



Sistematización de inventarios de procesos morfodinámicos tipo movimientos en masa para la ciudad de Medellín

Alejandra Díaz Rivera
Laura Daniela Gil Cárdenas

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Medio Ambiente y Geoinformática

Asesor
Juan Carlos Guzmán Martínez, Magíster (MSc) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática
Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Diaz Rivera & Gil Cárdenas, 2024)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Diaz Rivera, A., & Gil Cárdenas, L. D. (2024). <i>Sistematización de inventarios de procesos morfodinámicos tipo movimientos en masa para la ciudad de Medellín</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Cohorte XIX.



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.

Resumen

Los movimientos en masa (MM) son fenómenos geodinámicos que representan un desafío para la gestión del territorio en Colombia, especialmente en áreas urbanas con alta densidad poblacional como Medellín, donde factores como las condiciones geológicas complejas, las pendientes pronunciadas y los cambios en el uso del suelo, junto con eventos climáticos extremos, han incrementado la ocurrencia de estos procesos, aumentando a su vez la amenaza a las comunidades y la infraestructura. Aunque existen inventarios y estudios detallados sobre MM en la región, la falta de sistematización y estandarización limita su utilidad para el análisis de susceptibilidad y riesgo. Este problema destaca la necesidad de consolidar la información dispersa en un sistema centralizado que permita generar insumos para modelos predictivos.

Este proyecto tiene como objetivo consolidar un inventario estandarizado de movimientos en masa para Medellín, a partir de información proveniente de estudios de riesgo de origen geológicos a escala detallada. La información es sistematizada en una Geodatabase (GDB) paramétrica, aplicando procesos de normalización y depuración para asegurar consistencia de los registros, que facilite la centralización y análisis de la información. Posteriormente, se evalúa la correspondencia entre los inventarios locales, nacionales y globales y la representatividad de los datos locales frente a patrones internacionales.

Adicionalmente, este proyecto busca proponer criterios mínimos para la elaboración de inventarios que mejoren la compatibilidad entre escalas locales y globales, fortaleciendo su utilidad para la gestión del riesgo y la toma de decisiones.

Palabras clave: movimiento en masa, deslizamiento, inventario, proceso, Medellín

Abstract

Mass movements (MM) are geodynamic phenomena that pose a challenge for territorial management in Colombia, particularly in densely populated urban areas such as Medellín. Factors such as complex geological conditions, steep slopes, changes in land use, and extreme weather events have increased the frequency of these processes, thereby amplifying the threat to communities and infrastructure. Although detailed inventories and studies on MM exist in the region, the lack of systematization and standardization limits their utility for susceptibility and risk analyses. This issue highlights the need to consolidate scattered information into a centralized system capable of generating inputs for predictive models.

This project aims to develop a standardized mass movement inventory for Medellín, based on detailed geological risk studies. The data is systematized into a parametric Geodatabase (GDB), applying normalization and data cleansing processes to ensure record consistency and

facilitate centralized data analysis. Subsequently, the correspondence between local, national, and global inventories is evaluated, along with the representativeness of local data in relation to international patterns.

Additionally, this project seeks to propose minimum criteria for inventory development to improve compatibility between local and global scales, enhancing their applicability for risk management and decision-making.

Keywords: mass movement, landslide, inventory, process, Medellín

Introducción

Los movimientos en masa (MM) representan una de las principales amenazas geomorfológicas en Colombia, dados su complejidad y frecuencia en territorios montañosos (SGC, 2016). Estos fenómenos, que incluyen deslizamientos, flujos de lodo y caídas de rocas, se ven condicionados por factores geológicos, climáticos y antrópicos. En el contexto nacional, entidades como el Servicio Geológico Colombiano (SGC) han desarrollado inventarios con criterios específicos, reconociendo su impacto sobre la infraestructura y la seguridad; sin embargo, la heterogeneidad de los datos disponibles, la falta de estandarización en los mismos y el acceso a la fuente, limitan su utilidad para la planificación territorial y la gestión del riesgo. A nivel internacional, iniciativas como el *Global Landslide Catalog (NASA)* han propuesto criterios globales para la recopilación y análisis de estos eventos, marcando una oportunidad para comparar y complementar datos locales con patrones globales.

En Medellín, ubicada en el Valle de Aburrá (Figura 1), las zonas de alta pendiente, las condiciones geológicas complejas y las dinámicas del territorio han favorecido la ocurrencia de MM significativos. Estudios locales, como los desarrollados en el marco de la microzonificación sísmica y los estudios de riesgo de detalle desarrollados en la implementación del plan de ordenamiento territorial, han permitido delimitar zonas de riesgo y generar inventarios preliminares sobre procesos morfodinámicos. Sin embargo, estos esfuerzos no han sido integrados ni comparados con estándares internacionales, lo que dificulta su uso como insumo en modelos de susceptibilidad y análisis de amenaza; la ausencia de una sistematización adecuada representa un vacío en el conocimiento que impide aprovechar plenamente los recursos existentes.

El presente proyecto busca consolidar un inventario paramétrico de movimientos en masa para Medellín, sintetizando información de estudios locales y comparándola con catálogos globales. Este inventario se estructura en una Geodatabase depurada, facilitando su integración en modelos predictivos. A través de este trabajo, se espera contribuir al entendimiento de los

patrones espaciotemporales de estos fenómenos, brindando herramientas que permitan la toma de decisiones informadas.



Figura 1. Localización del área de estudio, Medellín perímetro Urbano y rural con sus respectivas comunas y corregimientos

Objetivos

Objetivo general

Consolidar en un inventario estructurado los procesos de movimientos en masa identificados en Medellín a partir de la información obtenida de estudios de detalles.

Objetivos específicos

- Sintetizar la información sobre procesos morfodinámicos para Medellín, a partir de estudios detallados desarrollados para el municipio.
- Integrar la información recopilada sobre procesos morfodinámicos en una Geodatabase (GDB) depurada, que proporcione un acceso más simple a la información relevante.
- Comparar la base de datos local con inventarios globales para evaluar su representatividad, estableciendo criterios mínimos para la estructuración de futuros inventarios.

Marco teórico

Los movimientos en masa (MM) son procesos naturales de remoción que implican el desplazamiento de material rocoso, detritos o tierra bajo la acción de la gravedad (Cruden y Varnes, 1996; SGC, 2016). Estos fenómenos abarcan una amplia gama de tipos, desde deslizamientos y flujos de lodo hasta caídas de rocas, cada uno con características distintivas según su velocidad, tipo de material y condiciones geológicas (Figura 2). La clasificación detallada de los MM es fundamental para su análisis y es uno de los componentes clave en el inventario propuesto.

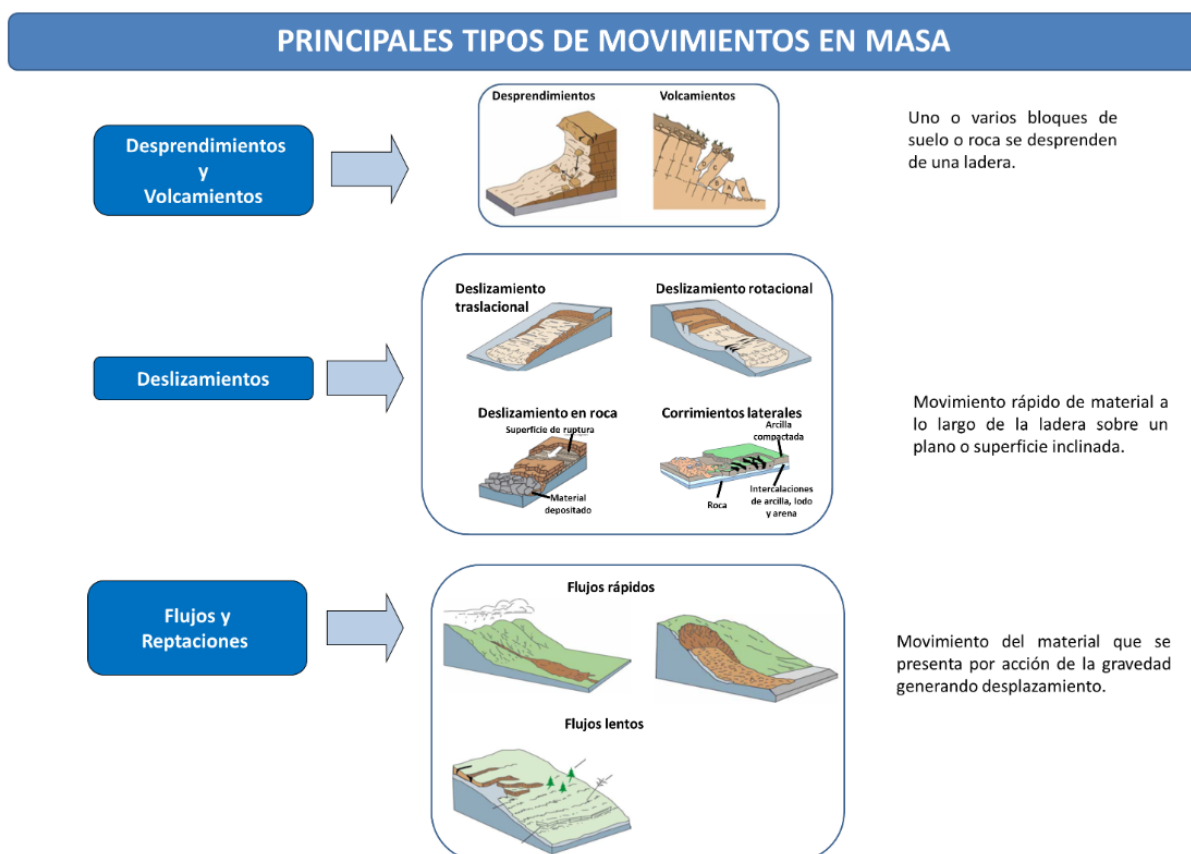


Figura 2. Tipos de movimientos en masa
Fuente: Adaptado USGS (2008), GEMMA: PMA - GCA (2007)

Los estudios de los movimientos en masa se fundamentan en la comprensión de sus factores condicionantes y desencadenantes; autores como Suárez (1998) y Van Westen et al. (2008) han destacado la importancia de los condicionantes geológicos y geomorfológicos, como la litología, estructura, meteorización, pendiente y relieve. Asimismo, Aristizábal et al. (2011) han enfatizado el papel crucial de los factores climáticos, especialmente la precipitación, en la ocurrencia de estos eventos. La influencia antrópica, manifestada a través de cambios en el uso

del suelo y modificaciones en las laderas, también ha sido reconocida como determinantes (Hermelin, 2007).

El artículo primero de la Ley 1523 de 2012 “*Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*”, concibe la gestión del riesgo como un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

La misma norma, dispuso que la gestión del riesgo se constituye en una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población. A partir de las disposiciones de la Ley 1523 de 2012, se desprendió la necesidad de reglamentar la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial que permitiera darle validez y continuidad a los procesos enfocados en la planificación del territorio.

Por medio del Decreto 1807 de 2014, se reglamenta la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial incorporado en el Decreto 1077 de 2015, este establece a nivel nacional la necesidad de elaborar estudios básicos para las revisiones de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial y definir aquellas áreas que por su condición de riesgo deben ser objeto de estudios de riesgo de detalle. Dentro de las especificaciones técnicas para la elaboración de estos estudios básicos se considera fundamental como insumo el inventario de procesos morfodinámicos.

Asimismo, el Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publicó una guía técnica para la elaboración de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa donde se resalta la importancia de los inventarios que permiten identificar las características de los eventos, su distribución espacial y temporal y su relación con los factores detonantes y la zonificación de las áreas con condición de riesgo y/o amenaza en las que se deberán desarrollar estudios de detalle.

A su vez, el SGC (2016) realiza una diferenciación importante entre catálogo e inventario; siendo el catálogo aquel elemento histórico que contiene fecha de reporte y del evento, localización geográfica, clasificación del movimiento y daños, información cuya fuente son los medios de comunicación y los entes territoriales de gestión de riesgo. En el inventario de

movimientos en masa la información proviene de fuentes técnicas, es levantada en campo, incluyen además datos relacionados con el tipo y nivel de actividad del movimiento en masa, su morfometría, material involucrado, causas, daños, entre otros.

En este contexto, los inventarios de procesos morfodinámicos emergen como herramientas fundamentales para el análisis de susceptibilidad, amenaza y riesgo (Guzzetti et al., 2012); estos inventarios se han beneficiado de avances tecnológicos significativos, incluyendo la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales (Guzzetti et al., 2000), el uso de LiDAR y fotogrametría (Jaboyedoff et al., 2012), y la validación mediante trabajo de campo (Ardizzone et al., 2007). A nivel global, iniciativas como el Global Landslide Catalog de la NASA (Kirschbaum et al., 2010, 2015) han buscado sistematizar la recopilación de datos sobre movimientos en masa, estableciendo criterios estandarizados para su registro y análisis.

Medellín ubicado en el Valle de Aburrá, presenta características geográficas y geológicas que la hacen susceptible a los procesos morfodinámicos. Rendón et al. (2006) y Aristizábal y Yokota (2006) han descrito la compleja geología de la región, mientras que Aristizábal y Gómez (2007) han documentado eventos históricos significativos que han afectado a la ciudad. Desde el 2006 se han desarrollado estudios básicos o geológico - geotécnicos detallados, que han sentado las bases para la elaboración de mapas de amenaza y análisis de susceptibilidad (Alcaldía de Medellín, 2011; Vega, 2013), contribuyendo a la comprensión de los patrones espacio temporales de ocurrencia de movimientos en masa en la región.

A partir de los estudios básicos y el criterio de expertos se delimitaron las zonas con condición de riesgo para el Municipio, estas zonas de acuerdo con las disposiciones de la Norma Nacional y a lo establecido en el Acuerdo 48 de 2014 – Plan de Ordenamiento Territorial vigente del Distrito Especial de Ciencia, Tecnología e Innovación de Medellín, son áreas donde se deben desarrollar estudios de riesgo de detalle; estos estudios a diferencia de los básicos deben contener análisis detallado de amenaza, evaluación de la vulnerabilidad, evaluación del riesgo y la determinación de medidas de intervención.

Desde el año 2016, se han adelantado estudios de riesgo de detalle en aquellas zonas identificadas, estos estudios han permitido caracterizar a una escala local cada uno de los fenómenos morfodinámicos, en donde a partir de la metodología empleada, se han realizado levantamientos de información de los procesos que se identifican a partir de fotointerpretación, información secundaria y trabajo en campo.

Por otro lado, en el año 2016 se llevó a cabo el estudio de armonización de la microzonificación sísmica de los Municipios del Valle de Aburrá. Este estudio, de acuerdo con el artículo 4 de la Ley 400 de 1997 *“por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo resistentes”*, es la división de una región o de un área urbana en zonas más pequeñas, que

presentan un cierto, grado de similitud en la forma como se ven afectadas por los movimientos sísmicos, dadas las características de los estratos de suelo subyacente.

En el marco del desarrollo del estudio de la microzonificación se realizó la actualización de la cartografía geológica, entre los entregables de la cartografía del estudio contiene el levantamiento de información como procesos morfodinámicos principalmente en la zona urbana.

A pesar de los avances significativos en este campo, persisten brechas importantes en el conocimiento; Reichenbach et al. (2018) han señalado la necesidad de mejorar la disponibilidad de datos, la escala de análisis y la integración de múltiples factores condicionantes en los modelos de susceptibilidad. La validación de los resultados y la adaptación de metodologías a contextos específicos son desafíos importantes (Corominas et al., 2014) y los inventarios confiables, sintetizados y estandarizados adquieren un valor fundamental para validar modelos de amenazas.

En el caso particular de Medellín, si bien se han realizado estudios detallados que abordan los criterios de movimientos en masa, existe un vacío en cuanto a la sistematización y comparación de estos datos locales con los requerimientos de inventarios globales; esta brecha representa una oportunidad para contribuir al conocimiento actual y complementariedad entre los enfoques locales y globales.

La investigación propuesta busca llenar este vacío mediante la compilación de un inventario en Medellín, basado en los estudios de riesgo detallados desarrollados en los últimos años y el levantamiento realizado por la Microzonificación sísmica, generando un insumo básico para la modelación de fenómenos morfodinámicos.

Como han señalado Chacón et al. (2006) y Huggel et al. (2010), la creación de inventarios detallados y estandarizados es fundamental para el desarrollo de sistemas de alerta temprana y la planificación territorial sostenible.

Metodología

La metodología de la presente monografía se divide en tres secciones, donde cada uno se organiza en función de cada objetivo específico planteado. A continuación, se detallan las técnicas de recolección y análisis de datos, así como el proceso de integración espacial de la información. Finalmente, se describen los parámetros de comparación entre la base de datos generada y los inventarios nacionales y globales.

Recolección y sistematización de la información

Se llevó a cabo un proceso de recopilación de datos a partir de estudios detallados adquiridos por medio de la alcaldía de Medellín.

A partir de la información levantada en cada estudio, se retomó la información del componente geográfico que contiene los shapefile de los procesos que fueron levantados a partir de datos obtenidos en campo, información secundaria o por medio de fotointerpretación.

Una vez recopilada la información, los datos se parametrizaron en una tabla dinámica que permitió organizar las características esenciales de cada evento, tales como la ubicación geográfica, categoría de proceso morfodinámico, la fecha del evento, fecha de reporte y la fuente del estudio. Esto facilita la sistematización y el análisis de los datos en etapas posteriores y darles una ubicación temporal a los eventos. La Figura 3 representa la estructura de la primera fase metodológica.

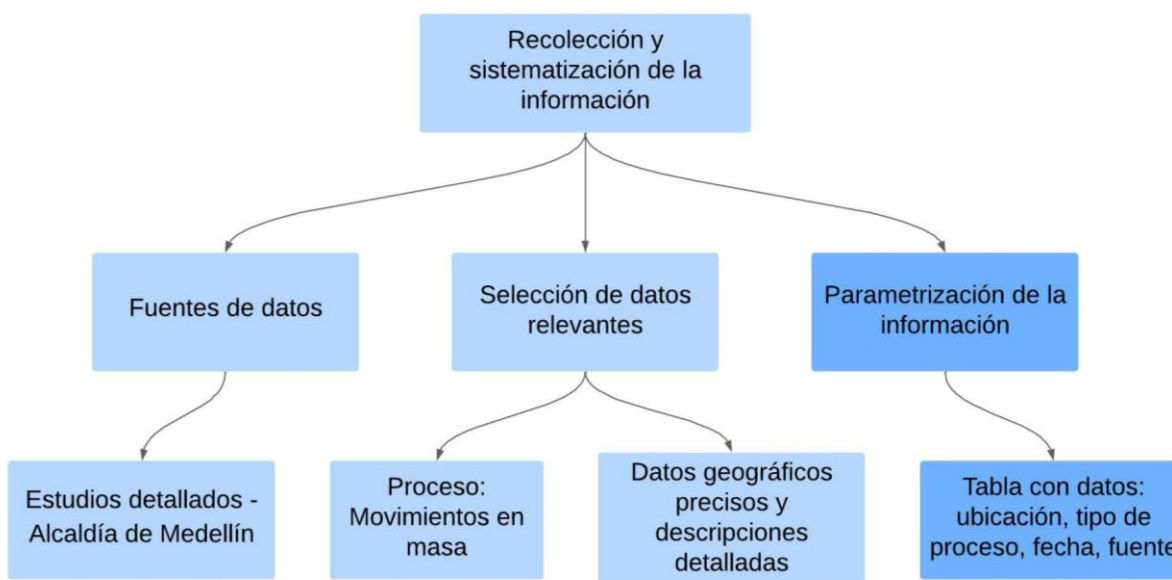


Figura 3. Diagrama resumen de la primera fase de la metodología

Integración de la información en una Geodatabase (GDB) depurada

Para la creación de una Geodatabase (GDB) se utilizó el software ArcGIS Pro que ofrece la posibilidad de estructurar la información geográfica en capas de datos.

A partir de la tabla generada en la primera fase, se transformaron los elementos originales, procurando reducir las expresiones al dividir parámetros en campos más detallados, con el fin de establecer una jerarquía entre los elementos que la componen, lo anterior basado en la primera forma de normalización de bases de datos, conocida como la *primera forma normal*.

Los elementos obtenidos con la consolidación realizada previamente, y teniendo en cuenta que el objeto del proyecto se centra únicamente en los procesos gravitacionales, se eliminaron del inventario los procesos asociados a fenómenos erosivos, tales como socavación lateral, erosión laminar y similares, entendiendo que estos eventualmente podrían derivar en

fenómenos gravitacionales, pero su inclusión en este inventario generaría discrepancias con la definición misma de movimiento en masa. Por lo anterior, eliminaron 81 elementos y se inició el proceso de depuración con 1922 polilíneas; a estas se les realizó un proceso riguroso de análisis, uniéndolas las que fuese necesario e intersecándolas con la capa de comunas y veredas del POT de Medellín, para obtener la localización de cada evento.

En la GDB estructurada, se distinguieron los tipos de procesos morfodinámicos en tipo polilínea, cada elemento se asoció así mismo a unos atributos vinculados con la tabla dinámica previamente sintetizada, entre los que se incluyen como más relevantes, las coordenadas en el sistema Magna Origen Único Nacional, categoría del proceso, subcategoría del mismo (cuando fuese posible establecerlo), la fecha de descripción, estudio fuente y ubicación geográfica, entre otra información adicional que pudo considerarse relevante y valiosa para un análisis.

Para el proceso de depuración de la GDB, se validaron los datos espaciales, para garantizar la coherencia de los registros, de igual forma se eliminaron los registros duplicados, esto teniendo en cuenta que algunos elementos podrían encontrarse duplicados debido a las diferentes metodologías de adquisición de los datos, así mismo, algunos elementos podrían encontrarse superpuestos y esto no consiste en un error ya que la fotointerpretación multitemporal podría duplicarlos, por ello, no se corrieron elementos de validación topológica. En la Figura 4 se presenta el diagrama resumido de la segunda fase metodológica.

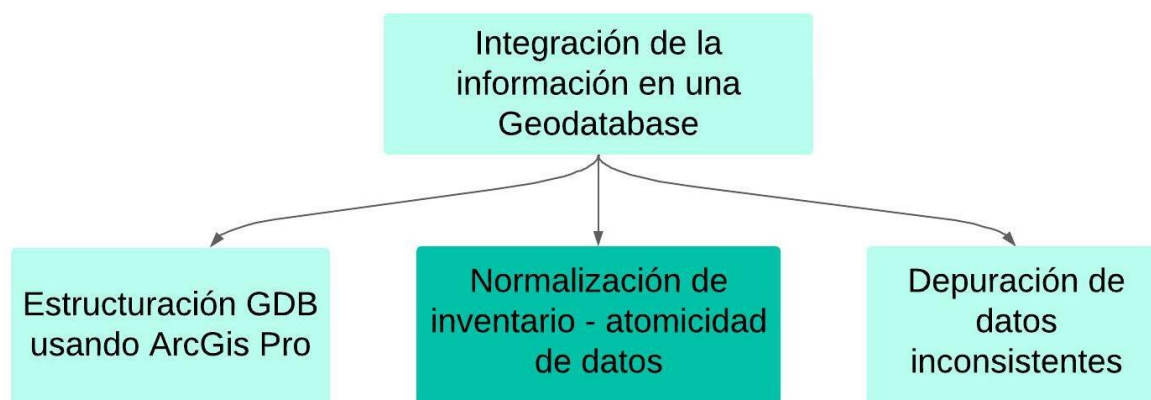


Figura 4. Diagrama resumen de la segunda fase de la metodología

Comparación con inventarios globales

La comparación de la base de datos local se realiza con respecto al inventario global de movimientos en masa desarrollado por la NASA, *The Global Landslide Catalog*, a su vez, se evalúan inventarios establecidos por el Servicio Geológico Colombiano a través del *Sistema de Información de Movimientos en Masa - SIMMA*, utilizados para cotejar la información disponible

en las publicaciones locales con los estándares mínimos definidos por catálogos nacionales e internacionales y de este modo determinar la utilidad del inventario.

Finalmente, se presenta una propuesta de criterios mínimos necesarios que debe incluir un inventario para que sea útil ante la modelación de escenarios de amenaza por movimientos en masa. En la Figura 5 se presenta el diagrama resumen de la tercera fase metodológica.

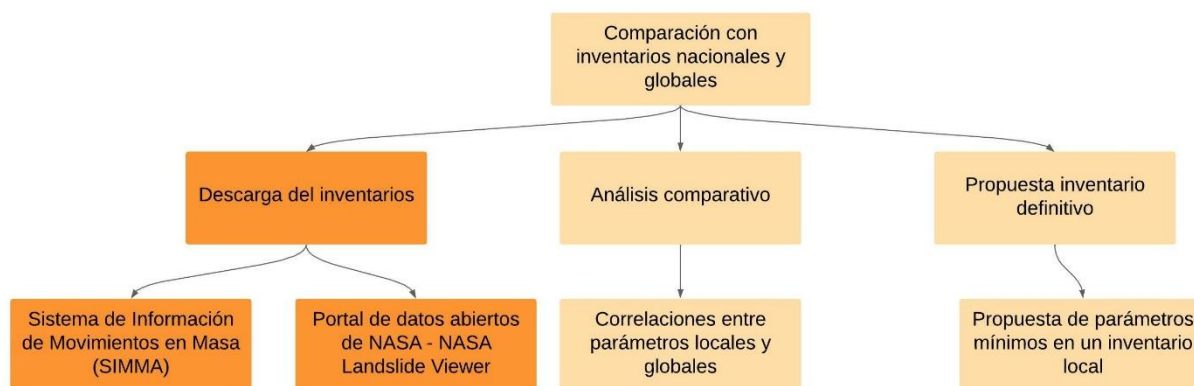


Figura 5. Diagrama resumen de la tercera fase de la metodología

Resultados

El Acuerdo 48 de 2014 “*Por medio del cual se adopta la revisión y ajuste de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín y se dictan otras disposiciones complementarias*”, identificó por medio de los estudios básicos las zonas con condición de riesgo para los diferentes fenómenos (movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) que debían ser objeto de estudios de detalle para definir el riesgo y las medidas de intervención estructurales y no estructurales.

Los estudios de riesgo de detalle realizados en las zonas con condiciones de riesgo al interior del Distrito han sido fundamentales para avanzar en la gestión del territorio; muchos de estos estudios se han desarrollado a partir del diagnóstico que dió lugar a la formulación de los instrumentos de segundo nivel identificados en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), como las Áreas de Intervención Estratégica y los Macroproyectos. Asimismo, se han ejecutado en el marco de programas como Unidos por el Agua, ahora conocido como Conexiones por la Vida.

Estos estudios han facilitado la recategorización de las zonas de riesgo, permitiendo la implementación de medidas orientadas a la reducción del riesgo al interior del Distrito; además, han aportado una visión detallada del territorio que respalda la toma de decisiones informadas, tanto en la gestión del riesgo de desastres como en la planificación territorial, fortaleciendo la capacidad del Distrito para promover un desarrollo sostenible y resiliente.

Por otro lado, los estudios de la microzonificación sísmica han permitido avanzar en el conocimiento de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico regional y local en los municipios que conforman el área metropolitana del Valle de Aburrá.

Recopilación y análisis de información base

La información consolidada de los procesos morfodinámicos proviene de los estudios de riesgo de detalle y de la microzonificación sísmica descritos previamente. A partir de la información presentada en cada estudio, se recopiló en un solo inventario los procesos morfodinámicos georreferenciados; es importante aclarar que cada uno de los estudios contenía diferentes atributos para describir el tipo de proceso, la fuente del dato adquirido y la fecha; así mismo, no todos los procesos contaban con algo más que un atributo generalizado del proceso. Partiendo de los inventarios disponibles, se agrupó la información tomando la mayor cantidad de campos, aun cuando estos tuviesen datos nulos para algunos elementos. En la Figura 6 se presentan los procesos, distribuidos por el área objeto de estudio.

Los campos conservados dentro de la tabla generalizada se describen a continuación:

- zona estudio: Corresponde a la zona donde se concentró el estudio del que se obtuvo la información, si bien hace referencia a una posición geográfica, no necesariamente se asocia con una comuna o barrio, por lo que en ocasiones resulta ser un dato ambiguo.
- tipo proceso: Hace referencia al proceso morfodinámico inventariado, dependiendo del detalle del estudio fuente o del método para obtener el dato, este tipo puede aproximarse a un subtipo de proceso o limitarse a concretar si es un proceso erosivo o por gravedad.
- an fuente: Es el año de la fuente. Principalmente se relaciona con los objetos inventariados a partir de la fotointerpretación, si bien no se detalla en todos los estudios, algunos de estos indican el año de toma de la fotografía aérea a partir de la cual se delimitó el proceso.
- tipo estudio: Se refiere al nivel de detalle del estudio fuente, este objeto se creó con el fin de tener una descripción general del estudio fuente de información, para que el interlocutor pudiese entender el detalle del mismo.
- Estudio: Corresponde al nombre del estudio a partir del cual se obtuvo el objeto.
- Fuente: Se asocia con el método de obtención de la información primaria, ya sea a partir de reportes de la comunidad, fotointerpretación o trabajo de campo, este campo permite aproximar la confiabilidad de los datos.
- an estudio: Es el año en el que se realizó el estudio del que se recopiló la información, difiere del año fuente, se consideró relevante ya que para los objetos para los que no se

cuenta con el año de la fuente primaria, el año del estudio puede tomarse como una edad relativa, entendiendo que los mismos son anteriores al estudio.

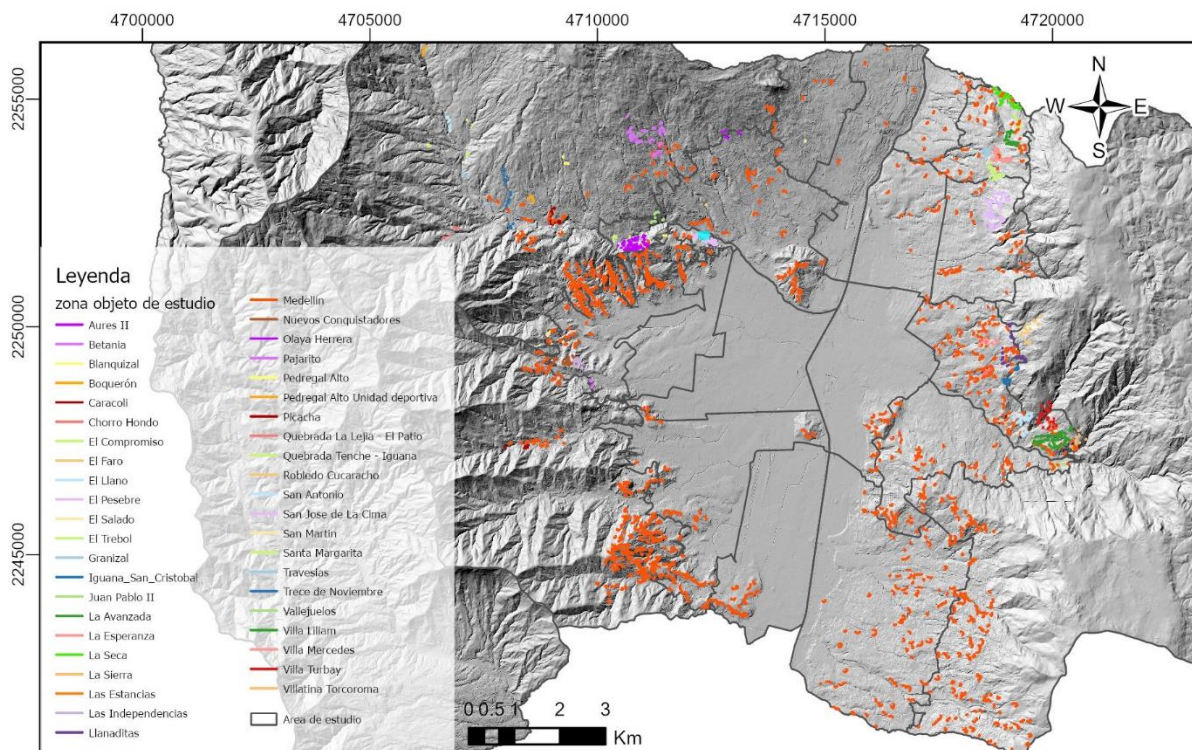


Figura 6. Procesos morfodinámicos recopilados, distribuidos por zonas objeto de estudio

Los resultados obtenidos de la primera fase de recopilación se detallan en las diferentes categorías, resaltando los campos considerados relevantes.

En el campo relacionado con el tipo de proceso, se evidencia que la mayor cantidad de elementos está categorizado como “cicatriz de deslizamiento” (59.76%), seguido por “cicatriz de movimiento en masa” con el 14.28%, los fenómenos asociados a “socavación lateral”, “erosión laminar” y similares (81 datos) fueron agrupados como “Procesos erosivos”, las demás categorías ocupan menos de 10%, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.
Cantidad de datos diferenciado por tipo de proceso

Tipo Proceso	Cantidad de datos	Porcentaje
Deslizamiento activo	1	0.05%
Movimiento en masa inactivo	3	0.15%
Movimiento en masa, deslizamiento	5	0.25%
Corona de deslizamiento	8	0.40%
Movimiento en masa, desgarre	8	0.40%
Movimiento en masa	21	1.05%

Tipo Proceso	Cantidad de datos	Porcentaje
Procesos erosivos	81	4.04%
Null	87	4.34%
Movimiento en masa activo y/o reciente	150	7.49%
Movimiento en masa activo	156	7.79%
Cicatriz de movimiento en masa	286	14.28%
Cicatriz de deslizamiento	1197	59.76%
TOTAL	2003	100.00%

En la Figura 7, se muestra de manera gráfica la distribución porcentual de los datos, cabe resaltar que aquellos procesos morfodinámicos cuyo porcentaje fuese inferior a 1%, se agruparon bajo el rubro “otros”.

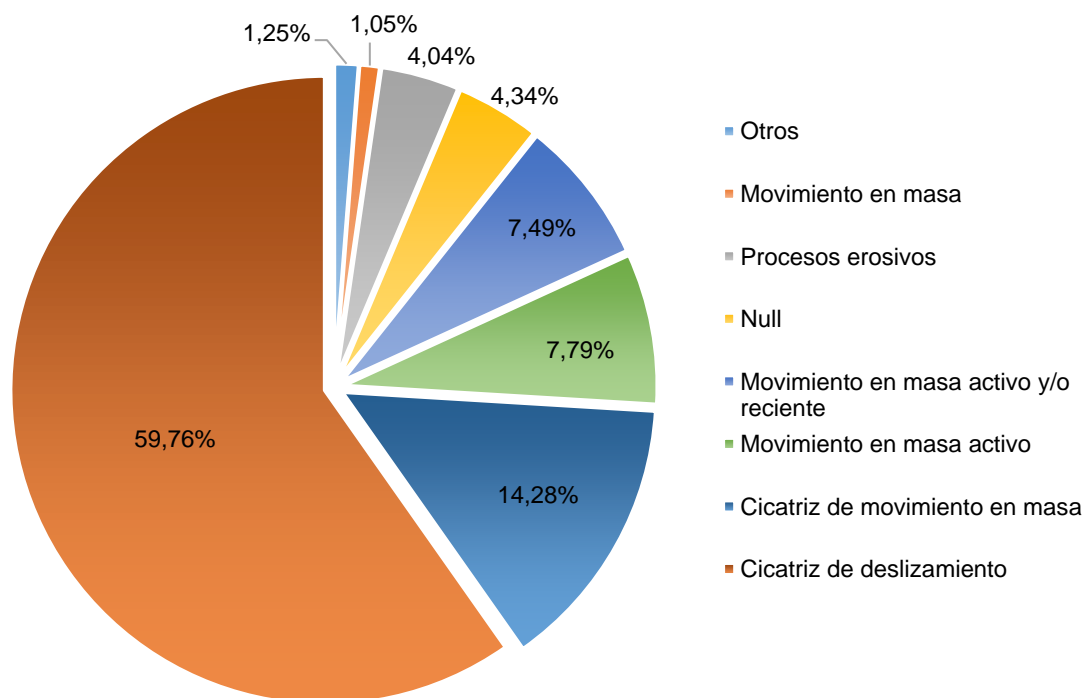


Figura 7. Diagrama de torta diferenciado por tipo de proceso morfodinámico

En la Figura 8 se presenta a detalle la cantidad de datos por tipo de movimiento en masa que previamente fueron clasificados bajo la categoría de otros, esto con el fin generar una mejor comprensión visual de los mismos.

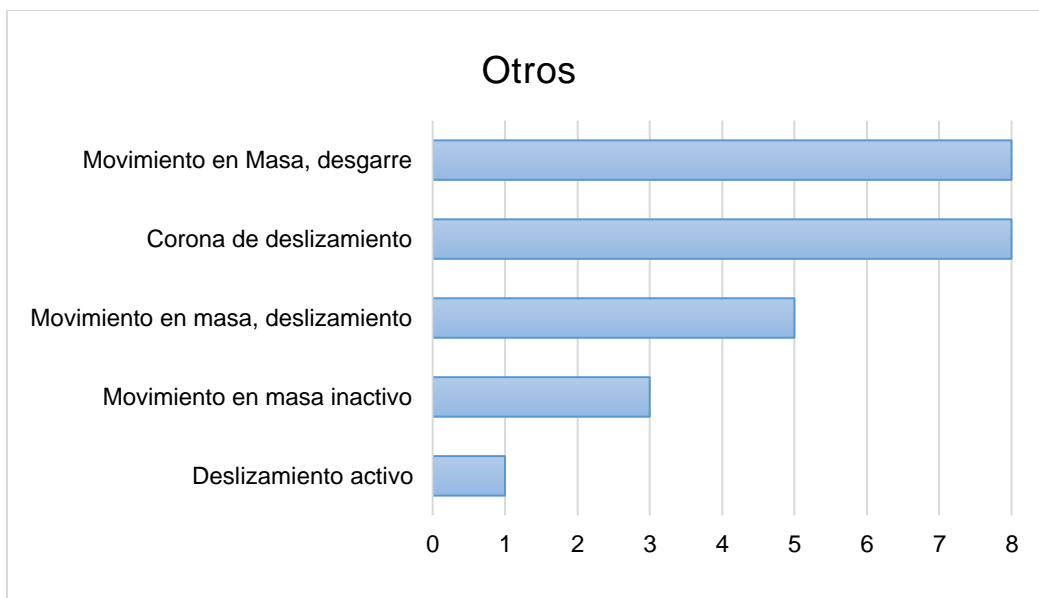


Figura 8. Detalle de los procesos catalogados como otros en la gráfica de torta general

A partir de la información anterior, se puede inferir que el 63% de los procesos involucrados podrían agruparse dentro de una subcategoría de “deslizamientos”, mientras que para los demás no es posible especificarlos dentro de un subtipo, lo anterior se puede asociar igualmente con el nivel de detalle de los diferentes estudios y muy especialmente con el método de adquisición de datos, siendo importante resaltar que cuando se hacen levantamientos en campo, es más probable que se adquiera información detallada del tipo de movimiento en masa, la subcategoría y el estado del mismo, mientras que cuando se hacen levantamientos a través de fotointerpretación, se dificulta establecer detalles, además de que resulta menos posible plasmar el estado del fenómeno sin hacer un análisis con imágenes de diferente temporalidad.

En la información recopilada de los registros, algunos describen el año de la fuente, siendo este al año de la toma de las fotografías aéreas fotointerpretadas o el año en el que se registró el trabajo de campo, para algunos registros se desconoce el año de la fuente de información, estos campos quedaron bajo la categoría “NULL”. En la Tabla 2, se representan los valores obtenidos para cada año.

Tabla 2.

Año de la fuente de información de cada proceso

AÑO FUENTE	REGISTROS
1943	50
1959	16
1969	12
1976	4

AÑO FUENTE	REGISTROS
1984	3
1995	10
2004	1
2010	1
2012	4
2016	7
2018	112
NULL	1783
TOTAL DE DATOS	2003

La información relacionada al año de la fuente muestra un alto porcentaje de datos faltantes, representados por el valor “NULL”, con 1.783 registros. Esto sugiere una falta de estandarización o de documentación en ciertos datos históricos, lo cual podría limitar la precisión del inventario en el análisis de los cambios temporales. Entre los registros que sí presentan año, destaca 2018 con 112 registros, lo que indica una mayor actividad de recolección de información o generación de estudios para este año. Otros años con registros significativos, aunque en menor proporción, son 1943, 1959 y 1969, posiblemente reflejando las fotografías aéreas disponibles para el área.

Bajo el análisis del campo *Fuente*, se obtuvo una variación considerable, lo que reflejan diferentes métodos y entidades responsables de la recopilación de datos y estudios. En la Figura 9 se detallan las encontradas.

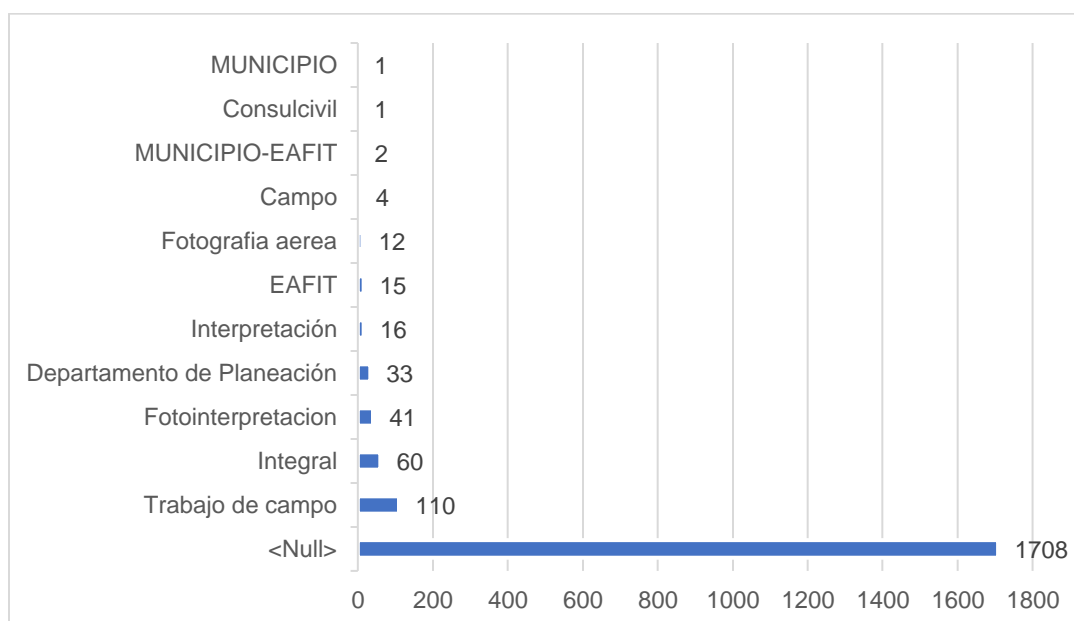


Figura 9 . Diagrama de fuente de información.

Bajo la fuente “trabajo de campo” aparece un número significativo de registros (114), indicando que gran parte de la información se ha recopilado directamente en el terreno; esto sugiere un alto nivel de confiabilidad y precisión en los datos, especialmente para los estudios de riesgos, debido a la escala de trabajo, ya que la recopilación en campo es esencial para capturar detalles que no siempre son visibles en imágenes satelitales o fotointerpretación.

Los datos relacionados con “Integral” (60) y “Consulcivil” (1) indica la consulta de información secundaria de las zonas de estudio, donde se retomó el registro de procesos de otros estudios realizados. El uso de información secundaria puede aumentar el rigor técnico al inventario, a su vez resalta la necesidad de evaluar continuamente la calidad y coherencia de los datos proporcionados por terceros.

Igualmente, se obtuvieron registros de “fotointerpretación” (69), considerada una herramienta fundamental en la identificación y monitoreo de procesos morfodinámicos, ya que permite analizar las características del terreno a partir de fotografías aéreas o imágenes satelitales, facilitando el reconocimiento de patrones y cambios en la superficie del terreno a lo largo del tiempo; sin embargo, la precisión puede depender de la calidad de las imágenes y de la habilidad del interprete, lo que puede introducir cierta variabilidad en los resultados.

En menor proporción se encuentran fuentes como la del “Departamento de Planeación - Alcaldía de Medellín” con 36 registros que reflejan el rol de instituciones gubernamentales locales en la recolección y validación de información.

Cabe destacar que en términos generales se obtuvo información de diversas fuentes. No obstante, en el inventario se tienen 1708 registros sin información de la fuente. Esto dificulta la identificación del levantamiento de información y su escala.

En cuanto al campo zona de estudio, registrada como parte del objeto general del estudio recopilado, se describe a detalle en la Tabla 3, con la cantidad de datos que se registraron para cada uno.

Tabla 3.

Relación de la zona de estudio con la cantidad de datos obtenidos de procesos.

ZONA DE ESTUDIO	CANTIDAD DE DATOS	PORCENTAJE
Null	1134	56,6%
La Seca	66	3,3%
El Pesebre	64	3,2%
Olaya Herrera	53	2,6%
Villa Liliam	51	2,5%

ZONA DE ESTUDIO	CANTIDAD DE DATOS	PORCENTAJE
La Esperanza	43	2,1%
San José de La Cima	40	2,0%
Caracolí	33	1,6%
La Avanzada	33	1,6%
Llanaditas	33	1,6%
Las Independencias	29	1,4%
Picacha	29	1,4%
Villa Turbay	28	1,4%
Nuevos Conquistadores	27	1,3%
Granizal	24	1,2%
Iguana San Cristóbal	24	1,2%
Quebrada La Lejía - El Patio	20	1,0%
Pajarito	20	1,0%
El Compromiso	18	0,9%
El Faro	17	0,8%
Ana Díaz	17	0,8%
Travesías	15	0,7%
El Trébol	13	0,6%
La Sierra	13	0,6%
El Llano	12	0,6%
Quebrada la Madera	12	0,6%
San Antonio	12	0,6%
Villa Mercedes	12	0,6%
Chorro Hondo	12	0,6%
Boquerón	10	0,5%
Pedregal Alto	10	0,5%
Juan Pablo II	9	0,4%
Santa Margarita	9	0,4%
El Salado	8	0,4%
Vallejuelos	8	0,4%
Quebrada Tenche - Iguana	8	0,4%
Aures II	7	0,3%
Blanquizal	6	0,3%
Trece de Noviembre	6	0,3%
Robledo Cucaracho	4	0,2%
Quebrada La Castro	3	0,1%

ZONA DE ESTUDIO	CANTIDAD DE DATOS	PORCENTAJE
Las Estancias	3	0,1%
Betania	3	0,1%
Pedregal Alto Unidad deportiva	2	0,1%
Villatina Torcoroma	1	0,05%
San Martin	1	0,05%
Total general	2002	100%

El conjunto de datos muestra que el 56.6% de los registros son valores “sin información”, esto implica que más de la mitad de la información carece de la localización de la zona de estudio, lo que plantea una limitación significativa para la interpretación y el análisis de tendencias. La alta tasa de valores nulos sugiere una necesidad urgente de mejorar la precisión en la recolección de datos y la cobertura de estos para obtener una representación más precisa de la realidad territorial.

Aparte de los valores nulos, los registros se distribuyen de manera desigual entre las diferentes áreas de estudio. Las zonas con mayor cantidad de datos incluyen “La Seca” (3.3%), “El Pesebre” (3.2%), “Olaya Herrera” (2.6%), y “Villa Liliam” (2.5%), lo que podría indicar mayor número de eventos registrados en ciertas áreas. (Ver Figura 10).

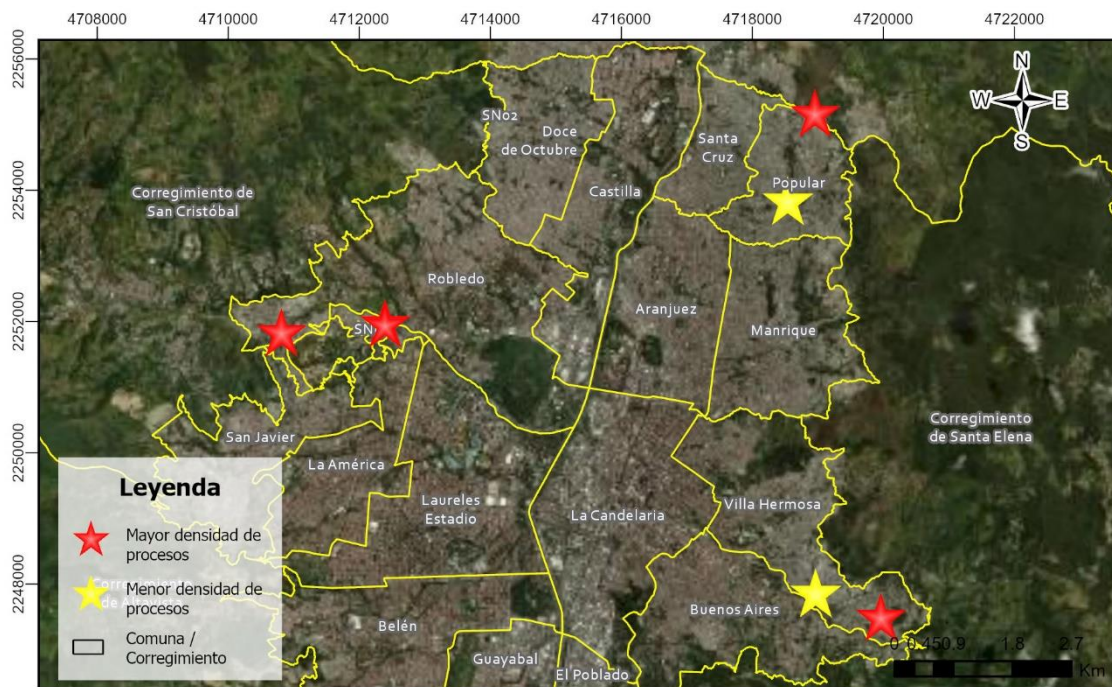


Figura 10. Zonas con mayor (en rojo) y menor (en amarillo) concentración de procesos de movimientos en masa por área de estudio

Contrastante a lo anterior, existen varias localidades con baja representación de datos, como “Villatina Torcoroma” y “San Martín”, que solo cuentan con un registro cada una (0.05%); esta falta de datos podría deberse a una menor cobertura de la recolección o a una baja incidencia de eventos o actividades en estas zonas.

De acuerdo con los registros de la zona de estudio, teniendo en cuenta que predominan los registros sin información, es necesario para verificar áreas de estudio con mayor precisión al realizar un cruce con información de Medellín como los barrios y las comunas con el fin de verificar el origen de los estudios porque esta puede hacer referencia a polígonos de estudio, pero necesariamente no corresponden al barrio o vereda donde se encuentran ubicados los eventos registrados.

Finalmente, la mayoría de los registros provienen de dos fuentes principales: el estudio de microzonificación sísmica, con 1,134 registros, y los estudios de riesgo de detalle, que aportan 869 registros, ambos estudios abarcan diferentes aspectos y alcances. Al observar su distribución espacial, se nota que los registros de microzonificación sísmica se extienden por toda la ciudad de Medellín, en cambio, los estudios de riesgo de detalle se concentran principalmente en los límites del Distrito, áreas caracterizadas por pendientes pronunciadas y mayores condiciones de inestabilidad, lo que justifica un análisis más específico y detallado en estas zonas vulnerables.

El análisis de la información recopilada e inalterada permitió identificar diversas deficiencias en los procesos morfodinámicos, uno de los aspectos más destacados fue la forma en que se caracterizan dichos procesos; si bien, la georreferenciación de un fenómeno como el movimiento en masa posibilita la inclusión en un inventario, la falta de una subcategoría específica limita su utilidad, esta omisión impide diferenciar entre tipos de movimientos como deslizamientos, flujos o reptaciones, lo que tiene implicaciones directas sobre parámetros fundamentales como velocidad, longitud de desplazamiento y origen; aunque en algunos casos no sea posible realizar esta distinción, se considera que algunos estudios más detallados pudieron haber contemplado esta clasificación; lo que pone en manifiesto la falta de estandarización en la entrega de los inventarios y resalta la necesidad de establecer criterios uniformes para futuros proyectos.

Otro hallazgo relevante fue la carencia de información sobre la fuente de los datos, en un porcentaje significativo de los objetos analizados, no se especificó la fuente de la información, ya sea esta fotointerpretación, trabajo de campo o fuentes secundarias. Dicha falta de claridad sobre el origen de los datos compromete su confiabilidad, ya que no es posible verificar su procedencia ni asociarlos a fuentes fidedignas; en este contexto, se hace necesario contar con parámetros más específicos que aseguren la trazabilidad de los datos.

Asimismo, un aspecto significativo que no se había identificado en la recopilación inicial de información fue la ausencia de una relación geográfica clara entre los procesos

morfodinámicos y un área de referencia. Aunque se cuenta con un área categorizada como “zona de estudio”, este se vincula principalmente con el área objeto de análisis de los estudios de detalle, lo que podría corresponder a una quebrada, un barrio o una vereda. Esta falta de precisión dificulta que el interlocutor asocie el proceso con una ubicación específica sin recurrir a una herramienta SIG para cruzar los datos.

Este análisis subraya la necesidad de depurar la información, agrupar los datos en categorías claramente definidas y presentar una propuesta que mejore la estructura y el aprovechamiento de los inventarios en investigaciones futuras.

Estructuración del inventario

A partir de la depuración de los 2003 elementos consolidados inicialmente, se obtuvieron 1894 procesos con categoría movimiento en masa que fueron consolidados en formato GDB (Figura 11), conformando un inventario georreferenciado con 13 atributos, de los cuales, seis (6) fueron heredadas del inventario preliminar (an_fuente, tipo_estudio, zon_objeto_estudio, estudio, fuente, an_estudio) los atributos generados para esta fase se describen a continuación:

- id_mov: Corresponde a un código único, conformado por dos letras mayúsculas que indican el tipo de procesos (en este caso todos son MM por movimiento en masa) y un número de cuatro (4) dígitos.
- Categoría: Se refiere al proceso principal identificado, en este caso, dado que solo se trabajó con eventos gravitatorios, se catalogan en su totalidad como *movimientos en masa*.
- Subcategoría: Según el SGC, se relaciona al primer movimiento en masa identificado (deslizamiento, propagación lateral, reptación, flujo, deformaciones gravitacionales), para este caso específico, se dividió en: deslizamiento, cicatriz de deslizamiento, cicatriz de movimiento en masa, desgarre y sin subcategoría o “NULL”.
- Actividad: Define si el movimiento se encuentra activo o inactivo.
- Localización: Correlación del proceso con una comuna o corregimiento del área de estudio, se obtuvo a partir de la intersección del shapefile de procesos con el de comunas obtenido del POT.
- cod_comuna: Código de la comuna, se obtuvo a partir de la intersección del shapefile de procesos con el de comunas del POT
- Shape_Length: Longitud en metros de la polilínea.

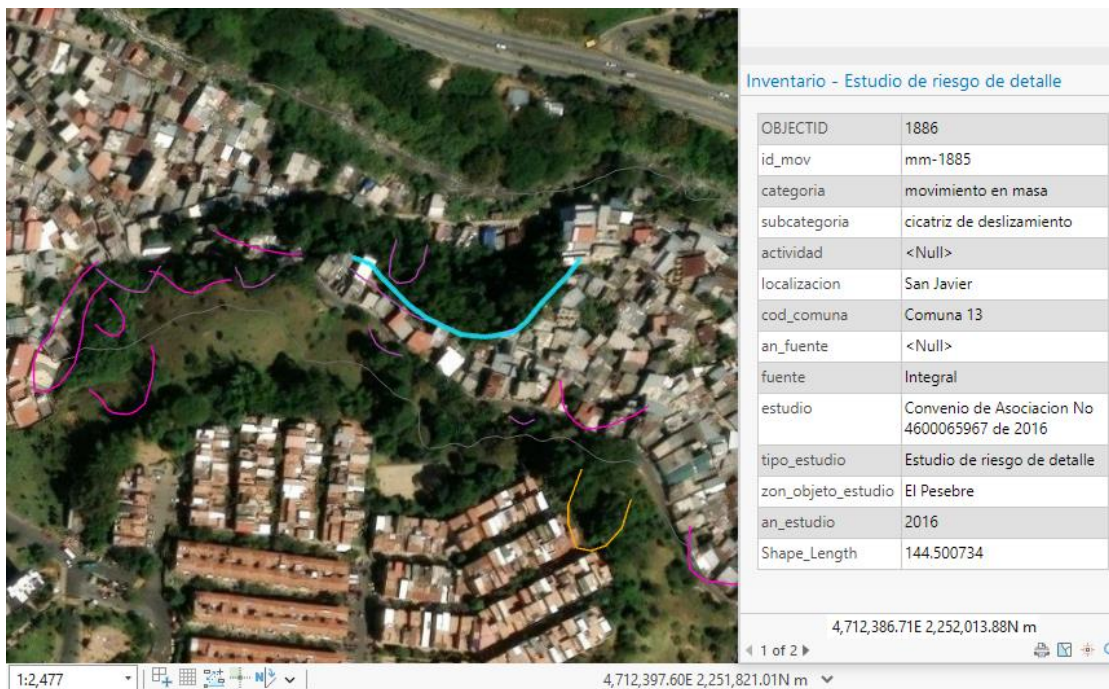


Figura 11. Representación de la información consolidada dentro del inventario georreferenciado

Uno de los resultados más relevantes de la reestructuración del inventario georreferenciado es la subclasificación de los procesos, esto permitió hacer análisis diferenciados, distribuir categorías y en el futuro, utilizar como una herramienta la información aquí contenida. En la Figura 12 se presentan los procesos divididos en las diferentes subcategorías.

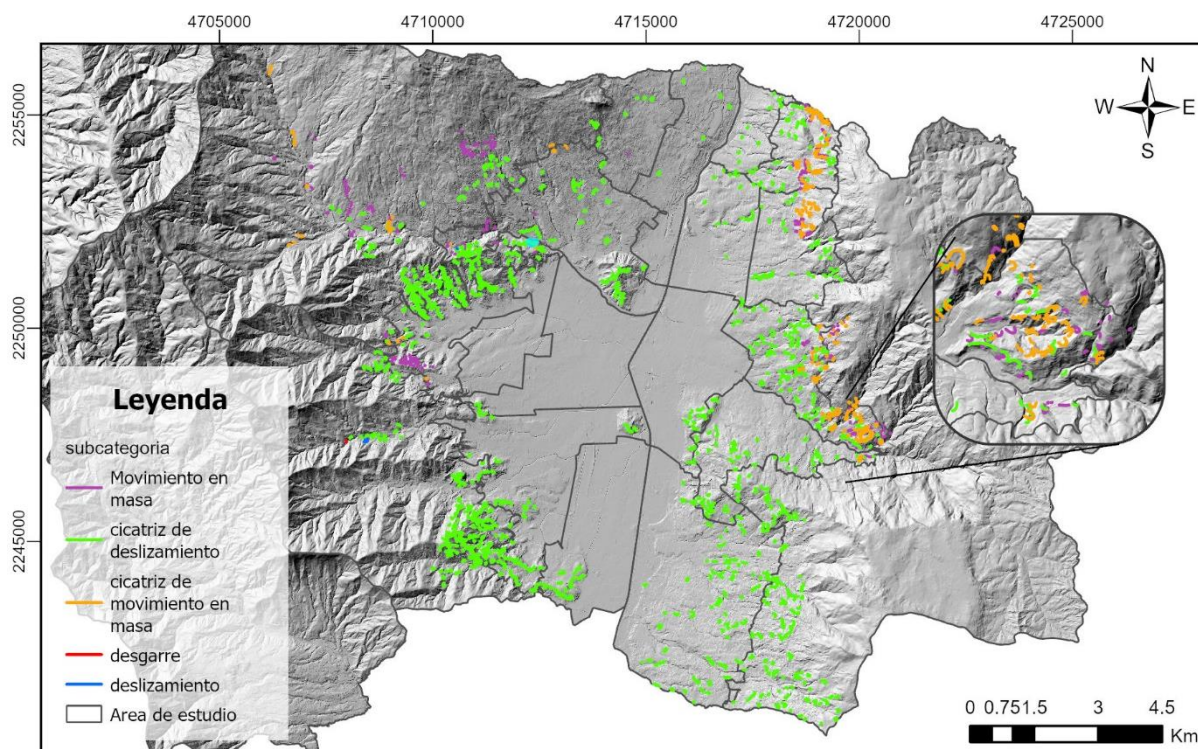


Figura 12. Distribución de los procesos morfodinámicos inventariados, categorizados en subcategoría

A partir de lo anterior, se puede evidenciar que el 64% de los procesos catalogados corresponden a “cicatriz de deslizamiento”; aclarando que dentro de esta subcategoría se incluyeron también “corona de deslizamiento” ya que según el SGC (2017), son conceptos equivalentes, sin embargo, no se considera que la subcategoría “cicatriz de movimiento en masa” (15%) deba integrarse bajo la misma que las anteriores, porque para otros tipos de movimiento en masa (como los flujos) es posible evidenciar una cicatriz, aunque esta no es equivalente a una corona (ya que los flujos no desarrollan superficie de ruptura en forma de corona). En la Figura 13 se presenta la cantidad de procesos por subcategoría.

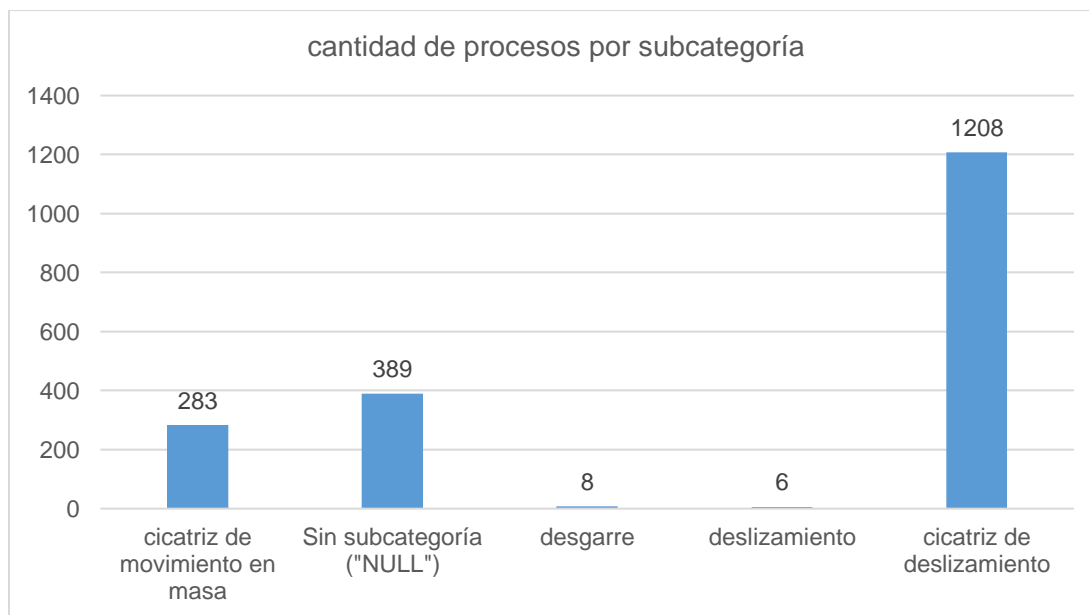


Figura 13. Cantidad de procesos morfodinámicos identificados por categoría

El segundo aspecto con mayor relevancia a partir de la reestructuración de la información recolectada fue la posibilidad de localizar geográficamente cada movimiento en masa en una comuna o corregimiento de Medellín, a través de un *intersect* de ambas capas y una corrección manual para los procesos en áreas limítrofes, se le atribuyó un contexto geográfico al inventario, sin la necesidad de usar un software GIS para consultarlo.

Por medio del cruce de la información de los procesos, se logró identificar una concentración significativa en ciertas áreas del territorio, particularmente en corregimientos y comunas específicas como se observa en la Tabla 4, que podrían estar relacionados con características socioespaciales, dinámicas demográficas y económicas, así como condiciones del territorio.

Tabla 4

Cantidad de procesos en las comunas y corregimientos de Medellín.

<i>BARRIOS Y CORREGIMIENTOS</i>	<i>CANTIDAD DE DATOS</i>	<i>PORCENTAJE</i>
<i>Corregimiento de San Cristóbal</i>	317	16,7%
<i>Villa Hermosa</i>	315	16,6%
<i>Popular</i>	211	11,1%
<i>Corregimiento de Altavista</i>	197	10,4%
<i>Corregimiento de Santa Elena</i>	167	8,8%
<i>San Javier</i>	162	8,6%
<i>Robledo</i>	112	5,9%
<i>El Poblado</i>	90	4,8%

<i>BARRIOS Y CORREGIMIENTOS</i>	<i>CANTIDAD DE DATOS</i>	<i>PORCENTAJE</i>
<i>Manrique</i>	87	4,6%
<i>Buenos Aires</i>	75	4,0%
<i>Belén</i>	42	2,2%
<i>SN01</i>	28	1,5%
<i>Guayabal</i>	21	1,1%
<i>Aranjuez</i>	18	1,0%
<i>La Candelaria</i>	17	0,9%
<i>Santa Cruz</i>	12	0,6%
<i>Doce de Octubre</i>	8	0,4%
<i>Castilla</i>	6	0,3%
<i>Laureles Estadio</i>	5	0,3%
<i>La América</i>	4	0,2%
<i>Total general</i>	1894	100%

La distribución de movimientos en masa en Medellín muestra una alta incidencia en corregimientos como San Cristóbal (16.7%) y Altavista (10.4%), que en conjunto representan más del 25% de las localizaciones. Por otro lado, también se destaca el corregimiento de Santa Elena (8.8%), la predominancia de estos procesos en estos corregimientos puede estar influenciada por las características físicas del territorio y transformaciones en el uso del suelo que aumentan la inestabilidad del terreno.

En la zona urbana, Villa Hermosa (16.6%) y Popular (11.1%) lideran entre las comunas más afectadas, donde la densidad poblacional y la ocupación de zonas de alta pendiente frecuentemente en condiciones de informalidad, agravan el riesgo. Comunas como San Javier (8.6%) y Robledo (5.9%) reflejan problemáticas similares debido a su ubicación en zonas de ladera. En contraste, comunas como La América (0.2%), Laureles-Estadio (0.3%) y Castilla (0.3%) presentan una incidencia significativamente menor, consistente a zonas de bajas pendientes y urbanización más consolidada. (Figura 14).

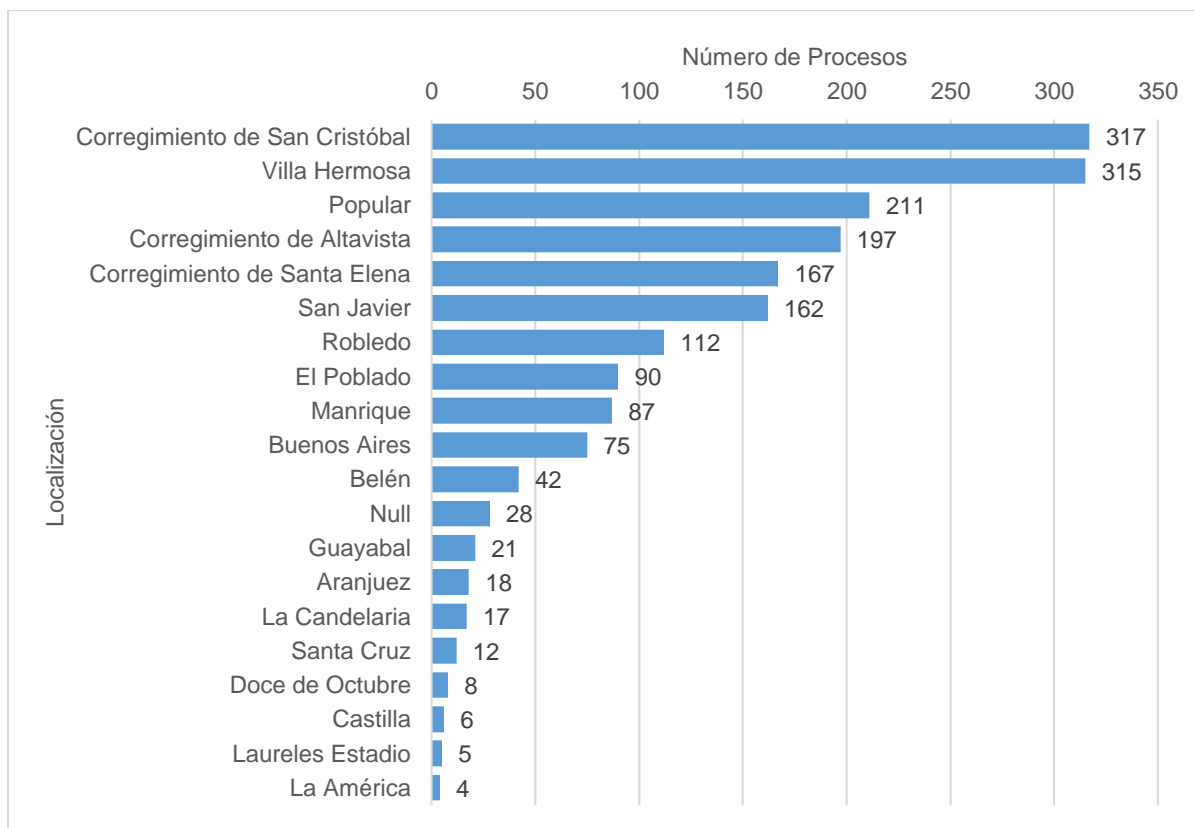


Figura 14. Cantidad de procesos en comunas y corregimientos de Medellín

A partir del análisis de estos resultados, se puede concluir que una estructuración de la información permite la comunicación con el interlocutor, lo que a su vez conlleva a un entendimiento del territorio y a que herramientas como los inventarios puedan ser utilizados tanto por entidades gubernamentales como por investigadores de temas afines.

La información obtenida a partir de los inventarios de movimientos permite establecer relaciones entre la cantidad de eventos y características geográficas del territorio, el uso del suelo y la densidad poblacional. La estructuración de esta información no solo fortalece la toma de decisiones, sino que también promueve la colaboración entre entidades, investigadores y comunidades, contribuyendo a una planificación territorial eficiente.

Por otro lado, los inventarios globales permiten recopilar los registros de eventos a nivel mundial, sin embargo, Kirshbaum et al., 2015 menciona que existe poca información sobre la ocurrencia histórica de movimientos en masa a esta escala y la principal fuente de información de estos catálogos globales está basada principalmente en informes de medios locales, bases de datos en línea y otras fuentes.

De acuerdo con Kirshbaum et al., 2009 las principales motivaciones para compilar un inventario global de movimientos en masa es poder aproximar las tendencias espaciales y

temporales en la ocurrencia de eventos, con el fin de aplicar algoritmos que integren la información de la superficie y datos de lluvia satelitales para obtener estimaciones de áreas susceptibles a movimientos en masa.

Las fuentes de información consideradas para catalogar un movimiento en masa se consideran elementos primarios que permiten describir el evento y los elementos secundarios proporcionan información adicional sobre las características del proceso. Los elementos primarios al interior del catálogo mundial es información de ubicación como país, provincia, tiempo que hace referencia a la fecha y hora local del evento y como desencadenante se tiene como elemento principal la lluvia. Los elementos secundarios son principalmente tipo (deslizamiento, flujo de lodos) y tamaño relativo del evento, latitud y longitud del evento e información del impacto (muertes, infraestructura afectada, daños económicos). Ambos elementos son obtenidos principalmente de noticias, reportes en periódicos y bases de datos de riesgo. (Kirshbaum et al., 2009).

Comparación con inventarios nacionales y globales

El Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) es una plataforma diseñada para gestionar de manera integral los movimientos en masa registrados en Colombia, permitiendo su carga, administración y consulta. Al descargar la capa correspondiente a los movimientos en masa en Medellín, se identificaron 12 registros que contienen información como el tipo de movimiento (deslizamiento, flujo), la fecha de ocurrencia y el subtipo específico del fenómeno, incluyendo subcategorías como deslizamiento rotacional, flujo de lodo o detritos, y deslizamiento traslacional.

Al analizar la distribución espacial de estos procesos, se observó un evento registrado como “flujo de lodos” en la comuna 10 – La Candelaria, sin embargo, como se evidencia en la Figura 15, este evento se ubica en una zona cuyas características físicas, como pendientes predominantemente bajas a muy bajas, hacen improbable la ocurrencia de este.

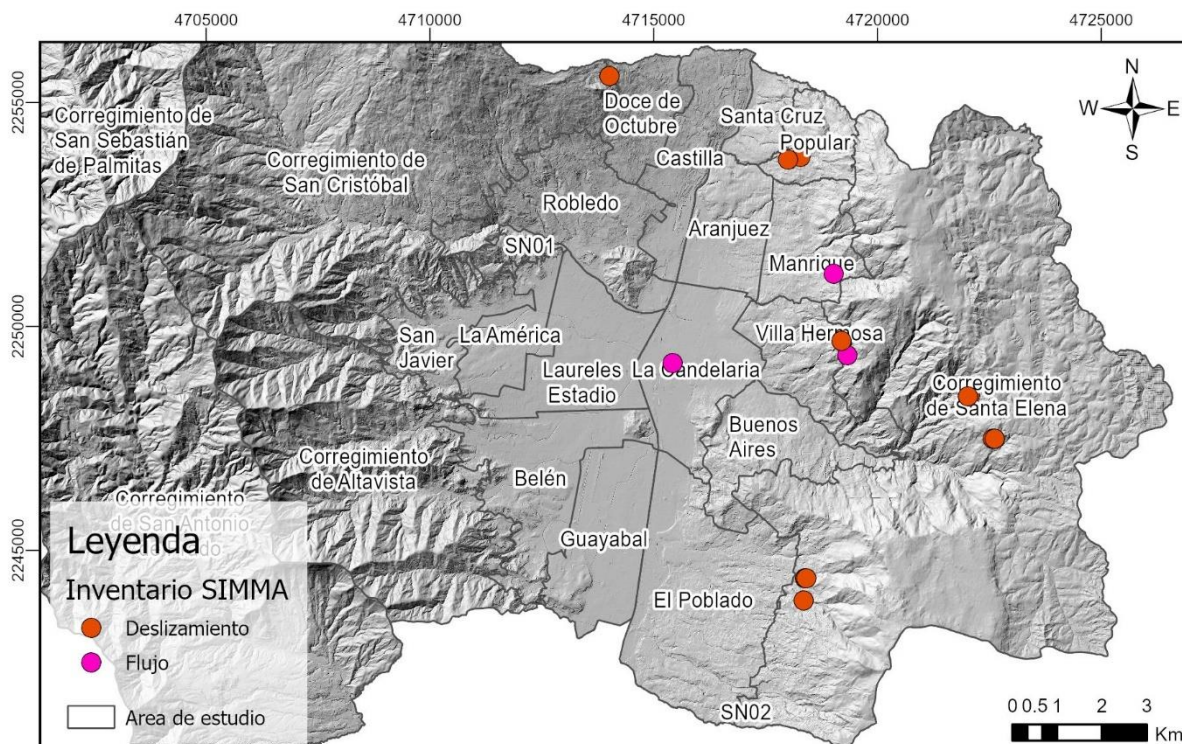


Figura 15. Inventario de procesos morfodinámicos obtenidos del SIMMA para Medellín

Al realizar un análisis comparativo con el inventario recopilado a partir de información secundaria revela diferencias clave en la precisión y trazabilidad de los datos. SIMMA ofrece información específica sobre tipos y subtipos de movimientos en masa, pero carece de detalles metodológicos y validación de su ubicación. Por otro lado, el inventario morfodinámico incorpora atributos como fuente, año y nivel de detalle del estudio, lo que permite mayor consistencia y confiabilidad de los datos.

Del mismo modo, se comparó el inventario *NASA Landslide Catalog*, este representa un avance significativo en la compilación de datos globales de movimientos en masa, sin embargo, su uso a escalas localizadas, como el caso de una ciudad como Medellín, presenta limitaciones significativas, las mencionadas por Kirshbaum et al., (2009) resaltan la fuente de información, siendo estas noticias, informes académicos y bases de datos de desastres, lo que genera una subestimación significativa de eventos, por un lado debido a que en zonas remotas los procesos son menos reportados o porque se reportan principalmente los de mayor magnitud o que generan una alta tasa de fatalidades. Adicionalmente, la escala de estos reportes limita la precisión de la ubicación (rango de confianza de hasta 20 km) como se puede apreciar en Figura 16, en el cual se reportan eventos como flujos, en el valle de la ciudad, donde a partir del conocimiento local, se puede deducir el error en la ubicación del proceso.

Los inventarios globales, dentro de los atributos resaltan aspectos que, si bien son relevantes dentro de un contexto histórico, no lo son para un inventario utilizado en la predicción de amenazas por movimientos en masa, estos atributos se asocian con nombres de las tormentas que causan el evento (*storm_name*), cantidad de muertes asociadas al evento (*fatalities*) y número de personas heridas (*injuries*). Sin embargo, hay otros campos, que se consideran relevantes y pueden proponerse para complementar un inventario local y que este constituya un insumo relevante en la toma de decisiones y la modelación de amenazas; estos campos son los relacionados con los factores detonantes del evento (*ls_trig*) y la evaluación del impacto, cuando este elemento se obtiene a partir de una fuente oficial (*ev_imp*).

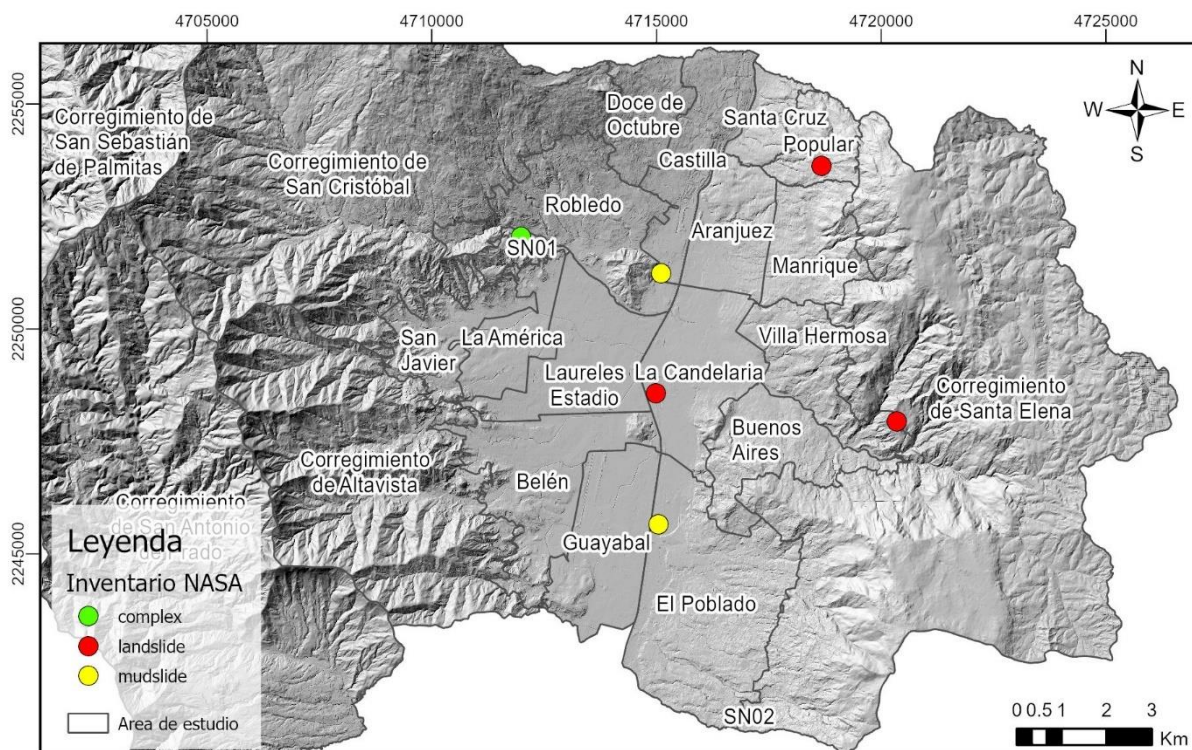


Figura 16. Inventario de procesos morfodinámicos obtenidos del NASA Landslide Viewer para Medellín

Partiendo de la revisión cualitativa de los inventarios nacionales y globales y siguiendo la línea de análisis local, se propone que los campos mínimos representativos para un inventario de procesos morfodinámicos, especialmente en una escala rural en ciudades como Medellín, deberían incluir los campos que se muestran en la Tabla 5, donde los atributos marcados con un asterisco (*) se consideran “obligatorios”, los demás son relevantes, aunque se entiende que no es posible adquirir dicha información en el total de casos analizados.

Tabla 5

Descripción de campos mínimos propuestos para un inventario de procesos morfodinámicos de tipo movimientos en masa

Atributo	Descripción
*id_mov	Código único del elemento inventariado
*categoria	Proceso principal identificado, para el caso de eventos gravitacionales, están en la categoría de movimientos en masa
subcategoria	deslizamiento, propagación lateral, reptación, flujo, deformaciones gravitacionales
actividad	Define si el movimiento se encuentra activo o inactivo
*localizacion	Barrio, comuna o corregimiento donde se identifica el proceso
detonante	Factor desencadenante del proceso (lluvia, sismo)
an_fuente	Año de la fuente de registro del proceso
*fuente	Proyecto, trabajo de campo, noticia de la cual se obtuvo la información del proceso
*estudio	Nombre del proyecto que enmarca el inventario
*tipo_estudio	Alcance del proyecto en el que se enmarca el inventario
*an_estudio	Año en el que se realiza el proyecto que enmarca el inventario
*Shape_Length	Longitud en metros del elemento

Conclusiones

- Medellín cuenta con diversos estudios detallados sobre movimientos en masa, no obstante, la información está fragmentada y carece de criterios uniformes, lo que limita su utilidad como insumo para realizar análisis de susceptibilidad, amenaza y planificación territorial.
- La integración de la información en una Geodatabase (GDB) permite organizar los registros de manera uniforme, reduciendo inconsistencias y mejorando la trazabilidad. Sin embargo, aún persisten datos incompletos o sin información clave como fuentes o ubicación precisa.
- La propuesta de criterios mínimos para la elaboración de inventarios, donde se presentan campos obligatorios y campos relevantes, abre una puerta al análisis de compatibilidad entre inventarios globales y locales, fortaleciendo la utilidad de ambos en la toma de decisiones informadas.
- La información de un inventario recolectado directamente en campo proporciona mayor precisión, sin embargo, gran parte de los registros recopilados provienen de fotointerpretación, lo que dificulta la caracterización detallada de los fenómenos, adicionalmente, un alto porcentaje de registros no cuentan con fuente de origen (56.6%), lo que compromete la confiabilidad general de los inventarios.

- La concentración de los estudios de riesgo de detalle en los límites del Distrito, especialmente en la ladera oriental, refleja la necesidad de atender las condiciones críticas de estas áreas, marcadas por pendientes pronunciadas, inestabilidad del terreno y un urbanismo acelerado. Estas características físicas y dinámicas urbanas generan escenarios altamente susceptibles a fenómenos como movimientos en masa, y avenidas torrenciales.
- Los inventarios internacionales, como el *Global Landslide Catalog* de la NASA, ofrecen un marco de referencia, pero presentan limitaciones al ser más adecuados para escalas mayores, subestimando eventos pequeños o en zonas remotas.
- Se identifican atributos esenciales para mejorar la calidad de los registros, como ubicación geográfica precisa, categoría y subcategoría del proceso, actividad del evento, factor detonante, fuente de información y año del estudio. Esto facilitará la integración en modelos predictivos.
- Un inventario depurado, normalizado y sistemático permite priorizar acciones en zonas vulnerables, diseñar intervenciones específicas y fortalecer la resiliencia territorial en ciudades como Medellín.

Referencias

- Alcaldía de Medellín. (2011). *Estudios geológicos y geotécnicos para la elaboración de mapas de amenaza en Medellín*. Alcaldía de Medellín.
- Aristizábal, J. J., & Gómez, L. E. (2007). *Eventos históricos de movimientos en masa en Medellín*. Universidad Nacional de Colombia.
- Aristizábal, J. J., & Yokota, T. (2006). *Estudio geológico y geotécnico del Valle de Aburrá y su susceptibilidad a movimientos en masa*. Universidad Nacional de Colombia.
- Aristizábal, J. J., Gómez, L. E., & Vélez, J. (2011). *Influencia del clima en los movimientos en masa: Caso Medellín*. *Geología Colombiana*, 37(2), 225–235.
- Ardizzone, F., Cardinali, M., & Prosser, G. (2007). *Landslide inventory and susceptibility maps as tools for assessing landslide hazard in Umbria (central Italy)*. *Geomorphology*, 81(1-2), 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.009>
- Chacón, A., Martínez, A., & Rodríguez, P. (2006). *La importancia de los inventarios en la prevención de desastres por movimientos en masa*. *Boletín de la Sociedad Geológica de Colombia*, 44(1), 13-20.
- Corominas, J., Moya, J., & Dussauge, C. (2014). *Evaluating the role of inventories in landslide hazard and risk assessment*. *Engineering Geology*, 176, 151-166. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.04.015>

- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Transportation Research Board Special Report 247.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., & Casagli, N. (2000). *Use of remote sensing and GIS in landslide studies in central Italy*. *Engineering Geology*, 58(1), 219-238. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00044-0)
- Guzzetti, F., Carrara, A., & Cardinali, M. (2012). *Inventory, susceptibility, hazard, and risk assessment of landslides: An overview of the Italian experience*. *Natural Hazards*, 59(2), 1131-1150. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9927-6>
- Hermelin, M. (2007). *Efectos de las actividades antrópicas sobre la inestabilidad de laderas en áreas urbanas*. *Revista de Geografía*, 42(2), 67-80.
- Huggel, C., Scolari, M., & Gotsch, C. (2010). *A global approach to risk assessment and early warning systems for mass movements*. *Journal of Applied Earth Science*, 119(1), 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.11.003>
- Jaboyedoff, M., Loya, A., & Derron, M. (2012). *LiDAR, photogrammetry and field validation for landslide inventory mapping in a Swiss alpine region*. *Geomorphology*, 157, 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.01.014>
- Kirschbaum, D. B., Adler, R., Hong, Y., Hill, S., & Lerner-Lam, A. (2009). *A global landslide catalog for hazard applications: Method, results, and limitations*. *Natural Hazards*, 52(3), 561–575. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9401-4>
- Kirschbaum, D. B., & Stanley, T. (2010). *The global landslide catalog (GLC): A tool for quantifying the frequency and impact of landslides worldwide*. *Journal of Geophysical Research*, 115, F03027. <https://doi.org/10.1029/2009JF001326>
- Kirschbaum, D. B., & Stanley, T. (2015). *Global landslide catalog: A tool for assessing landslide hazards and risks*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(11), 2297-2315. <https://doi.org/10.1002/2015JF003577>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). *Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog*. *Geomorphology*, 249(1), 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Reichenbach, P., Soeters, R., & Roessner, S. (2018). *Advances in landslide susceptibility mapping: A review of methodologies and applications*. *Environmental Earth Sciences*, 77(7), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7390-y>
- Rendón, M., Rivas, A., & Ríos, C. (2006). *Geología y riesgos geotécnicos en el Valle de Aburrá*. *Revista de la Sociedad Geológica de Colombia*, 29(2), 48-56.

Servicio Geológico Colombiano. SGC. (2016). *Guía técnica para la elaboración de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano.

Suárez, M. (1998). *Factores geológicos y geomorfológicos en la ocurrencia de movimientos en masa en Colombia*. Geografía y Ordenamiento Territorial, 12(3), 118-130.

U.S. Geological Survey (USGS). (2008). *Tipos de movimientos en masa*. Adaptado por el USGS (U.S. Geological Survey). Recuperado de <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>

Van Westen, C. J., Terlien, M. T., & Soeters, R. (2008). *Landslide hazard and risk zonation – Why is it still so difficult?*. Geological Society Special Publications, 292, 1-12. <https://doi.org/10.1144/SP292.1>

Vega, S. (2013). *Análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa en el área metropolitana de Medellín*. Revista de Geotecnia, 24(1), 1-14.

Ley 1523 de 2012, *Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres*. Diario Oficial No. 48.721, del 24 de abril de 2012.

Decreto 1807 de 2014, *Por el cual se reglamenta la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial*. Diario Oficial No. 49.154, del 4 de noviembre de 2014.

Decreto 1077 de 2015, *Por el cual se reglamentan algunas disposiciones sobre ordenamiento territorial y la gestión del riesgo*. Diario Oficial No. 49.866, del 26 de mayo de 2015.