 donde se obtienen 2028 MCSs (pol) y 3103 MCSs (pol) para análisis del mismo día y 3 días antes respectivamente, y comparándolo con el total de desastres que exhibe la Tabla 2 (1746 desastres en total), puede observarse que en promedio hay más de un MCS (pol) que sucede por cada evento de desastre, ya que la cantidad de MCSs (pol) registrada en los días de desastre en cada municipio supera la cantidad de desastres totales. La Tabla 7 permite observar esta diferencia según el tipo de evento, ya que muestra el número de desastres naturales de cada categoría que tuvieron presencia de MCSs (pol) (referenciados en la Tabla 3 y 4) comparado con el número de MCSs(pol) que se presentaron en cada tipo de desastre con análisis del mismo día y de 3 días antes del desastre para movimientos en masa y deslizamientos.

Del mismo modo, la Tabla 7 muestra el promedio de MCSs(pol) registrados en cada tipo de desastre. Por ejemplo, la inundación es la categoría que registra mayor cantidad de MCSs (pol) cuando hay presencia de MCSs(pol) en el evento de desastre (1278 ocurrencias) y además es la que registra el segundo promedio más alto de MCSs(pol) el día del desastre, después de la creciente súbita. Esto quiere decir que, si en un evento de inundación hay presencia de MCSs(pol), el promedio de sistemas que hacen presencia el día del desastre es de 3.93 MCSs(pol).

Asimismo, en la Tabla 7 se realiza el análisis para 3 días antes para deslizamiento y movimientos en masa, en donde se obtiene que en promedio cuando hay participación de MCSs(pol) en los desastres, hay presencia de 6.90 MCSs(pol) en los deslizamientos y 6.46 MCSs(pol) para movimientos en masa.

Tabla 7.

Presencia de MCSs(pol) en desastres naturales en Antioquia - Análisis del mismo día y de 3 días antes para deslizamientos y movimientos en masa (2008-2020).

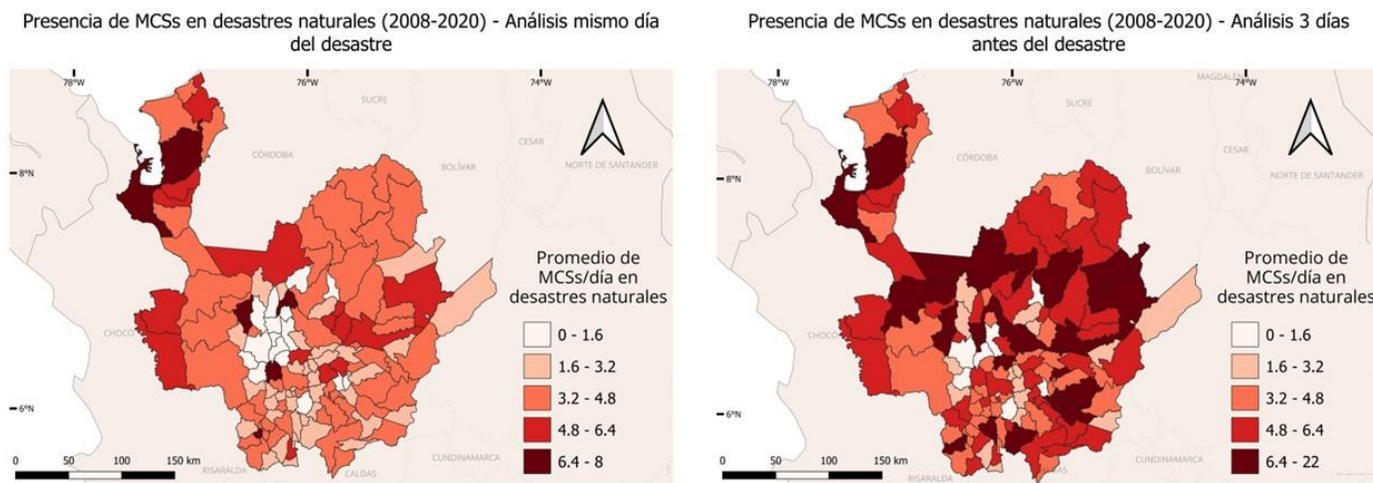
Registro de MCSs(pol) totales que coincidieron con cada tipo de desastre natural en Antioquia - Análisis mismo día y 3 días antes para deslizamientos y movimientos en masa (2008-2020)						
Tipo de evento	Desastre natural con presencia de MCSs(pol) - mismo día	Número de ocurrencias de MCSs(pol) - Análisis mismo día	Promedio de MCSs(pol) en cada desastre natural - Análisis mismo día	Desastre natural con presencia de MCSs(pol) - 3 días	Número de ocurrencias de MCSs(pol) - Análisis 3 días antes	Promedio de MCSs(pol) en cada desastre natural - Análisis 3 días antes
Inundación	325	1278	3.93			
Vendaval	180	697	3.87			
Deslizamiento	122	436	3.57	248	1711	6.90
Movimiento en masa	76	281	3.70	145	937	6.46
Creciente súbita	21	92	4.38			
Avenida torrencial	16	57	3.56			
Tormenta eléctrica	10	40	4			
Total=	750	2881				

Nota: La tabla muestra la cantidad de MCSs(pol) que participaron en los desastres naturales según el tipo en Antioquia. Para obtener el promedio de MCSs(pol) se considera la Tabla 3 para conocer la cantidad de desastres que tuvieron presencia de MCSs(pol), y con este dato dividir el número de ocurrencias de MCS(pol) sobre los desastres naturales con dicha correspondencia. Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

Para complementar el análisis realizado en la Tabla 7, la Figura 10 muestra el promedio de MCSs(pol) por día en cada municipio donde se presentó un desastre natural. Es decir que para el número de desastres naturales con presencia de MCSs, se obtuvo la cantidad promedio de polígonos de MCSs que hubo para el día del desastre. En la Figura 10 presenta tanto el análisis para el mismo día del desastre como para los 3 días previos.

Figura 10

Promedio de MCSs(pol) por día para los desastres naturales que tuvieron presencia de MCSs en Antioquia (2008-2020)



Nota: El gráfico muestra los MCSs(pol) que en promedio se presentaron para los desastres naturales cuando hubo presencia de MCSs. A la izquierda se muestra el análisis para el mismo día y a la derecha se muestra el análisis para 3 días antes. Datos de *consolidado de emergencias* por UNGRD, 2020, Unidad Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres y Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

El promedio de MCSs(pol) por día mostrado en la figura 10 es importante ya que representa también los municipios en los que sucedieron mayor cantidad de MCSs(pol) en el departamento. Detallando la gráfica se observa que, al igual de las zonas de interés mencionadas en la sección 8.2.1, el noroccidente del departamento es un área de especial interés en cuanto a las relaciones de MCSs y desastres naturales, ya que se observa que los municipios pertenecientes a esta región poseen un promedio de MCSs(pol) /día superior al del resto del departamento, tanto en el análisis de 1 día como el de 3 días previos. Sin embargo, vale la pena resaltar que esta es una región con una ocurrencia alta de MCSs en general. Asimismo, se

destaca el caso del oriente y nororiente, ya que aumenta notablemente el número de MCSs por día cuando se introduce el análisis de 3 días.

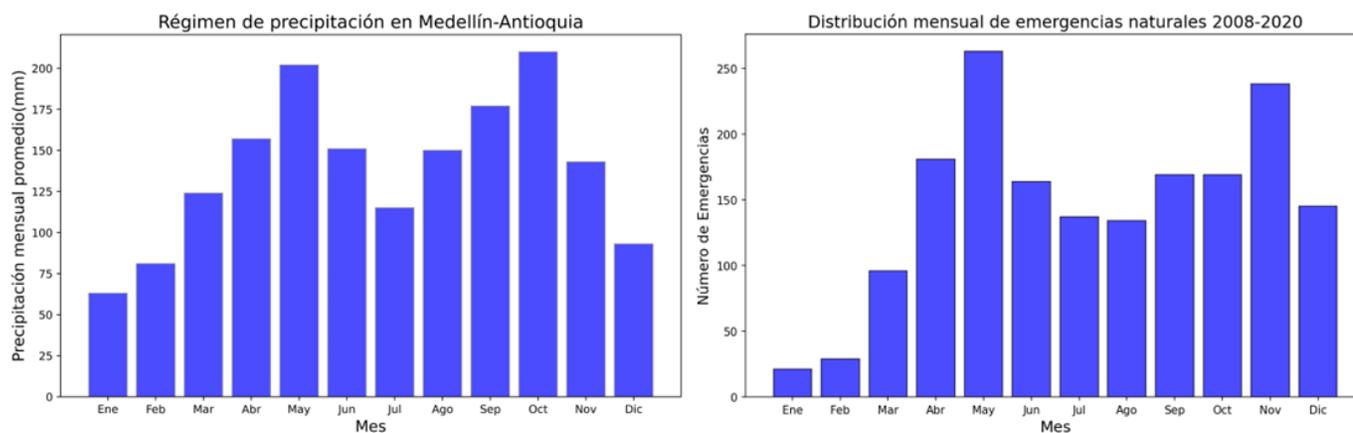
8.2.3 Análisis temporal de los desastres naturales y MCSs en Antioquia.

Después de obtener un análisis según los tipos de desastres naturales y la relación de los MCSs con los desastres naturales en el departamento, es igualmente importante detallar la distribución de dichos desastres y la relación con los MCSs desde un marco temporal. La Figura 11 destaca la distribución mensual de los desastres en Antioquia y los compara con el régimen de lluvia para el municipio de Medellín, resaltando su comportamiento semejante respecto a los periodos de más lluvia y los meses en los cuales se presentan mayor cantidad de desastres.

Por ejemplo, en referencia a la Figura 11, mayo es el mes que tiene una precipitación mensual promedio mayor, e igualmente es el mes donde más se presentan desastres naturales en el departamento.

Figura 11.

Régimen de lluvias mensual comparado con la distribución de emergencias por mes en Antioquia para el periodo (2008-2020)



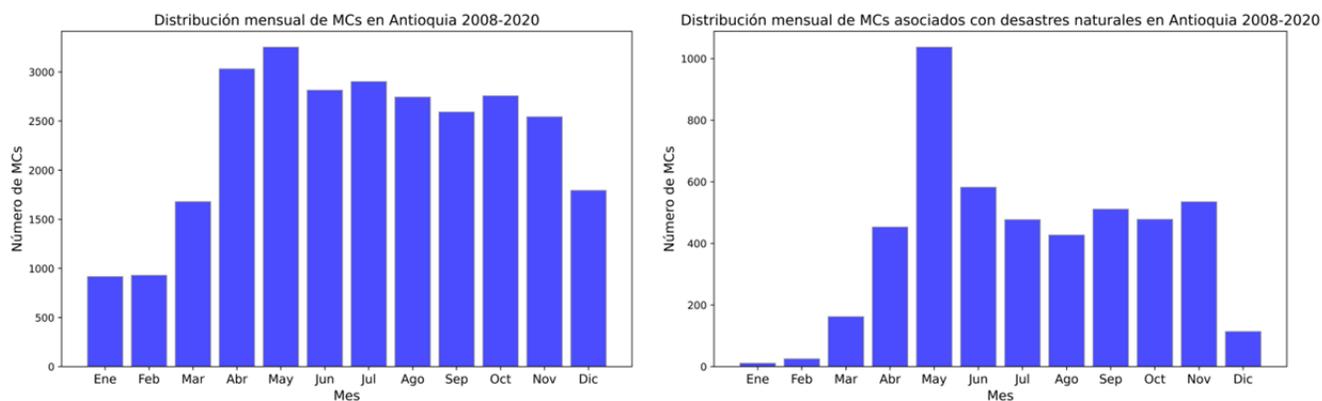
Nota: La gráfica muestra el régimen de precipitación mensual registrado para el municipio de Medellín comparado con la distribución mensual de desastres naturales para el periodo de 2008 a 2020. Datos de *Características climatológicas de las ciudades*, por IDEAM, 2012; y *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020.

Adicionalmente, se detalla en la distribución de MCSs(pol) de forma mensual en el departamento y en la distribución de los desastres con correspondencias de MCSs en Antioquia, que evidencia la Figura 12. Se observa que, al igual que en la Figura 11, el mes de mayo es el que presenta los mayores registros, en este caso de sistemas convectivos de mesoescala totales(pol) registrados (figura izquierda) y de MCSs(pol) asociados a desastres (figura derecha).

Se constata en la Figura 12 que la distribución mensual de MCSs en Antioquia no es igual de semejante al comportamiento del régimen de lluvias expuesto en la Figura 11. Sin embargo, la distribución mensual de MCSs(pol) asociados con desastres naturales sí presenta mayor similitud al régimen de lluvias mostrado en la gráfica derecha de la Figura 12.

Figura 12.

Distribución mensual de MCSs(pol) y MCSs(pol) asociados con desastres naturales en Antioquia para el período 2008-2020



Nota: la gráfica muestra a la izquierda la distribución mensual de MCSs(pol) en Antioquia 2008-2020 y a la derecha la distribución mensual de MCSs(pol) asociados a desastres naturales. Se puede registrar de forma clara que el mes con mayores ocurrencias de MCSs y también con más MCSs asociados a desastres es el mes de mayo. Datos de *consolidado de emergencias*, por UNGRD, 2020.

8.3 Características de los MCSs(pol) Asociados a Desastres naturales y los MCSs(pol) no asociados.

En aras a una caracterización de los MCSs que contribuya a que el estudio tenga mayor rigurosidad, se clasifican y diferencian los sistemas convectivos de mesoescala asociados a eventos naturales y los que no. Esta diferenciación permite evidenciar las diferencias entre ambos grupos y comprender los factores que más se relacionan a los desastres naturales.

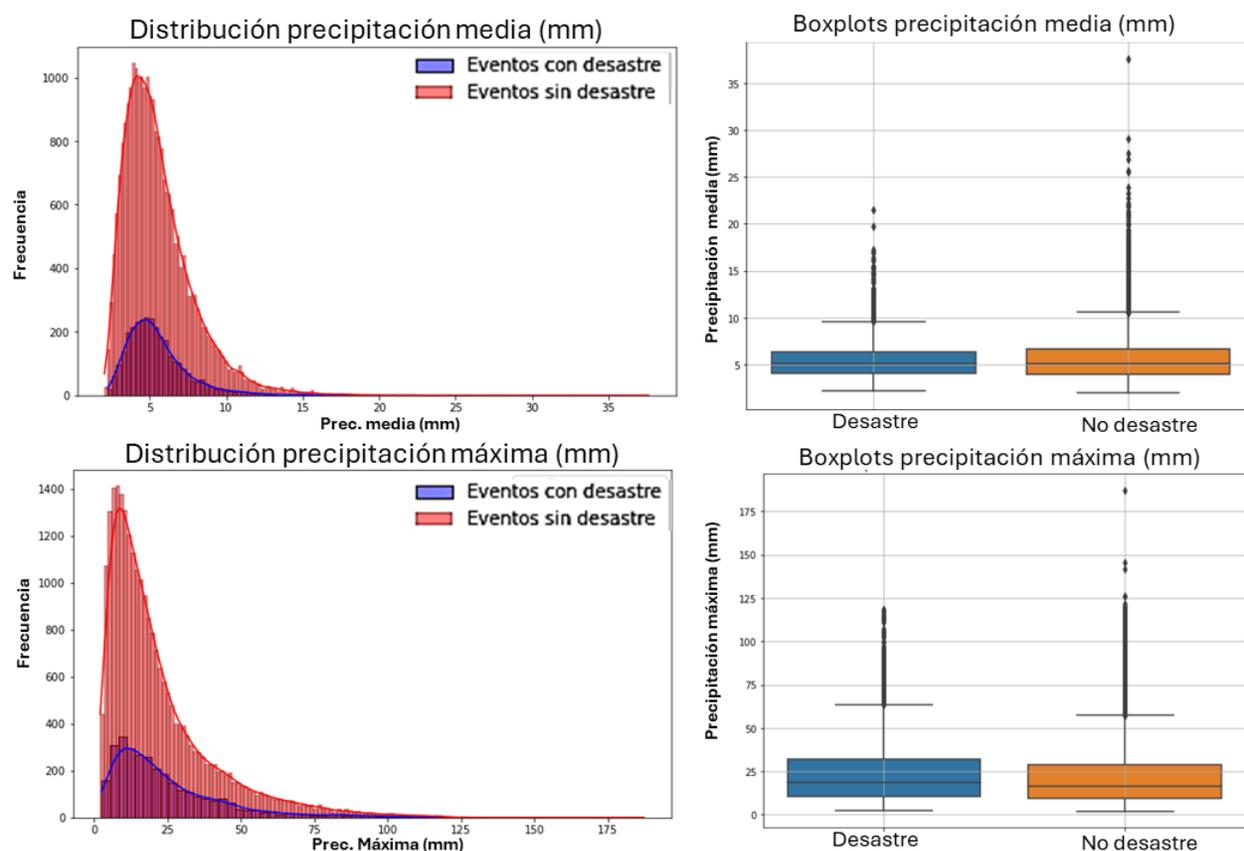
Para la caracterización de los MCSs, es importante resaltar que primeramente se analizan algunas de las variables de interés presentes en los datos del algoritmo ATRACKCS, como lo son: la precipitación media, la precipitación máxima y el área de temperatura de brillo. Para estas variables se usa una gráfica de caja y bigotes (boxplots) comparando los datos de los MCSs asociados a desastres (MCS-AD), que son los MCSs(pol) registrados que tuvieron presencia el día en que se presentó un desastre natural en el municipio correspondiente, en contraste con los MCS no asociados a desastres (MCS-NoAD), que son los que para el municipio de análisis no tuvieron correspondencia el día en que se presentó un desastre.

Como se observa en la Figura 13, los boxplots se complementan con gráficas de distribución de los datos para respaldar el análisis brindado por dichos diagramas.

La Figura 13 muestra la comparación entre los datos de precipitación media y precipitación máxima en los MCS-AD y los MCS-NoAD, mediante gráfica de boxplots y de distribución. En ella se evidencia que no hay diferencias notables entre los MCSs-AD y MCS-NoAD, respecto a las variables de precipitación, exceptuando que para la precipitación máxima la distribución es ligeramente mayor en los MCS-AD que en los MCS-NoAD.

Figura 13.

Comparación de precipitación media y precipitación máxima entre los polígonos de MCS-AD y MCS-NoAD para el periodo de estudio (2008-2020) en Antioquia



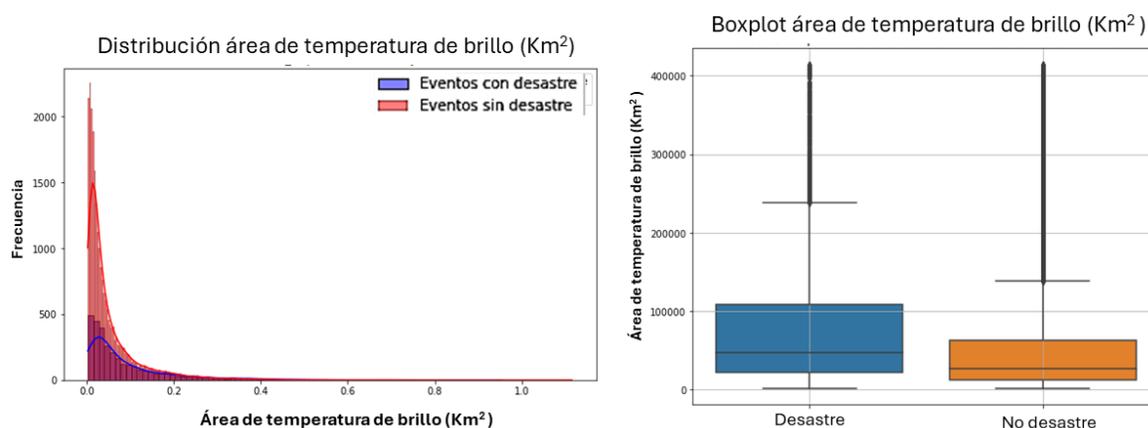
Nota: La gráfica de distribución de frecuencia de la parte izquierda muestra cómo se comportan los datos de precipitación en mm para MCS-AD y MCS-NoAD. A pesar de que son gráficas muy

similares, se logra notar una diferencia para la precipitación máxima en MCSs-AD, con una extensión alargada hacia la derecha en la gráfica de distribución y un desplazamiento levemente hacia arriba en el tercer cuartil de la gráfica de boxplot “Desastre”. Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

La Figura 14 analiza en este caso el área de temperatura de brillo en los polígonos de MCS-AD vs los MCS-NoAD. Esta Figura evidencia de manera clara que el área de la temperatura de brillo en los MCS-AD tiene una distribución más alta que en la de los MCS-NoAD, lo que indica que en general los polígonos de MCSs asociados a desastres tienen un área de temperatura de brillo mayor a los MCS-NoAD.

Figura 14

Comparación del área de temperatura de brillo entre los polígonos de MCS-AD y MCS-NoAD para el periodo de estudio (2008-2020) en Antioquia



Nota: En la gráfica de la izquierda se evidencia la distribución de frecuencias para el área de temperatura de brillo, donde se observa que tiene los MCS-AD (color azul) tienen una distribución más alargada hacia la derecha, lo que denota una mayor área. Esto se confirma en la gráfica de

boxplot de la derecha, donde se observa que para los MCS-AD el tercer cuartil está ubicado más arriba que el boxplot que representa los MCS-NoAD, así como su mediana se ubica en un valor superior. Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

Para complementar el análisis de las variables de los datos de ATRACKCS, es importante considerar un análisis desde el punto de vista de los MCSs que suceden antes y después de un desastre en un municipio, para determinar si hay algún factor que le aporte a la diferenciación de los MCS-AD y los MCS-No-AD. La Tabla 8 y Tabla 9 permiten constatar dichas diferencias. Por ejemplo, la Tabla 8 compara la presencia de MCSs en el municipio del desastre para el mismo día del desastre en contraste con hasta 3 días después. Allí se observa si hay presencia de al menos 1 MCS los días posteriores al desastre, y se constata la notable disminución de MCSs en el municipio del desastre. Por ejemplo, para las inundaciones se pasa de 325 desastres con presencia de MCSs el día del evento, a que solo en 150 de dichas emergencias naturales haya presencia de MCS al día siguiente de la inundación.

Tabla 8

Comparación entre los desastres naturales que tienen presencia de MCSs el día del evento VS los días después del evento.

Tipo de evento	Desastres naturales con presencia de MCSs - mismo día	Desastres naturales con presencia de MCSs - 1 día después	Desastres naturales con presencia de MCSs - 2 días después	Desastres naturales con presencia de MCSs - 3 días después
INUNDACION	325	150	115	134
DESLIZAMIENTO	122	90	99	106
VENDAVAL	180	87	76	76
MOVIMIENTO EN MASA	76	63	48	59
CRECIENTE SUBITA	21	12	10	11
AVENIDA TORRENCIAL	16	7	7	8
TORMENTA ELECTRICA	10	6	6	7
Total=	750	415	361	401

Nota: La tabla muestra que hay una notoria disminución en participación de MCSs en un municipio el día que se presenta un evento natural en contraste con los días siguientes al desastre. Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

Complementando la tabla anterior, la Tabla 9 muestra el número de MCSs(pol) que se presentaron el día del desastre natural, y lo compara respecto al número de MCSs(pol) que sucedieron los días siguientes al desastre. Igualmente, se constata la diferencia que existe entre el número de MCSs(pol) que se presentaron para el día del desastre en comparación con los MCSs(pol) ocurridos en los días después. A modo de ejemplo se observan los MCSs(pol) totales, que pasan de 2881 para el día del desastre a 1536, 1336 y 1495 para 1, 2 y 3 días después respectivamente.

Tabla 9

Comparación entre MCSs(pol) totales que se presentaron el día del evento de desastre VS los MCSs(pol) totales de los días después del evento.

Registro de MCSs(pol) totales que coincidieron con cada tipo de desastre natural en Antioquia - Análisis 1,2 y 3 días después del evento (2008-2020)				
Tipo de evento	Número de ocurrencias MCSs(pol) - mismo día	Número de ocurrencias MCSs(pol) - 1 día después	Número de ocurrencias MCSs(pol) - 2 días después	Número de ocurrencias MCSs(pol) - 3 días después
INUNDACION	1278	586	484	521
DESLIZAMIENTO	436	315	317	376
VENDAVAL	697	312	264	289
MOVIMIENTO EN MASA	281	225	181	207
CRECIENTE SUBITA	92	62	24	41
TORMENTA ELECTRICA	40	19	29	26
AVENIDA TORRENCIAL	57	17	37	35
Total	2881	1536	1336	1495

Nota: La tabla muestra la cantidad de MCSs(pol) que se presentaron el día del evento de desastre en comparación con los días después del suceso. Se constata que hay una disminución evidente en cada una de las categorías respecto a la cantidad de MCSs(pol) presentes en el municipio del desastre natural. Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

De acuerdo con los datos entregados por la Tabla 8 y 9, se logra evidenciar que, en general, para los días en los que se presentaron desastres naturales hubo mayor presencia de MCSs(pol) en los municipios donde sucedió el evento, en comparación con los días posteriores al desastre. Esto sugiere que una diferencia importante entre los MCSs(pol) asociados a desastres y los no asociados es el número de MCS/día que ocurren cuando se presenta un desastre natural.

En congruencia con el resultado mencionado anteriormente, en los casos de estudio tratados a continuación se presenta también un análisis de los polígonos de MCSs/día en el municipio del desastre natural.

8.4 Casos de Estudio.

Para un mejor acercamiento a la investigación, se presentan casos de estudio que permiten hacer una mayor comprensión del estudio realizado, ya que presenta casos concretos que sucedieron en el periodo de estudio (2008-2020) y exhibe los detalles más importantes de cada uno de los eventos.

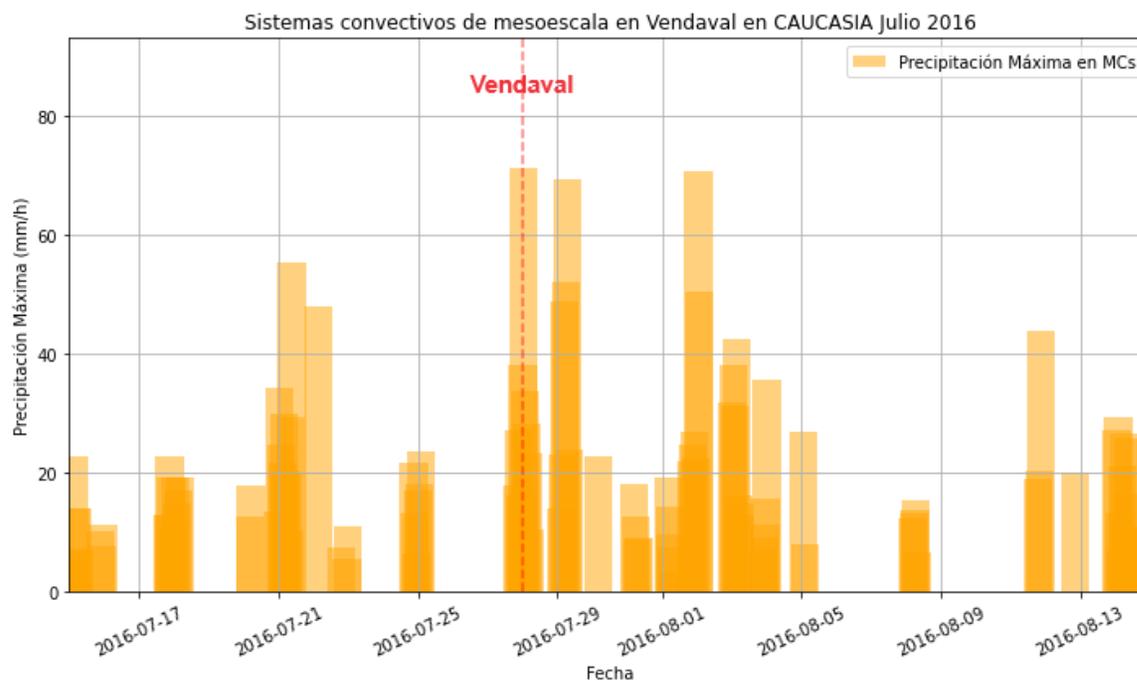
8.4.1. Vendaval, Caucasia 28 de julio de 2016.

Según el registro de UNGRD (2020), aproximadamente 2800 personas resultaron afectadas por el vendaval sucedido el 28 de julio en el municipio de Caucasia, Antioquia. Se consideran los registros de los polígonos de sistemas convectivos de mesoescala observados gracias al algoritmo ATRACKCS (Robledo, 2023) y se determina que se presentaron MCSs para el 28 de julio, los cuales tuvieron una duración de 12 horas.

Por medio de la serie de tiempo de MCSs(pol) para el día del vendaval, presentada en la Figura 15, se evidencia una concentración alta de MCSs(pol) para el día del desastre natural (28 de julio) a través de la acentuación del color naranja, que representa mayor cantidad de MCSs(pol). Se muestran también las precipitaciones máximas de los MCSs(pol) que sucedieron el día del desastre, días anteriores y días posteriores. En ella se observan precipitaciones máximas que alcanzan los 70mm/h para el día del desastre natural.

Figura 15

Serie de tiempo de los polígonos de MCSs antes, durante y después del Vendaval de Caucasia el 28 de Julio de 2016



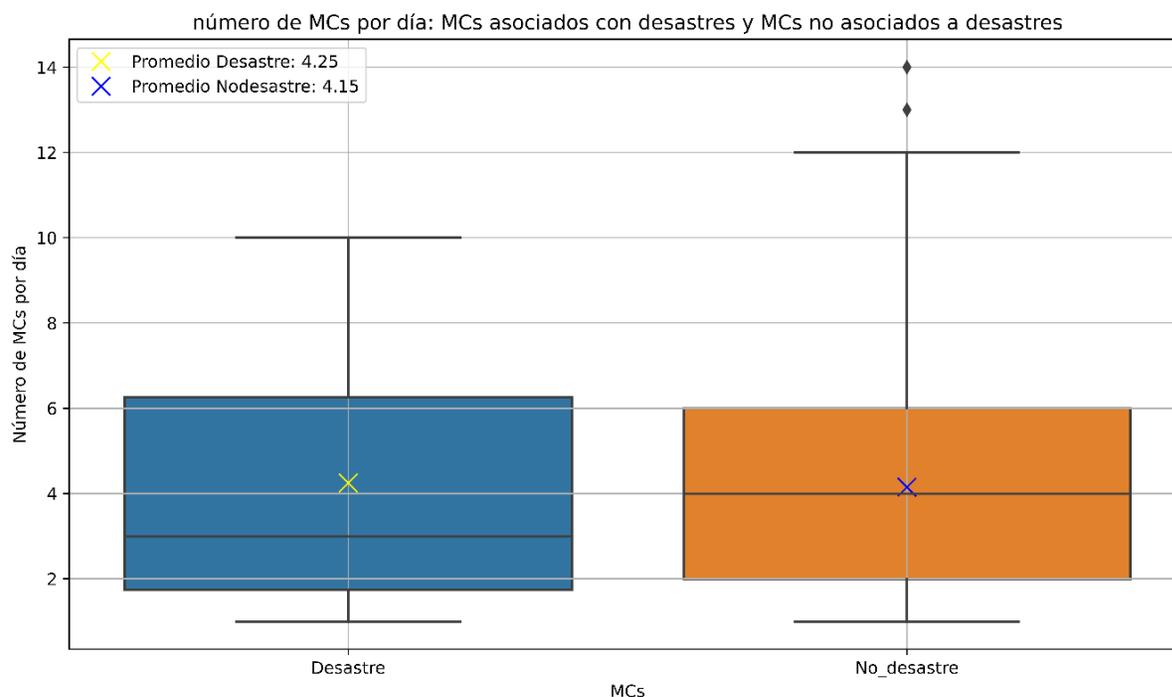
Nota: La gráfica evidencia los MCSs(pol) que sucedieron el día del vendaval, en días previos y posteriores al mismo, así como la precipitación máxima asociado a cada uno de los MCS (eje Y)- Se aprecia que para el día del desastre hay una concentración de MCSs levemente mayor en comparación a los días anteriores y posteriores. Adaptación de *Algoritmo ATRACKCS*, 2023, por Robledo.

La Figura 16 toma en cuenta las características señaladas anteriormente acerca de los MCSs(pol) por día y las analiza de acuerdo con el municipio de la tragedia, en este caso es Cauca, Antioquia. En la gráfica se evidencia que la distribución del primer al tercer cuartil en los MCSs(pol) asociados a desastres es ligeramente más amplia que en los MCSs(pol) no asociados a desastres, y aunque el promedio para MCSs-AD (Sistemas convectivos de mesoescala asociados a desastres) es mayor, su mediana es menor, por lo que no hay un patrón claro que indique diferencias entre los polígonos de MCSs-AD y los MCSs-NoAD.

Para este caso de desastre natural, se observa que hay una cantidad de MCSs(pol) por día levemente superior para el día en el que sucedió el vendaval, por lo que la Figura 17, es fidedigna a lo que se constata en este caso en particular, donde se verifica que para Caucasia, Antioquia no hay diferencias destacables respecto a la cantidad de MCSs(pol) por día entre MCSs-AD y MCSs-NoAD.

Figura 17.

Comparación entre los polígonos de MCS-AD y MCS-NoAD para Caucasia en el periodo de 2008-2020

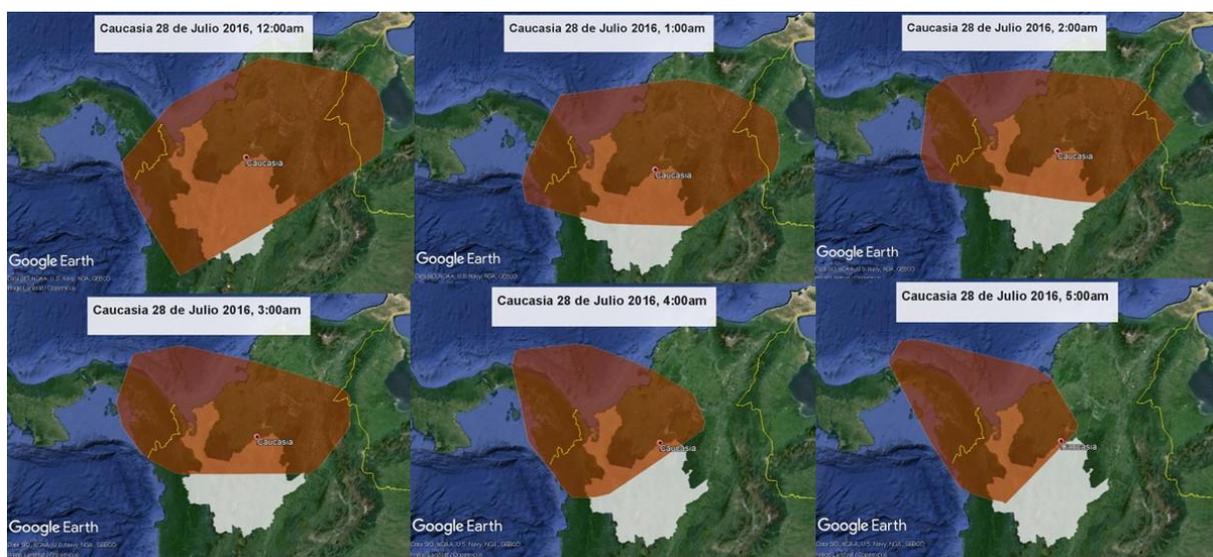


Nota: Gráfica de boxplot que muestra la distribución de sistemas convectivos de mesoescala asociados a desastres naturales (que suceden el mismo día) vs la distribución de sistemas convectivos de mesoescala que no están asociados a desastres. Se evidencia que hay una leve diferencia entre ambos, pero no lo suficiente como para destacar una característica en particular.

Asimismo, para el día 28 de Julio de 2016 se realiza un seguimiento satelital (Google Earth Pro, 2024) de los polígonos de MCSs-AD como se observa en la Figura 18, y permite ilustrar de una manera clara la influencia de los MCSs en los desastres naturales. En este análisis temporal se observa la evolución de los polígonos de MCSs sucedidos el día del vendaval, los cuales tuvieron una duración de 12 horas, lo que concuerda con lo que menciona El Palpitar (2016) acerca del evento.

Figura 18.

Seguimiento satelital a los polígonos de MCSs sucedidos el día en el que se presentó el vendaval en Caucasia.



Nota: Seguimiento satelital realizado a los polígonos de los MCSs asociados con el vendaval del 28 de Julio. Se visualiza la zona de estudio (Departamento de Antioquia en color blanco) y el municipio donde sucedió el desastre natural, en este caso: Caucasia, al norte del departamento con un señalador de color rojo. Tomado de *mapa de sistemas convectivos*, por Google Earth, s.f.

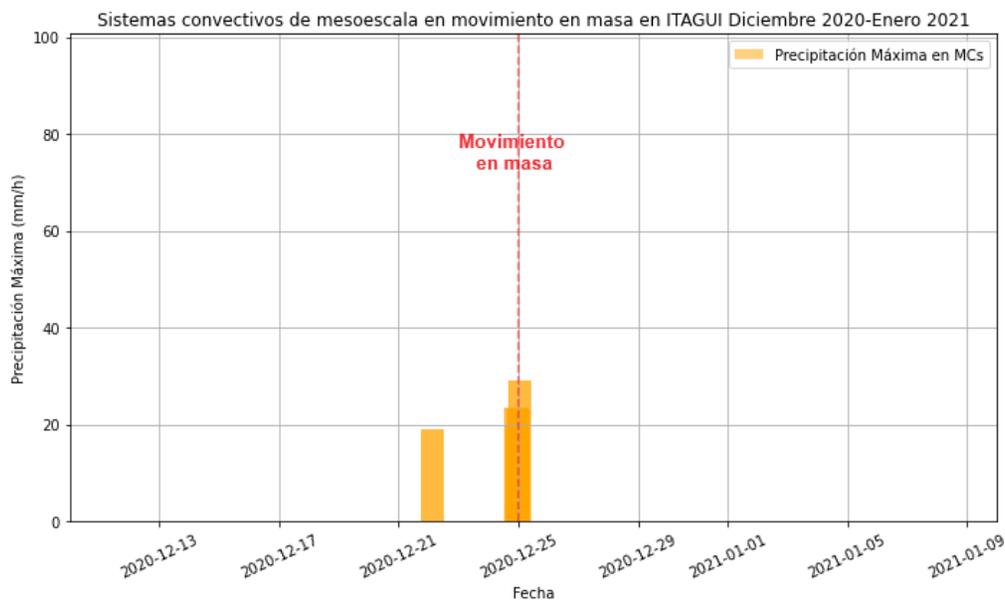
8.4.2. Movimiento en Masa, Itagüi 25 de diciembre de 2020.

El caso de estudio del municipio de Itagüi fue catalogado como un movimiento en masa según el UNGRD (2020), y sucedió en la madrugada del 25 de diciembre. El movimiento en masa ocasionó la muerte de 2 personas y otras 12 más resultaron afectadas.

Según se detalla en el reporte periodístico, el movimiento en masa habría sido condicionado por las fuertes lluvias sucedidas y a las construcciones ilegales realizadas en la zona (El Espectador, 2020). Estas fuertes lluvias se evidencian en la Figura 19, las cuales muestran que en el periodo considerado solo se registran 2 MCSs que tuvieron lugar el municipio de Itagüi, pero el día del desastre se observa la duración prolongada del MCS en el municipio.

Figura 19.

Serie de tiempo de sistemas convectivos de mesoescala antes, durante y después del movimiento en masa de Itagüi el 28 de Julio de 2020.

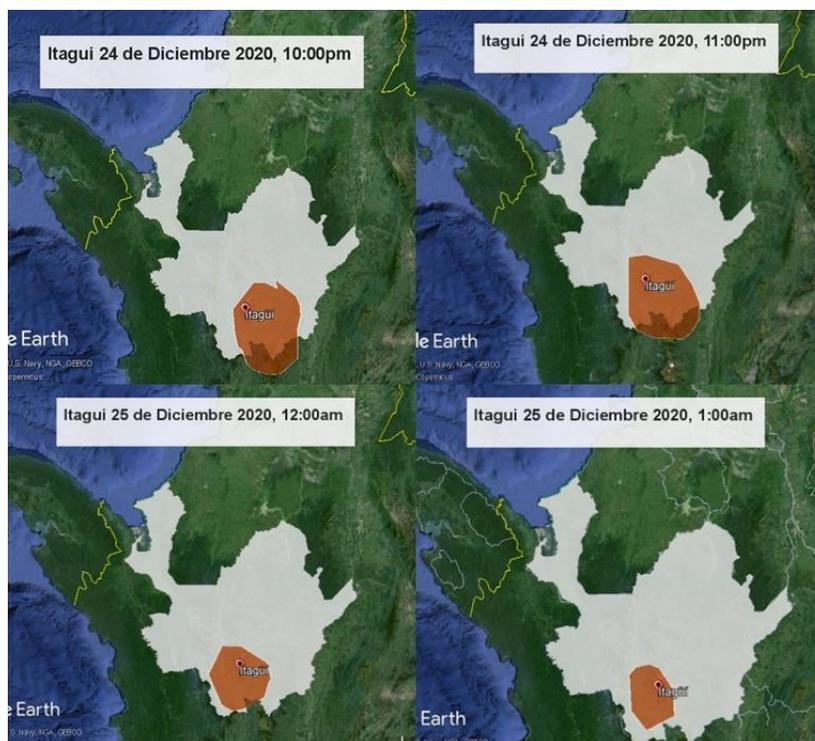


Nota: Presenta los MCSs registrados días previos, durante y después del desastre en el municipio de Itagui, Antioquia. Se constata que el día 25 de diciembre (día del desastre natural expresado con la línea roja punteada) hubo una importante concentración de polígonos de MCSs, con precipitaciones máximas alcanzando los 30 (mm/h). Se evidencia que, en el periodo del rango de la gráfica, el día en el que sucedió el movimiento en masa fue el día en el que hubo más polígonos de MCSs con presencia en la zona.

Asimismo, la Figura 19 ilustra la progresión del MCS el día de la tragedia, la cual constata la influencia del MCS en el movimiento en masa sucedido el 25 de diciembre, ya que dicho desastre natural se reportó a las 2 am, lo que corresponde con el periodo de tiempo en el que sucedió el MCS, que fueron horas previas a la tragedia y durante la misma.

Figura 19.

Seguimiento satelital al MCS sucedido el día en el que se presentó el movimiento en masa en Itagüi.

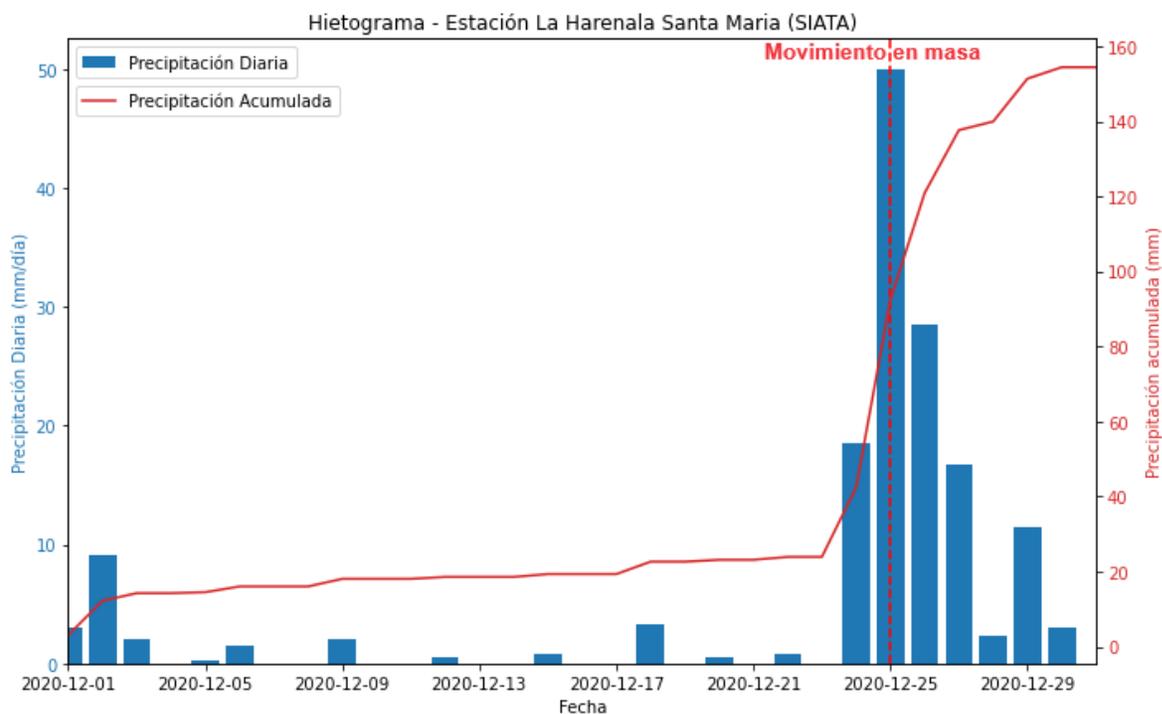


Nota: Evolución del sistema convectivo de mesoescala sucedido en el municipio del desastre (Itagüi, Antioquia) mediante la representación satelital con polígonos rojos. Se detalla la hora en la evolución del MCS, la zona de estudio y el municipio afectado. Tomado de *mapa de sistemas convectivos*, por Google Earth, s.f.

La precipitación que registra el MCSs (a través del algoritmo ATRACKCS) son respaldadas por la precipitación que consigna la estación pluviométrica del SIATA (Sistema de alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburrá), en donde el hietograma de la Figura 20 evidencia que el día de mayor precipitación se registró el 25 de diciembre (día del movimiento es masa), registrando una precipitación de hasta 50mm/día (SIATA, s.f)

Figura 20.

Hietograma que representa las condiciones del mes en el que se registró la tragedia natural en el municipio de Itagüí.



Nota: Hietograma vinculado a los datos de la Estación La Harenala, ubicada a 1.5Km de distancia de donde se presentó el movimiento en masa. Se muestra la precipitación por día (mm) en el Eje Y en la parte izquierda y la precipitación acumulada (mm) para el mes en la parte derecha. El hietograma muestra el comportamiento de la precipitación para el mes de diciembre, donde se aprecia que el día en el que hubo mayor precipitación (mm/día) fue el día de la tragedia. Adaptado de: *Monitoreo*, por SIATA (Sistema de Alertas tempranas del Valle de Aburrá).

8.4.3. Avenida Torrencial, Salgar 18 de mayo de 2015.

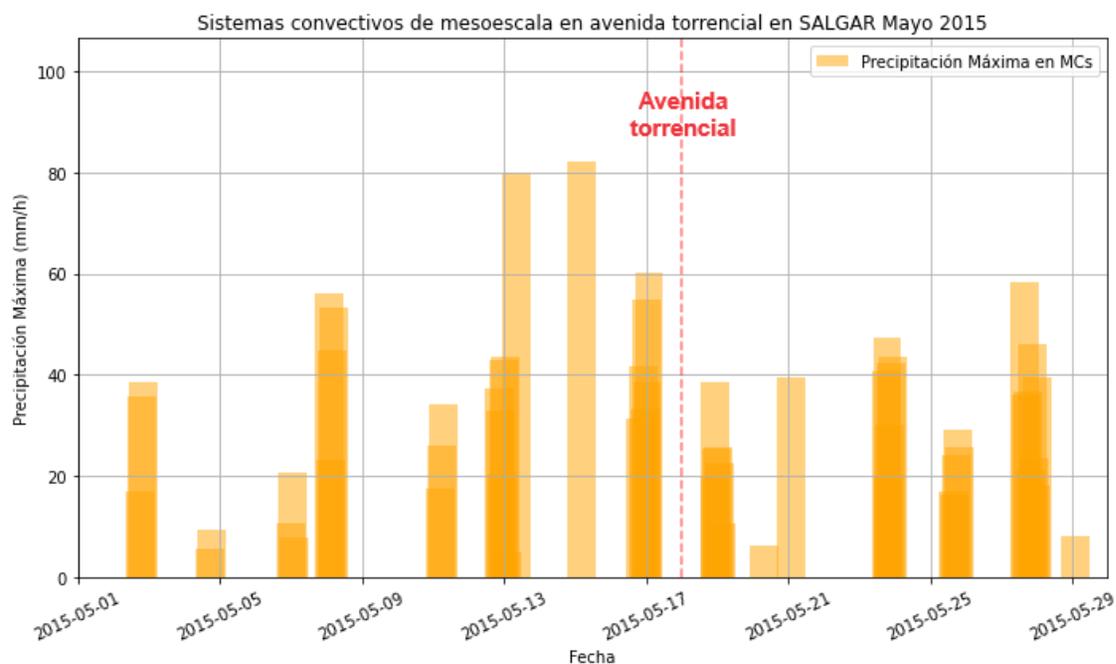
La avenida torrencial de salgar es uno de los eventos naturales sucedidos en Antioquia que mayor cantidad de víctimas fatales ha registrado. La UNGRD reportó 93 fallecidos y 1440 personas afectadas. Para este caso en particular, una de las explicaciones del incremento de la

vulnerabilidad del territorio fueron los asentamientos informales y el uso inadecuado del suelo (El Espectador, 2015).

Según Hoyos et al. (2019), un detonante crucial para que se registrara la avenida torrencial fueron las lluvias asociadas a MCSs los días previos a la tragedia, que habrían contribuido al desborde de la quebrada y la posterior avenida torrencial. En la Figura 21 donde se observan los MCSs en salgar en el mes de Mayo, se constata el número de polígonos de MCSs por día previo a la tragedia, que muestra que en un periodo de 2 días antes hubo una concentración de al menos 6 polígonos de MCSs en el municipio, con precipitación máxima que supera los 40 mm/h en al menos 3 de ellos.

Figura 21.

Serie de tiempo de sistemas convectivos de mesoescala antes, durante y después de la avenida torrencial, el 18 de mayo de 2015.

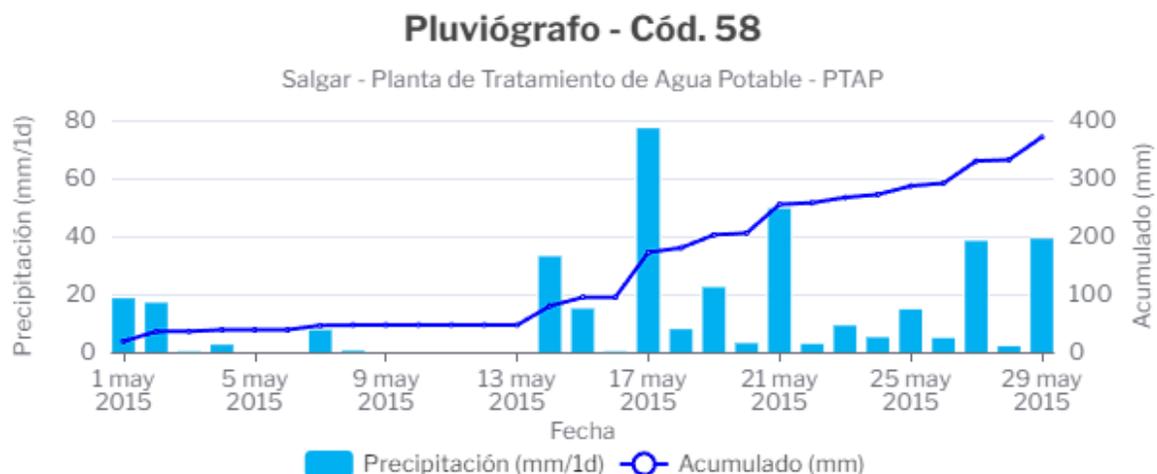


Nota: Representa los MCSs registrados En el mes de mayo para el municipio de Salgar, Antioquia. La línea vertical roja representa el día en el que sucedió la avenida torrencial, y el eje Y expresa los valores de precipitación máxima para cada MCS sucedido.

Los datos registrados de precipitación máxima en MCSs previos a la avenida torrencial en Salgar se respaldan además con la Figura 22 del pluviógrafo, la cual refleja que el día previo a la avenida torrencial (17 de mayo,2015) se presentó el valor mayor de precipitación por día, alcanzando los 80 mm/día.

Figura 22:

Hietograma que representa las condiciones del mes en el que se registró la tragedia natural en el municipio de Salgar.



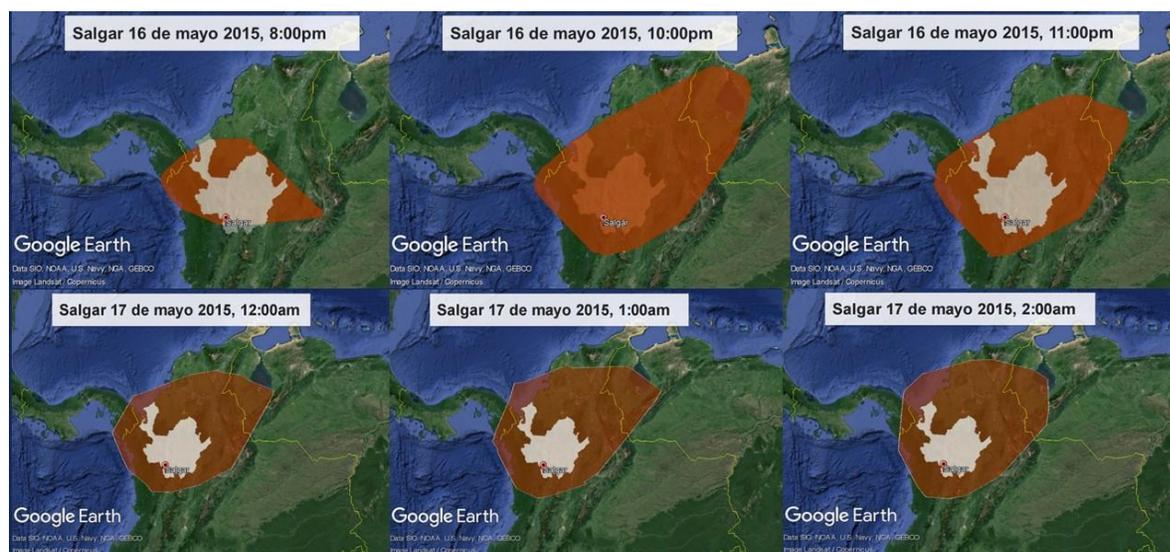
Nota: Precipitación por día (Eje Y izquierdo) y precipitación acumulada para el mes en el que se registró la avenida torrencial en Salgar, Antioquia. La estación pluviográfica está ubicada a 1km del parque principal de Salgar. Se observa que para 1 día antes de la avenida torrencial (17 de

mayo) se registró la mayor precipitación por día en el mes. Imagen tomada del *pluviógrafo 58 del geoportal de Piragua, 2024*.

Asimismo, la Figura 23 permite detallar de una manera clara el transcurso de los polígonos de los MCSs que tuvieron presencia en Salgar los días previos a la avenida torrencial. En ella se evidencia la evolución temporal de los MCSs a partir de los polígonos que detallan sus características. La gráfica presenta un seguimiento satelital de los polígonos de MCSs para hacer visible su presencia en el municipio e ilustrar su influencia en el desastre natural

Figura 23

Seguimiento satelital a los polígonos de MCSs sucedidos el día en el que se presentó la avenida torrencial en Salgar.



Nota: Evolución de los MCSs con relación a la avenida torrencial ocurrida en Salgar, Antioquia el 18 de mayo de 2015. Los polígonos de color rojo expresan el área del MC que representan y el cuadro de texto detalla la hora en la que tuvieron presencia cada polígono de MCS en el municipio. En color blanco se señala el área de estudio (Antioquia, Colombia) y el ícono de

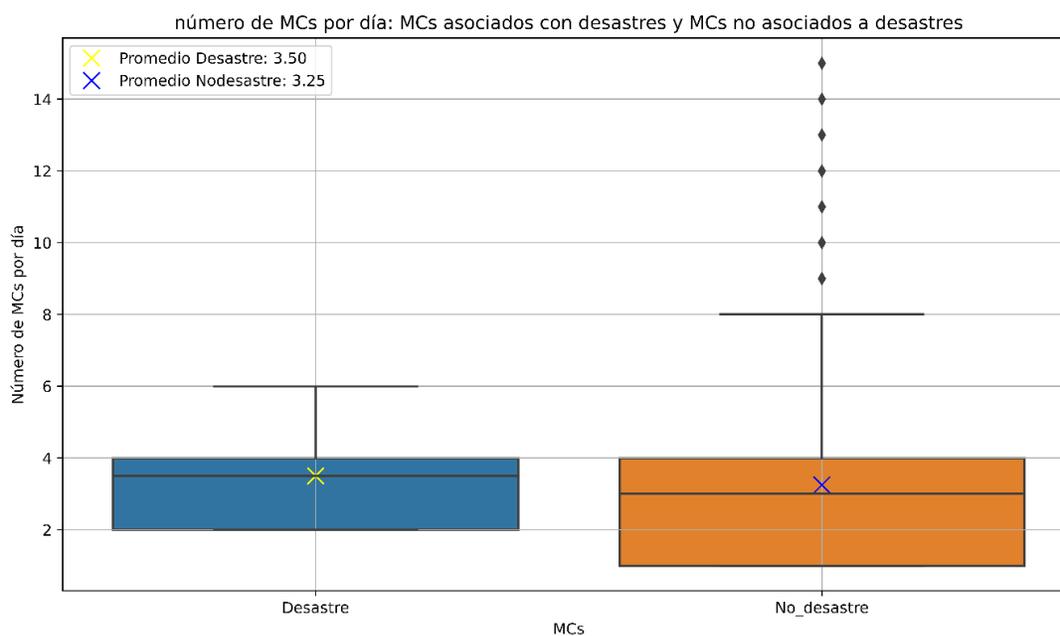
ubicación de color rojo señala la localización del municipio donde ocurrió el desastre natural.

Tomado de *mapa de sistemas convectivos*, por Google Earth, s.f.

Para el caso del municipio de Salgar, se observa en la Figura 24 que las diferencias entre los polígonos de MCs-AD y MCS-NoAD no son tan pronunciadas, ya que el promedio, la mediana y la distribución del cuartil 1 al 3 tienen comportamientos similares. Sin embargo, es conveniente un análisis riguroso para determinar un umbral de riesgo, ya que en el boxplot de MCs-AD la ubicación del cuartil 2 (mediana) se encuentra 0.5 MCs/día más arriba que en MCs-NoAD, lo que podría mostrar una propensión al desastre natural con una concentración de MCs por día más alta.

Figura 23.

Comparación entre los polígonos de MCS-AD y MCS-NoAD para Salgar en el periodo de 2008-2020



Nota: Boxplot de MCSs(pol)/día en sistemas asociados y no asociados a desastres naturales. En el eje Y se encuentra el número de MCSs(pol)/día, y en el eje X se encuentra el tipo de sistema (MCSs asociados o no asociados a desastres naturales). El boxplot azul izquierdo representa los polígonos de MCSs-AD y el naranja derecho representa MCSs-NoAD. A pesar de estar en un rango muy similar, la mediana y el promedio en MCSs-AD es mayor que en MCSs-NoAD, lo que podría indicar una propensión al desastre a mayor número de MCSs por día. Datos de la climatología de Robledo (2023) con el algoritmo ATRACKCS.

9.Discusión.

La identificación de los desastres naturales en Antioquia es una herramienta fundamental para la determinación de las zonas de vulnerabilidad en el departamento. Sumado a esto, la verificación del número de fallecidos en dichos desastres hace posible detallar en qué zonas se debe tener un enfoque especial para la gestión y la prevención del riesgo.

En concordancia con el análisis llevado a cabo por Ayala & Ospino (2023), se observan 3 zonas de especial interés por la cantidad de desastres naturales que suceden, dichas zonas son: el centro del departamento, con énfasis en los municipios de Medellín y Bello; el Noroccidente, destacando a Turbo, Apartadó y Chigorodó; y El Nororiente, dando prioridad a Nechí, Cauca y Zaragoza. Cuando se añade al análisis el número de fallecimientos, se establece que Medellín, Valdivia y Bello son los municipios de mayor interés, dado que presentan altas cifras de desastres naturales e igualmente un alto número de fallecidos a causa de dichos desastres.

Con base en los análisis realizados, las áreas de interés identificadas son fundamentales para la investigación futura, ya que se propone que estos municipios sean áreas prioritarias para procesos de gestión del riesgo, tales como: el desarrollo de nuevos estudios que permitan especificar las características de la vulnerabilidad de cada zona en concreto, la creación de planes de contingencia más rigurosos que salvaguarden la vida de la población y la puesta en marcha de programas de educación y concientización en zonas de alto riesgo en los municipios.

Asimismo, en concordancia con las zonas de interés respecto al número de fallecidos y los municipios donde más se presentan desastres, se determina que desde el punto de vista de las zonas en donde más suceden MCSs, los municipios del noroccidente y nororiente poseen especial interés. El resultado del análisis respalda lo mencionado por Jaramillo et al. (2017) y Robledo (2023), ya que los municipios limítrofes con el chocó son los que cuentan con mayor cantidad de MCSs registrados, por lo cual están influenciados por el “hotspot” de MCSs existente en esta zona. Además, se constata la presencia importante de MCSs hacia el nororiente del departamento, donde se registra una alta cantidad de MCSs en la subregión del bajo cauca y el nordeste Antioqueño. Allí se verifica un favorecimiento a las condiciones que posibilitan la existencia y formación de MCSs (Robledo, 2023; Zipser et al., 2006)

En cuanto a la caracterización de los desastres naturales por tipo de evento, se evidencia que las inundaciones son las que poseen un porcentaje de ocurrencias mayor en Antioquia para los 12 años de estudio (2008-2020), llegando a casi la mitad del total de los desastres naturales, alcanzando un 45% del total. A esta le siguen los vendavales con un 20% y los deslizamientos y movimientos en masa con un 19% y 10% respectivamente.

Respecto a la correspondencia de los tipos de evento de desastres con MCSs, sobresalen el porcentaje de correspondencia del 51.3% de la categoría de vendaval. Esto es congruente con

lo mencionado en la literatura, ya que los MCSs se asocian con un alto contenido de fuerte vientos y se ha documentado su relación con la generación de huracanes y tornados (Houze, 2018; Schumacher & Rasmussen, 2020). Sin embargo, se encuentran altos porcentajes de correspondencia en cada uno de los tipos de evento de desastre, ya que analizando la presencia de los MCSs el día del desastre, según su categoría se obtiene que cada uno de los tipos de desastre tiene presencia de MCSs en más del 35%, siendo el más bajo la categoría de deslizamientos con un 36,5%, llegando a aumentar hasta el 74,3% si se añade un análisis de 3 días previos al desastre. Esto podría sugerir que los MCSs desempeñan un papel fundamental en la ocurrencia de desastres naturales, ya que en promedio están presentes en 40% de dichos eventos naturales. Sin embargo, se debe tener presente las limitantes innatas a los datos de desastres naturales, que no proporcionan una hora de ocurrencia del desastre ni las coordenadas específicas, por lo que se dificulta un análisis más preciso y que permita esclarecer si los MCSs fueron los detonantes de los desastres. A pesar de esto, los análisis con los días posteriores indican que la correspondencia de los desastres y los MCSs en el día del evento son robustas.

Asimismo, es importante tener en cuenta que considerar la lluvia antecedente para el Valle de Aburrá es un aspecto fundamental para la prevención del riesgo de desastres respecto a los deslizamientos y movimientos en masa, ya que es la zona del departamento donde más se observa un aumento de correspondencia cuando se considera este factor. Además, el Valle de Aburrá es la zona donde se encuentra ubicada la mayoría de la población del departamento, existe un alto riesgo documentado para las laderas del valle y una mayor amenaza por la densidad de población que alberga en dichas zonas de riesgo (Salazar, 2022; urbam, 2012).

Por otra parte, de acuerdo con la distribución anual de la lluvia y la distribución de los desastres naturales ocurridos, se constata que los desastres naturales siguen un comportamiento

acorde al régimen de lluvias. Este resultado respalda lo mencionado por Ayala & Ospino (2023) donde resaltan que los desastres naturales en Antioquia son principalmente de origen hidrometeorológico. Según esto, se observa que el mes de mayo cumple 3 características: es el mes con mayor precipitación registrada (mm), con más cantidad de desastres naturales registrados y mayor cantidad de MCSs registrados.

Para una investigación futura es importante destacar que el área de temperatura de brillo y los MCS por día que se presentan en un evento de desastre natural, son los 2 factores principales donde se encontraron mayores diferencias entre los MCSs asociados a desastres y los no asociados. El área de temperatura de brillo de los MCS-AD es en general superior a los MCS-NoAD y asimismo para los días de desastre hubo de 15% a 20% más sistemas convectivos de mesoescala que en los días posteriores. Se considera que es crucial el depositar interés en dichos factores específicos ya que puede proporcionar a los municipios un entendimiento mayor acerca del impacto de los MCSs en el territorio. Por ejemplo, a través de los polígonos de MCS/día sería útil estudiar si hay un umbral a partir del cual se esté más propenso en un municipio a algún tipo de desastre natural y aplicar técnicas de pronóstico para MCSs para anticipar la ocurrencia del desastre.

Un aspecto importante de la relación de los MCSs con los desastres naturales, es que estos son eventos de gran tamaño y con duraciones en ocasiones bastante prolongadas. Esto quiere decir que son sistemas observables con información de radar y productos satelitales, los cuales pueden ser utilizados por sistemas de alertas tempranas. Además, en varios casos específicos se puede evidenciar el papel de las condiciones antecedentes y la ocurrencia de MCS en días previos, lo cual puede servir en municipios de interés para que esta información sea utilizada por los tomadores de decisiones. El uso de técnicas de inteligencia artificial y diferentes

algoritmos de pronóstico del desplazamiento y evolución de los MCSs pueden ser altamente valiosos para los sistemas de alertas tempranas.

10. Conclusiones.

Este estudio presenta un análisis de la relación de los sistemas convectivos de mesoescala (MCSs) con los desastres naturales ocurridos en el departamento de Antioquia, Colombia para el periodo de 2008 a 2020. Se utilizan dos insumos principales: el algoritmo ATRACKCS, que permite conocer la ubicación de los MCSs en el norte de Suramérica; y la base de datos de desastres de la unidad nacional de gestión de riesgo (UNGRD). Con base en el número de desastres, fallecidos en desastres y cantidad de MCSs, se determina que hay 3 zonas de mayor interés donde se deben priorizar la gestión del riesgo: el nororiente, el noroccidente y el Valle de Aburrá en el centro del departamento. El nororiente y el noroccidente debido a que son las zonas donde se presentan más MCSs en el departamento y los que registran mayor cantidad de desastres después de los municipios del Valle de Aburrá. El Valle de Aburrá debido a ser la zona con mayor cantidad de fallecidos, la de mayor ocurrencia de eventos de desastre y donde hay mayor cantidad de población ubicada en zonas de alto riesgo.

Para los 7 tipos de desastres considerados se observa que las inundaciones representan el 45% del total de ocurrencia, seguidos de los vendavales con 20%, los deslizamientos con el 19% y los movimientos en masa con el 10%. Se evidencia que los MCSs tienen participación en un promedio del 43% de los 1746 desastres naturales registrados, siendo la categoría de creciente súbita con el 52% y vendavales con 51% las que presentan el mayor porcentaje de correspondencias, y los deslizamientos los que presentan el menor porcentaje con 36%. Sin

embargo, este porcentaje aumenta al 74% si se considera la ocurrencia de MCSs en los 3 días anteriores al deslizamiento.

Para futuras investigaciones se sugiere considerar factores como el área de temperatura de brillo, la precipitación máxima y los MCSs/día para obtener umbrales de riesgo basados en dichas características.

11. Referencias Bibliográficas

Alcaldía de Medellín. (2014). MOVIMIENTOS EN MASA. Alcaldía de Medellín.

https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportaldelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_8/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2016/CartillaMovMasa.pdf

AMVA. (2018). INVITACIÓN DE LOS 10 MUNICIPIOS DEL VALLE DE ABURRÁ PARA ENTENDERNOS [Gubernamental]. Área metropolitana del Valle de Aburrá.

<https://www.metropol.gov.co/noticias/invitaci%C3%B3n-de-los-10-municipios-del-valle-de-aburr%C3%A1-para-entendernos>

Ayala, J., & Ospino, K. (2023). Desastres naturales en Colombia: Un análisis regional. Banco de la República. <https://doi.org/10.32468/dtseru.317>

Commons wikimedia. (2012). Mapa de localización del departamento de Antioquia [Map]. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_Antioquia.svg, Creative Commons.

Cooper, A., Turney, C. S. M., Palmer, J., Hogg, A., McGlone, M., Wilmshurst, J., Lorrey, A. M., Heaton, T. J., Russell, J. M., McCracken, K., Anet, J. G., Rozanov, E., Friedel, M., Suter,

- I., Peter, T., Muscheler, R., Adolphi, F., Dosseto, A., Faith, J. T., ... Zech, R. (2021). A global environmental crisis 42,000 years ago. *Science*, 371(6531), 811-818.
<https://doi.org/10.1126/science.abb8677>
- CRED. (2024). 2023 Disasters in numbers (p. 8) [Annual]. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. https://files.emdat.be/reports/2023_EMDAT_report.pdf
- DANE. (2018). Censo nacional de población. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Dimri, A. P., Thayyen, R. J., Kibler, K., Stanton, A., Jain, S. K., Tullos, D., & Singh, V. P. (2016). A review of atmospheric and land surface processes with emphasis on flood generation in the Southern Himalayan rivers. *Science of The Total Environment*, 556, 98-115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.206>
- El Espectador. (2015). Avalancha en Salgar, otra tragedia anunciada.
<https://blogs.elespectador.com/actualidad/el-rio/avalancha-en-salgar-otra-tragedia-anunciada>
- El Espectador. (2020). Dos desaparecidos en Itagüí, Antioquia, tras deslizamiento de tierra.
<https://www.elespectador.com/colombia/medellin/dos-desaparecidos-en-itagui-antioquia-tras-deslizamiento-de-tierra-article/>
- El Palpitar. (2016). 45.000 afectados dejó inundación en Cauca. <http://www.elpalpitar.com/antioquia/2016/07/45-000-afectados-dejo-inundacion-caucasia/>
- Finlay, P. J., Fell, R., & Maguire, P. K. (1997). The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 811-824.
<https://doi.org/10.1139/t97-047>

Fritsch, J. M., & Forbes, G. S. (2001). Chapter 9 Mesoscale Convective Systems.

Garcia, N. O., Ferreira, R. N., & Latrubesse, E. M. (2009). Climate and Geomorphologic-related Disasters in Latin America. En *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 13, pp. 1-27). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(08\)10001-3](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(08)10001-3)

Gobernación de Antioquia. (2023). Conociendo Antioquia [Oficial gubernamental]. Territorio Antioquia. https://www.antioquiadatos.gov.co/territorio_antioquia/index.php/conociendo-antioquia/

Google Earth. (s.f). Mapa de sistemas convectivos en Antioquia, Colombia [Google Earth pro]. <https://earth.google.com/static/multi-threaded/versions/10.49.0.0/index.html?hl=es-419>

Gomez, D., & Aristizabal, E. (2023). Influencia de la lluvia antecedente en los deslizamientos en los Andes Colombianos.

González, F. A. I., & London, S. (2021). Desastres naturales y su impacto: Una revisión metodológica. *Visión de Futuro*, 25, No 1 (Enero-Junio), 43-61. <https://doi.org/10.36995/j.visiondefuturo.2021.25.01.002.es>

Houze, R. A. (2004). Mesoscale convective systems. *Reviews of Geophysics*, 42(4), 2004RG000150. <https://doi.org/10.1029/2004RG000150>

Houze, R. A. (2018). 100 Years of Research on Mesoscale Convective Systems. *Meteorological Monographs*, 59, 17.1-17.54. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0001.1>

Hoyos, C. D., Ceballos, L. I., Pérez-Carrasquilla, J. S., Sepúlveda, J., López-Zapata, S. M., Zuluaga, M. D., Velásquez, N., Herrera-Mejía, L., Hernández, O., Guzmán-Echavarría, G., & Zapata, M. (2019). Meteorological conditions leading to the 2015 Salgar flash flood: Lessons for vulnerable regions in tropical complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(11), 2635-2665. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2635-2019>

- IDEAM. (2010). AMENAZAS COSTERAS. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Amenazas+Costeras.pdf/2d134cc7-063e-43c3-8ef2-c76fa25c1cdd#:~:text=Existen%20fen%C3%B3menos%20naturales%20clasificados%20como,y%20bienes%20de%20la%20poblaci%C3%B3n.>
- Jaramillo, L., Poveda, G., & Mejía, J. F. (2017). Mesoscale convective systems and other precipitation features over the tropical Americas and surrounding seas as seen by TRMM. *International Journal of Climatology*, 37(S1), 380-397. <https://doi.org/10.1002/joc.5009>
- Jeong, J.-H., Lee, D.-I., Wang, C.-C., & Han, I.-S. (2016). Characteristics of mesoscale-convective-system-produced extreme rainfall over southeastern South Korea: 7 July 2009. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 927-939.
<https://doi.org/10.5194/nhess-16-927-2016>
- Jirak, I. L., & Cotton, W. R. (2007). Observational Analysis of the Predictability of Mesoscale Convective Systems. *Weather and Forecasting*, 22(4), 813-838.
<https://doi.org/10.1175/WAF1012.1>
- Mejía, J. F., & Poveda, G. (2005). Ambientes atmosféricos de sistemas convectivos de mesoescala sobre Colombia durante 1998 según la TRMM y el Re-análisis NCEP/NCARv. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 29(495-514).
https://www.researchgate.net/publication/233922038_Ambientes_atmosfericos_de_sistemas_convectivos_de_mesoescala_sobre_Colombia_durante_1998_segun_la_TRMM_y_el_Re-analisis_NCEPNCAR

- Nesbitt, S. W., Zipser, E. J., & Cecil, D. J. (2000). A Census of Precipitation Features in the Tropics Using TRMM: Radar, Ice Scattering, and Lightning Observations. *Journal of Climate*, 13(23), 4087-4106. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4087:ACOPFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4087:ACOPFI>2.0.CO;2)
- Palharini, R., Vila, D., Rodrigues, D., Palharini, R., Mattos, E., & Undurraga, E. (2022). Analysis of Extreme Rainfall and Natural Disasters Events Using Satellite Precipitation Products in Different Regions of Brazil. *Atmosphere*, 13(10), 1680. <https://doi.org/10.3390/atmos13101680>
- Piragua. (2024). Programa integral red de agua -Piragua (piragua; Versión 2024) [dataset]. <https://piragua.corantioquia.gov.co/geoportal/red-automatica>.
- Python org. (2024). Definición de python [Python; Windows, IOs]. Python.
- Ramírez-Cardona Álvaro, Robledo Vanessa, Rendón A. Angela M., Henao Juan. J, Hernández, K. Santiago, Gómez-Ríos Sebastián & Mejía John F. (2022). Algorithm for Tracking Convective Systems (ATRACKCS) (v1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7709989>
- Robledo, V. (2023). Spatio-temporal characteristics of mesoscale convective systems over northwestern South America using a new persistence tracking technique. <https://hdl.handle.net/10495/36625>
- Salazar, J. F. (2022). Tranquilizar el Río Medellín: Una tarea urgente. *Territorios Sostenibles*. <https://territoriosostenibles.com/cambio-climatico/hay-que-tranquilizar-al-rio-medellin/>
- Sánchez, F., & Calderón, S. (2015). Caracterización de y Vulnerabilidad a los Desastres Naturales en Colombia, 1970-2011. Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/be84425b-d0b6-47c0-86fb-b207def5eb5c>

Schumacher, R. S., & Johnson, R. H. (2005). Organization and Environmental Properties of Extreme-Rain-Producing Mesoscale Convective Systems. *Monthly Weather Review*, 133(4), 961-976. <https://doi.org/10.1175/MWR2899.1>

Schumacher, R. S., & Rasmussen, K. L. (2020). The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(6), 300-314. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0057-7>

SIATA. (s.f). Datos de precipitación de Itagüí. [dataset]. https://siata.gov.co/siata_nuevo/

Song, F., Leung, L. R., Feng, Z., Chen, X., & Yang, Q. (2022). Observed and Projected Changes of Large-Scale Environments Conducive to Spring MCS Initiation Over the US Great Plains. *Geophysical Research Letters*, 49(15), e2022GL098799. <https://doi.org/10.1029/2022GL098799>

Trenberth, K. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1), 123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>

UNGRD. (2012). Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <https://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=144>

UNGRD. (2018). Identificación de escenario de riesgo. Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de desastres. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Procedimientos/Identificacion-de-escenario-de-riesgo.pdf>

urbam. (2012). RE HABITAR LA LADERA: Operaciones en Areas de riesgo y asentamiento precario en Medellin. Centro de Estudios Urbanos y Ambientales.

<https://www.eafit.edu.co/centros/urbam/articulos->

publicaciones/Documents/urbam_eafit_rehabitar_la_ladera.pdf

Zipser, E. J., Cecil, D. J., Liu, C., Nesbitt, S. W., & Yorty, D. P. (2006). WHERE ARE THE MOST INTENSE THUNDERSTORMS ON EARTH? Bulletin of the American Meteorological Society, 87(8), 1057-1072. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057>