ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS FUENTES SISMOTECTÓNICAS PARA DETERMINAR LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR AMENAZA SÍSMICA EN EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA.

YEIMI LORENA AYALA ZAMORA

CARLOS MARIO GONZÁLEZ GIRALDO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C 2023

ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS FUENTES SISMOTECTÓNICAS PARA DETERMINAR LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR AMENAZA SÍSMICA EN EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA.

YEIMI LORENA AYALA ZAMORA

CARLOS MARIO GONZÁLEZ GIRALDO

Monografía presentada como requisito para optar por el título de:
Ingenieros Catastrales y Geodestas

Director
Andrés Cárdenas Contreras
Profesor Asociado Tiempo Completo

Grupo de investigación:

Semillero G30 - Grupo NIDE

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C 2023

Dedicatoria

A mis padres por creer siempre en mí y enseñarme que con disciplina y esfuerzo puedo lograr todo lo que me proponga.

A mis hermanas por ser mi mayor apoyo y colaboración en cualquier momento de mi vida.

Lorena Ayala.

A mi madre por enseñarme que nunca es tarde para cumplir mis objetivos, que, aunque la vida se torne lúgubre y melancólica siempre encontrare el camino correcto.

A mis amigos, que en los momentos más difíciles me brindaron apoyo incondicional y me alentaron a seguir adelante con mis estudios.

Carlos González.

Agradecimientos

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por convertirse en nuestra alma mater y permitirnos adquirir conocimientos y experiencias de gran valor para nuestra vida.

Al profesor Andrés Cárdenas por estar presto a ayudar y brindarnos sus conocimientos
que nos dieron una guía al realizar este trabajo.

Resumen

En esta monografía se presenta la zonificación de la amenaza sísmica y las zonas susceptibles a presentar daños en las construcciones ante la ocurrencia de un evento sísmico, mediante el análisis espacial con sistemas de información geográfica (SIG) de las fuentes sismotectónicas presentes en el departamento de Tolima, Colombia. Este es un resultado indispensable en la planificación y ejecución de planes de gestión de riesgo que debe realizar la entidad territorial, ya que permite determinar las zonas susceptibles a daños ocasionados en caso de presentarse un evento sísmico que pueda afectar la población que vive en: las cabeceras municipales, centros poblados o áreas rurales.

En la monografía se determinan fuentes sismotectónicas del departamento de Tolima, a partir de parametrización con base en variables como las fallas geológicas activas y los sismos históricos presentes en la zona de estudio. Se utilizó el método estadístico de Máxima Verosimilitud, la ley de Gutenberg-Richter y ajuste de datos mediante una regresión potencial, así se obtienen los mapas de Amenaza Sísmica en determinado periodo de retorno; posterior a este análisis se evalúa la susceptibilidad de las construcciones ubicadas en los centros poblados mediante métodos de superposición de datos como número de pisos, tipo de construcción, litología y geomorfología de la zona. Además, se realizó una aplicación espacial de una encuesta con la cual es posible definir la intensidad de un evento sísmico, esta información se visualiza en un Geovisor, que funciona como herramienta espacial de apoyo en la gestión del riesgo sísmico del departamento de Tolima y sus provincias.

Palabras clave: Fuentes sismotectónicas, Amenaza sísmica, Visor geográfico, Aplicaciones APP, Escenarios de riesgo.

Abstract

This monograph presents the zoning of the seismic hazard and the areas susceptible to damage in buildings in the event of a seismic event, through the spatial analysis with geographic information systems (GIS) of the seismotectonic sources present in the department of Tolima, Colombia. This is an indispensable result in the planning and execution of risk management plans to be carried out by the territorial entity, since it allows determining the areas susceptible to damage in the event of a seismic event that may affect the population living in municipalities, population centers or rural areas.

The monograph, seismotectonic sources of the department of Tolima are determined from parameterization based on variables such as active geological faults and historical earthquakes present in the study area. The Maximum Likelihood statistical method was used, the Gutenberg-Richter law and data adjustment by means of a potential regression, thus obtaining the Seismic Hazard maps in a certain return period; after this analysis, the susceptibility of the constructions located in the populated centers is evaluated by means of data superposition methods such as floor number, type of construction, lithology and geomorphology of the area. In addition, a spatial application of a survey was carried out with which it is possible to define the intensity of a seismic event; this information is visualized in a Geovisor, which functions as a spatial support tool in the management of seismic risk in the department of Tolima and its provinces.

Keywords: Seismotectonic Sources, Seismic Hazard, Geographic Viewer, APP Applications, Risk Scenarios.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 11
1.1. Introducción 11
1.2. Planteamiento del problema 12
1.3. Antecedentes del problema 13
1.4. Pregunta de investigación 15
1.4.1. Pregunta central de investigación 15
1.4.2. Preguntas orientadoras 15
1.5. Justificación 16
1.6. Objetivos 18
1.6.1. Objetivo general 18
1.6.2. Objetivos específicos 18
1.7. Alcances 19
1.7.1. Alcance temático 19
1.7.2. Alcance espacial 19
1.7.3. Alcance temporal 19
1.7.4. Alcance técnico 19
2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL 20
2.1. Amenaza, peligro, riesgo y vulnerabilidad sísmica 20
2.1.1. Amenaza sísmica 20
2.1.2. Peligro sísmico 21
2.1.3. Riesgo sísmico 22
2.1.4. Vulnerabilidad sísmica 22
2.1.5. Susceptibilidad sísmica 23
2.2. Sismicidad 23
2.2.1. Magnitud 24
2.2.1.1. Escalas sismológicas 24
2.2.2. Ley de Gutenberg- Richter 28
2.2.3. Ecuaciones de atenuación 28
2.2.4. Ecuaciones de parametrización de fuentes sismotectónicas 29
2.2.5. Ecuación de tasa de excedencia 30
2.2.6. Ecuaciones de aceleración horizontal de terreno 30
2.2.7. Ecuaciones de aceleración horizontal en periodos de retorno 31
2.3. Caracterización geológica y geofísica 32
2.3.1. Fuentes sísmica 32
2.3.2. Geología estructural 33

2.3.3. Fallas sísmicas 40
3. METODOLOGÍA 44
3.1. Diagrama de flujo 45
3.2. Zona de estudio 45
3.3. Datos 46
3.3.1. Catálogos 46
3.3.3. Registro 1 y 2 de catastro 48
3.4.1. Depuración de eventos sísmicos 50
3.4.2. Parametrización De Fuentes Sísmicas 56
3.4.3. Cálculo De Tasa De Excedencia 59
3.4.4. Cálculo De Aceleraciones Horizontales – Relaciones De Atenuación 59
3.4.5. Cálculo De La Amenaza Sísmica 59
3.4.6. Mapas De Amenaza Sísmica 60
3.4.7. Parametrización de la Susceptibilidad 62
3.4.8. Encuesta 66
3.4.8.1. Creación del formulario 66
3.4.9. Implementación encuesta 79
3.4.10. Visor geográfico 82
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS 95
4.1. Mapas 95
4.1.1. Mapa de Amenaza Sísmica 95
4.1.2. Mapas de Períodos de Retorno 96
4.1.2.1. Periodo de retorno 100 años 97
4.1.2.2. Periodo de retorno 500 años 98
4.1.2.3. Periodo de retorno 1.000 años 99
4.1.2.4. Periodo de retorno 2.000 años 100
4.1.3. Mapa de Susceptibilidad Sísmica 101
4.2. Publicación del visor geográfico 105
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 109
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa nacional de amenaza sísmica. 21
Figura 2. Mapa geológico del departamento del Tolima 35
Figura 3. Mapa litológico del departamento del Tolima 38
Figura 4. Columna estratigráfica del departamento de Tolima 39
Figura 5. Principales fallas activas en el departamento del Tolima 41
Figura 6. Diagrama de flujo general de la metodología desarrollada 45
Figura 7. Área de estudio 46
Figura 8. Mapa de pendientes del departamento del Tolima 48
Figura 9. Magnitud Vs Tiempo 51
Figura 10. Resumen de datos ingresados 52
Figura 11. Distribución espacial de los sismos registrados 52
Figura 12. Distribución espacial de los sismos clasificados por magnitud 53
Figura 13. Distribución espacial de los sismos clasificados por profundidad 54
Figura 14. Resumen de resultados Matlab 54
Figura 15. Distribución espacial de los sismos depurados 55
Figura 16. Distribución espacial de los sismos en función de su profundidad. 55
Figura 17 Fallas y sismos asignados 57
Figura 18 Herramienta general tabla de cercanías 59
Figura 19 Zona de estudio y malla de puntos 60
Figura 20 Clasificación de usos del suelo Departamento de Tolima 64
Figura 21. Unión espacial en ArcGIS 65
Figura 22. Cálculo de campo en ArcGIS 65
Figura 23. Inicio de la aplicación Survey 123 Connect. 74
Figura 24 Código QR Encuesta 78
Figura 25.Vista del formulario desde página web 79
Figura 26 Puntos de interés - Trabajo de Campo 80
Figura 27. Implementación encuesta 81
Figura 28 Tablero de control encuesta 81
Figura 29 Herramienta de publicación en WEB - ArcGIS Pro 82
Figura 30 Interfaz Map Viewer 82
Figura 31 Edición capas ArcGIS Online 83
Figura 32 Configuración capas ArcGIS Online 84
Figura 33 Configuración capas ArcGIS Online 85
Figura 34 Configuración capas ArcGIS Online 85
Figura 35 Configuración capas ArcGIS Online 85
Figura 36 Opciones de capa 86
Figura 37 Opciones de ventanas emergentes 86
Figura 38 Configuración de ventanas emergentes 86
Figura 39 Opciones de etiqueta 86
Figura 40 Descripción Geovisor 87
Figura 41 Lista de Aplicaciones ArcGIS Online 87

Figura 42 Interfaz Experience Builder 88
Figura 43 Opciones de pagina 88
Figura 44 Módulo de datos 89
Figura 45 Modulo de utilidades y servicios 89
Figura 46 Modulo de temas 89
Figura 47 Modulo de edición de mapa 90
Figura 48 Modulo de herramientas del mapa 90
Figura 49 Opciones de diseño 90
Figura 50 Modulo edición de imágenes 91
Figura 51 Modulo de edición de imágenes 91
Figura 52 Widgets de adición de datos 92
Figura 53 Widget Buscar 93
Figura 54 Acciones Widget Buscar 93
Figura 55 Previsualización Visor Geográfico 94
Figura 56 Grado de amenaza sísmica 96
Figura 57 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 100 años 98
Figura 58 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 500 años 99
Figura 59 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 1.000 años 100
Figura 60 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 2.000 años 101
Figura 61. Susceptibilidad de construcciones urbanas en el municipio de Espinal. 103
Figura 62.Susceptibilidad de construcciones urbanas en el municipio de Chaparral. 104
Figura 63. Susceptibilidad de construcciones urbanas en el municipio de Fresno. 105
Figura 64 Vista general Geovisor 106
Figura 65 Herramienta de Búsqueda Geovisor 106
Figura 66 Resultado de búsqueda Geovisor 107
Figura 67 Herramienta de Cargue de archivos Geovisor 107
Figura 68.Visualización de capas Geovisor 108
Figura 69.Visualización de Leyenda Geovisor 108
Figura 70. Opciones de compartir Geovisor 108
Figura 71. Código QR Geovisor 108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.Niveles de intensidad, según escala de Mercalli 25
Tabla 2. Escala logarítmica de Richter 26
Tabla 3. Sismos recolectados y fuentes 47
Tabla 4 Contenido Registro 1 49
Tabla 5 Contenido Registro 2 49
Tabla 6. Resumen de eventos depurados 56
Tabla 7 Magnitudes ultimas fallas activas 57
Tabla 8 Resumen parametrización 58
Tabla 9 Muestra base de datos obtenida 61
Tabla 10. Parametrización de construcciones y amenaza sísmica 62
Tabla 11. Clasificación litológica 63
Tabla 12. Parametrización según litología 63
Tabla 13. Parametrización según pendiente 64
Tabla 14. Encuesta de percepción sísmica aplicada por el BGS 66
Tabla 15.Encuesta de percepción sísmica aplicada por el USGS 68
Tabla 16.Encuesta de percepción sísmica aplicada por la RNS 71
Tabla 16.1. Encuesta de percepción sísmica aplicada por la RNS 72
Tabla 17.Encuesta de percepción sísmica aplicada por la Red Sísmica de España 72
Tabla 18. Hoja (1) XLS Form de survey123 Connect. 74
Tabla 19. Reglas definidas como condicionales Survey123. 76
Tabla 20. Hoja (2) XLS Form "Choices" de survey123 Connect. 76
Tabla 21.Hoja (4) XLS Form "Types" de survey123 Connect. 77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El departamento del Tolima está ubicado en una estructura geológica compleja, con presencia de fallas activas como los sistemas locales de las fallas de Ibagué, Buenos Aires y Chapetón-Pericos, también el sistema de fallas de Romeral, Palestina y parte del sistema de falla Salinas (Paris et al.,2000), entre otras. En los estudios sismológicos es conocido que la presencia de fallas geológicas activas aumenta el grado de amenaza sísmica, dado que, junto con otros factores como la geología estructural, la geomorfología, la estructura física y química del suelo, es posible parametrizar matemáticamente las fuentes sismotectónicas, a las cuales son asociados los eventos sísmicos y con base en estas se realizan estudios de la estabilidad o la resistencia de un territorio ante los eventos sismológicos (Bonett, 2003).

La amenaza sísmica es definida por la Asociación Colombiana de Sismología como un fenómeno físico asociado con un sismo, el movimiento fuerte del terreno o la falla del mismo, que tiene el potencial de producir una perdida; la amenaza sísmica es uno de los factores de los que depende la presencia del riesgo sísmico, que se origina a partir de la posible ocurrencia de eventos sísmicos, este riesgo puede describirse en términos de pérdida de vidas humanas, lesiones, daños de infraestructura, pérdidas económicas, problemas sociales e incluso la pérdida de un pueblo o ciudad. El daño de los terremotos depende de: 1) magnitud del terremoto, 2) profundidad focal del terremoto, 3) distancia epicentral, 3) propiedades del suelo, 4) densidad de población de cada entidad territorial localizada en: cabecera municipal, centro poblado o área rural y 5) diseño de la construcción. Sin embargo, los desastres causados por terremotos pueden controlarse, reducirse y gestionarse (Mostafa et al., 2019) mediante el estudio de los riesgos sísmicos, pues determinar los niveles de amenaza sísmica posibilita una adecuada planeación y aplicación de medidas preventivas y correctivas, mediante la elaboración de planes relacionados con el uso del suelo, normas de diseño y construcción, crecimiento urbano, etc.

El propósito de esta monografía fue realizar la zonificación de la susceptibilidad por amenaza sísmica en el departamento del Tolima a partir del análisis de las fuentes sismotectónicas con ayuda de sistemas de información geográfica, para desarrollar este propósito se aplican métodos estadísticos como el de Máxima Verosimilitud, ley de Gutenberg-Richter y ajuste de datos que permiten analizar el comportamiento de las fuentes sismotectónicas presentes en el departamento de Tolima, como las fallas geológicas activas y los sismos históricos (desde 1900 a 2022), así mismo, se evalúa la susceptibilidad de las construcciones urbanas y se publica una encuesta de percepción sísmica con el fin alimentar un Geovisor que funcione como herramienta de apoyo en la gestión del riesgo sísmico a las entidades encargadas en el departamento y sus municipios.

1.2. Planteamiento del problema

El departamento del Tolima cuenta con una compleja estructura geológica, con presencia de fallas y pliegues con direcciones marcadas de norte a sur (Núñez, 2001) , un ejemplo de las principales fuentes sismotectónicas corresponden a los sistemas locales de las fallas de Ibagué, Buenos Aires y Chapetón-Pericos, además de las fallas cuaternarias presentes alrededor Montenegro, Armenia, Paraíso, Córdoba-Navarco, Mulato-Getudo, Honda, Alto del Trigo y Bituima (parte del sistema de falla Salinas), Cucuana, Toro, Argelia, Garrapatas, y el sistema de falla del Romeral. (Paris et al., 2000), esto requiere realizar estudios geológicos y geofísicos detallados para entender las fuentes sismo tectónicas (García-Mayordomo & Insua-Arévalo, 2011) con el fin de establecer acciones para realizar los planes de gestión del riesgo sísmico de los 47 municipios del departamento de Tolima.

Históricamente se han presentado diversos eventos sísmicos, como es el caso del sismo presentado en Honda el 16 de junio de 1805 con una intensidad de IX en la escala de Mercalli[1],que de acuerdo con el estudio macro sísmico realizado por el Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS) en 2007, este sismo dejó convertida en ruinas la Villa de San Bartolomé de Honda, y la población de Mariquita sufrió daños muy graves, ya que se habla de una "casi destrucción" e incluso algunos autores han denominado dicho evento como "El Terremoto de Mariquita"; según los reportes hubo alrededor de 100 heridos y un número similar de muertos solamente en la ciudad de Honda, por otra parte se destaca el sismo que ocurrió en el Parque Nacional de los Nevados en 1878 catalogado con una intensidad de VII según valores de Intensidad de la escala MSK[2] y demás eventos que han tenido influencia en la ciudad de Ibagué y el departamento del Tolima, con magnitudes importantes y efectos devastadores en algunas poblaciones (Alcaldía de Ibagué & CEDERI, 2006), además se ha demostrado que el departamento cuenta con amenazas sísmicas entre altas e intermedias de sus municipios (Romero López, 2007)

Pese a la importancia de hacer planes de gestión del riesgo, una de las dificultades que se ha presentado en el departamento de Tolima está relacionada con los pocos estudios de amenaza sísmica por parte de las entidades encargadas. Los últimos informes encontrados son del 2012 y años anteriores; y los estudios son únicamente para la ciudad de Ibagué, uno de ellos realizado por INGEOMINAS en 1993; por otra parte es importante resaltar que para la implementación de un sistema de gestión del riesgo sísmico en tiempo real como el que se requiere para realizar un monitoreo adecuado, la baja conectividad a internet y el poco acceso a las tecnologías de la información afectan notoriamente su adecuado desarrollo (Santofimio et al., 2020); además, el gobierno departamental no invierte los suficientes recursos en investigación geofísica, dado que son estudios de largo plazo y por este motivo la mayor parte

[1] Los edificios bien construidos sufren un daño considerable. Daño general en los cimientos. Las estructuras de armazón que no están bien cimentadas se desplazan. Tuberías subterráneas rotas. Amplias grietas en el suelo. En áreas de aluvión hay eyección de arena y barro, aparecen fuentes y volcanes de arena. (RSN, Costa Rica)

[2] Escala sísmica propuesta en 1964 por S. V. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karnik en colaboración con un grupo de trabajo constituido por la XIII Asamblea General de la U.G.G.I (Berkeley, 1963).

son destinados a solucionar problemáticas relacionadas con temas socioeconómicos actuales y no con una posible presencia de un evento sísmico de gran magnitud como lo mencionan los estudios científicos. (Alfaro et al., 2000).

1.3. Antecedentes del problema

La información documentada en este marco referencial se divide en dos campos de conocimiento, inicialmente se realizó la caracterización de la zona de estudio y los estudios en sismología elaborados en el departamento de Tolima, el otro campo que se tuvo en cuenta fue la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en estudios de amenaza sísmica para una gestión de riesgo.

En las regiones donde no es posible evaluar la amenaza sísmica con métodos directos a través del análisis de la sismicidad instrumental e histórica, como es el caso de Colombia, se debe acudir a la geomorfología y a la geología clásica a través de varias disciplinas modernas: neotectónica, sismo tectónico y paleo sismología, (Osorio, J. et al., 2008). Es por esto que en la ciudad de Ibagué se han llevado a cabo diversos estudios para la evaluación de la amenaza sísmica, un ejemplo de esto, son las investigaciones acerca del desarrollo geomorfológico de la región Ibagué-Girardot (Soeters, 1976), en esta misma línea la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica -AIS en 1984 adelantó estudios de amenaza para todo el país, asignando a fuentes sismotectónicas para la ciudad de Ibagué un porcentaje de amenaza sísmica distribuido así: falla de Ibagué 47,1%, Romeral con 23,6%, zona de Benioff con un 20,2% , el sistema frontal de la cordillera oriental 5,6%, el sistema de Palestina con 2,7% y la falla del Magdalena con 0,7% (García Reyes, 1984); Es importante destacar que en 2001 también se elaboró la caracterización geotécnica de la ciudad de Ibagué (Martínez, L., 2001) así como la microzonificación sísmica preliminar, estudio en el que se generó un modelo geotécnico a partir del modelo geológico (Alfaro et al., 2000) y en el mismo año realizaron una evaluación de los eventos sísmicos asociados mediante la utilización del SIG (Beltrán Torres et al., 2006). Aunque existen algunos estudios previos, se ha mostrado que es difícil evaluar la amenaza sísmica en Ibagué y en general del departamento de Tolima, debido a que se requieren estudios más complejos desde el punto de vista geo científico para obtener resultados confiables para una gestión de riesgo sísmico adecuado y que a su vez sea un insumo para el ordenamiento territorial y aplicaciones a la infraestructura y las construcciones rurales y urbanas de los principales asentamientos del departamento (López & Castillo, 2009).

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en diversas áreas del conocimiento ha experimentado un gran desarrollo en las últimas dos décadas, especialmente para resolver problemas donde se requiere la toma de decisiones asertiva y la organización de un territorio determinado (Pardo-Carrasco, 2017); a nivel internacional son muchos los estudios que se han realizado para la evaluación de amenaza sísmica como lo menciona Jena, et al (2020) por medio de aplicaciones SIG, donde utilizan información geotécnica (GTIS) para plantear modelos y estimar efectos locales, asociados con la amplificación del movimiento del suelo, la microzonificación de terremotos, y la velocidad media de la onda de corte (Chang & King, 2005), así mismo han investigado diferentes aspectos de ERA

(Earthquake Risk Assessment) a diferentes escalas utilizando varios enfoques, incluidas técnicas basadas en SIG (Alizadeh, Hashim, et al., 2018; Alizadeh, Ngah, et al., 2018; Alparslan et al., 2008; CHANG & KING, 2005; Hashemi & Alesheikh, 2011; Karimzadeh et al., 2017; Rahman et al., 2015; Rashed & Weeks, 2003; Sun et al., 2008; Villagra et al., 2014) de igual forma se han modelado máquinas de vectores de soporte (SVM) basado en SIG, análisis estadístico y análisis estadístico basado en SIG. ((M.C. Ningthoujam, R.P. Nanda - 2018, C. Xu, F.C. Dai, X.W. Xu, Y.H. Lee – 2012, M. Ghassemi – 2016)

Por otra parte, es importante conformar una base datos robusta que compile datos geológicos y sísmicos históricos, así lo recomienda en sus diversos estudios el Instituto Nacional de Física de la Tierra de Bucarest en Rumania (Hassanzadeh, 2019), también es importante condensar estos datos y preservarlos para posteriores estudios que ayuden a proteger las ciudades y municipios de los sismos (Toma-Danila, Dragos, 2022) un claro ejemplo es el estudio realizado con datos históricos para la ciudad de Pompeya - Italia, donde se realizaron análisis bidimensionales de amplificación de sitio después de una erupción volcánica para prever los sitios de mayor riesgo sísmico (De Sanctis, L., et al. 2022); es importante resaltar que los SIG como herramienta tecnológica actual, ayuda a cuantificar probabilísticamente la amenaza sísmica en el territorio de tal forma que ayude a la toma de decisiones oportuna.

En complemento a los SIG es fundamental hoy en día el apoyo en diversas herramientas que faciliten alimentar y depurar la información, un caso en particular son los formularios que se elaboran bajo ciertas características para la recolección de datos; un herramienta que se ha venido utilizando en Colombia es survey 123 de ArcGIS en la que se pueden administrar encuestas y recolectar información indispensable en estudios de caso de gestión de riesgos a nivel nacional y es utilizada por entidades a nivel nacional como el IDIGER en Bogotá (Rodríguez & Rodríguez , 2021) y la "Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres"(UNGRD) a nivel nacional. Este tipo de herramientas facilita la visualización de la información y permite el análisis de la amenaza sísmica lo cual permite una respuesta efectiva ante un sismo de mediana y gran magnitud (Kanamori, et al 1997)

1.4. Pregunta de investigación

1.4.1. Pregunta central de investigación

- ¿Cuáles son los principales factores de las fuentes sismotectónicas que inciden en la determinación de zonas de riesgo en el territorio del departamento del Tolima y como están se representan espacialmente?

1.4.2. Preguntas orientadoras

- ¿Cómo se afecta la conformación de los asentamientos urbanos en el departamento de Tolima partiendo de su nivel de susceptibilidad al riesgo sísmico?
- ¿Qué papel juegan las tecnologías SIG en el análisis y toma de decisiones para mitigar el riesgo sísmico por parte de las entidades territoriales en el Tolima?
- ¿Es la encuesta un mecanismo efectivo para la recolección y depuración de datos en tiempo real para definir la intensidad sísmica en un momento determinado?

1.5. Justificación

Los estudios sísmicos en la actualidad es un tema fundamental para cualquier lugar del planeta, sobre todo donde se encuentran asentamientos humanos, dado que al momento de presentarse un sismo este influye en las edificaciones y estabilidad del terreno, lo cual hace necesario realizar estudios para garantizar un nivel de riesgo aceptable en las construcciones y el territorio y de esta forma minimizar las amenazas a la seguridad de la vida. (Fathi-Fazl et al, 2020); otro eje primordial al momento de realizar estudios sísmicos, es prevenir las pérdidas que ya se han presentado con sismos pasados, dado a las implicaciones humanas y económicas que estos han tenido y que afectan de manera importante la calidad de vida de las distintas sociedades, para esto son útiles las tecnologías SIG o GIS, las cuales permiten reconstruir modelos que simulan eventos pasados y a su vez permite plantear posibles eventos futuros, lo cual permite realizar una óptima gestión del territorio (Jena, R. et al, 2020).

Con base en lo anterior es necesario que desde las administraciones locales (alcaldías), hasta las de orden regional y nacional (Gobernaciones y Gobierno), se realice una adecuada planificación y gestión del riesgo, en la cual se tenga una correcta utilización del medio ambiente lo cual genera que se tenga una preparación económica, técnica (planes de evacuación) y humana (capacitación ante eventos de riesgo), y de esta forme mitigar los desastres que se pueden presentar. (Arguelles et al, 2019); por esta razón y con base a lo anteriormente descrito es imprescindible un buen manejo y desarrollo de los sistemas de información geográfica como ayuda a la planificación del territorio en cuanto a la gestión del riesgo sísmico.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son instrumentos de apoyo para la toma de decisiones y análisis que ayudan a comprender de forma óptima el territorio y los problemas que en este se presentan y se quieren estudiar (Ran & Nedovic-Budic, 2016), por otra parte un eje fundamental en la administración del territorio es la gobernabilidad, y en este aspecto la tecnología SIG permite automatizar procesos y comunicar la información más rápido, mejorando los tiempos de respuesta (Toro Román, 2019). Actualmente, los científicos utilizan herramientas espaciales basadas en modelos SIG (Ahmad et al., 2017), esto permite realizar un análisis de las fuentes sismotectónicas de manera adecuada, mediante las fallas activas y la geología estructural (Deligiannakis et al., 2018) , un modelo SIG es muy útil en el análisis de gestión de riesgos sísmicos dado que permite un uso masivo de información espacial, procesa datos espaciales históricos de los eventos sísmicos, geología, geomorfología y geofísica del lugar para la toma de decisiones (Guo et al., 2016).

Además de los modelos SIG, las tecnologías espaciales se compilan en visores geográficos o geovisores, los cuales se han convertido en una necesidad para las instituciones públicas y privadas, ya que al capturar información en tiempo real permiten compilar el conocimiento y de forma efectiva proceder a la toma de decisiones al momento de los eventos sísmicos, lo cual genera un gran impacto en las etapas de planificación del territorio (Alvarado, 2022). En esta monografía se busca desarrollar un visor geográfico para el departamento del Tolima que tiene como finalidad suministrar información espacial sobre la amenaza del riesgo sísmico de los

municipios del departamento; la cual con información geológica y geofísica permite realizar una gestión de riesgo sísmico integral para la protección de la población (Beck, 2000).

Por último es de resaltar que la presente monografía tiene como fin proporcionar una herramienta con un manejo amigable con el usuario, lo cual permite que desde cualquier administración local o departamental se pueda acceder a una información compilada y analizada con antelación, lo cual proporciona una base para la toma de decisiones al momento de plantear y ejecutar un plan de gestión del riesgo, además de contar una funcionalidad en tiempo real que permite analizar al instante que áreas se están afectando en mayor grado al momento de presentarse un evento sísmico.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Realizar la zonificación de amenaza sísmica en el departamento del Tolima a partir del análisis de las fuentes sismotectónicas por medio de un Sistema de Información Geográfico.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar la susceptibilidad de riesgo sísmico que podría afectar a las áreas urbanas de mayor población del departamento del Tolima.

- Realizar un geovisor de la amenaza sísmica del departamento del Tolima, que permite analizar las fuentes sismotectónicas para la toma de decisiones de las entidades territoriales.

- Diseñar una encuesta que permita a la población notificar un evento sísmico que se presente y sea un insumo para definir la intensidad sísmica por parte de las entidades responsables.

1.7. Alcances

1.7.1. Alcance temático

En esta monografía la investigación se enfocó en analizar y depurar datos recolectados en campo complementándolos con información histórica existente de las fallas sísmicas, pliegues, volcanes, geomorfología y geología del departamento de Tolima, estos datos y su procesamiento se recopilaron en un SIG que posteriormente sirvió como base para un visor geográfico, con el fin de evidenciar la zonificación de la amenaza sísmica que sirve como insumo de soporte para las entidades encargadas de la gestión del riesgo a nivel municipal, regional y departamental de Tolima.

1.7.2. Alcance espacial

Desde el enfoque de la Ingeniería Catastral y Geodesia, la monografía aúna esfuerzos para realizar futuros estudios científicos sobre amenaza, riesgo y susceptibilidad con mayor relevancia en los centros poblados por medio del análisis espacial; en este caso, el área de estudio definida abarca completamente al departamento de Tolima y parcialmente a los departamentos de Caldas, Cundinamarca, Huila, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca. Los resultados de la monografía se visualizan por medio de un visor geográfico, en el cual se muestran las fuentes sismotectónicas y demás información para determinar las zonas de intensidad y susceptibilidad sísmica en el área de estudio.

1.7.3. Alcance temporal

El estudio se realizó con base en los sismos que tuvieron lugar entre 1900 y 2022 en el departamento de Tolima, esta amplia periodicidad es necesaria para tener una base de datos suficiente para la zonificación de la susceptibilidad por amenaza sísmica realizada y así se obtuvo un mayor nivel de detalle de consulta en el geovisor.

1.7.4. Alcance técnico

En la monografía realizada se integraron herramientas tecnológicas para realizar el visor geográfico en donde se visualizan: fallas, volcanes, pliegues, geomorfología, mapas de susceptibilidad sísmica, mapa de amenaza sísmica y mapas de aceleraciones de terreno en periodos de retorno definidos, además actualiza los resultados de la aplicación de la encuesta diligenciada por las personas de percepción de un evento sísmico; por otra parte el geovisor permite visualizar y consultar información de las construcciones y la zona de susceptibilidad en que se encuentra; estas herramientas facilitan el análisis del comportamiento espacial y temporal de las afectaciones que puede llegar a tener una porción del territorio en caso de un evento sísmico.

2. MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL

2.1. Amenaza, peligro, riesgo y vulnerabilidad sísmica

2.1.1. Amenaza sísmica

La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica considera la amenaza sísmica como la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos y movimientos del terreno que tiene el potencial de generar una perdida en un sitio particular y en un periodo de tiempo determinado. Mediante el análisis probabilístico esto se puede ilustrar por medio de una curva o un mapa de amenaza sísmica. En general la amenaza sísmica se mide en niveles o magnitudes, medidas de la cantidad de energía liberada, que indica el tamaño real del sismo, que no es tradicionalmente usado para identificar el tamaño del evento sísmico.

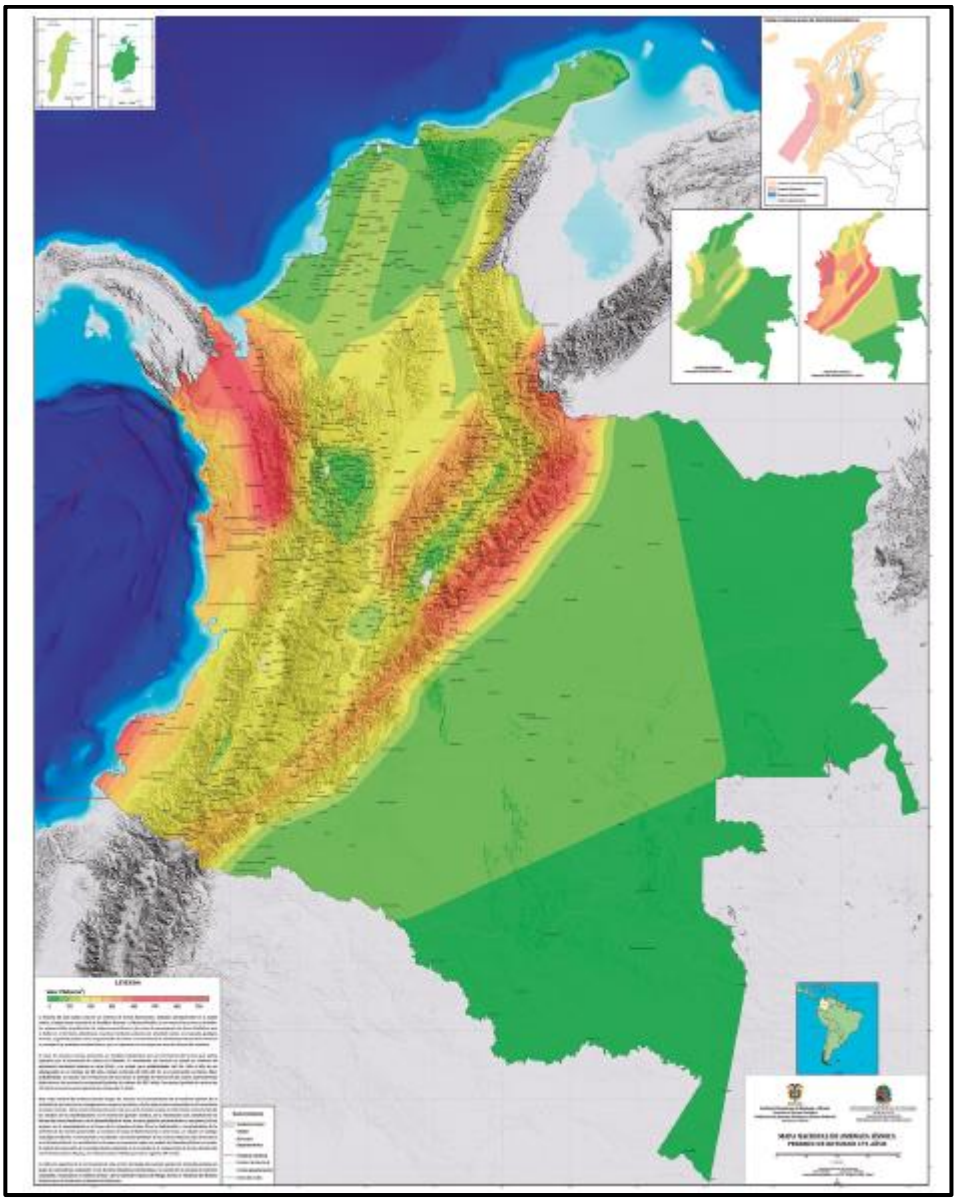
La amenaza sísmica es una función de la magnitud del sismo y la distancia del punto hasta la fuente sísmica. El movimiento sísmico se mide con la aceleración máxima del terreno (PGA) y se evalúa la amenaza en términos probabilísticos: es una práctica común definir la amenaza sísmica como la aceleración máxima del terreno con probabilidad del 90% de no ser excedida durante un período de 50 años, que corresponde a la vida útil de una estructura normal. (Páiz & Bendaña, 2015)

Los mapas de amenaza son realizados a partir de rejillas de puntos con aceleración máxima del suelo y se trazan curvas de igual nivel de aceleración. Además, permiten identificar áreas de mayor peligro en los mapas y se convierten en un insumo de gran aporte a la planificación del territorio, se establecen niveles de aceleración que se deben considerar en el diseño sísmico de estructuras. Estos valores fueron utilizados por primera vez para estudios en los Estados Unidos (Algermissen Perkins, 1976) y han sido adoptados en la mayor parte de los países que cumplen la normatividad sismorresistente en sus construcciones.

Conforme con lo que establece el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10 y el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (2009), elaborado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS-300, la amenaza sísmica corresponde al "valor esperado de futuras acciones sísmicas en el sitio de interés y se cuantifica en términos de una aceleración horizontal del terreno esperada, que tiene una probabilidad de excedencia dada en un lapso de tiempo predeterminado. En la figura 1, se muestra el mapa de Amenaza Sísmica de Colombia, realizada por Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia en 2010, en donde se destaca que hay dos (2) zonas de amenaza principales y su distribución espacial corresponden al sistema de fallas activas en la costa pacífica del país, la cual hace parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacifico el cual es considerado la zona más susceptible del planeta a ocurrencia de terremotos y tsunamis, esto debido a la dinamicidad de las placas subyacentes presentes (Roque et al, 2023), en esta franja se ven afectados los departamentos de Nariño, Cauca, Valle del Cauca, Chocó, Antioquia y Córdoba; la otra zona de amenaza es el denominado nido de Bucaramanga, el cual es considerado como una de las zonas de mayor sismicidad intermedia en el mundo, en esta parte del país se observa el cambio de dirección de

la cordillera oriental a través de los sistemas de fallas de Santa Marta, Bucaramanga, Suarez, Salinas, entre otras (Sepúlveda et al, 2018), afectando principalmente a los departamentos de Santander, Norte de Santander, Arauca y Boyacá.

Figura 1. Mapa nacional de amenaza sísmica.



Fuente: INGEOMINAS y Universidad Nacional de Colombia (2010)

2.1.2. Peligro sísmico

El peligro sísmico en un sitio depende principalmente de tres factores: la sismicidad de las fuentes sísmicas que pueden afectarlo, la distancia entre dichas fuentes y el sitio, y por último los efectos de la geología local. La sismicidad se refiere a la descripción probabilística de la frecuencia con la que ocurren sismos de diferentes magnitudes en cada fuente. Para una fuente y magnitud dada es posible estimar la intensidad del movimiento a cualquier distancia por medio de leyes de atenuación, las cuales toman en cuenta la disminución de dicha intensidad con el incremento en la distancia al epicentro o a la zona de ruptura. Finalmente, el movimiento

sísmico puede verse afectado por las condiciones locales del sitio. Este efecto es particularmente importante en el caso de depósitos de suelo blando, los cuales producen modificaciones muy importantes en la amplitud, contenidos de frecuencia y duración del movimiento sísmico. (Gallego, 2020).

2.1.3. Riesgo sísmico

Se define como el producto entre la amenaza sísmica y la vulnerabilidad. Para evaluar el riesgo se debe hacer un estudio de la interacción entre el suelo y la estructura, observando el comportamiento dinámico de la obra civil objetivo (Salazar 2003). Se entiende también por riesgo sísmico, el grado de pérdida, destrucción o daño esperado debido a la ocurrencia de un determinado sismo. Está relacionado con la probabilidad que se presente o manifiesten ciertas consecuencias, lo cual está íntimamente vinculado al grado de exposición, su predisposición a ser afectado por el evento sísmico y el valor intrínseco del elemento.

La región andina en Colombia es en sí una zona de riesgo sísmico. Los sismos son intensos hacia la costa Pacífica y hacia el Sur y centro Occidente del país. También son intensos en el margen llanero y el occidente de los Santanderes, y la Cordillera Central hasta Honda. En segundo nivel aparece el Norte, centro y Oriente antioqueños, la región del Magdalena Medio y occidente de Santander. Los andes de Colombia hacen parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las zonas sísmicamente más activas del planeta. La convergencia de las placas Suramericana, de Nazca y del Caribe, hace que este emplazamiento tectónico resulte complejo y que Colombia esté sometida a una serie de movimientos sísmicos procedentes de diversas fuentes. Entre las Fuentes Interplaca, la "Zona de Subducción", cuya traza superficial discurre de norte a sur separada unos 150 a 200 km del margen de la Costa del Pacífico colombiano.

De manera que la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo sísmico, es que la amenaza está relacionada con la probabilidad de ocurrencia del evento sísmico, mientras que el riesgo sísmico está relacionado con la probabilidad de que se produzca una pérdida de valor como consecuencia de un sismo (OPS, 1993).

2.1.4. Vulnerabilidad sísmica

Según Safina (2003), la vulnerabilidad sísmica se define como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultando de la probable ocurrencia de un evento sísmico desastroso. Es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su comportamiento, que puede entenderse como la predisposición intrínseca de un elemento o grupo de elementos expuestos a ser afectado o ser susceptible a sufrir daño, ante la ocurrencia de un evento sísmico determinado (Ecuación 1)

La relación entre los conceptos de riesgo, amenaza, peligro y vulnerabilidad se puede expresar así:

$$R_{ie} = (A_i^t, V_e, C_e) \qquad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

A_i^t… Representa la amenaza o peligro sísmico, entendida como la probabilidad que se presente un evento sísmico con intensidad mayor o igual que i, durante un periodo de exposición t.

V_e… Representa la vulnerabilidad sísmica, entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e, a ser afectado por la ocurrencia de un evento con una intensidad i

C_e… Representa el valor o coste del elemento expuesto e.

R_{ie}… Representa el riesgo sísmico, entendido como la probabilidad que se presente un daño sobre el elemento expuesto e, como consecuencia de la ocurrencia de un evento con intensidad mayor o igual que i.

La definición de vulnerabilidad sísmica lleva implícitos términos genéricos como son la afectación y el daño, la afectación se refiere al nivel de perturbación funcional que puede sufrir una instalación y está directamente relacionada con la llamada vulnerabilidad funcional. El daño, se refiere al deterioro físico que pueden sufrir los diversos elementos de una edificación. Desde el punto de vista cualitativo, el daño sísmico puede ser de dos tipos; el daño estructural y el daño no estructural, dependiendo si el elemento en cuestión forma parte o no del sistema resistente de la edificación. Estos daños están respectivamente relacionados con la llamada vulnerabilidad estructural y vulnerabilidad no estructural. (Safina M., 2003)

2.1.5. Susceptibilidad sísmica

La susceptibilidad sísmica consiste en el nivel de riesgo o la propensión inherente de una zona determinada a sufrir daños considerables ante un sismo; lo anterior está ligado directamente con la geología y geomorfología con la que cuenta la zona en estudio (Bonett, 2003). En cuanto al análisis de susceptibilidad sísmica de estructuras en asentamientos urbanos y rurales, es importante resaltar que hay diversos factores a tomar en cuenta, como sus cimentaciones, estructura constructiva, materiales de construcción, entre otros (Barbat, 1998).

2.2. Sismicidad

A las características de ocurrencia de sismos en una región dada se le conoce como Sismicidad. La sismicidad de una zona depende de su situación tectónica. En general las regiones del planeta con mayor frecuencia de ocurrencia de sismos y mayor energía liberada corresponden a las zonas de subducción (Zúñiga, 2011). Los sismos son movimientos que se producen por vibraciones repentinas causadas por la relajación y reactivación de la energía acumulada por la deformación de la litosfera, que se propaga a través de las demás capas geológicas. Los sismos también pueden ser causados por eventos volcánicos, hundimiento, deslizamiento y explosiones atómicas.

Por otra parte, Sunte (2023) expresa que un sismo es una colisión de gases, moléculas, y partículas que sacuden internamente el suelo debido a la energía negativa que por su naturaleza intenta estabilizarse.

Según la sociedad mexicana de ingeniería sísmica la tectónica de placas y la actividad volcánica son la principal causa por la que se producen los terremotos, aunque existen otros factores que pueden dar lugar a temblores de tierra como son los desprendimientos de rocas en las laderas de las montañas, hundimiento de cavernas, variaciones bruscas en la presión atmosférica por ciclones e incluso actividad humana. Estos últimos mecanismos generan eventos de baja magnitud que generalmente caen en el rango de microsismos, temblores que sólo pueden ser detectados por sismógrafos, instrumento que registra el movimiento del suelo causado por el paso de una onda sísmica. La sismología es una de las ramas de la Geofísica que según el Servicio Geológico Colombiano se encarga de estudiar los terremotos y los fenómenos asociados a ellos tal como su origen, duración, distribución geográfica, fuerza entre otros aspectos.

El Servicio geológico de México expone que cuando un sismo ocurre, el foco o hipocentro se sitúa siempre por debajo de la superficie, con una profundidad no superior a los 700 kilómetros. El epicentro es la proyección del foco a nivel superficial donde el sismo alcanza su mayor intensidad. La falla es una zona de liberación repentina de energía en la que las rocas son sometidas a gran presión constante y por la que son generadas las ondas sísmicas.

2.2.1. Magnitud

Hay dos maneras para medir un sismo: una expresada en términos cualitativos, la escala de intensidad; la otra manifestada en términos cuantitativos, la escala de magnitud. La intensidad es una medida que pretende determinar los efectos causados por un sismo en un lugar determinado de la superficie terrestre, depende del sitio de observación y se fundamenta en la cantidad de daños observados; mientras que la magnitud es una medida del tamaño de un sismo en su fuente (Sauter,1989). La magnitud es una medida objetiva del tamaño de un sismo ya que pretende cuantificar la energía liberada durante la ruptura de la roca, en la zona de falla, por medio del análisis de los sismogramas obtenidos a partir del terremoto.

2.2.1.1. Escalas sismológicas

Existen dos tipos de escalas para la clasificación de movimientos telúricos: escalas de intensidad y escalas de magnitud. La escala sismológica de Mercalli, la escala sismológica de Richter y la escala sismológica de magnitud de momento son las más usadas en la actualidad para la clasificación de movimientos sísmicos. A continuación, se presentan estas escalas:

Escala sismológica de Mercalli (MM)

Conocida como la Escala de Mercalli Modificada (MM), esta escala ha pasado por cuatro modificaciones desde su planteamiento por el vulcanólogo italiano Giuseppe Mercalli. Inicialmente, la escala fue propuesta por el italiano en 1884 para la evaluación de un sismo según su impacto percibido a nivel visual en las estructuras y edificaciones. Con diez niveles, Mercalli clasificaba los sismos y los databa conforme identificaba su magnitud. Adolfo Cancani amplió los niveles de visualización del impacto del sismo a doce, modificación que fue acogida por el geofísico August Sieberg para su posterior reformulación.

Actualmente, la Escala sismológica de Mercalli permite la evaluación de la intensidad de los sismos en doce grados de medición, mediante la visualización y valoración de los efectos y daños causados a las estructuras involucradas. Los niveles de intensidad propuestos en la escala se encuentran detallados en la Tabla 1, donde la medida g corresponde a la aceleración de la gravedad.

Tabla 1.Niveles de intensidad, según escala de Mercalli

Int.	Aceleración		Grado	Descripción
	(Gal)	(g)		
I	< 0.5	< 0.0005	Muy débil	Imperceptible
II	0.5 – 2.5	0.0005–0.0025	Débil	Levemente perceptible
III	2.5 – 6.0	0.0025–0.0061	Leve	Perceptible por personas en pisos altos
IV	6.0 – 10	0.0061–0.0100	Moderado	Perceptible por personas en edificios
V	10 – 20	0.0100–0.0200	Poco fuerte	Perturbaciones en edificaciones
VI	20 – 35	0.0200–0.0350	Fuerte	Daños leves en viviendas
VII	35 – 60	0.0350–0.0611	Muy fuerte	Daños leves en estructuras y edificios
VIII	60 – 100	0.0611–0.1019	Destructivo	Daños en estructuras y edificaciones
IX	100 – 250	0.1019–0.2549	Muy destructivo	Desplazamiento de estructuras
X	250 – 500	0.2549–0.5098	Desastroso	Daños graves en edificaciones
XI	> 500	> 0.5098	Muy desastroso	Destrucción de puentes y mampostería
XII	N/R	N/R	Catastrófico	Destrucción total de edificaciones

Fuente: Miranda, J. D. & Gamboa, C. A. (2018).

En la Tabla 1 puede notarse un aumento progresivo en intervalos de aceleración que se encuentra relacionado con la percepción de destrucción del sismo. Esta aceleración no representa una magnitud relevante para el estudio sismológico, debido a que se trata de una aproximación al cambio de velocidad durante el movimiento telúrico y la escala está enfocada en la representación del daño estructural en términos prácticos visibles.

Escala sismológica de Richter

La Escala sismológica de Richter fue propuesta por Charles Francis Richter y Beno Gutenberg en el año 1935 como parte de una investigación del Instituto de Tecnología de California

Caltech en movimientos sísmicos al sur de California. La Escala de Richter se enfoca en la búsqueda de la representación cuantitativa de la magnitud del impacto de un sismo. La primera magnitud establecida en la escala es el 0. La Escala sismológica de Richter se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Escala logarítmica de Richter

Magnitud	Descripción	Intens. Mercalli	Efectos	Frecuencia de ocurrencia
1.0 – 1.9	Micro	I	Microsismos registrados en sismógrafos sensibles.	Continua, muchos millones por año.
2.0 – 2.9	Menor	I a II	Sin daño en edificaciones, sentido por pocas personas.	Más de un millón por año.
3.0 – 3.9	Menor	III a IV	Vibración imperceptible de puertas, sentida por pocas personas.	Más de 100.000 por año.
4.0 – 4.9	Leve	IV a VI	Vibración perceptible que no causa efecto infraestructural.	Entre 10.000 y 15.000 por año.
5.0 – 5.9	Moderado	VI a VII	Daño leve en edificaciones, sentido por casi todas las personas.	Entre 1.000 y 1.500 por año.
6.0 – 6.9	Fuerte	VII a X	Daño moderado en edificaciones, sentido por todas las personas.	Entre 100 y 150 por año.
7.0 – 7.9	Fuerte	VIII o más	Daño a la mayoría de edificaciones, sentido hasta en un radio de 250 Km.	Entre 10 a 20 por año.
8.0 – 8.9	Muy fuerte	VIII o más	Daño estructural a edificios, sentido en gran radio de expansión.	Uno al año.
9.0 o más	Demasiado fuerte	VIII o más	Daño severo en estructuras.	Uno cada 10 a 50 años.

Fuente: Miranda, J. D. & Gamboa, C. A. (2018).

La magnitud de la escala es determinada por el logaritmo de la relación entre la amplitud de las ondas registradas por el sismograma, teniendo en cuenta un margen de medición del sismógrafo que lo registra.

Escala sismológica de Magnitud de Momento (Mw)

Existen otras escalas de magnitud como la escala de magnitud de ondas de cuerpo m_b o la escala de magnitud de ondas de superficie m_s, estas escalas se utilizan comúnmente para medir sismos cuyo foco es lejano al punto de registro de las ondas; sin embargo, la escala de magnitud más conocida y más empleada a nivel mundial es la escala sismológica de magnitud de momento (M_W) o simplemente escala de magnitud de momento porque es la única que realiza una adecuada estimación del tamaño de los grandes sismos (Tarbuck, 2005).

El Servicio Geológico Colombiano presenta los datos históricos de los sismos en diferentes unidades de magnitud, con el fin de homogenizar las magnitudes a una sola el SGC ha planteado algunas fórmulas, las cuales estiman de manera aproximada la conversión a Magnitud de momento (Mw) de las diferentes magnitudes como lo son: la magnitud de ondas interna (Mb), La magnitud de onda de superficie (Ms), La magnitud local (Ml) y la magnitud de duración (Md).

Para estas conversiones se plantearon relaciones exponenciales y bilineales entre las diferentes magnitudes, asegurando una bondad del ajuste adecuado; en las ecuaciones 2 a 5, se presentan las ecuaciones planteadas, en donde se muestra las relaciones anteriormente descritas con su respectivo Error Cuadrático Medio[3] (RMS), La Bondad del Modelo[4] (R^2) y su Desviación Estándar[5] (σ).

Ecuación 2. Transformación de Magnitud (Mb a Mw)

Relación	**RMS**	**R^2**	σ
$\boldsymbol{Mw}\ (3.6 < mb \leq 5.7) = \boldsymbol{0.954mb + 0.42}$	0.08	0.64	0.28
$\boldsymbol{Mw}\ (5.7 < mb \leq 7.7) = \boldsymbol{1.433mb - 2.35}$	0.13	0.5	0.36

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Ecuación 3. Transformación de Magnitud (Ms a Mw)

Relación	**RMS**	**R^2**	σ
$\boldsymbol{Mw}\ (3.6 < Ms \leq 6.1) = \boldsymbol{0.689Ms + 1.93}$	0.04	0.83	0.20
$\boldsymbol{Mw}\ (6.1 < Ms \leq 8.9) = \boldsymbol{0.928Ms + 0.474}$	0.03	0.84	0.18

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Ecuación 4. Transformación de Magnitud (MI a Mw)

$$\boldsymbol{Mw}\ (2.9 < MI \leq 6.1) = \boldsymbol{0.958MI + 0.1}\ (\boldsymbol{\sigma = 0.50})$$

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Ecuación 5. Transformación de Magnitud (Md a Mw)

$$\boldsymbol{Mw}\ = \boldsymbol{0.93(MD, Md, D) + 0.6}\ (\boldsymbol{\sigma = 0.3})$$

Fuente: Servicio Geológico Colombiano

[3] Error cuadrático medio, es el ajuste absoluto del modelo el cual indica que tan cerca están los valores observados a los esperados en el modelo y se calcula mediante la siguiente formula: $RMS = \sqrt{1/n * \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}$, donde n corresponde al número de datos, y es el valor observado y $\hat{\mathbf{y}}$ el valor esperado. (Moore, 2005).

[4] Bondad del modelo planteado, y muestran en que grado las variables independientes explican las variables dependientes y se calcula mediante la siguiente formula: $R^2 = 1 - (\sum(y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum(y_i - \bar{y}_i)^2)$ donde $\hat{\mathbf{y}}$ es el valor esperado y $\bar{\mathrm{y}}$ el valor medio de los datos observados. (Moore, 2005)

[5] Desviación estándar, es una medida de dispersión de los datos respecto a su media y se calcula mediante la siguiente formula: $\mathrm{s} = \sqrt{\sum(\mathrm{y} - \bar{\mathrm{y}})^2 / (\mathrm{n} - 1)}$, donde y es el valor observado, $\bar{\mathrm{y}}$ el valor medio de los datos observados y n corresponde al número de datos. (Moore, 2005)

2.2.2. Ley de Gutenberg- Richter

Los primeros estudios estadísticos que se realizaron a partir de los registros instrumentales de los sismos ocurridos en el mundo fueron hechos por Gutenberg y Richter en 1954. La energía liberada por un sismo se mide empleando una escala que crece de forma logarítmica (a partir de las potencias de 10) a partir de una magnitud mínima tomada de forma arbitraria por Gutenberg y Richter. La distribución de probabilidades sobre la magnitud de los sismos se puede obtener de la denominada Ley de Gutenberg-Richter G-R; esta ley plantea que la ocurrencia de sismos, para una franja de la corteza y durante un periodo de tiempo especificado, puede obtenerse a partir de una relación matemática. A partir de un análisis estadístico se puede obtener esta relación para una zona específica durante un periodo de tiempo generalmente de años. En la relación Gutenberg-Richter G-R se presenta una fórmula matemática empírica que cuantifica la relación entre el logaritmo de la frecuencia y la magnitud. Esta ley se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación 6, como:

$$\log_{10} N = a - bM \qquad (Ecuación\ 6)$$

Donde N representa el número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a M, generalmente M es igual o mayor a 3,0102; mientras que a y b son contantes fijadas por la naturaleza sísmica de la zona de estudio (Zambrano, 2018), un ejemplo de la aplicación de esta ley se encuentra en el estudio realizado por Gómez (2015) donde se estimaron los parámetros "a" y "b" para seis (6) series sísmicas ocurridas en el Golfo de Valencia España.

2.2.3. Ecuaciones de atenuación

En la actualidad, para poder proveer una forma en la cual se pueda estimar el movimiento de terreno, ya sea como desplazamiento, velocidad o aceleración, para valores máximos o espectrales, se utilizan relaciones de atenuación cuya expresión en inglés es "ground-motion prediction equations", que son ecuaciones que relacionan la intensidad sísmica con características de los sismos, como las magnitudes, así como las distancias sitio-fuente, condiciones del suelo, mecanismos de falla, entre otros (Strasser, 2008). Las relaciones de atenuación pueden ser categorizadas en tres de manera general: 1) aquéllas en las que se encuentran en zonas tectónicas activas y donde se presentan eventos sísmicos de tipo cortical, 2) en regiones continentales estables con presencia de sismos corticales someros y 3) en relaciones de atenuación enfocadas a eventos sísmicos de subducción (Abrahamson, 1997).

La ley de atenuación es una expresión semiempírica que relaciona magnitud, distancia e intensidad del registro de un sismo y describe la forma de disipación de energía que se libera en el epicentro, el propósito más importante de una curva de atenuación es predecir las aceleraciones que se provocarán, debido a un sismo de magnitud "M", a una distancia establecida. Los registros sísmicos son la materia prima para lograr una curva de predicción de aceleraciones o ley de atenuación. Varios autores han propuesto leyes de atenuación partiendo de bases sísmicas de sus propios países entendiendo que los datos de la base sísmica dependen

de las características de los suelos que constituyen la corteza en el sitio de donde provienen. (Theurer et al., 2016)

Las leyes de atenuación se pueden comprender fácilmente mediante dos aspectos, que son:

- A una misma distancia, se espera tener la misma intensidad sísmica (aceleración, velocidad, desplazamiento del terreno).

- La intensidad sísmica disminuye conforme la distancia aumenta y viceversa.

No obstante, hay que tener en cuenta que la respuesta dinámica del terreno está fuertemente influenciada por las condiciones de resistencia del terreno, en particular, es especialmente compleja la respuesta de suelos finos de consistencia blanda y media. (Díaz,2008)

2.2.4. Ecuaciones de parametrización de fuentes sismotectónicas

Para la parametrización de las fuentes sismotectónicas se utiliza el método de Máxima Verosimilitud en el cual se calculan parámetros λ y β, para esto se establece una magnitud umbral (M_0).

Para el cálculo del parámetro λ, se utiliza la siguiente fórmula mostrada en la ecuación 7:

$$\lambda = \frac{N}{t} \qquad (Ecuación\ 7)$$

Donde:

t: Número de años entre el primer y el ultimo evento

N: Número de eventos con magnitud superior a M_0

Para el cálculo del parámetro β, se utiliza la siguiente formula, mostrada en la ecuación 8:

$$\beta = \frac{\mathrm{N}}{\sum_{i=1}^{N}(M - \mathrm{M_0})} \qquad (Ecuación\ 8)$$

Donde:

N: Número de eventos con magnitud superior a M_0

M: Magnitud de cada evento

M_0: Magnitud umbral

Una vez calculados los parámetros λ y β, también se determina el coeficiente de variación (Cv) de la siguiente forma como se muestra en la ecuación 9:

$$Cv = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \qquad (Ecuación\ 9)$$

Donde:

N: Número de eventos con magnitud superior a M_0

Por último, se calcula la magnitud ultima de cada falla, y se calcula de la siguiente forma, como aparece en la ecuación 10:

$$M_u = 5.08 + 1.16 * \log Lr \qquad (Ecuación\ 10)$$

Donde:

Mu: Magnitud Ultima esperada (Mw)

Lr: Longitud de ruptura de la fuente (Km)

2.2.5. Ecuación de tasa de excedencia

Con los resultados obtenidos en las ecuaciones 6, 7, 8 y 9, se tienen los datos necesarios para el cálculo de la tasa de excedencia, la cual indica la frecuencia en que se generan los sismos de cierta fuente de una magnitud umbral determinada; para el presente estudio se utilizaran las fórmulas planteadas por Gutenberg y Richter (1994) las cuales son una modificación y ajuste de las fórmulas de Cornell (1968) y que aparecen en la ecuación 11:

$$\lambda(\mathrm{M}) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta \mathrm{M}} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \qquad (Ecuación\ 11)$$

Donde:

λ(M): Tasa de excedencia

M_u: Magnitud última esperada

M: Magnitud de cada evento

M_0: Magnitud umbral

λ y β: Parámetros que definen la tasa de excedencia de cada fuente

2.2.6. Ecuaciones de aceleración horizontal de terreno

Para el cálculo de las aceleraciones horizontales se utiliza la ecuación de MacGuire (1974), dado que relaciones la aceleración de terreno, la magnitud y la distancia hipocentral a la fuente,

dejando de lado parámetros de geología estructural y tectónica de placas con los cuales no se cuenta y que se muestra en la ecuación 12:

$$a = 472.3e^{0.610M}(r + 25)^{-1.301} \qquad (Ecuación\ 12)$$

Donde:

a: Aceleración horizontal del terreno (cm/s^2) = (1 Gal)

M: Magnitud de cada evento

r: Distancia hipocentral del evento a la fuente (Km)

La distancia hipocentral (r) corresponde a la mínima distancia dada en kilómetros desde el punto al que se le requiere calcular la aceleración horizontal de terreno y la fuente sismogénica que lo afecta.

2.2.7. Ecuaciones de aceleración horizontal en periodos de retorno

Con los datos de las aceleraciones horizontales para cada magnitud presentada en cierta zona de estudio, es posible calcular una relación de dichas aceleraciones con periodos de retorno, la cual se realiza ajustando los datos por métodos estadísticos. (Moore, 2005)

El periodo de retorno se entiende como el inverso de la tasa de excedencia, como aparece en la ecuación 13:

$$T(r) = \frac{1}{\lambda(\mathrm{M})} \qquad (Ecuación\ 13)$$

Donde:

T(r): Periodo de retorno

λ(M): Tasa de excedencia

Es necesario realizar un ajuste de datos mediante fórmulas estadísticas, para esto utiliza una regresión potencial en la cual se obtiene una mejor relación de los datos de conformidad con Segura (2015), para esto se utilizan las siguientes relaciones de las ecuaciones 14 a 18:

$$y = a * x^b \qquad (Ecuación\ 14)$$

Se procede a linealizar mediante logaritmos:

$$\log y = \log a * b \log x \qquad (Ecuación\ 15)$$

Aplicando las relaciones que $Y = \log y$, $X = \log x$ y $A = \log a$, se tiene que:

$$Y = A + BX \qquad (Ecuación\ 16)$$

Y solucionando se tiene que:

$$a = anti \log A \ ^{6} \qquad (Ecuación\ 17)$$

$$b = B \qquad (Ecuación\ 18)$$

Ya con estos datos se procede a realizar las diferentes regresiones para obtener la ecuación que se ajusta a los datos y poder calcular las aceleraciones en un periodo de retorno determinado.

2.3. Caracterización geológica y geofísica

2.3.1. Fuentes sísmica

Una fuente sísmica es una representación espaciotemporal de un fenómeno físico que se manifiesta a través de la sismicidad. A partir de la fuente sísmica se desarrolla el análisis de la amenaza sísmica, como una manera de aproximar la ocurrencia espacial de sismos. Se define como una región de la corteza terrestre que tiene características de sismicidad uniforme y distinta de las fuentes vecinas, y que es capaz de generar movimientos del suelo significativos en el sitio de interés.(Caicedo et al., 2005, p.4)

De acuerdo con la disponibilidad de infraestructura para investigar los diferentes ambientes sismo tectónicos se puede lograr la identificación, los tipos de fuente y la caracterización de su comportamiento sismológico. Una fuente sísmica se incluye en la estimación de la amenaza sísmica, cuando se evidencia que esta posiblemente contribuye en el movimiento del terreno. Para cada fuente es necesario definir localización y geometría, las cuales para la evaluación de la amenaza se pueden agrupar en los siguientes tipos:

Tipo 1: Corresponden a zonas asociadas a trazos de fallas representadas como líneas (a nivel de la superficie del terreno) o planos inclinados en profundidad (efecto del buzamiento de la falla).
Tipo 2: Áreas fuente que encierran zonas de sismicidad concentrada
Tipo 3: Áreas fuente regionales (definidas por características sismo tectónicas regionales).
Tipo 4: Áreas fuente de fondo (zonas amplias sin dominio de una falla mayor, pero que puede contener fallas que no afloran, donde se presenta una sismicidad de fondo significativa).

En geología, una fuente sísmica es un volumen de la litósfera dentro del cual se presume que pueden ocurrir sismos con origen tectónico similar (Sarria, 1995). Para definir estas fuentes es relevante conocer su ubicación, su actividad (descrita en términos de la recurrencia de

[6] Entiéndase el antilogaritmo "Q" de base "n", corresponde a "x"; y donde logaritmo de "x" de base "n", corresponde a "Q". En las siguientes formulas se puede observar lo planteado: $antilog\ Q_n = x$, por consiguiente, se cumple que: $log\ x_n = Q$. (García et al, 2005)

magnitudes de sismos asociados a dicha fuente), así como la magnitud máxima de los sismos que puede producir (Sarria, 1995).

2.3.2. Geología estructural

La geológica del departamento de Tolima se caracteriza, al igual que su configuración geográfica y morfológica, por tres zonas, las cordilleras Central la Oriental y el Valle Superior del Magdalena. El flanco oriental y la cima de la Cordillera Central de Colombia, conformada por rocas cristalinas, metamórficas e ígneas, cubiertas por depósitos volcánicos y volcaniclásticos del Neógeno - Cuaternario. Las rocas más antiguas son las metamórficas de medio a alto grado, asignadas al eón Proterozoico, por lo tanto, el núcleo de esta cordillera está constituido por rocas poli metamórficas, de medio a bajo grado de metamorfismo. En las estribaciones y parte media se encuentran zonas con afloramientos de unidades sedimentarias, algunas fosilíferas y otras con metamorfismo incipiente, asignadas al periodo Ordovícico, Devónico y Carbonífero. Durante una de las fases de deformación que sufrió la Cordillera Central durante su larga historia geológica se dio el emplazamiento de intrusivos sinorogénicos a finales del Paleozoico. En el Mesozoico y Cenozoico, especialmente durante el Jurásico, tuvo lugar un importante evento magmático, no sólo en el Departamento del Tolima, sino en todo el territorio colombiano, que trajo consigo el emplazamiento del Batolito de Ibagué y otros plutones menores. (Núñez, 2001)

En las estribaciones de la cordillera se acumularon, en el Triásico - Jurásico, las formaciones Luisa (conglomerados y areniscas), Payandé (predominantemente calizas) y Saldaña (lavas y piroclastitas). El Valle del Magdalena está conformado por rocas sedimentarias marinas del Cretácico y continentales del Cenozoico, así como por abundantes depósitos sedimentarios del Cuaternario, especialmente aluviones y abanicos de origen volcaniclásticos. En el límite con la Cordillera Central estas unidades sedimentarias recubren las rocas más antiguas. Hacia el sur, en el llamado Arco de Natagaima, están expuestas vulcanitas de la Formación Saldaña y plutonitas jurásicas (Núñez, 2001) como se muestra en las figuras 2 y 3 que corresponden al mapa geológico y litológico del Departamento de Tolima respectivamente.

En el flanco occidental de la Cordillera Oriental, se encuentran unidades sedimentarias del Cretácico y Cenozoico, además de algunos afloramientos de vulcanitas de la Formación Saldaña y pequeñas exposiciones de rocas intrusivas del Jurásico. Las estructuras geológicas, como fallas y pliegues, tienen una dirección predominante de norte a sur, con dos componentes transversales importantes: NW - SE y NE - SW. La falla de Chapetón - Pericos, también conocida como Megasutura Otú - Pericos, marca la línea de sutura entre el Bloque Andino, autóctono, y el Terreno Tahamí, alóctono. Algunas de estas fallas geológicas muestran evidencias claras de haber experimentado movimientos importantes en tiempos recientes. El departamento de Tolima alberga diversos recursos geológicos de importancia, como oro, caliza, mármol, materiales de construcción, barita, yeso y roca de enchape (Núñez, 2001).

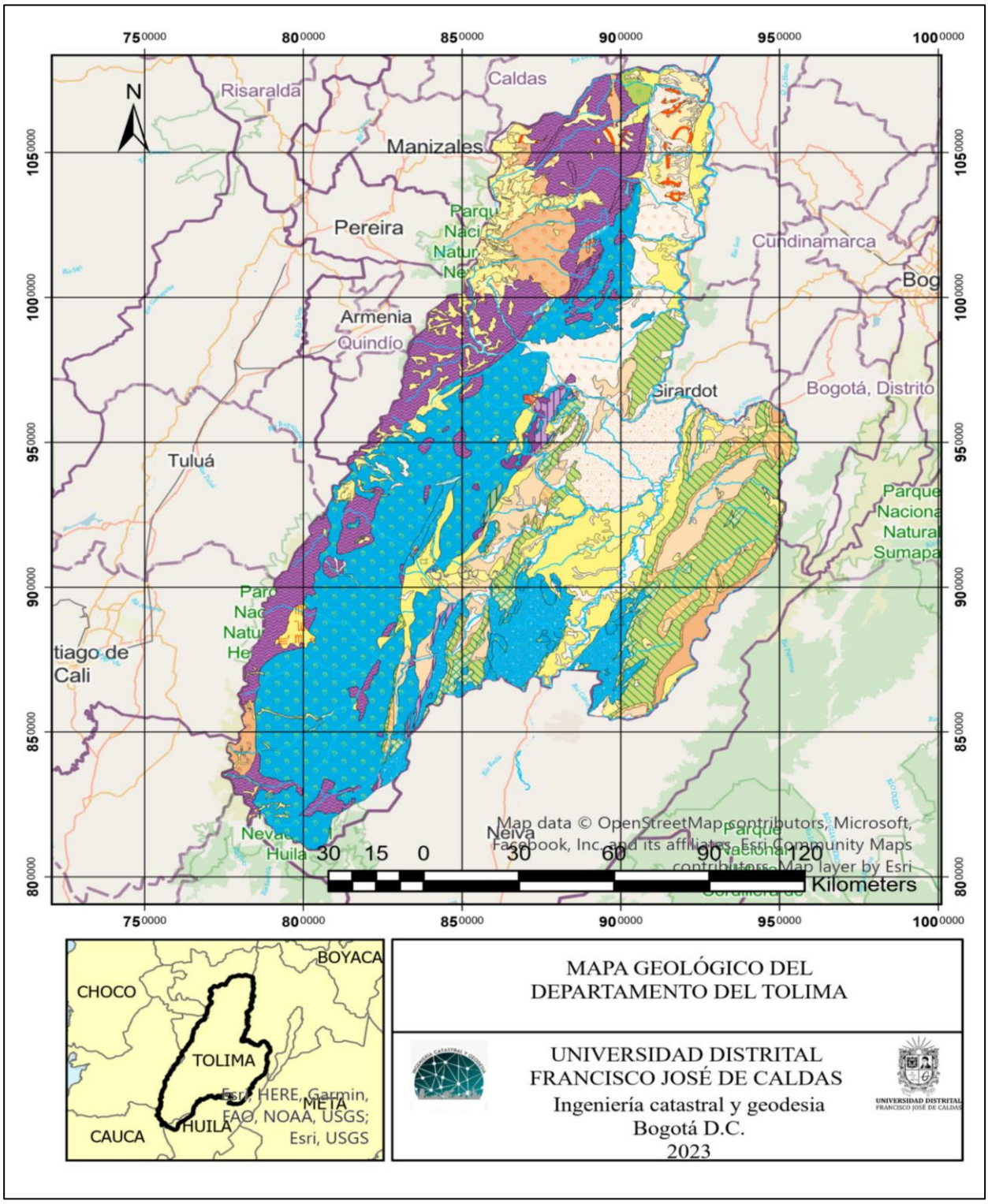
En los últimos años la producción de hidrocarburos ha venido en aumento, con la entrada en operación de campos petrolíferos en el valle del Magdalena. Volcanismo, sismos y fenómenos

de erosión y remoción en masa son los eventos naturales, de tipo geológico, que afectan y pueden afectar el territorio tolimense. La Cadena Volcánica Ruiz - Tolima, activa desde finales del Neógeno hasta la actualidad, ha cubierto con lavas y material piroclástico buena parte del norte del departamento. En épocas históricas la actividad sísmica ha causado daños en Chaparral, Honda, Ambalema, Mariquita y Espinal. La presencia de fallas geológicas activas aumenta el grado de amenaza sísmica. Las condiciones topográficas y la actividad humana, unidas a factores geológicos e hidrológicos, inciden en la formación y aceleración de los procesos erosivos que resultan en deslizamientos, de diferente tipo, flujos torrenciales e inundaciones.

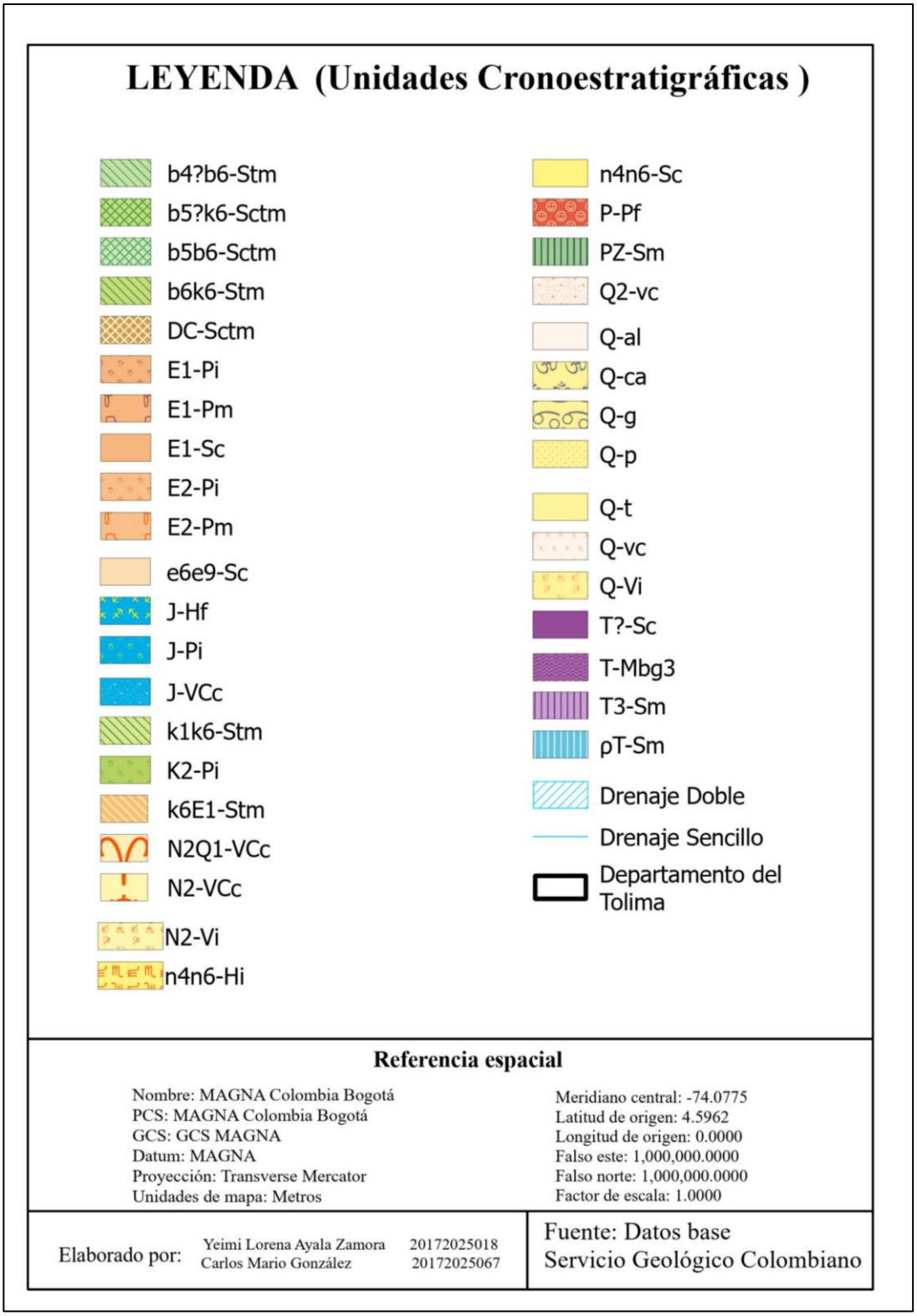
En la figura 2, correspondiente con el mapa geológico se observan 36 unidades cronoestratigráficas simbolizadas por color y textura de acuerdo con las edades y los tipos de roca. En el sector noroccidental se pueden encontrar suelos de la edad cuaternaria, eoceno y plioceno que corresponden principalmente a lava y depósitos de ceniza y esto se presenta por la ubicación de los volcanes y nevados dentro del departamento. Por otra parte, en el sector central y suroccidental en límites con el departamento del Valle y Quindío se encuentran suelos de la edad Triásica que pertenecen a la unidad geológica del Complejo Cajamarca y se identifica con colores morados.

Para el caso de la zona central del departamento se destacan gran parte en tonos azules que corresponde a una edad Jurásica, integradas en el batolito de Ibagué y otra zona importante que hace parte del abanico de Ibagué y pertenece al periodo cuaternario. Por último, en el sector oriental se encuentran unidades integradas del abanico del Guamo y Espinal, caracterizados por ser del periodo cuaternario y en mayor extensión se presentan suelos con edades albianas que hacen parte del periodo cretácico tanto superior como inferior, así mismo se destacan arenitas y arcillolitas en los límites del Río Magdalena.

Figura 2. Mapa geológico del departamento del Tolima



Fuente: Elaboración propia, Datos base del Servicio Geológico Colombiano



Fuente: Elaboración propia, Datos base del Servicio Geológico Colombiano

En la figura 2, se utilizó información geológica disponible por el Servicio Geológico Nacional para representar la distribución de las diferentes unidades geológicas en la región. Mientras tanto, en la figura 3, los geólogos Gabriel Rodríguez García y Alberto Núñez realizaron un

mapa estratigráfico más detallado y enfocado únicamente en el departamento de Tolima, mostrando la disposición de las capas de rocas y sedimentos específicos de esta área.
La figura 3 presenta en la leyenda la columna estratigráfica y aunque varía un poco los colores representa las unidades cronoestratigráficas de manera muy similar a la figura 2, la importancia del mapa estratigráfico está en proporcionar información sobre la secuencia y la disposición de las capas geológicas en la superficie terrestre y la representación cartográfica es esencial para entender la geología de una región y cómo se han ido depositando y formando las distintas capas de rocas a lo largo del tiempo geológico.

A partir del mapa realizado por los geólogos Núñez y Gutiérrez, se observó que durante la era del Proterozoico se destaca la presencia de rocas metamórficas[7] en el sur del departamento en municipios como Río Blanco y Planadas (Zapata et al., 2022). Posteriormente en la era del paleozoico, principalmente en el periodo inferior se encuentran sedimentitas sobre la formación Anaba[8] y la formación Amayá; en el caso del periodo superior de esta misma era, Núñez y Murillo (1982) sugieren la presencia de areniscas, cuarcíticas y conglomerados cuarzosos sobre la formación imán (secuencia sedimentaria, que aflora en el Cerro El Imán y las quebradas El Imán) (Núñez et al., 1984).

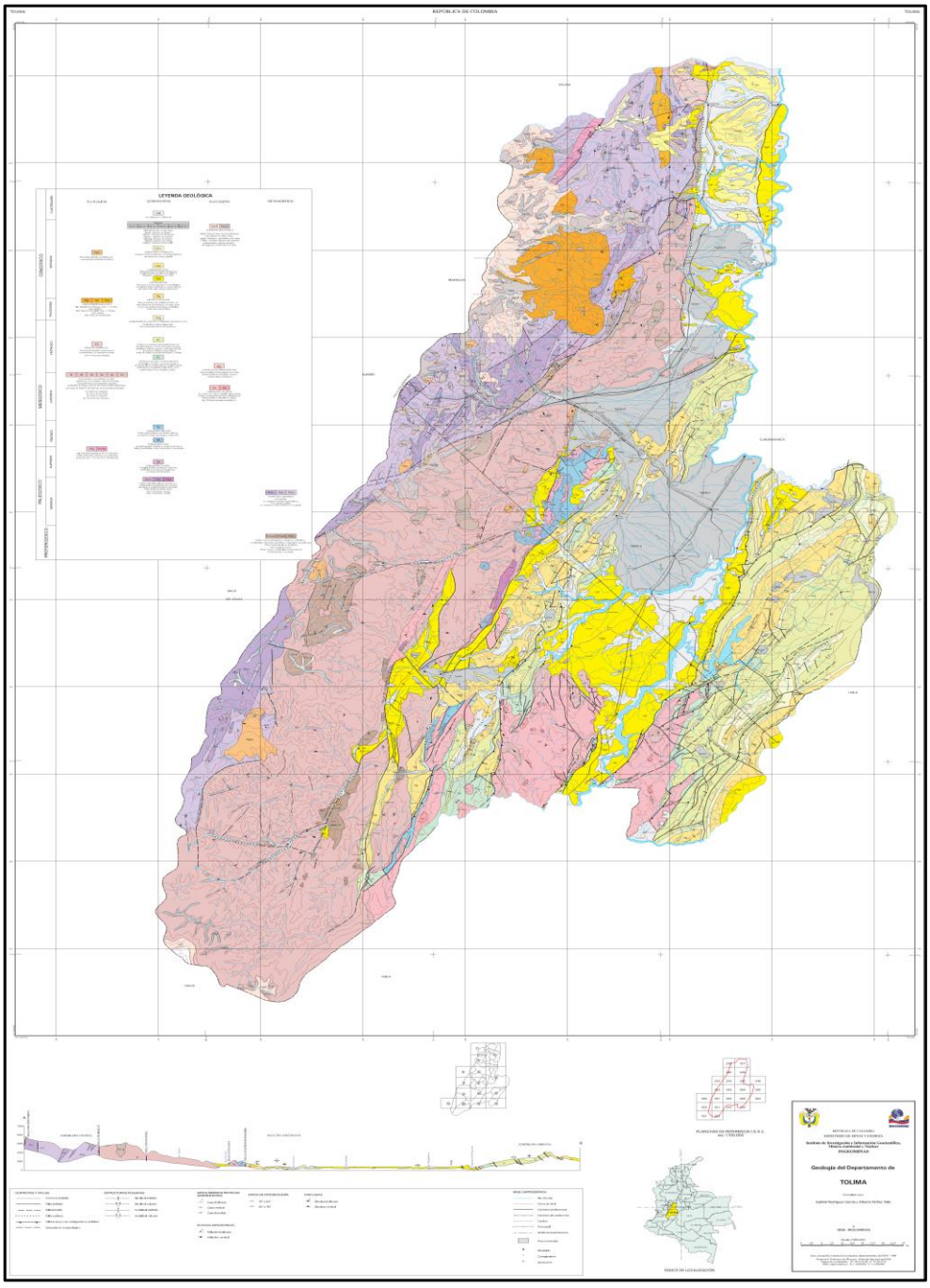
La formación Payandé, una secuencia predominantemente calcárea que aflora en el flanco oriental de la Cordillera Central, y la formación Luisa, que se encuentra al oriente de la carretera Rovira – El Corazón, entre los ríos Luisa y Cucuana, se desarrollaron durante la era del Mesozoico, específicamente en el período Triásico. Estas formaciones están compuestas por rocas sedimentarias como calizas, silicios y lutitas; durante la misma era, pero en el periodo Jurásico se destaca la presencia de las rocas plutonitas[9] tales como cuarzodioritas, tonalita y granodiorita, en diversas áreas como el batolito de Ibagué, el stock de Payandé, Dolores, Los Naranjos y Anchique. También en ese mismo intervalo de tiempo, sobresale la Formación de Saldaña, que presenta rocas volcánicas[10], como tobas de cenizas, limolitas, calizas, aglomerados y lavas (Streckeisen, 1979).

En la figura 3, se pueden identificar otras unidades geológicas destacables, como el grupo Honda, el grupo Gualanday, y las formaciones de la Mesa y Casabianca. Estas últimas se originaron durante el Cenozoico, específicamente entre los períodos Paleógeno y Neógeno. Una característica sobresaliente de todas ellas es la presencia predominante de rocas sedimentarias, principalmente areniscas, tobáceas y arcillolitas.

[7] Rocas que se forman a partir de la transformación de otras rocas preexistentes mediante procesos geológicos de metamorfismo, implica cambios en la mineralogía, textura y estructura de las rocas.
[8] Secuencia litológica, con muy bajo grado de metamorfismo, que aflora sobre los ríos Anabá, Loany y Ortega, al Occidente del municipio de Ortega (Núñez & Murillo, 1982)
[9] Clase de rocas ígneas intrusivas que se forman a partir del enfriamiento lento y la solidificación del magma a gran profundidad dentro de la corteza terrestre
[10] Clase de rocas ígneas que se forman a partir del enfriamiento y solidificación del magma expulsado durante las erupciones volcánicas, estas se forman en la superficie terrestre o en niveles poco profundos de la corteza

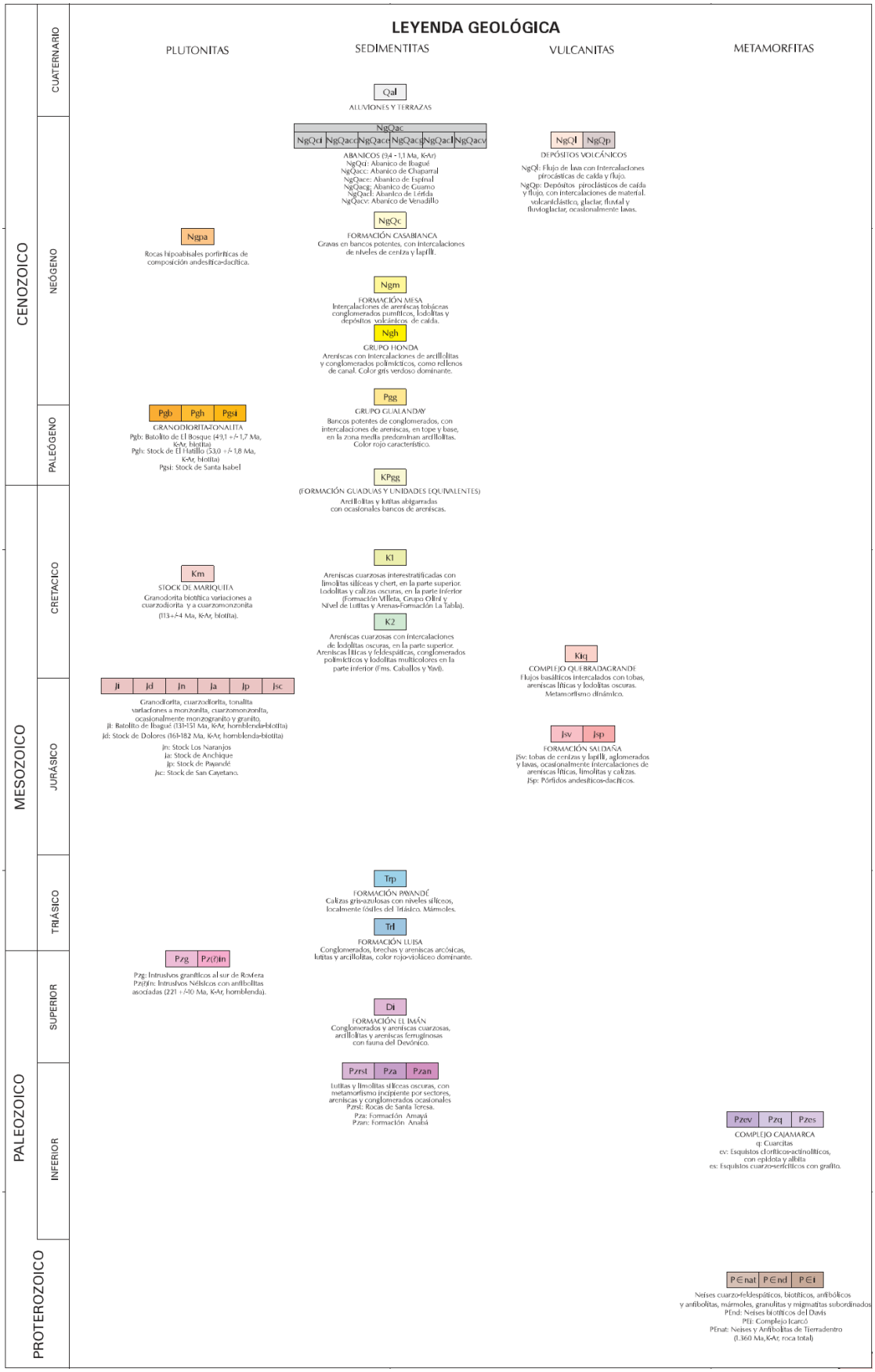
Es destacable que en el sector noroccidental del departamento se encuentra una unidad geológica importante que abarca municipios como Santa Isabel, Líbano y Murillo. Esta zona está compuesta por rocas plutónicas que corresponden al período Paleógeno. Sin embargo, en el mismo sentido de la cordillera y sobre los nevados de Tolima, Ruiz y Santa Isabel, se ubica una unidad geológica diferente, caracterizada por rocas volcánicas y flujos de lava que también pertenecen al Neógeno. Durante este mismo periodo, se originaron los abanicos del centro del Tolima, como el de Ibagué, Lérida, Venadillo, Espinal y Guamo, pero con predominancia de rocas sedimentarias.

Figura 3. Mapa litológico del departamento del Tolima



Fuente: Información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano (Núñez & Gutiérrez, 1999)

Figura 4. Columna estratigráfica del departamento de Tolima



Fuente: Información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano (Núñez & Gutiérrez, 1999)

2.3.3. Fallas sísmicas

Se entiende por falla a una estructura tectónica a lo largo de la cual se ha producido una fractura y un desplazamiento diferencial de los materiales adyacentes. En sismología e ingeniería sísmica el interés se centra en las fallas activas y en las fallas capaces (Rodríguez, 2008) . La falla activa es aquella estructura tectónica en la que:

1) Ha habido al menos un movimiento en la superficie o cerca de ella en los últimos 10.000 – 30.000 años, o movimientos con recurrencia en los últimos 500.000 años.

2) Existe constancia instrumental de la ocurrencia de sismos relacionados con la falla.

3) Hay relación con fallas potenciales que satisfacen las dos características anteriores.

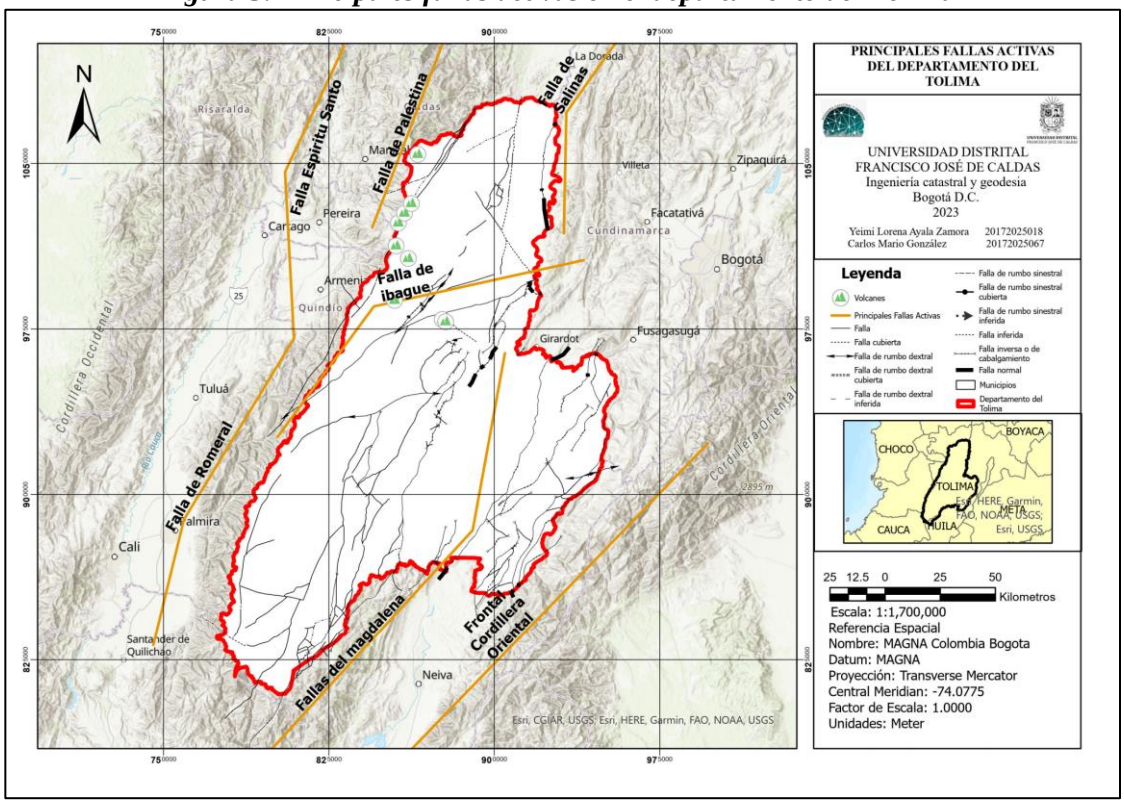
La falla potencialmente activa es la que no tiene indicios de actividad en el campo de esfuerzos actuales, pero que en una etapa anterior fue activa. Mientras que una falla se define capaz cuando la generación de deformaciones es permanente en o cerca de la superficie, una falla es no activa cuando no se ajusta al conjunto de las tres anteriores. Si bien las fallas que sufren desplazamientos cuando sucede un terremoto son activas, no todas las fallas activas generan terremotos, algunas son capaces de moverse de forma asísmica, es decir sin que esté asociada a ninguna actividad sísmica. (Aki & Lee, 1976)

Las fallas geológicas cartografiadas en el Departamento del Tolima se pueden asociar a tres grupos o sistemas principales: norte - sur (N - S a N 30º E), este - oeste (N 60º E a E - W) y noroeste (N 30º W a N 60º W). El primer sistema es importante en los bordes de las cordilleras y fueron, muy posiblemente, las responsables del levantamiento de ellas durante la Orogenia Andina, en el Paleógeno y Neógeno. El sistema este - oeste tiene expresiones importantes en la Cordillera Central y en el valle del Magdalena; algunas de las fallas de este grupo presentan rasgos morfológicos que evidencian actividad en el Holoceno (últimos 10.000 años). Las Fallas NW no son tan evidentes y aparentemente están enmascaradas por los dos grupos descritos; en los años recientes, el empleo de imágenes de satélite ha permitido inferir el trazo de algunas de ellas en la Cordillera Central y el valle del río Magdalena. En la Cordillera Oriental no tienen gran expresión. (Núñez, 2001)

A continuación, en la figura 4 se pueden visualizar espacialmente las fallas activas presentes en el departamento de Tolima en donde se desatacan La Falla del Magdalena, La Falla de Ibagué, La Falla Espíritu Santo, El Sistema de Fallas del Romeral, La Falla de Palestina, La Falla Frontal de la Cordillera Oriental y la Falla de Salinas, indispensables para el cálculo de las ecuaciones 9 a 12 y que permiten obtener la parametrización de las fuentes sismotectónicas para proceder al cálculo de las aceleraciones horizontales de terreno aplicando las ecuaciones 13 a 18, los cuales son los datos base para los mapas 35 a 39, las cuales son las de relevancia para el estudio que se lleva a cabo; así mismo se muestran las fallas no activas clasificadas

mediante su tipo y/o rumbo; también se evidencian los volcanes presentes en zona de estudio ubicados principalmente al noroccidente del departamento de Tolima.

Figura 5. Principales fallas activas en el departamento del Tolima



Fuente: Elaboración propia, Datos base del Servicio Geológico Colombiano

A continuación, se describe detalladamente cada una de las fallas utilizadas para la parametrización del presente estudio.

Sistemas de Fallas Romeral:

El Sistema de Fallas de Romeral se conoce como una zona de cizalla de primer orden, la cual se extiende cerca de 1600 km desde el este de la ciudad de Barranquilla en el norte de Colombia hasta el sureste de la ciudad de Talara al noroeste de Perú. Este sistema separa rocas de afinidad oceánica al occidente, de rocas continentales al oriente. Esta diferencia indica que este sistema de fallas corresponde probablemente a una paleosutura asociada con un proceso de obducción que se produjo durante el cretácico inferior (120 Ma), y que en Colombia es el responsable de la orogenia de la cordillera occidental. (Chicangana, 2005)

El sentido actual de movimiento del sistema de romeral parece ser lateral derecho en los tramos situados al sur de Armenia. Más al norte (Medellín) el sentido de movimiento podría invertirse (lateral izquierdo) debido al cambio de dirección general del sistema (N-NW). El sismo de Popayán del 31 de marzo de 1983 es un ejemplo de actividad tectónica superficial a lo largo de un segmento de falla mediano asociado a este sistema. Esta zona de falla está compuesta

casi siempre por tres fallas paralelas o subparalelas que se entrecruzan en varios puntos. (Chicangana, 2005)

Falla Salinas:

Está ubicada al costado oriental del Magdalena Medio, en el departamento de Santander, en una región de alta sismicidad. Se considera una falla de tipo inverso con buzamiento al este cuya traza se aprecia en la zona central del país con rumbo sensiblemente norte sur y longitud superior a 150 km. Esta falla afecta el flanco este de la Cordillera Oriental. (Chicangana, 2005)

Falla Espíritu Santo:

La Falla Espíritu Santo de dirección NE-SW constituye prácticamente el límite NW entre la Cordillera Central y el área plana de la región del Cauca Inferior que se extiende hasta la población de El Banco. En los Mapas geológicos de GEOTEC (1988) y el Servicio Geológico Colombiano (1988) es muy claro el recorrido de la falla, por 200 km desde El Banco hasta la población de Cáceres. Luego se extiende por otros 150 Km desde la población de Cáceres hasta Sabanalarga cerca de Liborina (10 Km al Norte de Santa Fe de Antioquia). (Ujueta, 2007)

Ha sido clasificada como una falla de rumbo con desplazamiento lateral derecho, su tasa de actividad ha sido estimada por Woodward-Clyde como del orden de 0.2 mm/año, separándose del sistema romeral-cauca en la población de Liborina, departamento de Antioquia.

Falla de Ibagué:

La Falla Ibagué es una estructura de tipo transcurrente dextral que se extiende en dirección WSW-ENE y se encuentra ubicada en medio de una zona de cizalla transversal que afecta la parte central de la Cordillera Central de Los Andes Colombianos con dirección. La Falla Ibagué presenta contundentes rasgos de actividad neotectónica asociados con su trazo, que la definen como una estructura potencialmente productora de grandes sismos. En su campo cercano contiene importantes centros poblados del país donde viven cerca de 13 millones de habitantes (Ibagué, Bogotá, Armenia, Pereira y Manizales son los más importantes). (Diederix et al., 2006)

Falla de Palestina:

El sistema de fallas de La Palestina es una de las estructuras tectónicas más importantes en la geología de nuestro país. Se encuentra situada sobre el flanco oriental de la Cordillera Central, siendo ligeramente paralela al río Magdalena en su valle medio. Fue definida por Feininger (1972), y desde entonces su trazo en el norte del departamento del Tolima y del Gran Caldas no ha sido bien conocido.

La Falla de La Palestina tiene una longitud de unos 250 km, con una dirección N 10° E, desplaza principalmente una superficie de erosión terciaria Pre-Mesa (24 millones de años). Tiene movimiento lateral izquierdo inverso, cabalgando al oriente. Presenta manantiales alineados, colinas aisladas lineales, corrientes desplazadas, lomos de obturación (shutter ridge), silletas y escarpes erosionados. La tasa de desplazamiento es baja a muy baja. La posible edad de los depósitos rotos está entre 1 y 5 millones de años, pero principalmente están dentro del Cuaternario. En el extremo septentrional, Departamento de Antioquia, tiene un carácter dextro lateral con desplazamiento calculado de 15 km, posiblemente pre Cuaternario. (Feininger et al 1972)

Falla Frontal Oriental:

Constituye un sistema de fallas, que se extiende desde el Ecuador, hasta el empate con el Sistema de Fallas de Boconó en el límite con Venezuela. Tiene una longitud aproximada de 1000 Km, con una dirección general N 30º a 40º E; hacen parte de este sistema los segmentos de fallas de Florencia, El Zorro, Mocoa, Servitá, Guaicáramo y Yopal, entre otras. El sistema se desarrolló posiblemente en el Paleozoico como una serie de fracturas distensivas que durante el Mesozoico constituyeron el borde oriental de una cuenca de depósito de espesas secuencias sedimentarias, presentes hoy día en la Cordillera Oriental. Los levantamientos producidos por la Orogénesis Andina bajo las compresiones derivadas de la interacción de las placas suramericana, Caribe y Nazca, transformaron las fracturas distensivas, en fallas inversas o cabalgamientos, que actualmente limitan el Sistema Andino, al oriente, con las planicies de los Llanos Orientales. El sistema tiene por lo tanto un gran desplazamiento inverso o cabalgante con un componente horizontal en sentido lateral derecho. Su tasa de actividad es moderada a baja. Los rasgos neo tectónicos predominantes, son los escarpes de falla de algunas decenas de km de longitud por 2 a 10 m de altura, desarrollados en abanicos cuaternarios. Son comunes las terrazas basculadas, los pliegues recientes y los cabalgamientos de las rocas sedimentarias del Terciario sobre las gravas cuaternarias del borde llanero. (Alvarado et al, 2015)

3. METODOLOGÍA

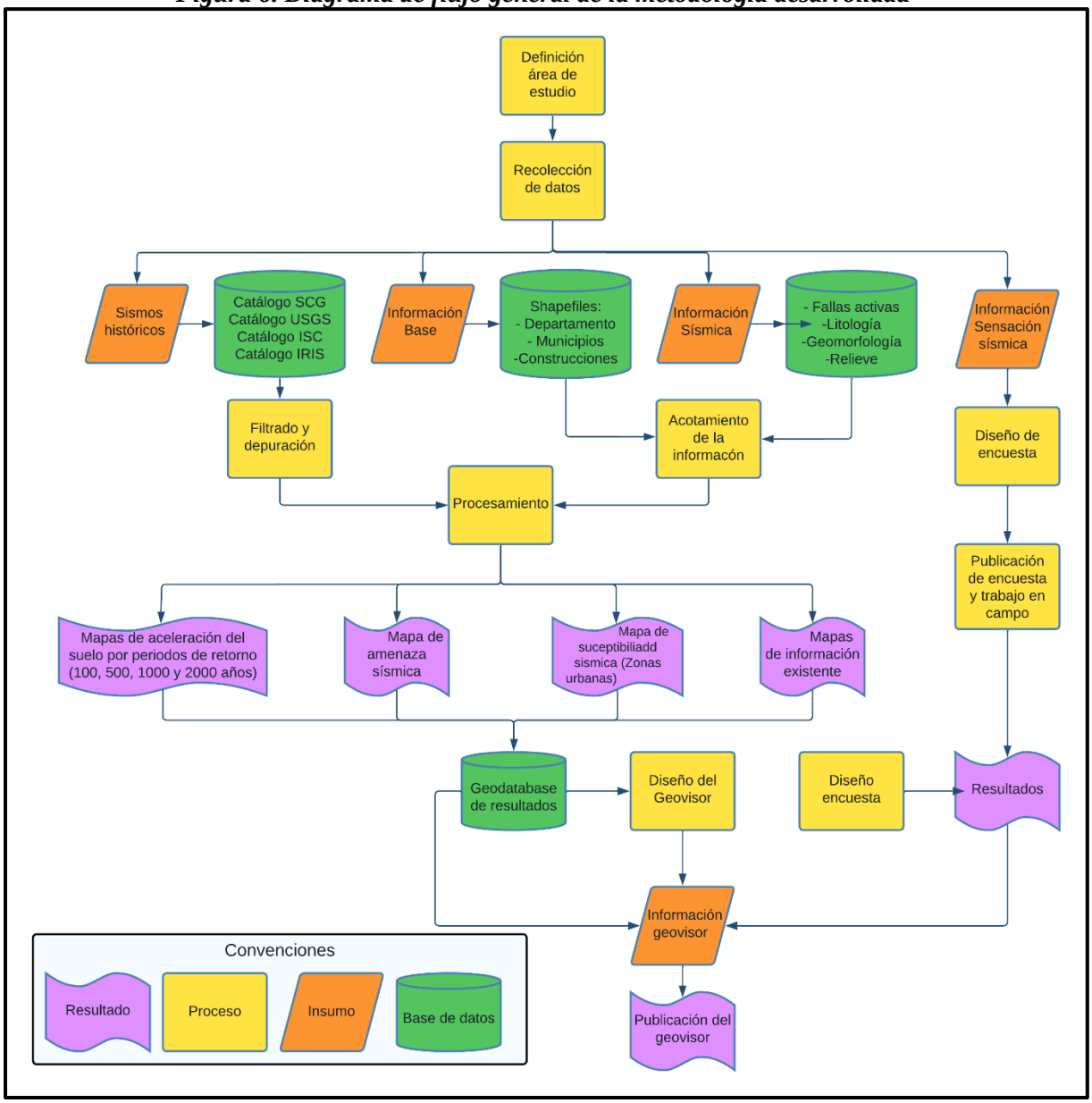
La metodología que se desarrolló en la monografía para la determinación de las fuentes sismotectónicas del departamento de Tolima, se definió en tres fases, la primera fue la obtención de la información como insumo fundamental para el análisis y elaboración de la metodología. La segunda, el procesamiento de la información para obtener resultados temáticos y la tercera y última fase fue la compilación y validación de los resultados, contrastándolos con resultados científicos de las entidades territoriales y nacionales en años anteriores, como mapas nacionales de amenaza sísmica, un ejemplo de estos es el estudio de los modelos nacionales de amenaza sísmica para Colombia realizado y publicado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en diciembre de 2018 y julio de 2020.

En la figura 6 se muestra de manera general el proceso llevado a cabo en esta monografía, se muestran los procesos necesarios para lograr las tres fases mencionadas anteriormente. Inicialmente se definió el área de estudio y a partir de esta se buscó toda la información base necesaria para llevar a cabo los estudios propuestos, dentro de esta se descargó información de los sismos históricos de bases de datos como la del Servicio Geológico Colombiano, el Servicio Geológico de Estados Unidos, El Instituto de Investigación Sismológica y el Centro Sismológico internacional; por otra parte se obtuvo información espacial en formatos shapefile de la delimitación de los departamentos y municipios, de las construcciones presentes con su información asociada (tipología constructiva , de las fallas presentes en la zona de estudio, litología, geomorfología y relieve; y finalmente se consultaron diversos formatos de encuestas aplicadas en caso de eventos sísmicos por entidades como el Servicio Geológico Británico, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, la Red Sinológica Nacional de Costa Rica y la Red Sísmica Nacional del Gobierno de España.

Toda la información recolectada está representada por romboide color naranja y las bases de datos consolidadas por cilindros color verde. Posterior a la descarga, compilación y consulta de la información se realizó una depuración y/o clasificación de todos los datos obtenidos y su respectivo procesamiento, estos pasos se pueden ver simbolizados en la figura 6 con rectángulos color amarillo, los cuales dan paso a los resultados que se presentan en rectángulos curvos color morado; como parte final se puede observar una compilación de todos los resultados, los cuales pasan a convertirse en el insumo básico para el desarrollo del visor geográfico desarrollado en esta monografía.

3.1. Diagrama de flujo

Figura 6. Diagrama de flujo general de la metodología desarrollada

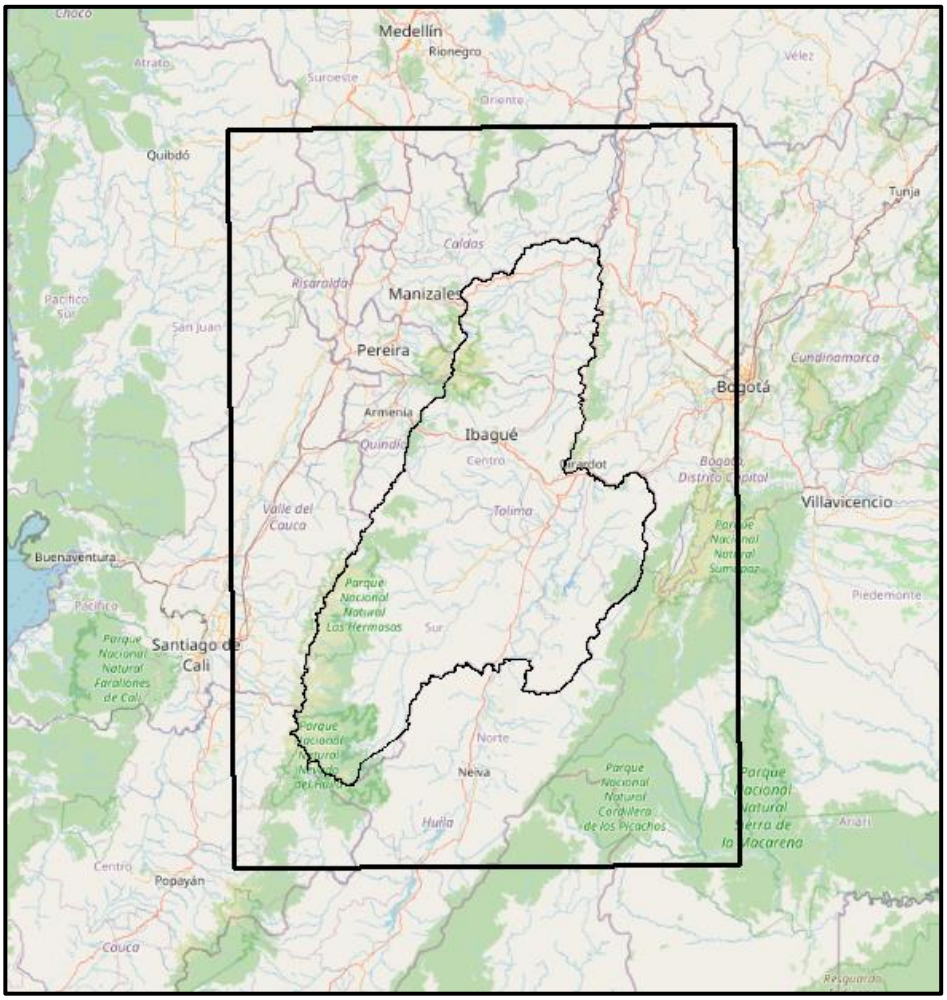


Fuente: Elaboración propia

3.2. Zona de estudio

El Departamento de Tolima está localizado en el centro-oeste del país en la región andina, localizada entre en un cuadrángulo cuyas coordenadas geográficas se delimitan entre 02º52’59’’ y 05º19’59’’ de latitud norte, y entre 74º24’18’’ y 76º06’23’’ de longitud oeste. La superficie del departamento que es de 23.582 km^2 lo que representa el 2.1 % del territorio continental colombiano. Para el presente estudio se definió como área de investigación, que se muestra en la figura 6 (mapa del área de estudio) y que se delimita entre latitudes 2° 30’ y 5°48’ Norte y las longitudes 76° 24’ y 74° 6’ Oeste de coordenadas geográficas en el territorio nacional.

Figura 7. Área de estudio



Fuente: Elaboración propia

3.3. Datos

3.3.1. Catálogos

Para los efectos de la evaluación de la peligrosidad sísmica en cualquier zona, es fundamental la elaboración de un catálogo completo, homogéneo y depurado de todos los terremotos, ocurridos en el departamento y sus alrededores tanto en época histórica como reciente. Dentro de este componente se realiza una búsqueda en bases de datos oficiales, sistemas de información geográfica nacionales e internacionales de los datos históricos sismológicos presentados en la zona de estudio definida, en la tabla 3 se presentan el número de sismos recolectados y la fuente donde fueron descargados:

Tabla 3. Sismos recolectados y fuentes

FUENTE	N° Sismos
USGS[11]	354
SGC[12]	33.178
ISC[13]	772
IRIS[14]	1.319
TOTAL	**35.623**

Fuente: Elaboración propia

Catalogo SGC: El catálogo sísmico del Servicio Geológica Colombiano recopila los eventos presentados en todo el territorio nacional desde 1993, este catálogo está divido en dos periodos, el primero está comprendido entre el 1 de junio de 1993 hasta el 28 de febrero de 2018, y el segundo periodo comienza a partir del 2 de marzo de 2018, hasta la actualidad; la diferencia de estos periodos radica en el cambio de software utilizado por la entidad para el registro y estudio de los sismos.

Catalogo USGS: El servicio geológico de Estados Unidos es una agencia gubernamental enfocada en realizar un registro, monitoreo y estudio de diferentes eventos naturales que se presentan a nivel mundial; dentro de sus programas cuentan con el de peligrosidad sísmica en el cual monitorean mediante estaciones sismológicas los eventos presentados en cada región del mundo, estos datos son procesados y colgados en la web de forma gratuita.

Catalogo ISC: El centro sismológico internacional es una entidad sin ánimo de lucro fundad en 1964 con el apadrinamiento de la Organización de las Naciones Unidas para la cultura, las ciencias y la educación – UNESCO, para realizar un seguimiento y estudio permanente a nivel mundial de los eventos sísmicos presentados.

Catalogo IRIS: El instituto de investigación en Sismología es un proyecto enfocado en el estudio de los eventos sísmicos a nivel mundial, esta organización está conformada por más de 100 universidades a nivel mundial, las cuales dedican parte de sus recursos a la adquisición y procesamiento de datos sismológicos para publicarlos de forma gratuita en la WEB; con la búsqueda de esta información se consolida una base de datos de con 35.623 sismos. Donde se tiene en cuenta, fecha, hora, ubicación y profundidad para cada sismo.

3.3.2.1. Mapa de Pendientes

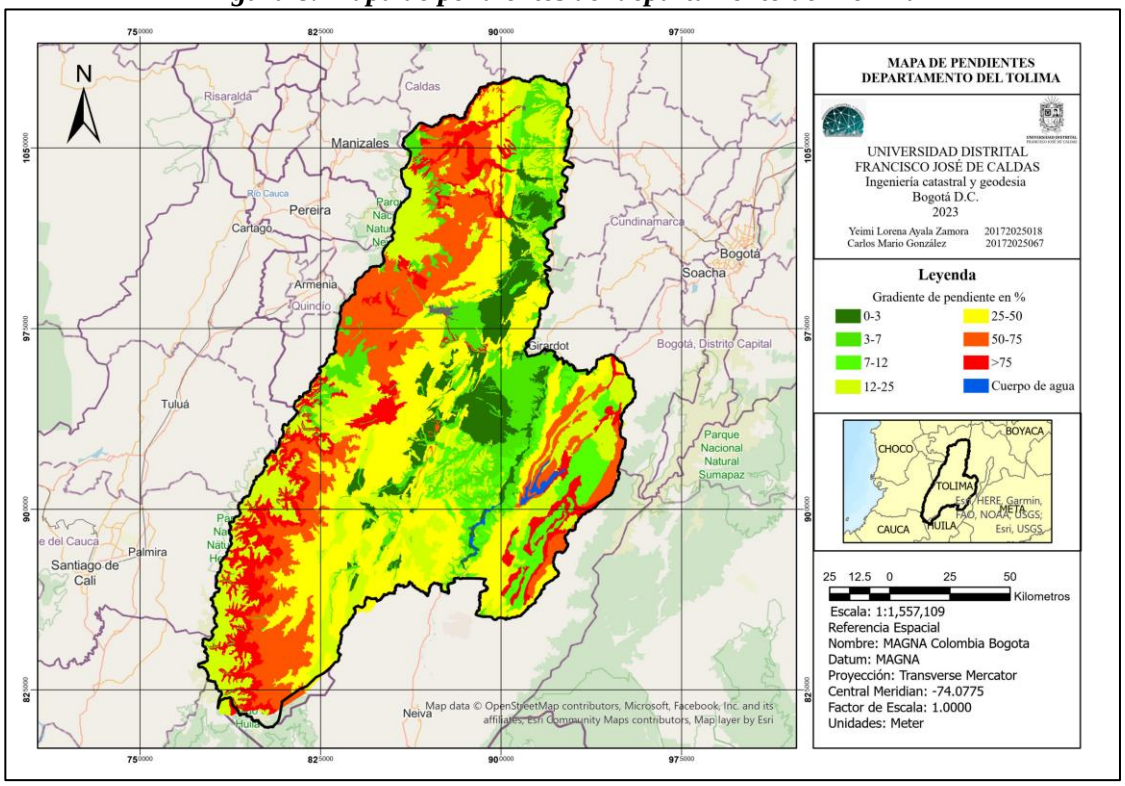
La elaboración del mapa de pendientes que se muestra en la figura 7, se desarrolló de acuerdo con la clasificación de porcentajes establecida por el IGAC, que inicia con un rango de (0-3%) de pendiente que hace referencia a plano y ligeramente plano y termina con el rango de pendientes mayores a 75% que hace referencia a terrenos fuertemente escarpados; de esta manera se puede observar que la zona con mayor pendiente se encuentra al costado occidental

[11] Servicio Geológico de los Estados Unidos
[12] Servicio Geológico Colombiano
[13] Centro Sismológico Internacional
[14] Instituto de Investigación en Sismología

del departamento de Tolima y pertenece a la cordillera central donde están localizados el Volcán nevado del Ruiz, Volcán nevado del Tolima y nevado de Santa Isabel que presentan alturas representativas. Por otra parte, sobre el sector central del departamento se encuentran rangos desde moderadamente inclinado hasta ligeramente escarpado (7 a 50%) este sector es conocido como el piedemonte de la cordillera central.

Sobre la zona oriental, en límite con el departamento de Cundinamarca se muestran suelos mucho más planos con pendiente de 0 a 7%, que corresponden al sector llamado Valle del Magdalena donde se destacan los municipios de Honda, Ambalema, Saldaña, Coello, Flandes y demás municipios ubicados sobre la zona conocida como el plan del Tolima. Por último, hacia el suroriente del departamento de Tolima se evidencian nuevamente suelos con pendientes altas que corresponden al inicio de la cordillera oriental de Colombia.

Figura 8. Mapa de pendientes del departamento del Tolima



Fuente: Elaboración propia, Datos base del Servicio Geológico Colombiano

3.3.3. Registro 1 y 2 de catastro

La información de las construcciones es obtenida de los datos abiertos de la subdirección de catastro del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, en estas bases de datos denominadas “registro 1” y “registro 2” se encuentran los datos de identificación del predio, datos del propietarios o propietarios del inmueble, destinación económica, área del terreno, área construida, altura edificada, distribución de la vivienda, puntaje catastral, entre otros; toda esta

información es necesaria para calcular la susceptibilidad sísmica de las construcciones en los diferentes municipios del departamento de Tolima.

Tabla 4 ***Contenido Registro 1***

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	NUMERO PREDIAL	DIRECCIÓN	DESTINO ECONÓMICO
73	73024	73024000000000000000000000000	EL CAFETAL	D
73	73024	73024000000000000000000000000	EL DIVISO	D
73	73024	73024000000000000000000000000	Lo EL AME	D
73	73024	73024000000000000000000000000	EL CAFETAL	D
73	73024	73024000000000000000000000000	Lo	D

Continua …

ÁREA TERRENO	ÁREA CONSTRUIDA	NUMERO PREDIAL ANTERIOR
48400	0	73024000100010000000
13612	0	73024000100010000000
18750	0	73024000100010000000
39325	0	73024000100010000000
5000	0	73024000100010000000

Fuente: subdirección de catastro IGAC, 2023

Tabla 5 Contenido Registro 2

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	NUMERO PREDIAL	ZONA FÍSICA 1	ZONA ECONÓMICA 1
73	73024	73024000100000000000000000000	18	5
73	73024	73024000100000000000000000000	18	5
73	73024	73024000100000000000000000000	18	5
73	73024	73024000100000000000000000000	18	5
73	73024	73024000100000000000000000000	18	5

Continua …

ÁREA TERRENO 1	ZONA FÍSICA 2	ZONA ECONÓMICA 2	ÁREA TERRENO 2	HABITACIONES 1	BAÑOS 1
48400.0	0	0	0.0	0	0
13612.0	0	0	0.0	0	0
18750.0	0	0	0.0	0	0
39325.0	0	0	0.0	0	0
5000.0	0	0	0.0	0	0

Continua …

LOCALES 1	PISOS 1	TIPIFICACIÓN 1	USO 1	PUNTAJE 1	ÁREA CONSTRUIDA 1	HABITACIONES 2	BAÑOS 2
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0

Continua …

LOCALES 2	PISOS 2	TIPIFICACIÓN 2	USO 2	PUNTAJE 2	ÁREA CONSTRUIDA 2	HABITACIONES 3	BAÑOS 3
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0
0	0	0	0	0	0.0	0	0

Continua …

LOCALES 3	PISOS 3	TIPIFICACIÓN 3	USO 3	PUNTAJE 3	ÁREA CONSTRUIDA 3	NUMERO PREDIAL ANTERIOR
0	0	0	0	0	0.0	73024000100010000000
0	0	0	0	0	0.0	73024000100010000000
0	0	0	0	0	0.0	73024000100010000000
0	0	0	0	0	0.0	73024000100010000000
0	0	0	0	0	0.0	73024000100010000000

Fuente: subdirección de catastro IGAC, 2023

3.4. Método

3.4.1. Depuración de eventos sísmicos

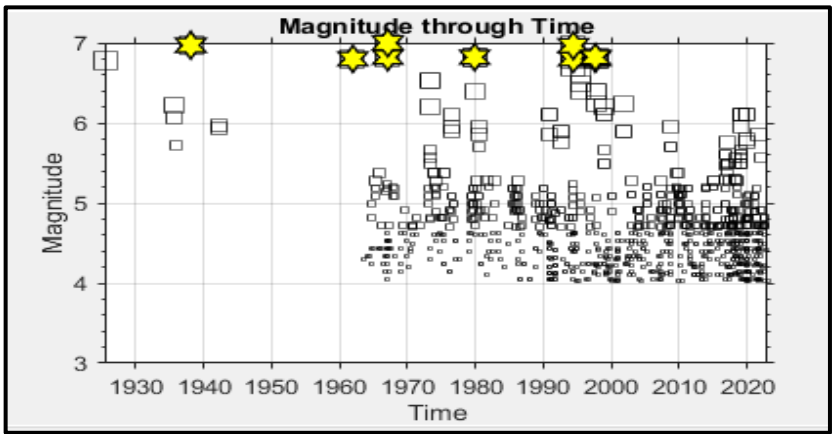
Los eventos sísmicos compilados se encontraban en diferentes medidas de magnitud, motivo por el cual se realizó una homogenización de magnitudes las cuales se convirtieron a Magnitud de Momento (Mw) con las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 mostradas previamente en la sección 2.2.1.1 del documento. Una vez estandarizados todos los eventos sísmicos en la misma magnitud se procedió a realizar una depuración que consistió en eliminar eventos repetidos y los que aquellos de magnitud inferior a 3.5 Mw, dado que estos sismos, aunque se registran por los sismógrafos no son perceptibles por el ser humano y al tener magnitudes bajas, el grado de incertidumbre es mayor al momento de ser utilizados en métodos matemáticos. (Villalón et al, 2018).

Posterior a esta depuración se realizó una desagrupación de los sismos con el fin de consolidar un catálogo con solo los eventos principales y descartar los eventos premonitorios y replicas para esto se utilizó la herramienta Zmap (versión 7) la cual es un conjunto de rutinas

programadas en el software Matlab con código abierto, esta herramienta ayuda a la depuración de los datos sísmicos para mejorar la calidad en los análisis en sismología. El software Zmap funciona únicamente si se tienen instalados los complementos de “Mapping Toolbox”, “Statistics and Machine Learning Toolbox”, “Parallel Computing Toolbox” y “Optimization Toolbox” en el software Matlab

Para el procesamiento en el software Zmap después de depuración se utilizó 1.705 eventos, del periodo comprendido entre junio de 1925 a diciembre de 2022 y cuyas magnitudes están entre 3.5 a 7.0 Mw; en la siguiente grafica se puede observar la cantidad de eventos registrados, tomando en cuenta su magnitud y año de ocurrencia. Se debe mencionar que después de 1960 se aumentó considerablemente el registro de los sismos y una posible razón puede estar asociada al uso de nuevas tecnologías en instrumentación geofísica del área sismología. Como se observa en la figura 8, en el cual se muestran eventos de mayor magnitud presentados y están representados por estrellas amarillas, cuyas magnitudes de momento (Mw) se encuentran en el intervalo de 6.6 a 7, para el periodo de estudio utilizado.

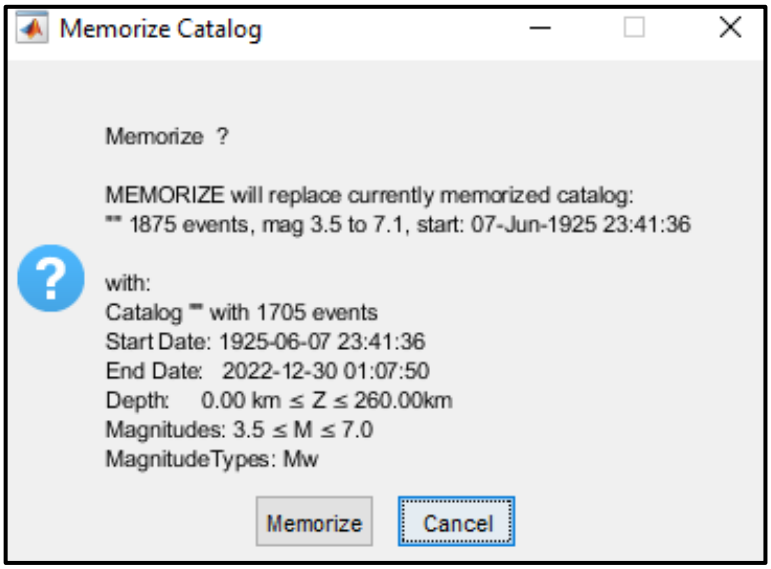
Figura 9. Magnitud Vs Tiempo



Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

Con los eventos ya depurados se procedió a utilizar la herramienta Zmap, la cual muestra un resumen de los datos a procesar, y los clasifica en rangos, de fecha, magnitud y profundidad tal como se muestra en la figura 10.

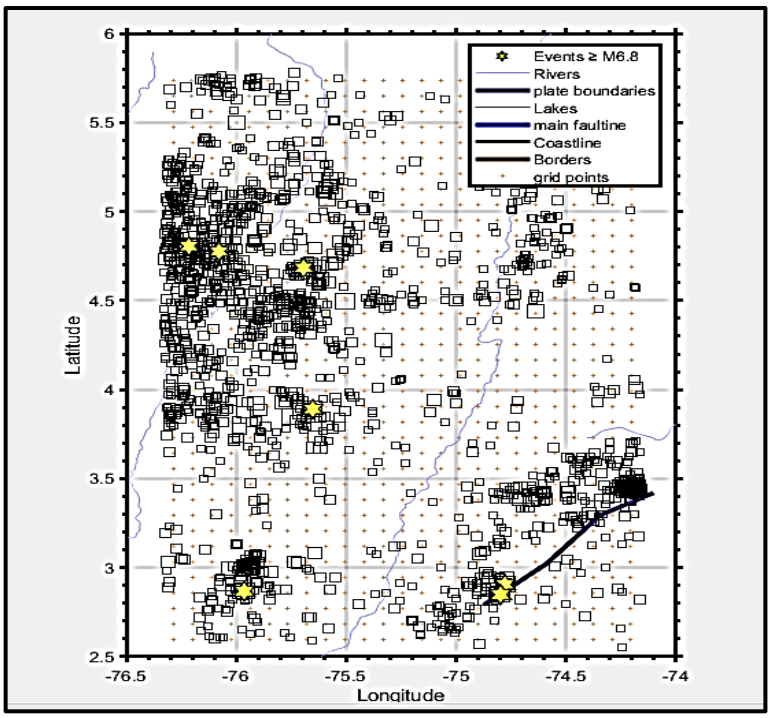
Figura 10. Resumen de datos ingresados



Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

Después de esto con la herramienta Zmap que funciona en Matlab, se pudo visualizar espacialmente la distribución de los sismos en la Figura 11 se presenta dicha distribución donde se evidenció mayor presencia de sismos con magnitudes (Mw) superiores a 4.5 se encuentran sobre el costado occidental del departamento, sin embargo, los eventos más representativos (Mw> 6.5) se ubican de forma dispersa sobre todo el departamento, estos se identifican con la simbología de una estrella amarilla.

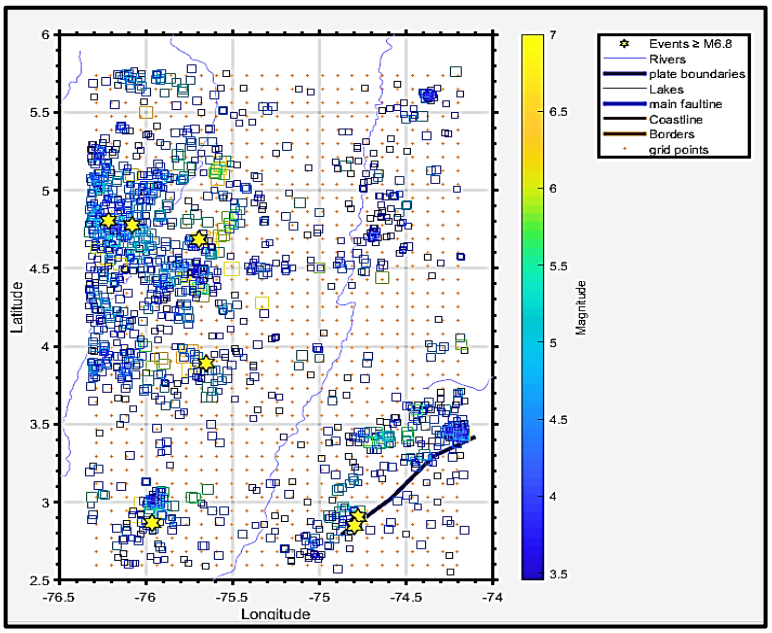
Figura 11. Distribución espacial de los sismos registrados



Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

En esta herramienta Zmap, se obtienen múltiples mapas para la interpretación de la información sismológica. Por ejemplo, algún factor principal de los sismos como la magnitud y profundidad. Entonces como se muestra a continuación en la figura 12 es posible observar la distribución de los sismos, resaltando en una escala de colores su magnitud, como puede notarse en la región noroccidental del área de estudio se tiene la mayor concentración de sismos y en la región suroriental se tiene la segunda región con mayor concentración de sismos, siendo muy específicos los eventos superiores a 6.5, localizados en estas dos zonas los cuales se destacan en con una estrella dorada y se sitúan en cercanías de las fallas activas del Romeral y de la falla Frontal de la Cordillera oriental, como se puede validar comparando la figura 12 con la figura 5.

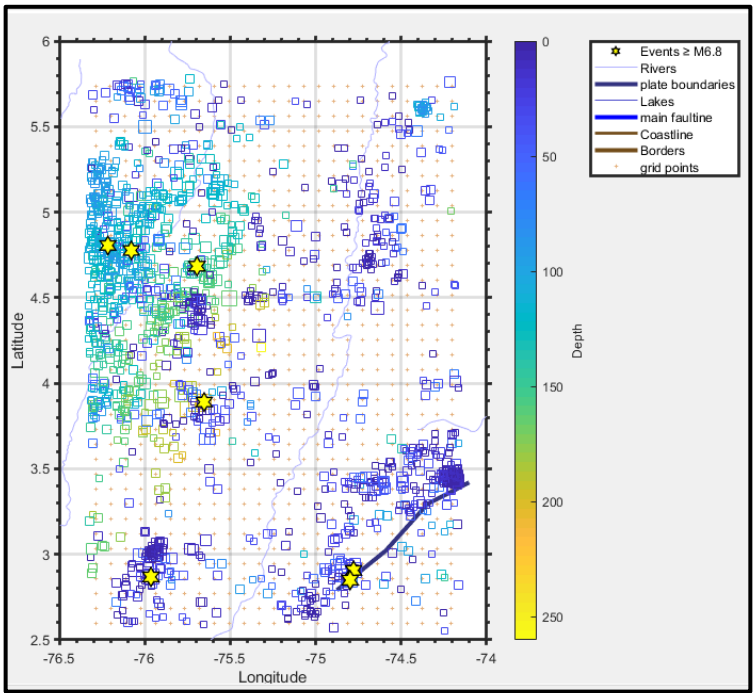
Figura 12. Distribución espacial de los sismos clasificados por magnitud



Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

En la figura 13 se puede observar la distribución de los sismos resaltando en una escala de colores su profundidad, se puede notar en la sección nororiental de la zona de estudio que los sismos presentados tuvieron profundidades entre los 100 a 220 km, mientras que en la sección suroccidental los sismos tienen profundidades entre los 10 a 100 km.

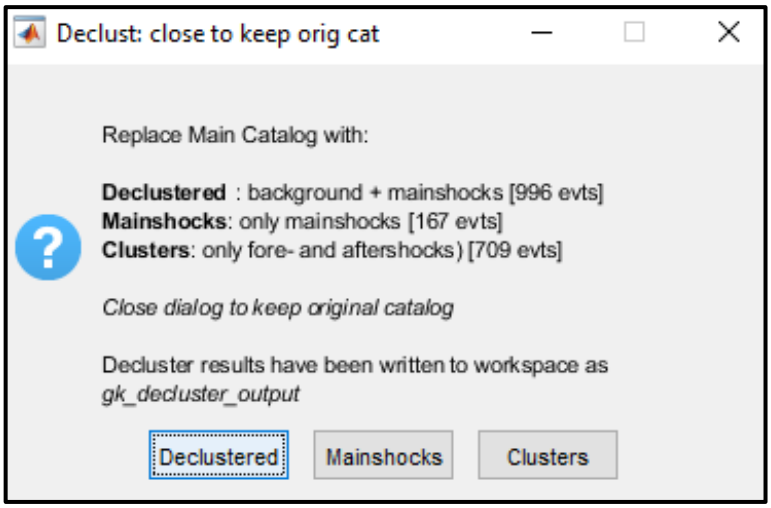
Figura 13. Distribución espacial de los sismos clasificados por profundidad



Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

Posterior a cargar los sismos en la herramienta Zmap, se procedió a realizar la desagrupación, el cual es un proceso realizado mediante el algoritmo de Gardner y Knopoff (1974) el cual identifica y remueve los sismos dependientes o replicas, tomando en cuenta factores espaciales y temporales de los eventos, dejando los datos de mayor relevancia o eventos principales, este resumen se puede observar en la figura 14.

Figura 14. Resumen de resultados Matlab

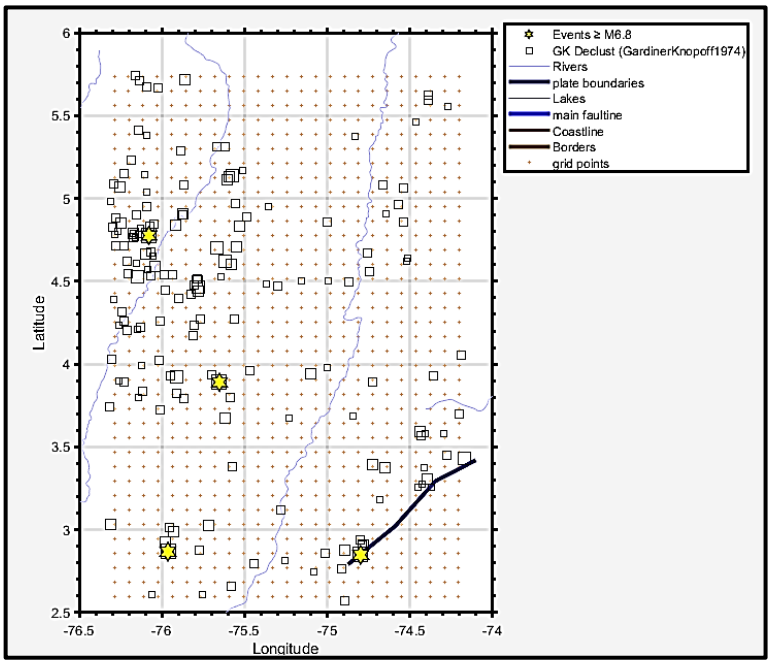


Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

Una vez aplicado el algoritmo de depuración, queda como resultado un total de 167 eventos principales y relevantes de acuerdo con el proceso matemático realizado por la herramienta, los cuales se puede observar espacial su distribución en la figura 15, donde se puede observar la

disminución de los eventos sísmicos en el área de estudio en comparación con la figura 11, dado que corresponden a la distribución de los eventos principales, los cuales son la base para la parametrización de las fuentes sismotectónicas al aplicar las ecuaciones 7, 8, 9 y 12.

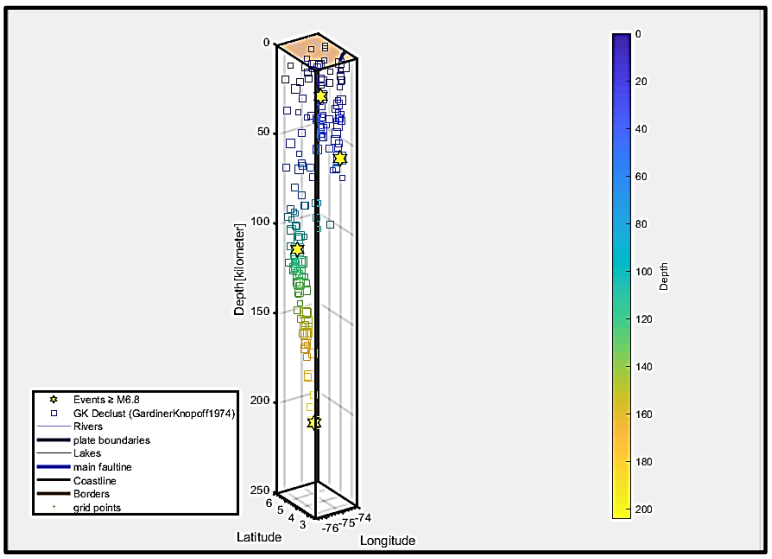
Figura 15. Distribución espacial de los sismos depurados



Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

Otra herramienta de visualización que permite usar Zmap es la representación 3D como se muestra en la figura 16, donde se evidencia la distribución espacial y profundidad de los sismos; en esta grafica se puede observar como en el área de estudio prevalecen sismos superficiales, los cuales tienen profundades menores a 100 km, por otra parte, se pueden observar sismos con una magnitud (Mw) mayor a 6.5 en las profundades de 20, 60, 120 y 220 km.

Figura 16. Distribución espacial de los sismos en función de su profundidad.



Fuente: Interfaz Zmap V7 Matlab

En resumen, se puede observar en la tabla 6 el resumen de la depuración de eventos, donde se tiene que en una fase inicial se depuraron 33.918 eventos los cuales corresponden al 95.2% del total de eventos que se muestran en la tabla 3, dejando así un total de 1.705 eventos a procesar mediante la herramienta Zmap como se ha explicado anteriormente, para dar un resultado final del proceso de desagrupación de 167 eventos, los cuales corresponden al 0.47% del total de eventos consultados y al 9.8% de los eventos procesados.

Tabla 6. Resumen de eventos depurados

Eventos totales	35.623
Eventos depurados	33.918
Eventos procesados	1.705
Eventos depurados por método Gardner y Konopoff (desagrupación)	1.538
Eventos resultados de la desagrupación	167

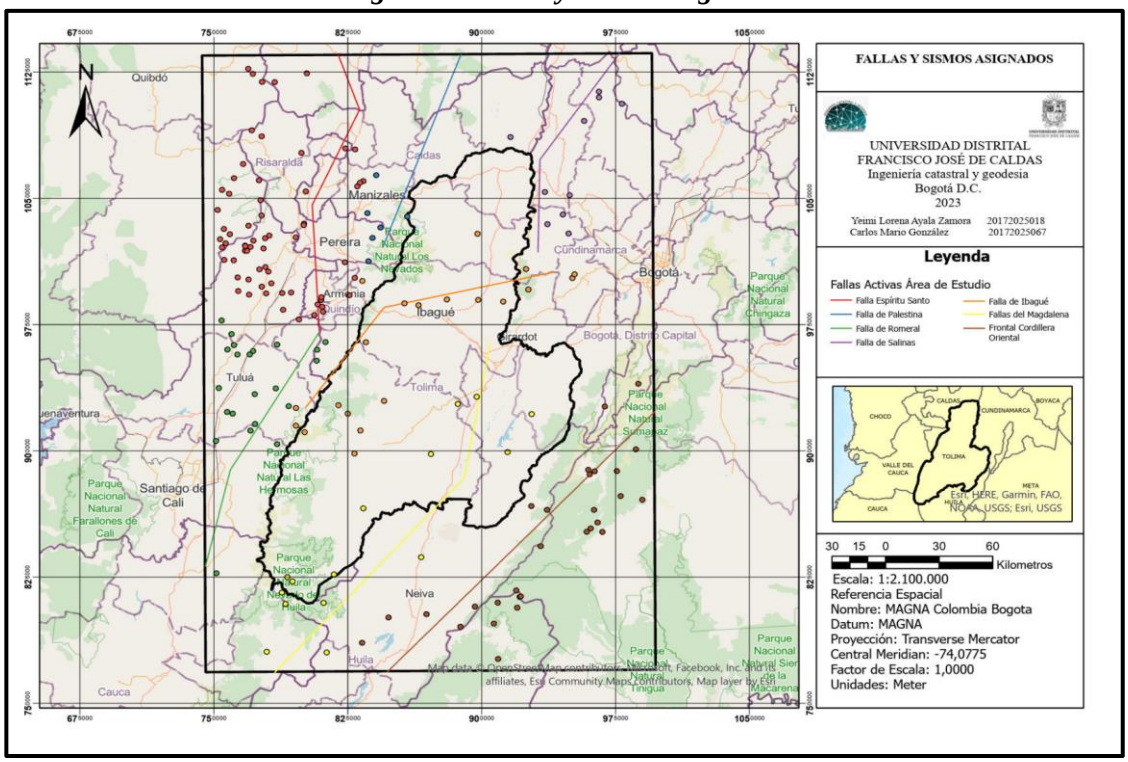
Fuente: Elaboración propia

El resultado final de la desagrupación entregó los sismos más representativos en la zona de estudio que se han presentado desde mayo de 1965 hasta agosto de 2022, y por ende los ideales para realizar la zonificación de susceptibilidad del riesgo sísmico

3.4.2. Parametrización De Fuentes Sísmicas

Una vez se obtuvieron los eventos representativos de la zona de estudio, se procedió a realizar la parametrización de las fallas activas en la zona de estudio, las cuales se pueden consultar en el ítem 2.3.3, para esto se asignó cada evento sísmico presentado a una falla activa, para esto se realizó una distribución de los sismos en cuadrantes o grilla de distancia de 500 m x 500 m y estos a su vez son asignados a la falla que tiene mayor influencia en cada uno de ellos, esto se muestra en el mapa 17 correspondiente a la figura 17.

Figura 17 Fallas y sismos asignados



Fuente: Elaboración propia, Datos base del Servicio Geológico Colombiano

Una vez realizada la asignación de sismos a cada falla, se aplicó el método de Máxima Verosimilitud para calcular los parámetros λ y β, aplicando las ecuaciones 7 y 8 del ítem 2.2.4 para esto se estableció una magnitud umbral (M_0) de 3.5 Mw por lo ya expuesto en el ítem 3.4.1.

Posterior a esto, se calculó el coeficiente de variación (Cv) aplicando la ecuación 8, para el dato de la magnitud ultima (Mu) se utilizó el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (2009), en donde por estudios previos se realizaron los cálculos de magnitudes ultimas de las fallas activas en Colombia.

Tabla 7 Magnitudes ultimas fallas activas

Fuente	Mo	Mu	Fuente	Mo	Mu
Arco de Dabeiba	4	6.9	Frontal Cordillera Oriental Sur	4	8
Bahía Solano	4	7.5	Garrapatas	4	6.5
Benioff Intermedia Sur	4	8	Ibagué	4	6.9
Benioff Intermedia Media	4	8	Junín	4	7
Benioff Intermedia Norte	4	8	Murindó	4	7.5
Benioff Profunda	4	7.5	Nido de Bucaramanga	4	6.5
Boconó	4	7.4	Normal Panamá Pacífico	4	7.1
Bucaramanga Santa Marta Norte	4	6.5	Oca	4	6.5
Bucaramanga Santa Marta Centro	4	6.5	Palestina	4	6.5
Bucaramanga Santa Marta Sur	4	6.9	Perijá	4	6.5

Fuente: AIS 2009

Tabla 7.1. Magnitudes ultimas fallas activas

Fuente	Mo	Mu	Fuente	Mo	Mu
Cauca	4	7.5	Puerto Redondo	4	6.7
Cimitarra	4	6.5	Romeral	4	7.6
Compresión Caribe SE	4	6.5	Romeral Norte	4	6.5
Compresión Caribe SW	4	6.1	Salinas	4	6.5
Cuiza	4	6.6	Suárez	4	6.5
Espíritu Santo	4	6.5	Subducción Norte	4	8.6
Fallas del Magdalena	4	7	Subducción Centro	4	8.6
Frontal Cordillera Oriental Norte	4	8	Subducción Sur	4	8.9
Frontal Cordillera Oriental Centro	4	8	Uribante-Caparro	4	7

Fuente: AIS 2009

El resumen de las fallas parametrizadas se puede encontrar en la tabla 8 en las cuales se definió su profundidad basándose en los eventos sísmicos asociados a cada una de ellas en un rango de exactitud del 95%. En esta tabla se comparan las fallas o fuentes sismotectónicas de estudio con los datos relevantes resultado de la parametrización anteriormente descrita, ya que de esta manera se muestra de forma comparativa los datos resultados de cada fuente sismotectónicas, dentro de los datos relevantes podemos observar la fecha del primer y último sismo asociado a cada falla, la magnitud (Mw) máxima y mínima que se presentó en ese periodo de tiempo, el total de eventos asociados a cada falla, la profundidad máxima a la que se presentaron el 95% de los eventos asociados a cada falla, la magnitud umbral establecida para el estudio, la magnitud ultima esperada, y los parámetros λ y β y su respectivo coeficiente de variación (Cv).

Tabla 8 Resumen parametrización

FALLA / ÍTEM	Falla de Ibagué	Falla de Palestina	Falla de Salinas	Falla de Magdalena	Falla Espíritu Santo	Falla del Romeral	Falla frontal Cordillera Oriental centro
Fecha Inicial	1979	1990	1985	1990	1965	1970	1967
Fecha Final	2019	2013	2016	2019	2022	2021	2021
Magnitud Max (Mw)	6,821	5,961	5,095	6,965	6,821	5,381	7
Magnitud Min (Mw)	3,6	3,7	4,141	3,855	3,5	3,6	3,5
Total, Eventos	20	6	10	15	65	22	29
Profundidad Km (95%)	10	120	30	5	20	30	7
Mo	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Mu	6,9	6,5	6,5	7	7	7,6	8
λ	0,487804878	0,25	0,3125	0,5	1,120689655	0,423076923	0,527272727
β	0,79377679	0,708633518	0,981643271	0,817438692	0,733179178	0,978996084	0,794237669
CV	0,229415734	0,447213595	0,333333333	0,267261242	0,125	0,21821789	0,188982237

Fuente. Elaboración propia

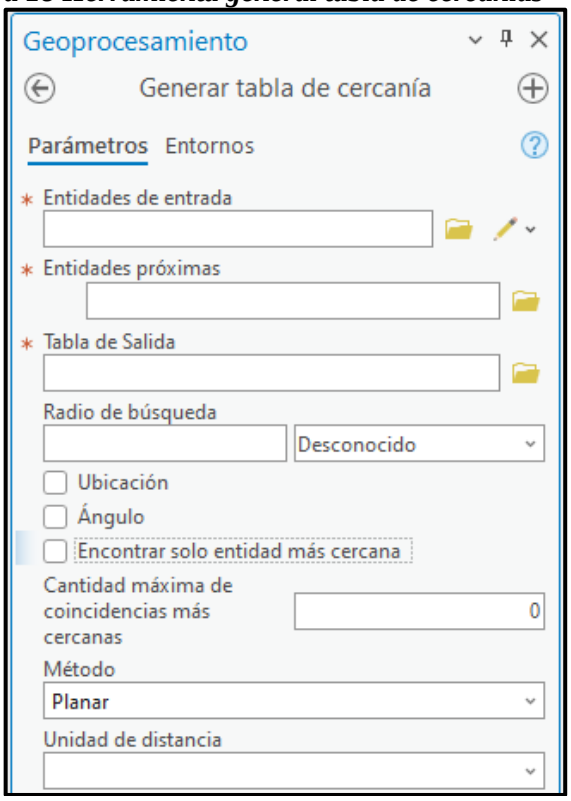
3.4.3. Cálculo De Tasa De Excedencia

Con la parametrización de las fallas, se procedió a calcular la tasa de excedencia, aplicando la ecuación 10, explicada con detalle en el ítem 2.2.5, en donde se utilizan las fórmulas planteadas por Gutenberg y Richter (1994) las cuales son una modificación y ajuste de las fórmulas de Cornell (1968), este dato es necesario para calcular el riesgo sísmico de un lugar determinado que está afectado por una o más fuentes sismotectónicas presentes en la zona.

3.4.4. Cálculo De Aceleraciones Horizontales – Relaciones De Atenuación

Para el cálculo de las aceleraciones horizontales se utilizó la ecuación de MacGuire (1974) explicada detalladamente en el ítem 2.2.6 y aplicando la ecuación 11; Para el cálculo de la distancia hipocentral (r), se calculó la distancia mínima de cada punto de interés a la falla asignada mediante la utilización de la herramienta "Generar tabla de cercanías" en el software ArcgisPro, la cual permite calcula la distancia mínima de una capa de puntos a múltiples objetos contenidos en otra capa seleccionada.

Figura 18 Herramienta general tabla de cercanías



Fuente: Interfaz ArcGIS Pro

3.4.5. Cálculo De La Amenaza Sísmica

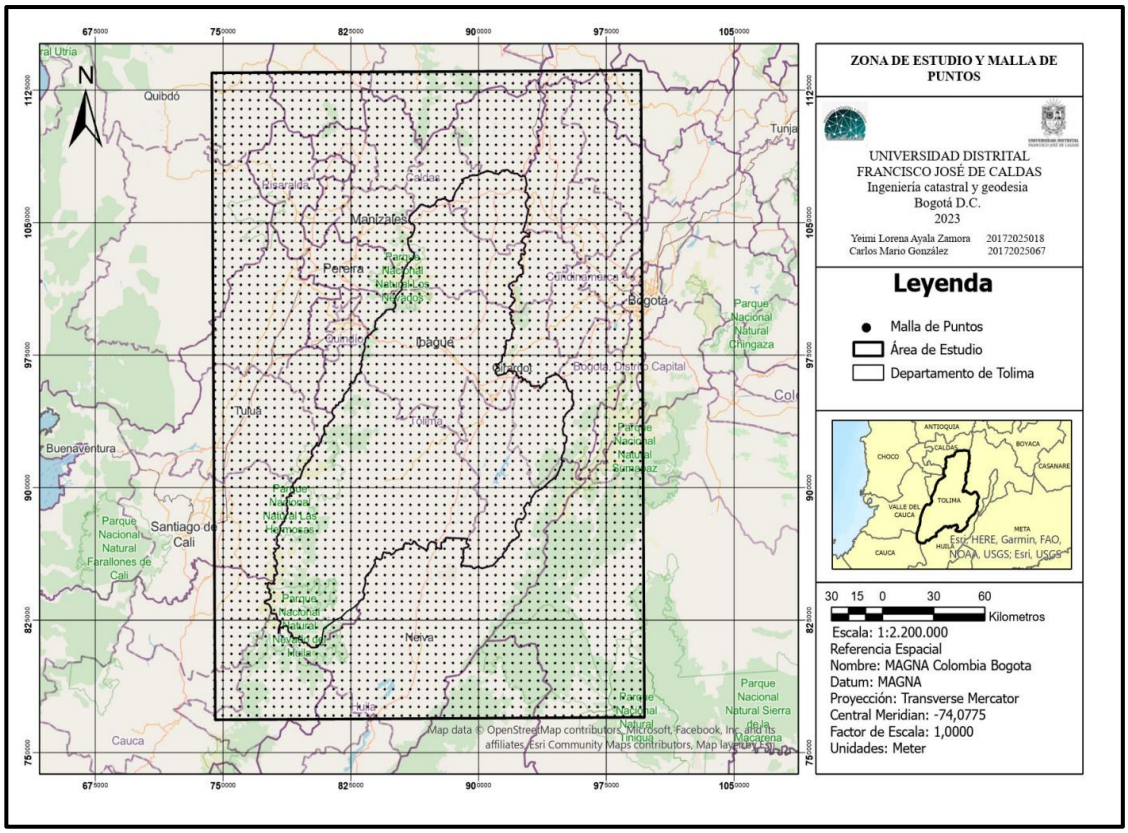
Con los datos de las aceleraciones horizontales para cada magnitud presentada en los datos obtenidos, se procedió a calcular la relación de estos con la tasa de excedencia de las fuentes sismotectónicas y a ajustar los datos de aceleraciones horizontales y periodos de retorno mediante ajuste de datos, lo cual se explica en el ítem 2.2.7.

Para el cálculo del periodo de retorno se utilizó la ecuación 12 y para el ajuste de datos se utilizaron las ecuaciones 13, 14, 15, 16 y 17, con estas relaciones se calcularon aceleraciones esperadas para periodos de retorno de 100, 500, 1000 y 2000 años.

3.4.6. Mapas De Amenaza Sísmica

Para la elaboración de los mapas de aceleraciones horizontales de terreno para cada periodo de retorno determinado se utilizó el software ArcgisPro, el cual permite realizar análisis de datos espaciales de forma precisa; para la evaluación de la amenaza sísmica se estableció una malla de puntos dentro del área de estudio definida en el ítem 3.2, los cuales tienen una distancia de 5 km entre sí, obteniendo un total de 3.774 puntos de investigación, como se observa en el mapa de la zona de estudio con la malla de puntos el cual corresponde con la figura 19, en donde se pueden ver la delimitación del área de estudio al igual que del departamento de Tolima y la distribución de los puntos de estudio.

Figura 19 Zona de estudio y malla de puntos



Fuente: Elaboración propia

Para cada punto de estudio se desarrolló la metodología propuesta en los ítems 3.4.2, 3.4.3 y 3.4.4, dando como resultado valores de aceleraciones horizontales de terreno para los diferentes periodos de retorno establecidos y tomando como el más significativo el que contaba con la aceleración horizontal de terreno más alta.

Por otra parte, se calcularon las aceleraciones horizontales de terreno utilizando la ayuda del lenguaje de programación nativo Microsoft VBA (Visual Basic para aplicaciones), el cual está

basado en el lenguaje de programación de Visual Basic y tiene como objetivo facilitar procesos repetitivos. El código en VBA utilizado para la optimización de procesos en el cálculo de las aceleraciones horizontales de terreno, consiste en la creación de una función donde se estableció una matriz unidimensional y unas variables que sirven como contadores, posterior a esto se procedió a rellenar la matriz utilizando apuntadores hacia las celdas donde se guardan las velocidades horizontales máximas de terreno, las cuales varían al aumentar en una unidad la celda de identificación, la cual controla los datos ingresados en las diferentes regresiones programadas con antelación.

```
Sub calculo aceleraciones ()
    Dim MatrizF () As Long
    Dim i As Long
    Dim f As Long

    Dim n As Integer
    n=1
    For i=1 To 999
        ReDim Preserve MatrizF (1 To i)
    Next i
    For f=Lboud(Matrizf) to Ubound(MatrizF)
        Hoja1.Cells (f).Value=[C12]
        [A12] = [A12] + n

    Next f

End sub
```

Una vez se corrió el algoritmo se alimentó automáticamente la base de datos con los puntos de investigación como se describió anteriormente, y dio como resultado un compilado ordenado de los datos por cada punto de investigación como se observa en la tabla 9, los resultados representados visualmente se pueden consultar los anexos 1.5 y 1.6 del presente documento.

Tabla 9 Muestra base de datos obtenida

PUNTO	Y(100)	Y(500)	Y(1000)	Y(2000)
0,00	34,00899641	90,958522	138,947191	212,2541304
1,00	34,59014464	92,512828	141,321531	215,8811446
2,00	35,19965835	94,142998	143,811761	219,6851911
3,00	35,83987983	95,855298	146,427451	223,6808883
4,00	36,51342915	97,656735	149,179304	227,8845885
5,00	37,22324778	99,555175	152,07934	232,3146498
6,00	37,9726509	101,55949	155,141102	236,9917624
7,00	38,76539043	103,6797	158,37992	241,9393427

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9.1. Muestra base de datos obtenida

PUNTO	Y(100)	Y(500)	Y(1000)	Y(2000)
8,00	39,60573152	105,92723	161,813218	247,1840099
9,00	40,4985461	108,3151	165,460902	252,7561703
10,00	41,44942795	110,85828	169,345826	258,6907353

Fuente: Elaboración propia

3.4.7. Parametrización de la Susceptibilidad

El desarrollo de la parametrización de la susceptibilidad sísmica se basa en un enfoque cualitativo, planteado por Shah y. Samal (2018) quienes hacen énfasis en la necesidad de definir las características propias de las edificaciones y sobre esa base se asignan porcentajes o pesos de acuerdo a la importancia de cada una de ellas, metodología que a su vez fue implementada por Zapata (2020) para el estudio del *"Modelo de diagnóstico de las estructuras de las edificaciones de las localidades de Chapinero y Bosa en el caso de un evento sísmico que afecte a Bogotá"*.

Para la asignación de pesos o porcentajes, se tomaron en cuenta cuatro categorías o características importantes en el análisis de susceptibilidad: el número de pisos de las construcciones, la litología, la pendiente y la amenaza sísmica. La última variable se obtuvo a partir de los resultados del ítem 3.4.6, donde se aplicó una tasa de retorno de 500 años.

En la tabla 10 se presenta la clasificación del número de pisos y la amenaza sísmica. Al número de pisos se le asignó un 20% del porcentaje total, el cual se dividió en 4 categorías. En la tabla se puede observar que, a mayor número de pisos, mayor es el peso asignado a esa variable. Por otro lado, a la amenaza sísmica se le asignó un 25% del porcentaje total y se clasificó en 3 intervalos iguales que permitieron categorizarla como baja, media o alta.

Tabla 10. Parametrización de construcciones y amenaza sísmica

Parámetro	Número de pisos				Amenaza Y(500)		
Clasificación	1	2 a 5	6 a 10	> 10	90-160	161-233	234-300
% Ponderado	20%				25%		
Peso	2%	4%	6%	8%	0%	10%	15%

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la litología, se llevó a cabo en ArcGIS la unión de todos los atributos que compartían la misma descripción. De esta manera, se obtuvieron un total de 14 categorías, las cuales se volvieron a clasificar según el tipo de roca, formaciones superficiales y materiales parentales, siguiendo la clasificación establecida por el IGAC. De esta forma, se consideró la categorización por grupo con un total de 7 tipos, como se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Clasificación litológica

Litología	Grupo	Subclase	Clase
Piroclastos sobre andesitas	Piroclásticos consolidados	Volcánicas	Ígneas
Tobas	Piroclásticos consolidados	Volcánicas	Ígneas
Cenizas volcánicas sobre andesitas y cuarzodioritas	Piroclásticos no consolidados	Clásticos	Depósitos superficiales
Mantos espesos de cenizas volcánicas sobre lahares	Piroclásticos no consolidados	Clásticos	Depósitos superficiales
Areniscas tobáceas y arcillolitas	Arenosas	Clásticas	Sedimentarias
Conglomerados y areniscas	Arenosas	clásticas	Sedimentarias
Arcillolitas	Limo-Arcillosas	clásticas	Sedimentarias
Lutitas	Limo-Arcillosas	clásticas	Sedimentarias
Aluviones finos y medios	Hidrogénicos	Clásticos	Depósitos superficiales
Flujos de lodo volcánico y aluviones heterométricos	Hidrogénicos	Clásticos	Depósitos superficiales
Sedimentos coluvio – aluviales	Hidrogénicos	Clásticos	Depósitos superficiales
Anfibolitas, neises y esquistos	De mediano grano	Dinamoter males	Metamórficas
Esquistos y arenas volcánicas	De bajo grado	Dinamoter males	Sedimentarias
Tonalitas (cuarzodioritas)	Félsicas	plutónicas	Ígneas

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis de pesos de acuerdo con los siguientes criterios: tipo de drenaje, textura y profundidad, a la litología se le asignó un 30% del porcentaje total y se clasificó teniendo en cuenta que, los suelos muy superficiales, imperfectamente drenados y de texturas finas son los que presentan mayor riesgo de remoción en masa y en este caso es a los que se le dio un mayor peso, tal como se muestra en la tabla 12.

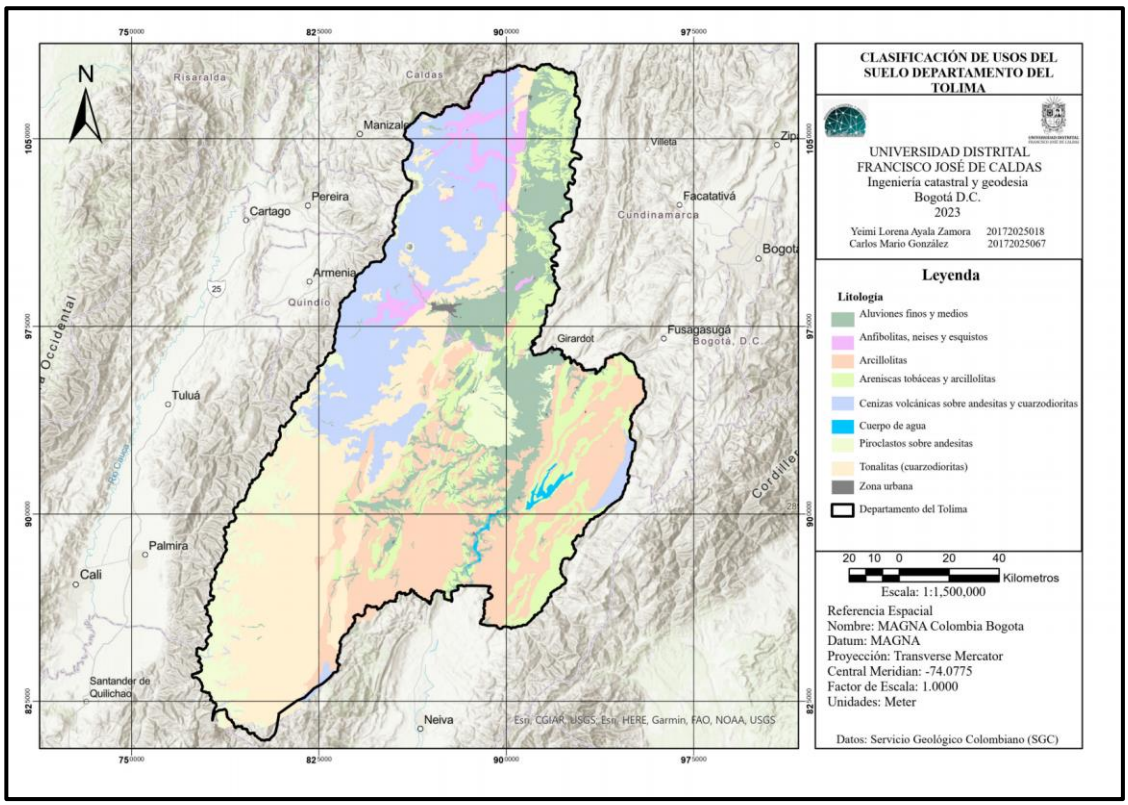
Tabla 12. Parametrización según litología

Parámetro	Zonificación litológica						
Clasificación	Areniscas	Piroclastos no Consolidados	Anfibolitas y esquistos	Piroclastos Consolidados	Tonalitas	Hidrogénicos	Limo-Arcillosas
% Ponderado	30%						
Peso	1%	2%	3%	4%	5%	6%	9%

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando esta información, se procedió a realizar la zonificación general de la litología, la cual se presenta en la figura 20. Además, en esta figura se muestra la clasificación de usos de suelos del departamento del Tolima.

Figura 20 Clasificación de usos del suelo Departamento de Tolima



Fuente: Elaboración propia, Datos base del Servicio Geológico Colombiano

Las pendientes fueron clasificadas de acuerdo con la descripción de relieves del shapefile de suelos del departamento del Tolima. Esta categorización se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el cual define 7 clases según los porcentajes de inclinación. Como se muestra en la tabla 13, se asignó mayor peso a los porcentajes de inclinación más altos, como los suelos moderada y fuertemente escarpados.

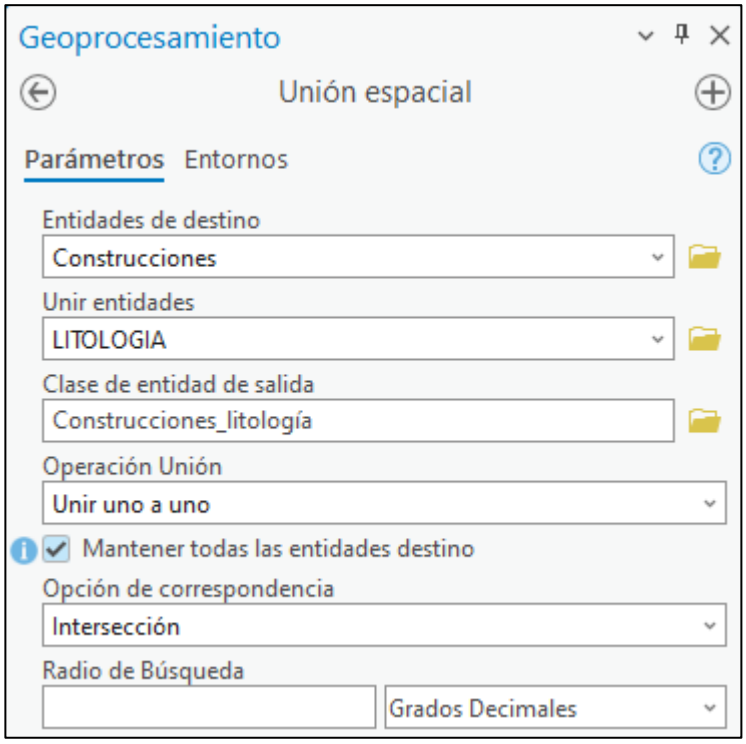
Tabla 13. Parametrización según pendiente

Parámetro	**Zonificación por pendiente**						
Clasificación	Plano (0-3%)	Ligeramente inclinado (3-7%)	Moderadamente inclinado (7-12%)	Fuertemente inclinado (12-25)%	Ligeramente escarpado (25-50%)	Moderadamente escarpado (50-75%)	Fuertemente escarpado (>75%)
% Ponderado	25%						
Peso	0%	1%	2%	3%	4%	6%	9%

Fuente: Elaboración propia, Datos IGAC.

Espacialmente se creó una capa o shapefile por cada una de las 4 categorías mencionadas y en sus atributos se asignó la descripción de la clasificación y el peso establecido, posteriormente se utilizó la herramienta de unión espacial que permite unir las tablas de atributos de 2 entidades de acuerdo con una opción de correspondencia, para todos los casos se utilizó la intersección.

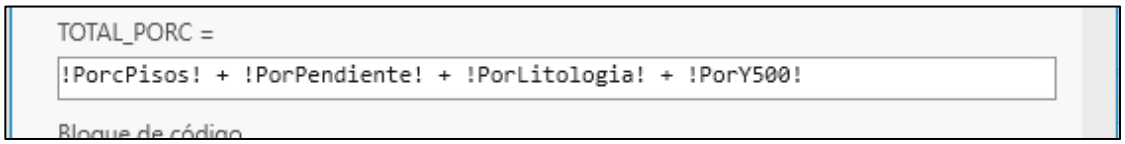
Figura 21. Unión espacial en ArcGIS



Fuente: Interfaz ArcGIS Pro

El procedimiento se llevó a cabo de forma consecutiva una vez que se realizó la primera unión. El shapefile resultante de dicha unión se utilizó para la siguiente unión, y así sucesivamente hasta unir las 4 capas necesarias. Una vez obtenida el último shapefile con la información de construcciones, pendiente, litología y amenaza, se creó una nueva columna en la tabla de atributos denominada "porcentaje total" y de tipo numérico. Este campo fue calculado mediante la suma de los pesos asignados a cada una de las 4 categorías.

Figura 22. Cálculo de campo en ArcGIS



Fuente: Interfaz ArcGIS Pro

A partir del análisis espacial previo, se generaron los mapas de susceptibilidad correspondientes a los municipios con una mayor representación urbana. Estos mapas se encuentran disponibles para su visualización en el anexo 1.4. No obstante, además de examinar dichos mapas, también

se llevaron a cabo análisis detallados de los resultados obtenidos en el capítulo 4 de esta monografía, específicamente en el ítem 4.1.3 de resultados.

3.4.8. Encuesta

La aplicación de una encuesta de percepción sísmica es de gran importancia, porque permite recopilar datos sobre cómo la población percibe y experimenta los eventos sísmicos, además este tipo de encuestas puede ayudar a identificar áreas y comunidades más vulnerables a los sismos y los daños potenciales que podrían ocurrir en caso de un terremoto. Además, los datos recopilados en la encuesta ayudan a mejorar las estrategias y medidas de mitigación en función de las necesidades y preocupaciones reales de la población, así como la planificación de políticas de reducción de desastres. Por tal motivo en la monografía se creó el formulario de la encuesta (*ítem 3.4.8.1*) y se aplicó en campo (*ítem 3.4.8.2*).

3.4.8.1. Creación del formulario

Para la creación del formulario se realizó una búsqueda de páginas web oficiales, encargadas de la gestión del riesgo sísmico que contaran con la sección de encuestas de percepción de sismos, dentro de la búsqueda se seleccionaron 4 páginas de países diferentes:

- BGS (Servicio Geológico Británico)
- USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos)
- RSN (Red Sismológica Nacional de Costa Rica)
- Red sísmica Nacional del Gobierno de España

Estas encuestas fueron tabuladas con el fin de identificar las preguntas más repetidas y las que pudiesen generar más impacto en la aplicación, además para tener claridad sobre los tipos de datos que se debían capturar. En la tabla 14, se muestra la encuesta traducida aplicada por el Servicio Geológico Británico. En esta encuesta se identificaron un total de 12 preguntas, de las cuales 10 eran de opción múltiple y única respuesta. Las dos preguntas restantes requerían información de ubicación y correo electrónico del encuestado. Además, se destacan las preguntas con condicionales, donde la respuesta a una opción específica generaba una pregunta adicional.

Tabla 14. Encuesta de percepción sísmica aplicada por el BGS

NOMBRE	**Servicio Geológico Británico (BGS)**
LINK	http://earthquakes.bgs.ac.uk/questionnaire/EqQuestPage1.html
1.	**Ubicación, Dirección, código postal** (*)
2.	**Correo electrónico**

Fuente: Elaboración propia, datos Servicio Geológico Británico.

Tabla 14.1. Encuesta de percepción sísmica aplicada por el BGS

NOMBRE	Servicio Geológico Británico (BGS)	
3.	**¿Dónde estaba?** Aire Libre Planta Baja Piso Superior Vehículo estacionado Vehículo en Movimiento Otro	**Condicionales** Tipo de edificio y tipo de construcción (Como materiales) Número de piso en el que estaba
4.	**¿Qué estaba haciendo?** Durmiendo Acostado De pie Caminando Arrodillado Otro	
5.	**¿Qué describe mejor el temblor que sintió?** Sin sacudidas Temblor Balanceo Movimiento espasmódico Impacto Movimiento Rodante Otro	**Fue:** Débil Moderado Severo
6.	**¿Qué describe mejor cualquier sonido que haya escuchado?** Sin sonido Retumbando Rugido Explosión Otro	**Fue:** Tenue Moderado Alto
7	**¿Qué describe mejor lo que pasó dónde estabas?** Nadie lo notó Solo una o dos personas lo notaron, pero no muchas Mucha gente lo notó La mayoría de la gente Todos lo notaron Las personas adentro lo notaron, pero no las de afuera La gente de arriba lo notó, pero no los de la planta baja No sé si otras personas lo notaron o no	

Fuente: Elaboración propia, datos Servicio Geológico Británico.

Tabla 14.2. Encuesta de percepción sísmica aplicada por el BGS

NOMBRE	Servicio Geológico Británico (BGS)
8.	**Solo para terremotos de noche** **¿Te despertó el terremoto?** Si ____ No____ **¿Había otras personas donde se despertó?** Nadie__ Me despertaron, pero no hubo otros___ No me despertaron, pero otros si__ Me despertaron y otros también___ no sé___
9.	**¿Tuviste miedo?** No___ Si___ **Donde estabas, ¿Alguien salió corriendo asustado?** No__ Si un poco___ Si muchos____ Si, la mayoría/todos ____ No sé____
10.	**¿Se asustó algún animal cercano?** No__ Si__ No hay animales cerca/ No sé __

Fuente: Elaboración propia, datos Servicio Geológico Británico.

En la tabla 15 se muestra la traducción de la encuesta que realiza el Servicio Geológico de los Estados Unidos para el reporte de sensación sísmica, se identificaron 16 preguntas, 14 de ellas de opción múltiple y única respuesta, dos con diferente formato de pregunta, una de ubicación y la otra referente al tiempo (Fecha y hora).

Tabla 15.Encuesta de percepción sísmica aplicada por el USGS

NOMBRE	USGS	
LINK	https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/tellus	
1.	**¿Lo sentiste?** Si No	
2.	Tiempo de terremoto (Hora) y Ubicación cuando ocurrió el terremoto	
3.	**¿Cuál era su situación durante el terremoto?** No especificado Dentro de un edificio Fuera de un edificio En un vehículo detenido En un vehículo en movimiento Otro	**Condición dentro de un edificio:** Bajo tierra Planta baja 2do piso 3er piso Otro **Especificar # de piso**

Fuente: Elaboración propia, datos USGS

Tabla 15.1.Encuesta de percepción sísmica aplicada por el USGS

NOMBRE	USGS
4.	**¿Estabas dormido?** No especificado No Dormí mientras ocurrió Despertó
5.	**¿Cómo describirías el temblor?** No especificado No sentía Débil Templado Moderado Fuerte Violento
6.	**¿Oyó crujidos u otros ruidos?** No especificado No Si, ligero ruido Si, ruido fuerte
7.	**¿Cómo reaccionaste?** No especificado Sin reacción/ no sentido Muy poca reacción Agitado Algo asustado Muy asustado Extremadamente asustado
8.	**¿Cómo respondiste?** No especificado No tomó ninguna acción Movido a la puerta Caído y cubierto Corrió Afuera Otro
9.	**¿Fue difícil ponerse de pie y/o caminar?** No especificado Si No
10.	**¿Otros cercanos lo sintieron?** No especificado Ningún otro lo sintió Algunos lo sintieron, la mayoría no La mayoría lo sintió Todos/ Casi todos lo sintieron

Fuente: Elaboración propia, datos USGS

Tabla 15.2. Encuesta de percepción sísmica aplicada por el USGS

NOMBRE	USGS
11.	**¿Notó que las puertas se balanceaban u otros objetos que colgaban libremente?** No especificado No Si, ligero balanceo Si, balanceo violento **¿Los objetos traquetearon, se volcaron o se cayeron de los estantes?** No especificado No Sacudido ligeramente Sacudió en voz alta Algunos se derrumbaron o se cayeron Muchos se cayeron Casi todo se cayó **¿Se movieron o se torcieron las imágenes en las paredes?** No Si, pero no se cayó Si y algunos se cayeron **¿Algún mueble o electrodomésticos se resbaló, se volcó o se desplazó?** No especificado No Si
12.	**¿Hubo algún daño en el edificio?** Sin daños Grietas finas en las paredes Algunas grietas grandes en las paredes Muchas grietas grandes en las paredes Se cayeron las tejas del techo o los accesorios de iluminación La mampostería se cayó de las paredes de bloques o ladrillos Edificio desplazado permanentemente sobre cimientos

Fuente: Elaboración propia, datos USGS

En la tabla 16 se muestra la encuesta que realiza la Red Sismológica Nacional de Costa Rica, donde se identificó un total de 12 preguntas, 11 de ellas de opción múltiple con única respuesta y una pregunta de ubicación.

Tabla 16.Encuesta de percepción sísmica aplicada por la RNS

NOMBRE	**Red Sismológica Nacional (RSN) Costa Rica**	
LINK	https://rsn.ucr.ac.cr/losentiste/	
1	**¿Lo sentiste?** Si No	
2	**¿Dónde estabas?**	
3	**¿Qué estabas haciendo?** En reposo En movimiento Durmiendo y me despertó	**En movimiento:** Caminando Viajando en automóvil
4	**¿En qué lugar?** Dentro de una edificación Fuera de una edificación	**Dentro de una edificación:** Piso 1 o 2 Piso 3 o más
5	**¿Personas cerca tuyo lo sintieron?** No Estaba solo Algunos La mayoría Todos	
6	**¿Cómo describirías el movimiento?** Débil Moderado Fuerte Violento	
7	**¿Cómo reaccionaste?** No reaccioné Mantuve la calma Me asusté Me asusté mucho Entré en pánico	
8	**¿Fue difícil caminar o mantenerse en pie?** No Si No aplica	
9	**¿Los objetos livianos se desplazaron o cayeron de los estantes?** No Pocos Muchos No aplica	

Fuente: Elaboración propia, datos RNS

Tabla 16.1. 17Encuesta de percepción sísmica aplicada por la RNS

NOMBRE	Red Sismológica Nacional (RSN) Costa Rica
10	**¿Los cuadros se cayeron?** No Si No aplica
11	**¿Los muebles se volcaron o cayeron?** No Si No aplica
12	**¿Hubo algún daño en las edificaciones?** No Paredes agrietada Colapso de edificios antiguos No aplica

Fuente: Elaboración propia, datos RNS

Y por último se realizó la búsqueda en la Red Sísmica Nacional del Gobierno de España en la que se encontraron 11 preguntas, 9 de ellas de opción múltiple con única respuesta y las otras corresponden a fecha y ubicación, en este caso la ubicación no recibe como respuesta la geometría capturada por GPS, sino que son varías preguntas como país, municipio, código postal y deja la pregunta abierta para que la población escriba su dirección, en la tabla 17 se muestran las preguntas para los usuarios que quieren reportar un evento.

Tabla 18.Encuesta de percepción sísmica aplicada por la Red Sísmica de España

NOMBRE	Red sísmica Nacional del Gobierno de España
LINK	https://www.ign.es/web/resources/cuestionario-macrosismico/cuesma.php?vEvid=&vFecha=&vHora=&vLoc=&locale=es_ES
1	**Ubicación durante el terremoto** País Provincia Municipio/Departamento Código postal
2	**¿Dónde estaba?** Al aire libre En movimiento Quieto Dormido En un edificio de ___ plantas, en el piso ___ En un vehículo Otro___

Fuente: Elaboración propia, datos Red Sísmica de España.

Tabla 17.1. Encuesta de percepción sísmica aplicada por la Red Sísmica de España

NOMBRE	Red sísmica Nacional del Gobierno de España
3	**¿Sintió usted el terremoto?** No Si **¿Oyó ruido?** No Si **Terremoto del día** dd/mm/aaaa
4	**¿Cómo describiría el movimiento durante el terremoto?** No sentí movimiento Muy leve Leve Moderado Fuerte Violento
5	**¿Qué reacción tuvo durante el terremoto?** Ninguna Pequeña reacción Me alarmé Sentí miedo Mucho miedo Pánico
6	**¿Le resultó difícil estar de pie?** No estaba de pie Si No
7	**¿Cerca de usted cuantos sintieron el terremoto?** Dentro de edificios No sé_ Nadie_ Algunos_ La mayoría_ Todos_ Fuera de edificios No sé_ Nadie_ Algunos_ La mayoría_ Todos_ ¿Corrieron personas a la calle? No sé_ Nadie_ Algunos_ La mayoría_ Todos_ ¿Cuántos despertaron? No sé_ Nadie_ Algunos_ La mayoría_ Todos_
8	**Efectos que observó en los objetos** Lámparas colgadas No pude observar_ Nada_ Oscilación_ Gran Oscilación_ Líquidos en recipientes No pude observar_ Nada_ Oscilación_ Gran Oscilación_ Cuadros colgados en la pared No pude observar_ Nada_ Vibración_ Se cayó_ Puertas y ventana No pude observar_ Nada_ Vibración_ Se abrieron_ Muebles No pude observar_ Nada_ Vibración_ Volcaron_
9	**¿Hubo algún daño en las edificaciones?** No Paredes agrietada Colapso de edificios antiguos No aplica

Fuente: Elaboración propia, datos Red Sísmica de España.

Una vez se realizó la selección y la formulación de nuevas preguntas para la encuesta, se hizo uso de la licencia Enterprise de ArcGIS que brinda la Universidad Distrital Francisco José de Caldas para llevar a cabo el proceso de creación y diseño de la encuesta; con el propósito de que la información capturada pueda ser administrada desde la misma cuenta que se crea. Para el diseño de la encuesta se utilizó el complemento de ArcGIS Survey123 y a su vez se descargó la aplicación Survey123 Connect para ordenador, que permitió la creación del formulario con opciones mucho más avanzadas en comparación con la versión que ofrece ArcGIS Online. En la figura 23, se observa el inicio de la aplicación Survey 123 Connect para ordenador.

Figura 23. Inicio de la aplicación Survey 123 Connect.



Esta aplicación cuenta con un libro de Excel denominado XLSForm, donde se creó y diseño toda la encuesta, en la hoja 1 denominada "*survey"* se generó fila a fila los componentes del formulario, título, imágenes, logos, y todas las preguntas; en la primer columna se definió el tipo de pregunta, en este caso 18 preguntas fueron de tipo "***select_one"*** que corresponde a una pregunta de opción múltiple donde solo se puede seleccionar una respuesta, así mismo se incluyó una pregunta tipo "***geopoint"*** que hace referencia a la ubicación durante el sismo y guarda el dato como un punto con su respectiva coordenada y por último se creó una pregunta tipo **"*dateTime*"** para capturar fecha y hora del evento, la segunda y tercer columna de esta hoja hacen referencia al nombre de la pregunta y la respectiva etiqueta, es decir cómo se va a mostrar para el usuario.

Tabla 19. Hoja (1) XLS Form de survey123 Connect.

type	name	Label	guidance_hint	appearance	required
note	generated_note_form_title				
note	generated_note_form_submit_text	Enviar			
note	generated_note_form_footer	Con tecnología de ArcGIS Survey123			
select_one list__sinti_el_sismo	_sinti_el_sismo	¿Sintió el sismo?		horizontal	yes
dateTime	fecha_y_hora	Fecha y hora del evento			yes
geopoint	ubicaci_n_durante_el_terremoto	Ubicación durante el sismo		hide-input	yes

Fuente: Survey 123 Connect

Tabla 18.1. Hoja (1) XLS Form de survey123 Connect.

type	name	Label	guidance_hint	appearance	required
select_one list__d_nde_estaba	_d_nde_estaba	¿Dónde estaba?		minimal	yes
text	_d_nde_estaba_other	Otro			
select_one list_condici_n_dentro_de_un_edificio	condici_n_dentro_de_un_edificio	Condición dentro de un edificio		minimal	
text	condici_n_dentro_de_un_e_other	Otro			
decimal	numero_de_pisos_del_edificio	Cuántos pisos tenía el edificio en el que se encontraba			yes
select_one list__qu_estaba_haciendo	_qu_estaba_haciendo	¿Qué estaba haciendo?		minimal	yes
text	_qu_estaba_haciendo_other	Otro			
select_one list_fue	fue	¿Cómo describiría el movimiento durante el terremoto?		horizontal	yes
select_one list__c_mo_describe_mejor_cualquier	_c_mo_describe_mejor_cualquier	¿Cómo describe mejor cualquier sonido que haya escuchado?		minimal	yes
text	_c_mo_describe_mejor_cualquier_other	Otro			
select_one list__qu_describe_mejor_lo_que_pas_d	_qu_describe_mejor_lo_que_pas_d	¿Qué describe mejor lo que pasó dónde estabas?		minimal	
begin group	cerca_de_usted_cu_ntos_sintiero	Cerca de usted, ¿Cuántos sintieron el sismo?		table-list	

Fuente: Survey 123 Connect

Así mismo existen columnas para mostrar información adicional al usuario, modificar la apariencia, la obligatoriedad o la condicionalidad, es decir la posibilidad de omitir preguntas o hacer que aparezcan nuevas preguntas en función de la respuesta dada a una pregunta anterior, es por esta razón que el número total de preguntas varía dependiendo de las respuestas que da cada encuestado, es importante destacar que las reglas de condicionalidad solo se pueden establecer en preguntas de selección única o de clasificación, para este caso todas las preguntas se dejaron obligatorias. En la tabla 19 se pueden ver las reglas definidas para las preguntas condicionadas, por ejemplo, el encuestado debe responder que sintió el sismo para que se habiliten las preguntas "¿Dónde estaba?, ¿Qué estaba haciendo?, ¿Cómo describiría el movimiento durante el terremoto?, ¿Cómo describe mejor cualquier sonido que haya escuchado?, ¿Qué describe mejor lo que pasó dónde estabas? y cerca de usted, ¿Cuántos sintieron el sismo?".

Tabla 20. Reglas definidas como condicionales Survey123.

Label	relevant
¿Dónde estaba?	${_sinti_el_sismo}='Si'
Otro	selected(${_d_nde_estaba}, 'other')
Condición dentro de un edificio	${_d_nde_estaba}='Planta baja' or ${_d_nde_estaba}='Piso superior'
Otro	selected(${condici_n_dentro_de_un_edificio}, 'other')
Cuántos pisos tenía el edificio en el que se encontraba	${_d_nde_estaba}='Planta baja' or ${_d_nde_estaba}='Piso superior'
¿Qué estaba haciendo?	${_sinti_el_sismo}='Si'
Otro	selected(${_qu_estaba_haciendo}, 'other')
¿Cómo describiría el movimiento durante el terremoto?	${_sinti_el_sismo}='Si'
¿Cómo describe mejor cualquier sonido que haya escuchado?	${_sinti_el_sismo}='Si'
Otro	selected(${_c_mo_describe_mejor_cualquier}, 'other')
¿Qué describe mejor lo que pasó dónde estabas?	${_sinti_el_sismo}='Si'
Cerca de usted, ¿Cuántos sintieron el sismo?	${_sinti_el_sismo}='Si'

Fuente: Elaboración propia, Software survey123 connect.

En la tabla 20 se puede ver una parte de la segunda hoja llamada ***"Choices"***, esta es útil para las preguntas tipo "Select" ya sean de única o múltiple respuesta, en esta hoja se crearon los listados de las posibles respuestas de cada pregunta tipo "Select" en la hoja anterior, en la primer columna cada opción se creó con el nombre de "list_name", donde "name" hace referencia el nombre que se le asigno a cada pregunta, para estos listados se crearon tantas filas con el mismo nombre como opciones tuviera esa pregunta; como en la hoja anterior, también existen columna de nombre y etiqueta, pero esta vez para la opción de respuesta.

Tabla 21. Hoja (2) XLS Form "Choices" de survey123 Connect.

list_name	name	label
list__sinti_el_sismo	Si	Si
list__sinti_el_sismo	No	No
list__d_nde_estaba	Aire libre	Aire libre
list__d_nde_estaba	Planta baja	Planta baja
list__d_nde_estaba	Piso superior	Piso superior
list__d_nde_estaba	Vehículo estacionado	Vehículo estacionado
list__d_nde_estaba	Vehículo en movimiento	Vehículo en movimiento
list__d_nde_estaba	Other	Otro
list_condici_n_dentro_de_un_edificio	Bajo tierra	Bajo tierra
list_condici_n_dentro_de_un_edificio	Planta baja	Planta baja
list_condici_n_dentro_de_un_edificio	2do piso	2do piso

Fuente: Survey 123 Connect

Tabla 20.1. Hoja (2) XLS Form "Choices" de survey123 Connect.

list_name	name	label
list_condici_n_dentro_de_un_edificio	3er piso	3er piso
list_condici_n_dentro_de_un_edificio	Other	Otro
list__qu_estaba_haciendo	Durmiendo	Durmiendo
list__qu_estaba_haciendo	Acostado	Acostado
list__qu_estaba_haciendo	De pie	De pie
list__qu_estaba_haciendo	Caminando	Caminando
list__qu_estaba_haciendo	Arrodillado	Arrodillado
list__qu_estaba_haciendo	Other	Otro
list_fue	No sentí movimiento	No sentí movimiento
list_fue	Muy leve	Muy leve
list_fue	Leve	Leve
list_fue	Moderado	Moderado
list_fue	Fuerte	Fuerte
list_fue	Violento	Violento

Fuente: Survey 123 Connect

La hoja 3, corresponde a configuraciones avanzadas de diseño, pero este caso no se hizo uso de esta. La hoja 4 ***"types"*** se puede ver en la tabla 21 y es la explicación de las hojas anteriores, da la descripción de columna por columna, de los tipos de datos que se puede capturar en los formularios, las operaciones que se pueden realizar con los datos y los ejemplos de cómo aplicar operaciones, en resumen, es una guía y ayuda detallada sobre cómo usar las herramientas del XLSForm.

Tabla 22.Hoja (4) XLS Form "Types" de survey123 Connect.

Field Types	
integer	Integer (i.e., whole number) input.
decimal	Decimal input.
range	Input for a given range of numbers.
text	Free text response.
select_one [list_name]	Multiple choice question; only one answer can be selected. Edit to reference the correct list name. Ignore any warnings after changing values.
select_multiple [list_name]	Multiple choice question; multiple answers can be selected. Edit to reference the correct list name. Ignore any warnings after changing values.
rank [list_name]	Ranking question; order a list of choices. Replace 'list_name' with the name of your choice list on the choices sheet.
note	Display a note on the screen, takes no input.
geopoint	Collect a single GPS coordinate.
geotrace	Collect a line on a map.
geoshape	Collect a polygon on the map.
date	Date input.
time	Time input.

Fuente: Survey 123 Connect

Tabla 21.1. Hoja (4) XLS Form "Types" de survey123 Connect.

Field Types	
dateTime	Date and time input.
image	Take a photo with the camera or upload an image file.
begin group	Begin a group of questions.
end group	End a group of questions.
begin repeat	Begin a set of repeating questions.
end repeat	End a set of repeating questions.
calculate	Performs a calculation on values in the form. The calculate field will contain the outcome of the calculation. This is a hidden field, not visible on the form.

Fuente: Survey 123 Connect

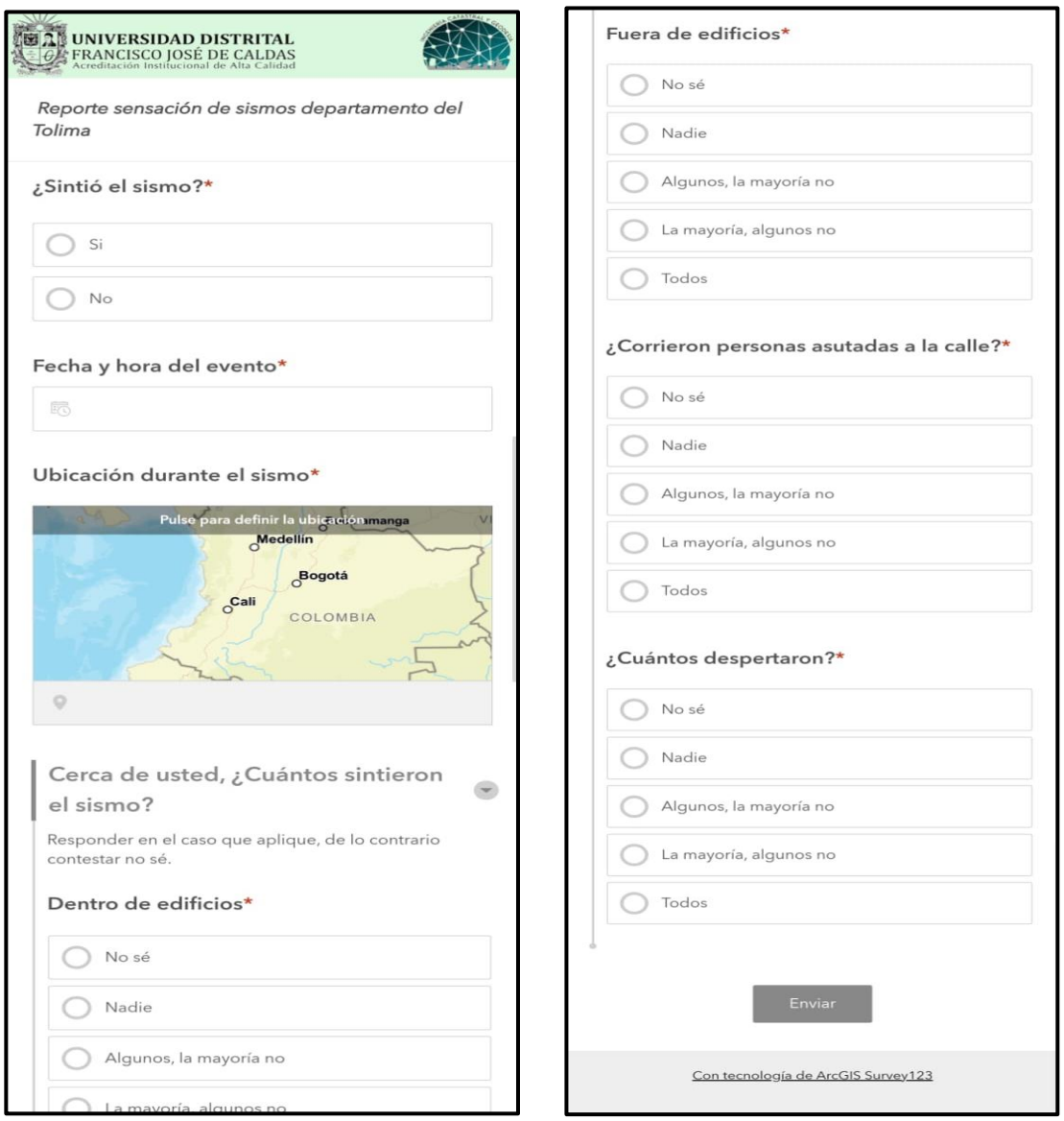
Una vez se generaron los tipos de datos de cada pregunta, desde la página web de Survey 123 se diseñó la presentación visual de la encuesta, como es el encabezado, las imágenes y colores para publicar la encuesta y además se definió la configuración de la publicación, como la privacidad de la encuesta y los resultados; así mismo, se editó, se guardó y se publicó la encuesta para que fuese posible su diligenciamiento por cualquier usuario con acceso a él link (https://arcg.is/1Oj9i10) o código QR que se muestra en la figura 24.

Figura 24 Código QR Encuesta

Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 se puede ver la versión final de la encuesta, es decir, como la ve el usuario al escanear el código o abrir el link, los asteriscos rojos al lado de cada pregunta indican la obligatoriedad de la misma, si no se responde no se puede enviar la encuesta, la captura de la fecha automáticamente se llena con los datos actuales pero esta se puede modificar en el caso de reportar eventos sísmicos pasados, en cuanto a la ubicación, se busca activar el GPS del dispositivo con el que se esté diligenciando la encuesta pero el usuario también puede marcar la ubicación en otro lugar.

Figura 25.Vista del formulario desde página web

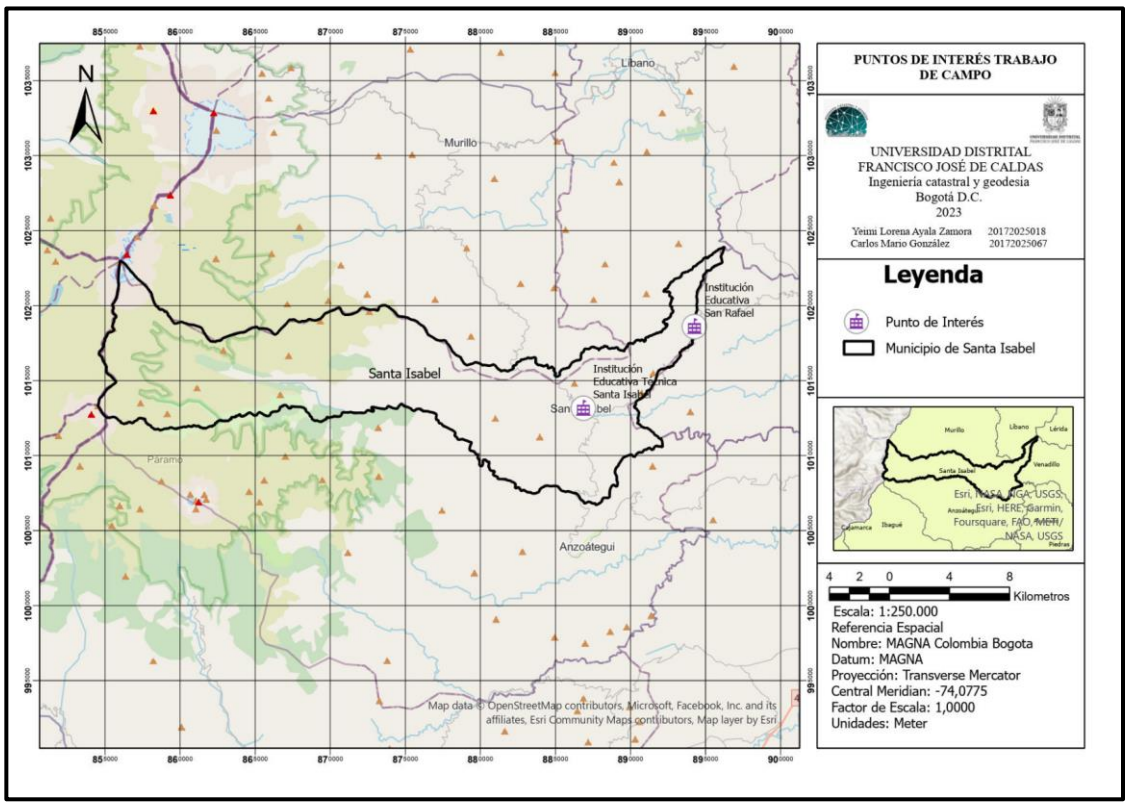


3.4.9. Implementación encuesta

La implementación de la encuesta se realizó de forma presencial el 10 de abril de 2023, en el municipio de Santa Isabel Tolima, en la Institución Educativa Técnica Santa Isabel y en la Institución Educativa San Rafael, en las cuales se solicitó permiso a sus directivas mediante oficio remitido vía correo certificado; la institución educativa técnica Santa Isabel se encuentra ubicada en el perímetro urbano del municipio y la Institución educativa San Rafael se encuentra ubicada en el centro poblado San Rafael, aproximadamente a 40 minutos del perímetro urbano principal.

En la figura 26 se puede visualizar la ubicación de las instituciones donde fue implementada la encuesta, así como los límites del municipio de Santa Isabel:

Figura 26 Puntos de interés - Trabajo de Campo



Fuente: Elaboración propia

La encuesta se implementó en los grados noveno, decimo y once de cada centro educativo, en donde inicialmente se dio una contextualización de los ámbitos científicos que abarca la ingeniera Catastral y geodesia, para posterior realizar una introducción a la sismología y la importancia del estudio de esta en la gestión del riesgo en cada municipio y como desde el aporte de cada persona por medio de la encuesta se puede calcular la amenaza presente en una zona determinada al momento de presentarse un evento sísmico, es importante aclarar que la encuesta se realizó con base al sismo presentado el pasado 10 de marzo del año 2023, con motivo de dar una contextualización de un evento real que se percibió en el municipio de Santa Isabel Tolima.

En la figura 27 se puede evidenciar los estudiantes y docentes diligenciando la encuesta, así mismo, en el anexo 1.1 se encuentra un registro fotográfico del trabajo en campo realizado en las dos instituciones educativas y en el anexo 1.2. se presenta el resultado de una encuesta enviada por un estudiante y la forma en que la aplicación survey 123 crea este tipo de informes para facilitar el análisis de resultados.

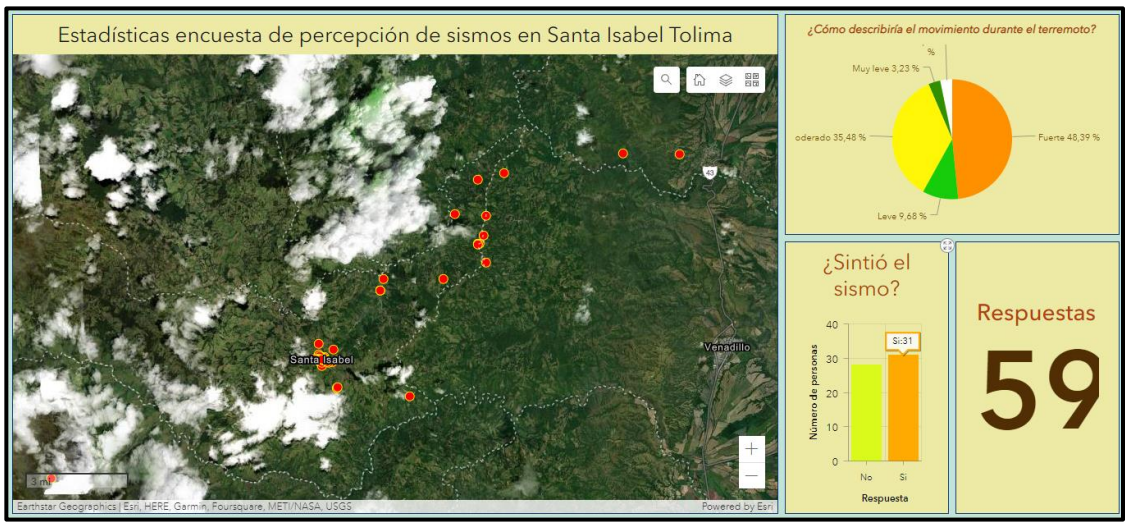
Figura 27. Implementación encuesta



Fuente: Elaboración propia

Para fines de control y depuración de la información, se implementó un "Dashboard" o "tablero de control", que permitió dar cuenta de las respuestas y ubicación; en la figura 28 se puede visualizar la interfaz del "Dashboard", el cual se divide en 4 elementos, el mapa que permitió ver la de distribución de ubicación de los encuestados, 2 gráficas que resumían estadísticamente las respuestas a preguntas importantes y por último el número total de respuestas. En el anexo 1.3 se muestran las gráficas de las estadísticas obtenidas de acuerdo con lo diligenciado por los estudiantes, en este anexo se evidencia la cantidad de respuestas por opción y los respectivos porcentajes que representan en esa pregunta, estos resultados fueron proporcionados y realizados por la herramienta Survey 123 de ArcGIS online.

Figura 28 Tablero de control encuesta

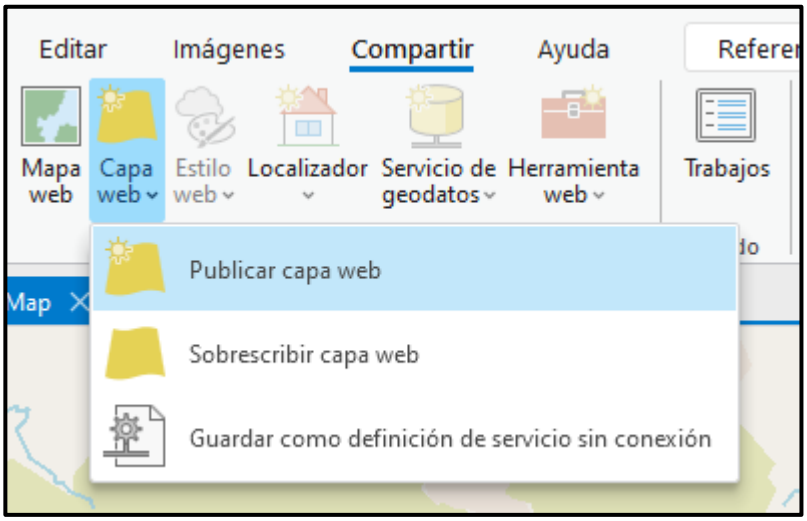


Fuente: Elaboración Propia

3.4.10. Visor geográfico

Para el desarrollo del visor geográfico se utilizó ArcGIS Pro y herramientas de la suite de ArcGIS Online, en el proceso se compilaron los resultados obtenidos en los procesamientos anteriormente descritos en un archivo de extensión MXD, el cual permite almacenamiento de diversas capas y de sus metadatos; una vez se tuvieron los archivos compilados, se utilizó la interoperabilidad de ArcGIS que permite publicar directamente en la web desde ArcGIS pro mediante la función “Publicar capa web”, como se observa en la figura 29.

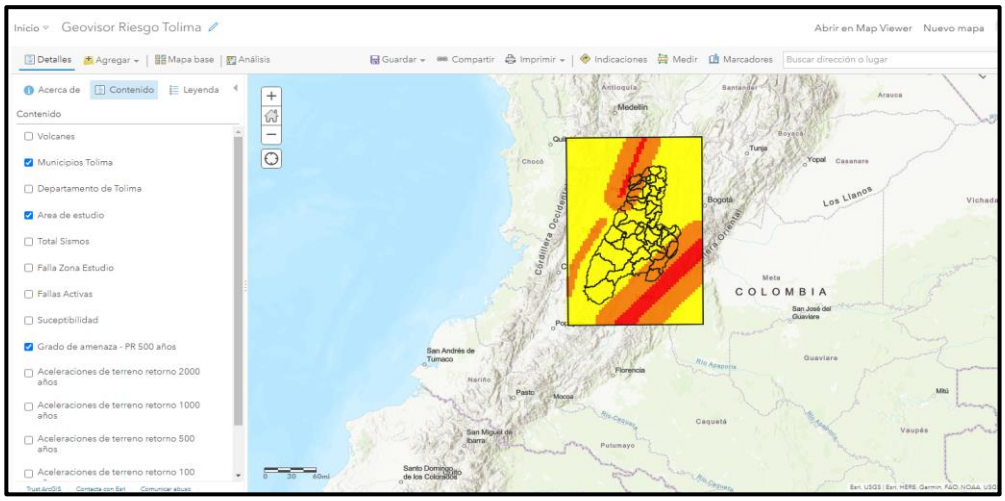
Figura 29 Herramienta de publicación en WEB - ArcGIS Pro



Fuente: Interfaz de ArcGIS Pro

Después de que se publicara como capa web, se llevó a cabo el proceso de abrir ArcGIS online, donde el MXD se convirtió en un grupo de capas alojadas. A través de la herramienta Map Viewer, se inició la edición para mejorar la visualización del mapa web. Esta interfaz se puede apreciar en la figura 30.

Figura 30 Interfaz Map Viewer



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

En la interfaz de Map Viewer se configuro el estilo de las capas, los colores utilizados, la escala, su leyenda y su forma de visualización; ArcGIS Online permite agrupar o combinar los datos espaciales para mejorar la visualización resaltando un atributo especifico. En la figura 31, se observa el módulo de edición de estilo de dibujo para las capas, donde es posible realizar agrupaciones y representaciones por colores en función del recuento y las cantidades de un atributo. Con estos mismos parámetros, también se puede efectuar una representación utilizando figuras geométricas de distintos tamaños.

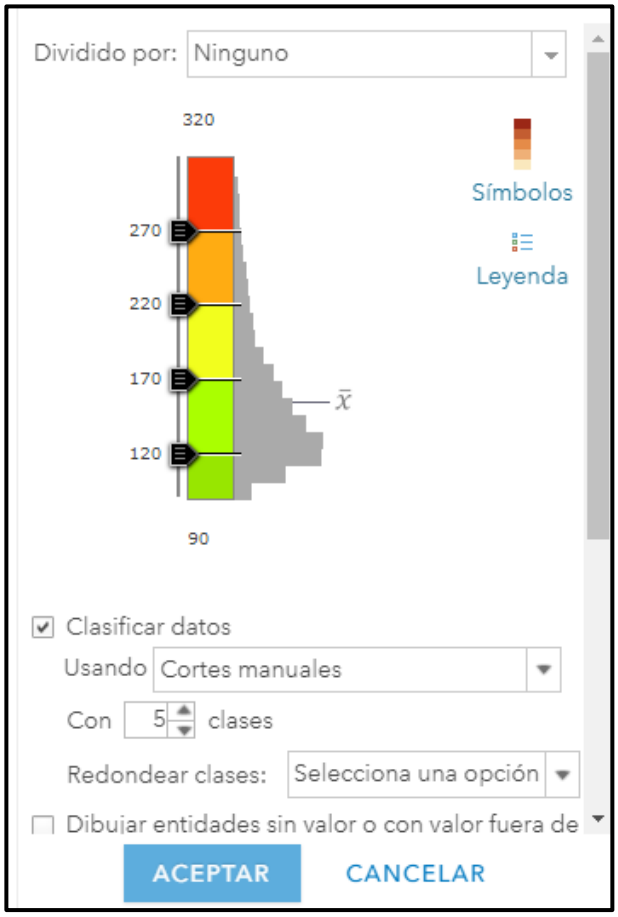
Figura 31 Edición capas ArcGIS Online



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

Para configurar la presentación visual y la leyenda de las capas empleadas en el visor geográfico, se utilizó el estilo de dibujo basado en colores, considerando el atributo que se deseaba representar. En esta sección, se llevó a cabo una clasificación de datos mediante cortes manuales, como se puede apreciar en la figura 32. Esta aproximación permitió personalizar los datos y lograr una óptima presentación de los mismos.

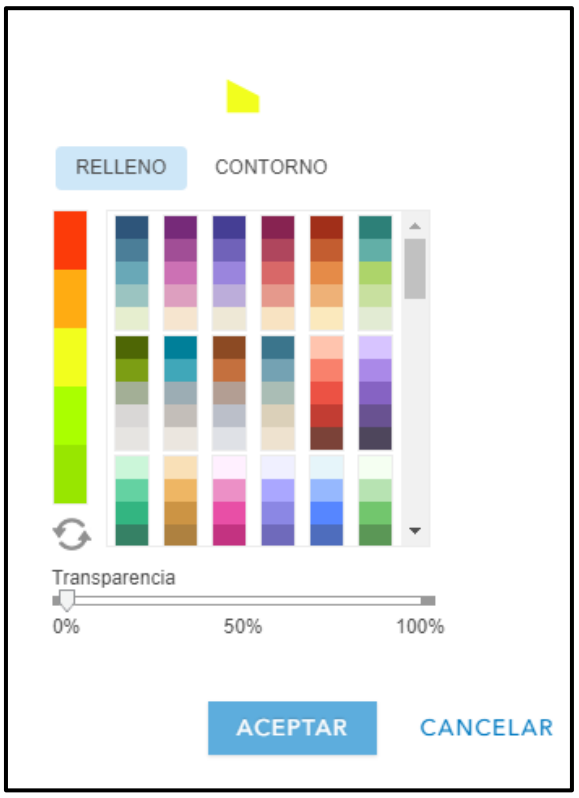
Figura 32 Configuración capas ArcGIS Online



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

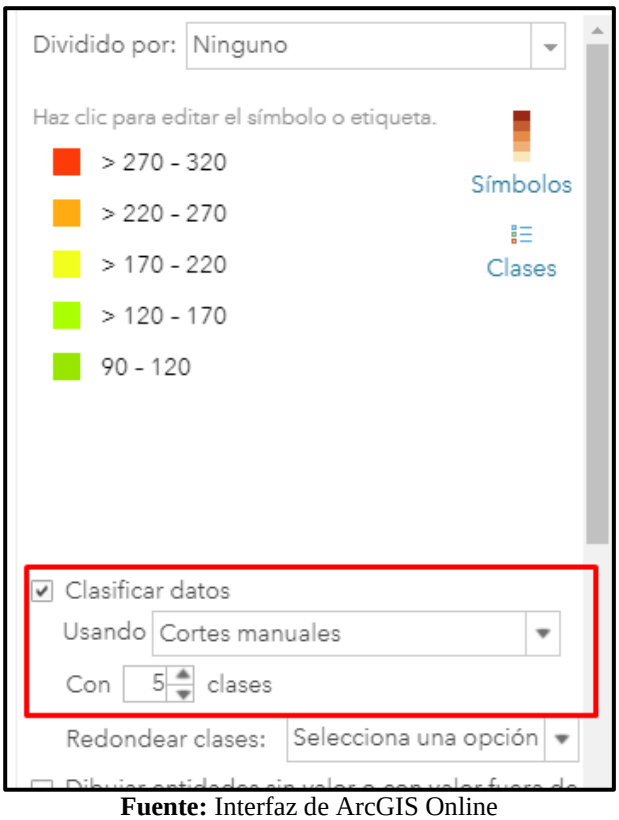
En las figuras 33 y 34 se pueden apreciar los módulos donde se configuraron las escalas de colores a utilizar en cada mapa, así como el rango de la leyenda y cómo estas se visualizan en el mapa de ArcGIS Online. Además, en la figura 35 se muestra la configuración específica que se realizó para cada capa en cuanto a su visualización y transparencia; es importante destacar que para cada mapa resultado se llevó a cabo una configuración particular, dependiendo de lo que se pretendía resaltar o destacar en cada caso, esta personalización permitió presentar de manera óptima la información y lograr una visualización clara y efectiva de los datos en el visor geográfico.

Figura 33 Configuración capas ArcGIS Online



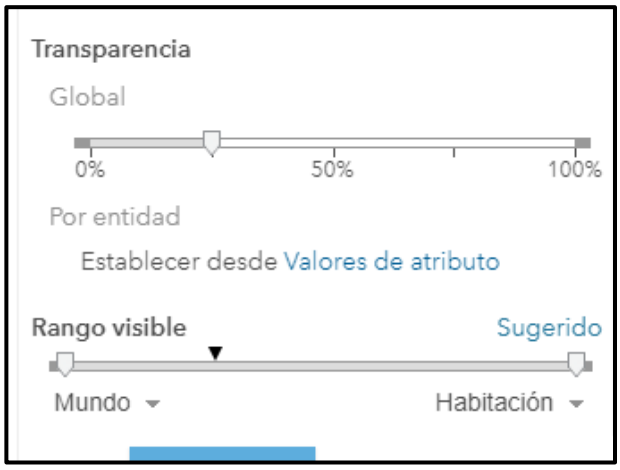
Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

Figura 34 Configuración capas ArcGIS Online



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

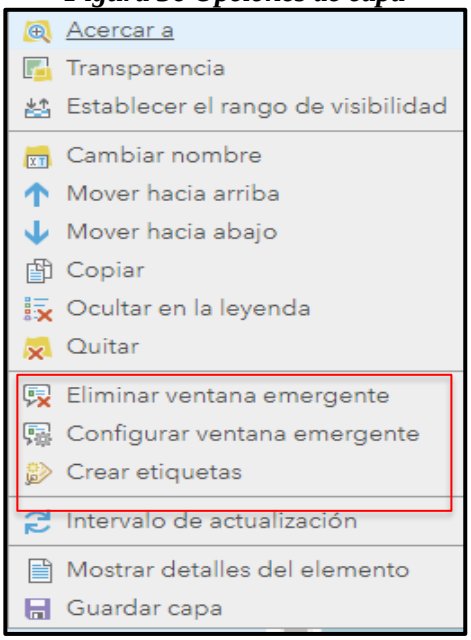
Figura 35 Configuración capas ArcGIS Online



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

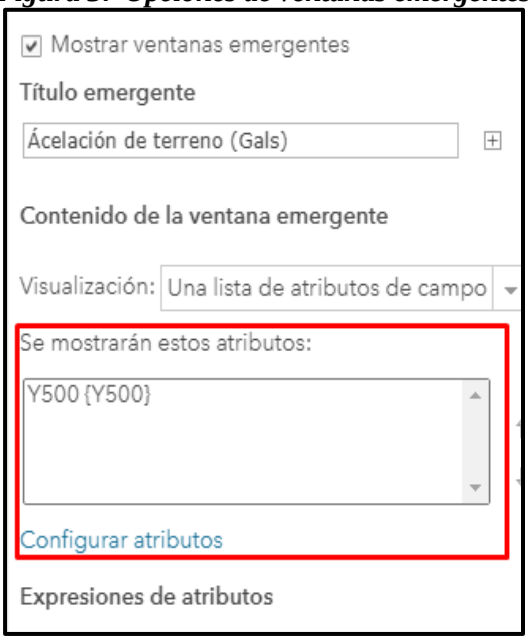
Por otra parte, para cada mapa de resultado y capas base, se configuraron ventanas emergentes y opciones de etiqueta; en estas configuraciones se asignaron los datos que se mostrarían al momento de interactuar con las capas, así como la forma de visualización; estas configuraciones específicas se pueden apreciar en las figuras 37, 38 y 39 donde se presentan los módulos de edición.

Figura 36 Opciones de capa



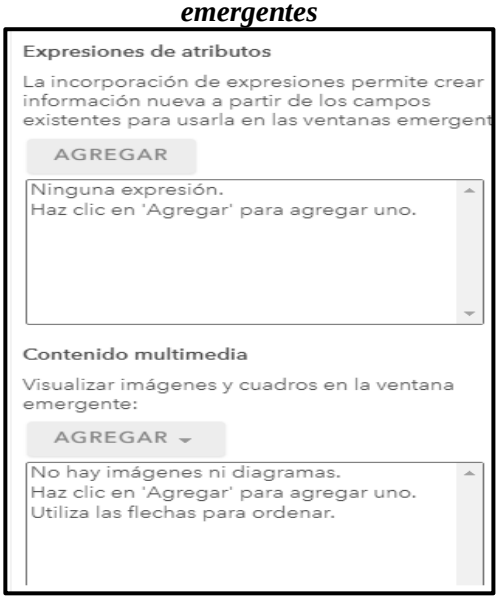
Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

Figura 37 Opciones de ventanas emergentes



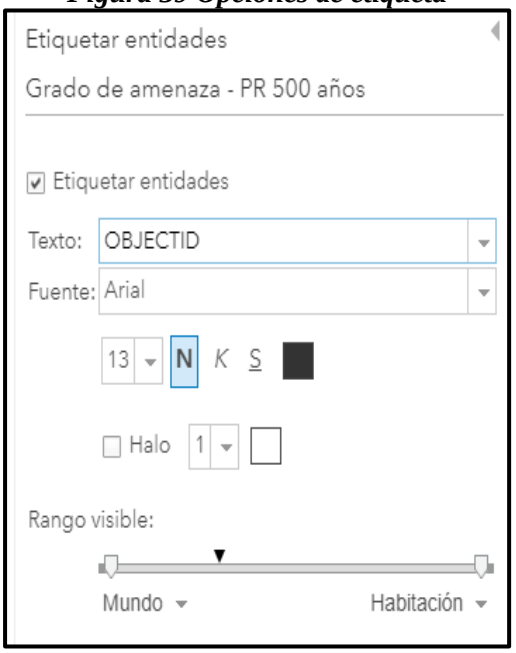
Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

Figura 38 Configuración de ventanas emergentes



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

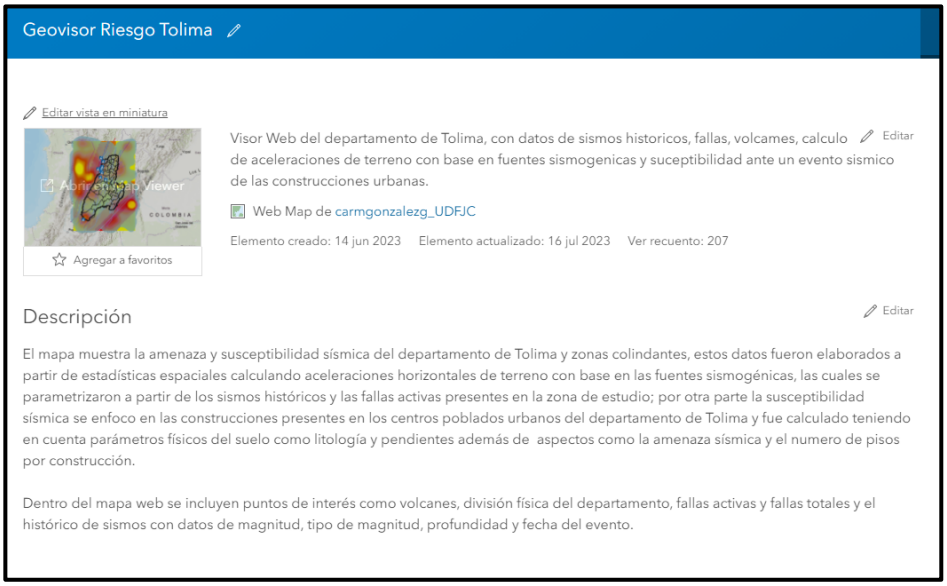
Figura 39 Opciones de etiqueta



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

Una vez que los datos ya estuvieron configurados, se procedió a realizar una descripción y un resumen del Geovisor; esta descripción se utilizó como una introducción a los datos para proporcionar un mayor entendimiento al usuario, dicha descripción y resumen del Geovisor se pueden visualizar en la figura 40.

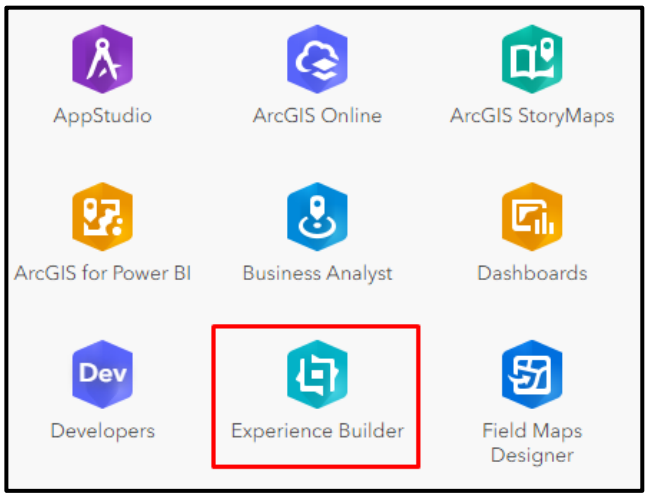
Figura 40 Descripción Geovisor



Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

Con los datos ya configurados y listos para su visualización, se utilizó la herramienta "Experience Builder" la cual permite configurar el visor geográfico unificando las capas Web, aplicaciones, Widgets[15] y datos estadísticos, como se observa en la figura 41; esta aplicación facilita el diseño personalizado, en donde es posible interactuar con contenido en 2D y 3D, implementar y diseñar aplicaciones enfocadas a cualquier dispositivo fijo o móvil, entre otras.

Figura 41 Lista de Aplicaciones ArcGIS Online

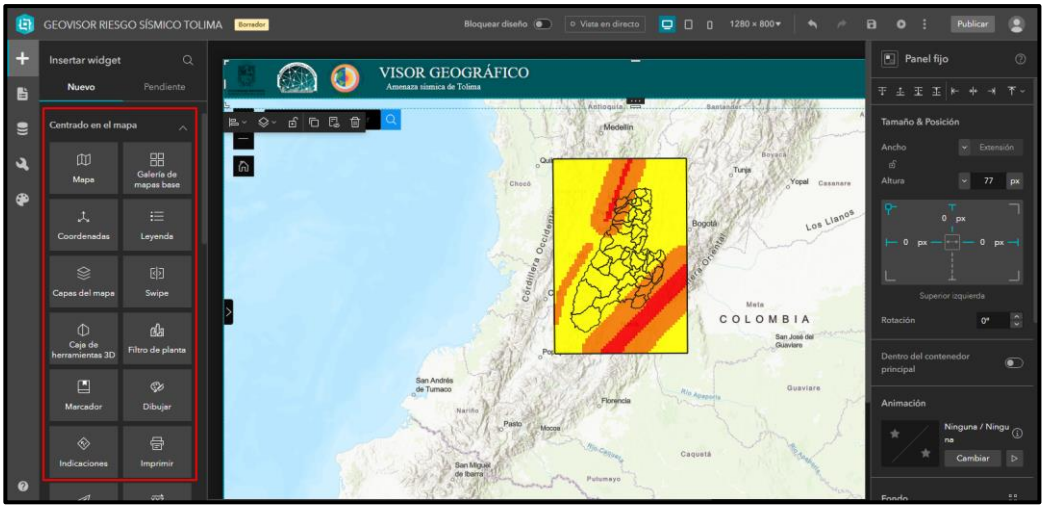


Fuente: Interfaz de ArcGIS Online

[15] Pequeña aplicación o programa con las funciones más usadas de un dispositivo.

La interfaz de Experience Builder cuenta con un panel de adición de Widgets como se puede ver en la figura 42, en donde se pueden adicionar funciones para el mapa, funciones basadas en los datos, elementos para la página (Texto, botones, divisiones, entre otros), menú de barras, diseños adicionales y secciones en la página.

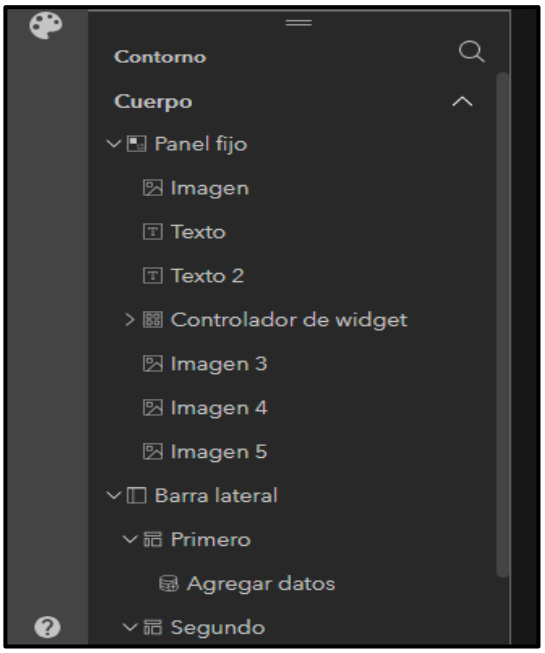
Figura 42 Interfaz Experience Builder



Fuente: Interfaz de Experience Builder

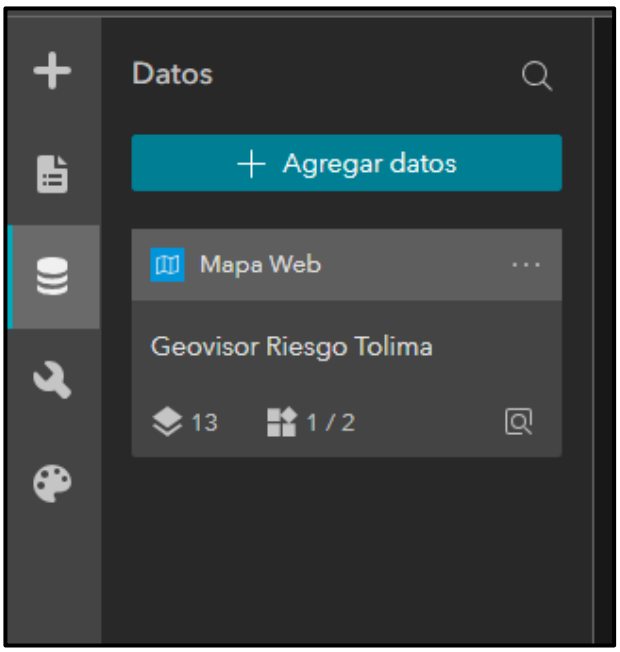
Por otra parte, se encontraba el módulo de opciones de página, como se observa en la figura 43, donde fue posible configurar cada ítem presente en el visor geográfico de forma individual. Además, también se contaba con el módulo de datos donde se configuro el cargue de las capas alojadas anteriormente modificadas, el módulo de servicios de utilidades y el módulo de temas donde se seleccionó el tema base del visor geográfico, los cuales pueden ser visualizados en las figuras 44, 45 y 46 respectivamente.

Figura 43 Opciones de pagina



Fuente: Interfaz de Experience Builder

Figura 44 Módulo de datos



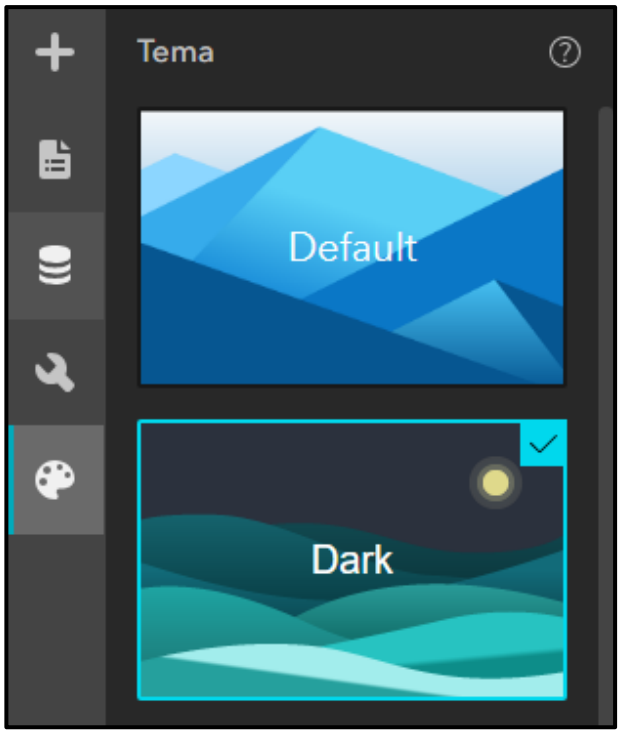
Fuente: Interfaz de Experience Builder

Figura 45 Modulo de utilidades y servicios



Fuente: Interfaz de Experience Builder

Figura 46 Modulo de temas



Fuente: Interfaz de Experience Builder

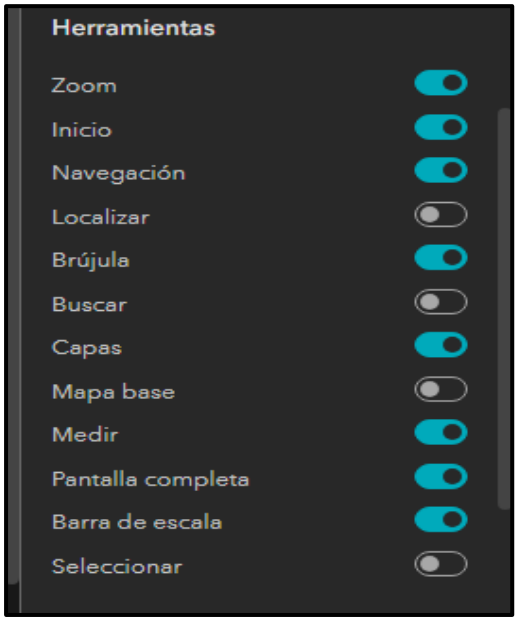
Con la configuración de las capas completada y su ajuste individual, así como la selección del tema, se procedió a realizar la configuración general de estilo, acciones y contenido del visor, tal como se aprecia en la figura 47, en esta etapa se eligieron las herramientas presentes en el mapa, las cuales son fundamentales para facilitar la interacción de los usuarios con la información, como se muestra en la figura 48 ; por otra parte se eligió la opción de diseño como se observa en la figura 49.

Figura 47 Modulo de edición de mapa



Fuente: Interfaz de Experience Builder

Figura 48 Modulo de herramientas del mapa



Fuente: Interfaz de Experience Builder

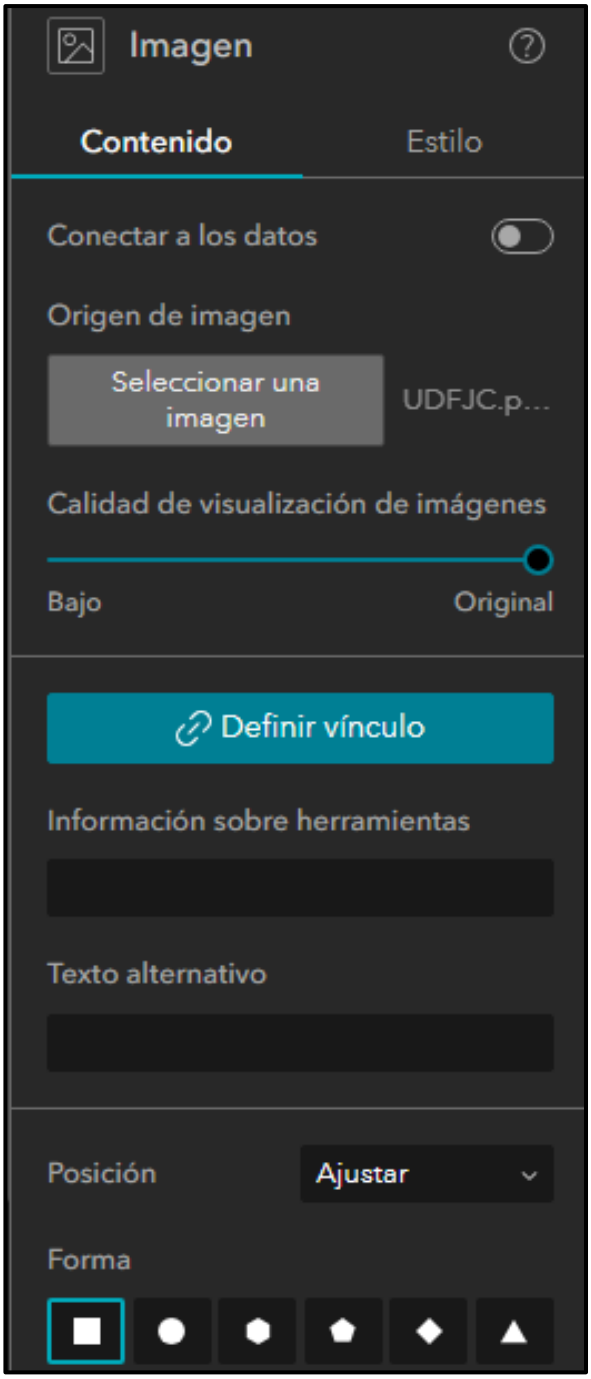
Figura 49 Opciones de diseño



Fuente: Interfaz de Experience Builder

Una vez realizadas las configuraciones anteriormente descritas, se añadieron widgets de imágenes, configurando el estilo y la calidad de la visualización de las imágenes a mostrar, tal como se puede apreciar en la figura 50; además, fue posible el cargue de imágenes desde el ordenador o la nube, como se muestra en la figura 51.

Figura 50 Modulo edición de imágenes



Fuente: Interfaz de Experience Builder

Figura 51 Modulo de edición de imágenes

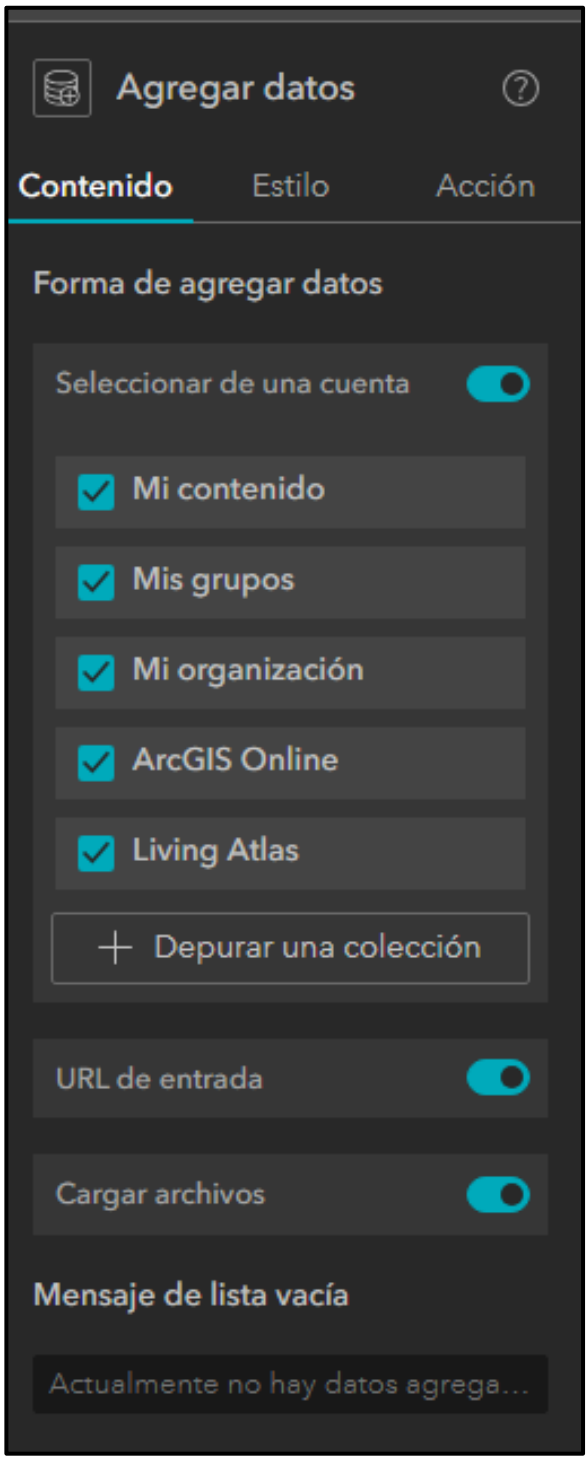


Fuente: Interfaz de Experience Builder

Se añadió un widget para la adición de datos externos por parte del usuario; este widget se ubicó en una ventana desplegable en el costado izquierdo del visor geográfico, el módulo permite al usuario cargar información geográfica externa, ya sea desde su propio ordenador o

desde diferentes fuentes web (ArcGis Online, Living Atlas, entre otros), esta configuración se puede apreciar en la figura 52.

Figura 52 Widgets de adición de datos

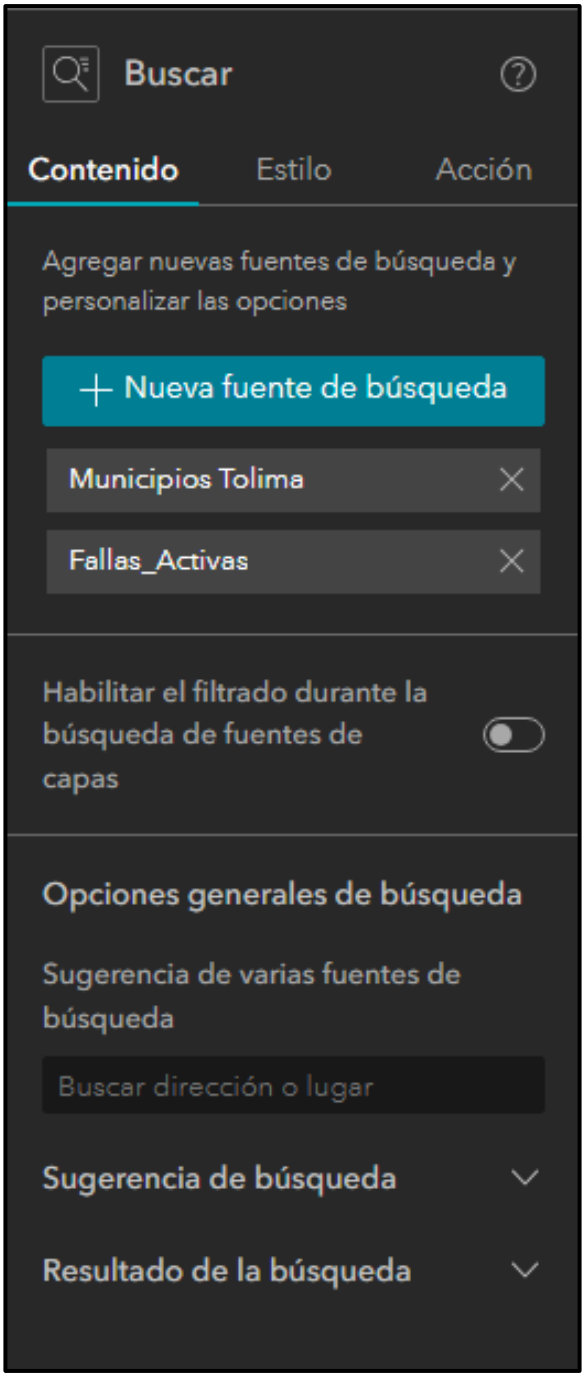


Fuente: Interfaz de Experience Builder

Finalmente, se configuró el widget de búsqueda, donde se limitó la búsqueda con la información de las capas existentes que componen el visor geográfico, tal como se observa en la figura 53, se seleccionaron como fuentes de búsqueda las fallas activas y los municipios del

departamento de Tolima; Además, se establecieron las acciones que se llevarían a cabo al momento de realizar la búsqueda, como se muestra en la figura 54, se habilitó una lista de opciones dependiendo de las iniciales que el usuario ingresó, así como la posibilidad de realizar una selección y acercamiento a la ubicación de la búsqueda que le interesara al usuario.

Figura 53 Widget Buscar



Fuente: Interfaz de Experience Builder

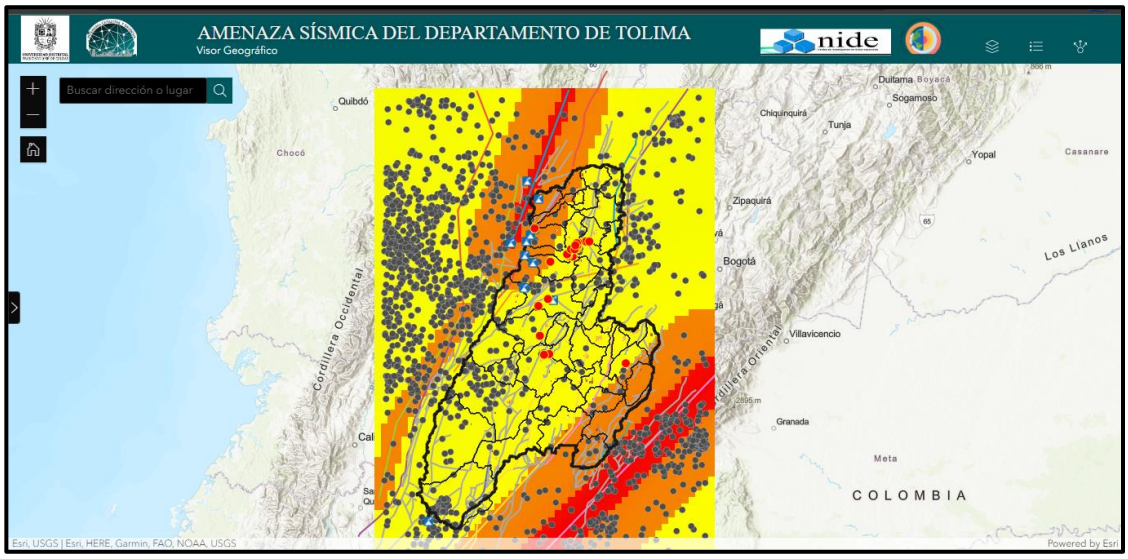
Figura 54 Acciones Widget Buscar



Fuente: Interfaz de Experience Builder

En la figura 55 se puede observar la vista final del visor geográfico, donde se añadieron todas las funcionalidades anteriormente descritas en este acapite, para su revisión al detalle remitirse al anexo 1.7 del presente documento.

Figura 55 Previsualización Visor Geográfico



Fuente: Previsualización Visor Geográfico

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Como se menciona a lo largo de la presente monografía, se realizó un análisis de las fuentes sismotectónicas y se procesaron las mismas, para definir la zonificación de la susceptibilidad de construcciones urbanas por amenaza sísmica en el departamento de Tolima, en este proceso se tomó como base la información de diferentes entidades nacionales e internacionales, como sismos históricos, fallas activas, construcciones con su información asociada (Tipología constructiva, número de pisos, entre otros), geomorfología y litología.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la monografía, así como el análisis comparativo con estudios previos realizados por entidades nacionales y territoriales encargadas de la gestión del riesgo sísmico. Estos resultados se muestran a través de mapas de amenaza sísmica, aceleraciones horizontales de terreno en periodos de retorno de 100, 500, 1.000 y 2.000 años, y mapas de susceptibilidad sísmica en construcciones.

Además, se creó un visor geográfico que compila todos los resultados mencionados anteriormente. Este visor geográfico se publicó en la suite online de ArcGIS, lo que permite que cualquier usuario pueda acceder y visualizar la información de manera sencilla a través de la web.

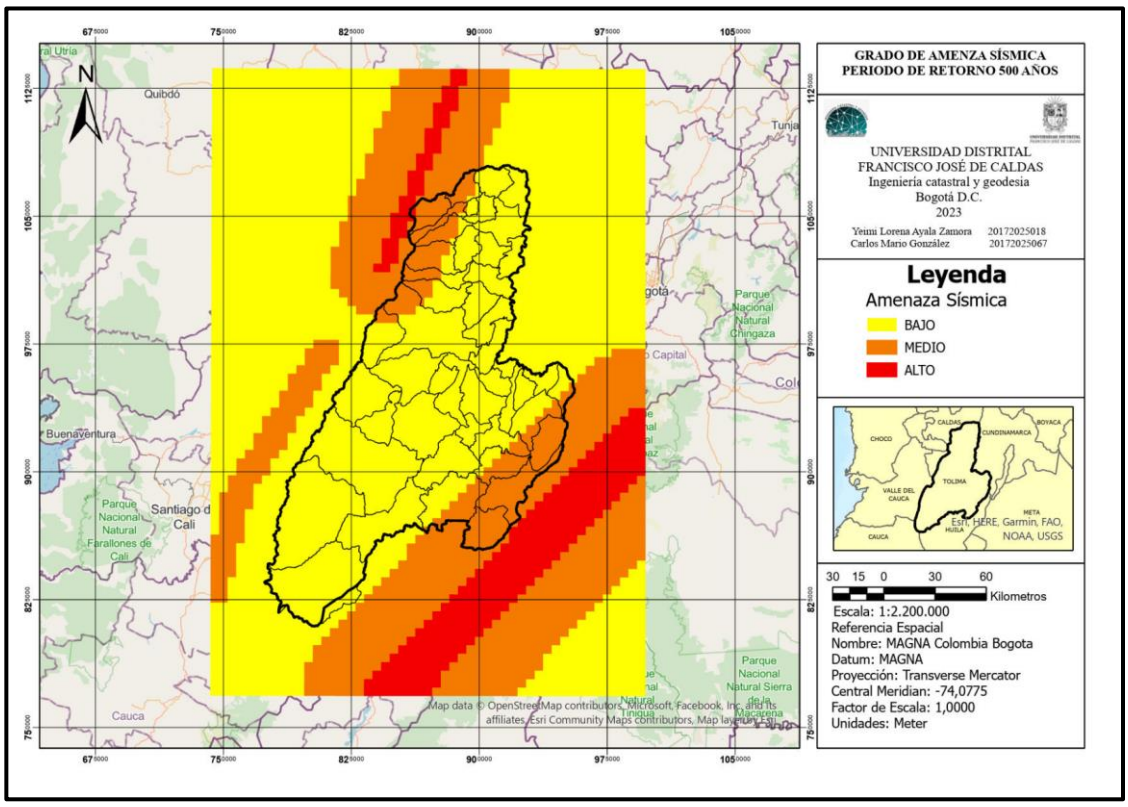
4.1. Mapas

4.1.1. Mapa de Amenaza Sísmica

En general el departamento de Tolima cuenta con una amenaza sísmica baja como se muestra en el mapa de amenaza sísmica, correspondiente a la figura 56, pero cuenta con zonas de amenaza media las cuales se encuentran en el suroriente y noroccidente del departamento; en la zona sur oriente los municipio de Alpujarra, Dolores, Villarrica, Icononzo, Cunday, Purificación, Prado y Natagaima tienen una afectación por la falla activa Frontal de la Cordillera Oriental, por otra parte los municipio de Fresno, Herveo, Palocabildo, Casabianca, Villahermosa, Murillo, Santa Isabel, Anzoátegui, Ibagué y Cajamarca cuentan con una afectación por el sistema de fallas del Romeral y por la falla de Palestina.

De acuerdo a este análisis se puede mencionar que hay 17 municipios en amenaza media, cuya superficie corresponde al 36,17% del total del departamento y están representados en la provincia de los nevados, norte, suroriente y oriente, y 30 municipios en amenaza baja lo cual corresponde con el 63,83% del total, estos resultados coinciden con los estudios de años previos que ha realizado el servicio Geológico de Colombia y que se muestra en la figura 1. Es importante mencionar que del mapa de Amenaza Sísmica se evidencia una tendencia a aumentar el riesgo a medida que se encuentran fuentes sismotectónicas predominantes como el sistema de fallas del Romeral, la falla de Palestina y la falla frontal de la Cordillera Oriental.

Figura 56 Grado de amenaza sísmica



Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Mapas de Períodos de Retorno

Los mapas de aceleraciones horizontales de terreno evidencian que el departamento de Tolima cuenta con dos zonas donde predominan valores altos, estas zonas y la tendencia de los valores de aceleraciones horizontales, cuyos resultados coinciden con el grado de amenaza sísmica realizado y mostrado en el mapa de la figura 56, explicado previamente; para realizar una interpretación adecuada de los resultados obtenidos se debe aclarar que cada mapa de aceleraciones horizontales de terreno cuenta con una escala diferente aplicable a los valores con los que cuenta cada uno, esto con fin de permitir una mejor visualización de los resultados obtenidos. En las figuras 57, 58, 59 y 60, que corresponden con los mapas de período de retorno, se encuentra la representación espacial de los resultados en cuanto al cálculo de aceleraciones horizontales de terreno para periodos de retorno de 100, 500, 1.000 y 2.000 años.

En general se resalta que, aunque el departamento de Tolima cuenta con diversas Fallas activas que cruzan su territorio como se muestra en el mapa de Fallas y Sismos mostrado en la figura 17; en este mapa se observa que las fallas activas en el exterior del departamento de Tolima inciden en mayor grado a el desplazamiento o aceleración de terreno en un periodo de tiempo, como son el sistema de fallas del Romeral, La falla de Palestina y la falla Frontal de la Cordillera Oriental. Mientras que las la falla de Ibagué y la falla del Magdalena, estas no son de mayor influencia en cuanto a las aceleraciones horizontales de terreno que se presentan.

En el mapa de aceleraciones horizontales de terreno en un periodo de retorno de 2.000 años, representado en la figura 60, se puede observar una zona con aceleraciones horizontales bajas, comprendida en un rango entre 0 y 370 gals, que se muestra con tonos verdes. Esta área se encuentra ubicada principalmente en los municipios centrales del departamento de Tolima; a medida que nos acercamos a la zona suroriental, limítrofe con el departamento de Huila, los valores de aceleración horizontal aumentan significativamente. Esto se debe a la presencia de fallas activas que tienen una influencia importante en la generación de sismos en esta región. Lo mismo se evidenció en el sector noroccidental, en cercanías a los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío, donde se presenta una situación similar. En contraste, en los límites con el departamento de Cundinamarca, se observa que las aceleraciones horizontales de terreno mantienen una tendencia baja en comparación con las zonas mencionadas anteriormente.

Se observa que las fallas Frontal de la Cordillera Oriental, Falla de Palestina y el sistema de Fallas del Romeral tienen una dirección muy pronunciada en sentido nororiente, mientras que las fallas de Ibagué, Salinas y Magdalena si bien mantienen su dirección en sentido nororiente, no es constante y cuenta con variaciones hacia el norte o hacia el oriente, por último se observa de la falla Espíritu Santo mantiene una tendencia o sentido hacia el norte con diversos cambios de sentido entre nororiental y noroccidental, es importante resaltar que los resultados de aceleraciones horizontales de terreno, se comportan de acuerdo al sentido de las fallas, es decir a través de ella los valores de aceleración aumenta, especialmente con las fallas de Palestina, Frontal de la Cordillera Oriental y el sistema de Fallas del Romeral.

Es importante tener presente en el análisis comparativo de los resultados de la presente monografía con los estudios realizador por el SGC, que la entidad en sus cálculos de amenaza sísmica presenta resultados de aceleraciones pico del terreno (PGA[16]) donde utiliza la medida de intensidad del campo gravitatorio "g"[17], mientras que para la elaboración de la presente monografía los resultados se presentan en gales "gals"[18], motivo por el cual es prudente aclarar que en los análisis se realizó la conversión[19] entre estas dos unidades de medida para aceleraciones de terreno.

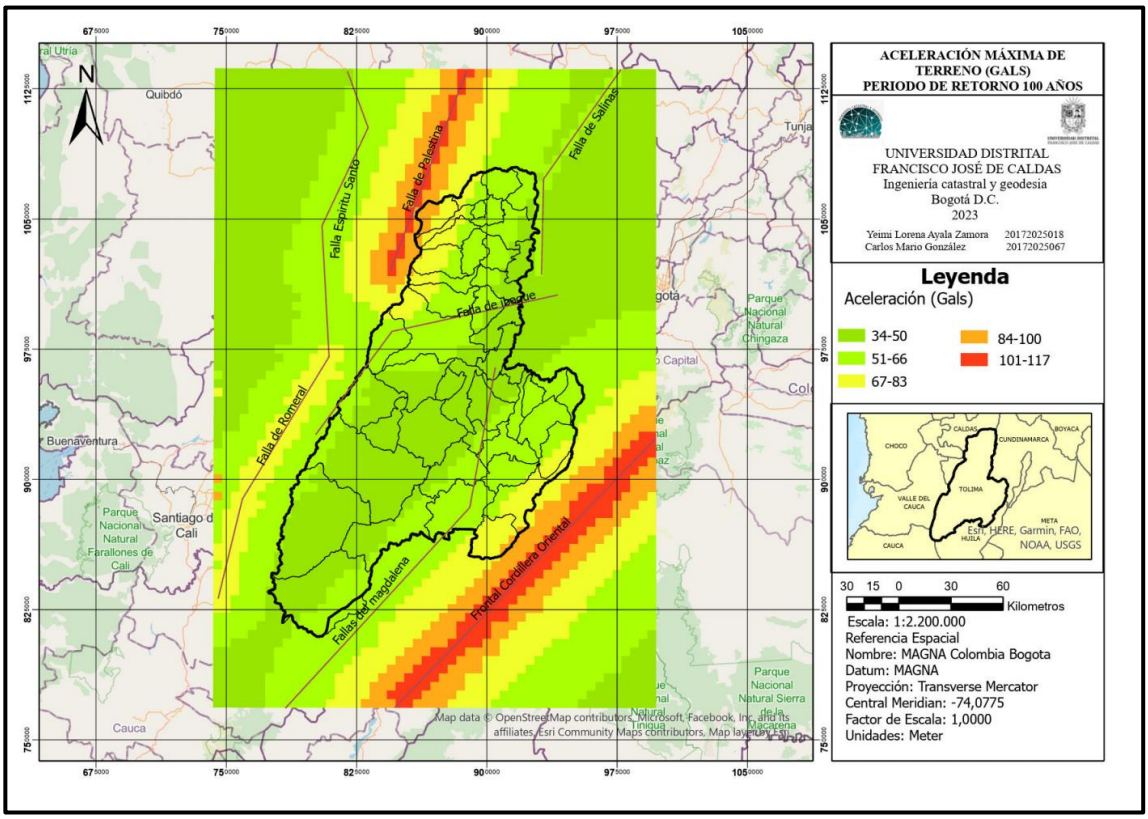
4.1.2.1. Periodo de retorno 100 años

En el mapa correspondiente al periodo de retorno de 100 años que corresponde a la figura 57, se observan aceleraciones horizontales de terreno en un intervalo de 34 a 117 Gals. En la sección suroriental, los municipios de Alpujarra, Dolores y Villarrica presentan aceleraciones horizontales de terreno entre 60 y 77 Gals. Por otro lado, en la sección noroccidental, los municipios de Casabianca, Villahermosa, Herveo, Murillo, Santa Isabel y Anzoátegui cuentan con aceleraciones horizontales de terreno entre 66 y 91 Gals. Se destaca que el municipio de Herveo registra los valores más altos, especialmente en su límite con el departamento de Caldas Por otra parte, es importante destacar que en los estudios realizados por el Servicio Geológico

[16] Peak Ground Acceleration
[17] Medida de intensidad del campo gravitatorio donde $g = m/s^2$
[18] Medida de gales donde $gals = cm/s^2$
[19] $1\ g = 0.001\ gals$

Colombiano - SGC no se incluyeron cálculos de aceleraciones horizontales de terreno para periodos de retorno cortos, por el contrario, en esta monografía al centrarse exclusivamente en el departamento de Tolima, se realizó un análisis en un periodo de retorno de 100 años para tener resultados de mayor precisión.

Figura 57 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 100 años



Fuente: Elaboración propia

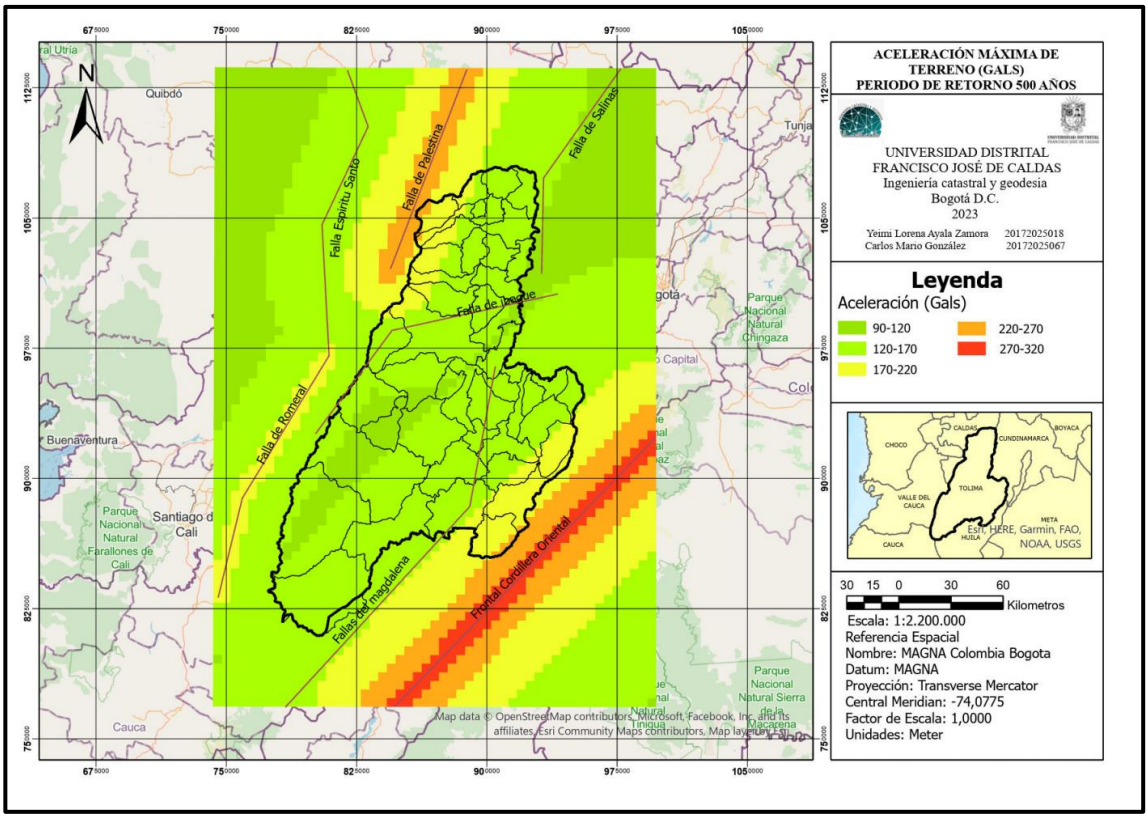
4.1.2.2. Periodo de retorno 500 años

En el mapa correspondiente al periodo de retorno de 500 años que corresponde a la figura 58, se observan aceleraciones horizontales de terreno en un intervalo de 34 a 117 Gals. En la sección suroriental, los municipios de Alpujarra, Dolores, Villarrica, Prado y la parte sur de Natagaima presentan aceleraciones horizontales de terreno entre 172 y 223 Gals; es importante destacar que el municipio de Alpujarra registra los mayores valores, especialmente en su límite con el departamento del Huila; por otra parte, en la sección noroccidental, los municipios de Casabianca, Villahermosa, Herveo, Murillo, Santa Isabel, Anzoátegui, Fresno e Ibagué cuentan con aceleraciones horizontales de terreno entre 171 y 230 Gals; se destaca que los municipios de Herveo y Casabianca presentan los valores más altos en su límite con el departamento de Caldas.

Es relevante mencionar que los resultados del Servicio Geológico Colombiano (SGC) indican aceleraciones horizontales de terreno entre 100 y 250 Gals para el departamento de Tolima en su mapa de aceleraciones pico para periodos de retorno de 475 años; se observa coincidencia

con los resultados mencionados previamente, ya que las zonas suroriental y noroccidental del departamento de Tolima presentan los mayores valores de aceleración horizontal de terreno en ambos estudios; en cuanto a los resultados emitidos por el SGC se puede observar que en la zona suroriental se tienen valores de 250 a 300 Gals y en la zona noroccidental se cuenta con valores de 200 a 300 Gals.

Figura 58 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 500 años



Fuente: Elaboración propia

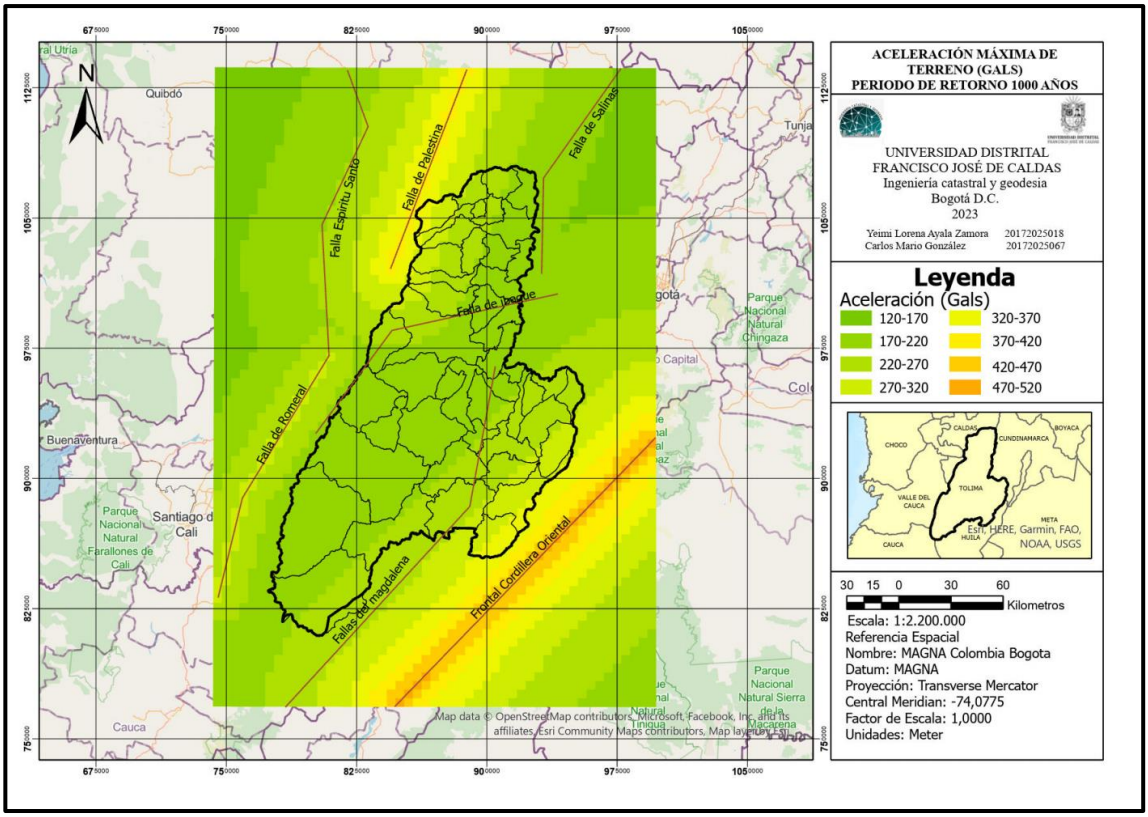
4.1.2.3. Periodo de retorno 1.000 años

En el mapa correspondiente al periodo de retorno de 1.000 años que corresponde a la figura 59, se observan aceleraciones horizontales de terreno en un intervalo de 120 a 520 Gals; en la sección suroriental, los municipios de Alpujarra, Dolores, Villarrica, Prado, Natagaima e Icononzo presentan aceleraciones horizontales de terreno entre 270 y 350 Gals; se destaca que los municipios de Alpujarra y Dolores registran los mayores valores, especialmente en su límite con el departamento del Huila; por otra parte, en la sección noroccidental, los municipios de Casabianca, Villahermosa, Herveo, Murillo, Santa Isabel, Anzoátegui, Fresno e Ibagué cuentan con aceleraciones horizontales de terreno entre 270 y 371 Gals. Nuevamente, se observa que los municipios de Herveo y Casabianca presentan los valores más altos en su límite con el departamento de Caldas.

Es relevante mencionar que los resultados del Servicio Geológico Colombiano (SGC) indican aceleraciones horizontales de terreno entre 200 y 600 Gals para el departamento de Tolima en su mapa de aceleraciones pico para periodos de retorno de 975 años; Se observa coincidencia

con los resultados mencionados previamente, ya que las zonas suroriental y noroccidental del departamento de Tolima presentan los mayores valores de aceleración horizontal de terreno en ambos estudios; en cuanto a los resultados emitidos por el SGC se puede observar que en la zona suroriental se tienen valores de 250 a 400 Gals y en la zona noroccidental se cuenta con valores de 300 a 400 Gals.

Figura 59 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 1.000 años



Fuente: Elaboración propia

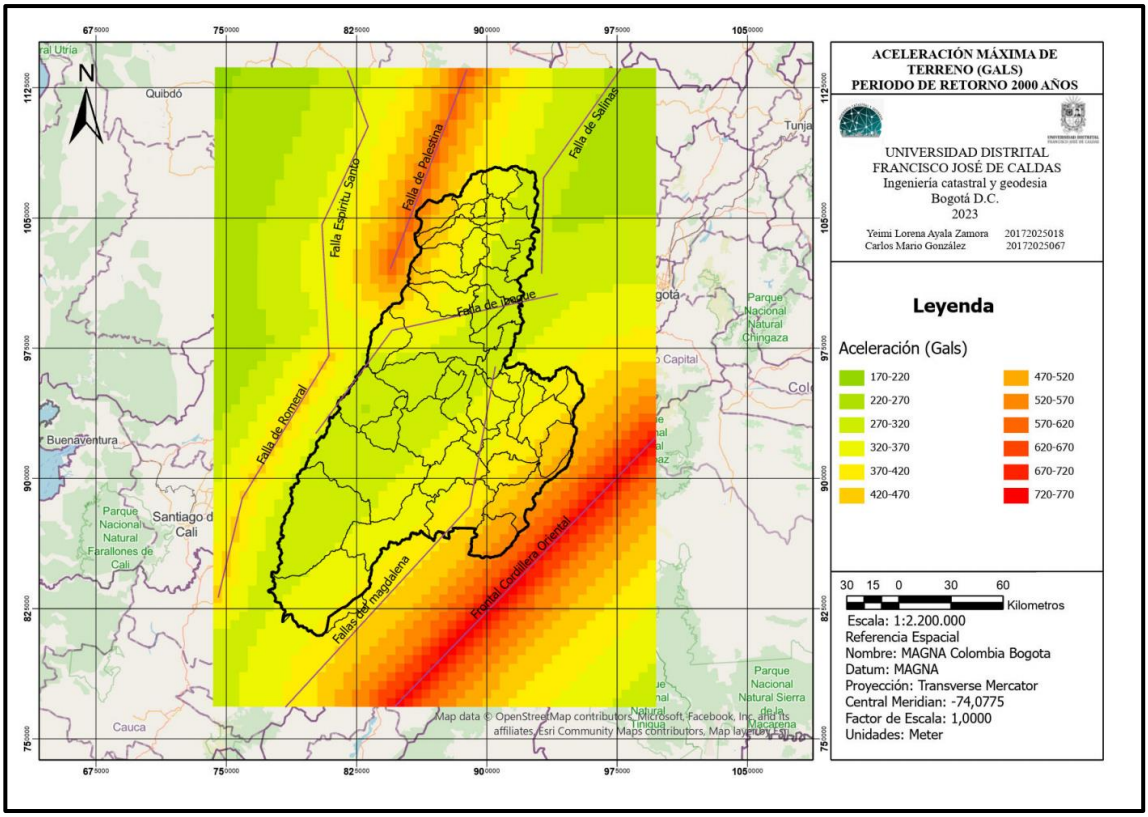
4.1.2.4. Periodo de retorno 2.000 años

En el mapa correspondiente al periodo de retorno de 2.000 años que corresponde a la figura 60, se observan aceleraciones horizontales de terreno en un intervalo de 170 a 770 Gals; en la sección suroriental, los municipios de Alpujarra, Dolores, Villarrica, Prado, Cunday, Natagaima e Icononzo presentan aceleraciones horizontales de terreno entre 420 y 560 Gals; se destaca que los municipios de Alpujarra, Villarrica y Dolores registran los mayores valores, especialmente en su límite con el departamento del Huila; por otra parte, en la sección noroccidental, los municipios de Casabianca, Villahermosa, Herveo, Murillo, Santa Isabel, Anzoátegui, Fresno e Ibagué cuentan con aceleraciones horizontales de terreno entre 420 y 575 Gals. Nuevamente, se observa que los municipios de Herveo y Casabianca presentan los valores más altos en su límite con el departamento de Caldas.

Es relevante mencionar que los resultados del Servicio Geológico Colombiano (SGC) indican aceleraciones horizontales de terreno entre 200 y 900 Gals para el departamento de Tolima en su mapa de aceleraciones pico para periodos de retorno de 2.475 años; se observa coincidencia

con los resultados mencionados previamente, ya que las zonas suroriental y noroccidental del departamento de Tolima presentan los mayores valores de aceleración horizontal de terreno en ambos estudios; en cuanto a los resultados emitidos por el SGC se puede observar que en la zona suroriental se tienen valores de 300 a 600 Gals y en la zona noroccidental se cuenta con valores de 400 a 750 Gals.

Figura 60 Aceleración máxima de terreno - Periodo de retorno 2.000 años



Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Mapa de Susceptibilidad Sísmica

Los mapas de susceptibilidad sísmica son herramientas importantes en el ámbito de las construcciones debido a su utilidad para evaluar el nivel de riesgo sísmico de un área específica. Estos mapas proporcionan información detallada sobre las zonas que podrían ser más propensas a sufrir daños durante un evento sísmico, lo que permite tomar decisiones informadas en la planificación y diseño de construcciones, en este ítem se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología aplicada en el ítem 3.4.7 de esta monografía.

En la metodología empleada para obtener este mapa, se consideraron cuatro elementos fundamentales: Construcciones, Amenaza, Litología y Pendiente. Respecto a la disponibilidad de información, es importante destacar que la variable de construcciones no se encontraba completa para todos los municipios debido a la presencia de vacíos espaciales e información faltante en registro 1 y 2; es por esto que los resultados presentados corresponden con la disponibilidad de información que se pudo obtener. Sin embargo, cabe señalar que esta metodología podría aplicarse nuevamente en el futuro, siempre y cuando la entidad

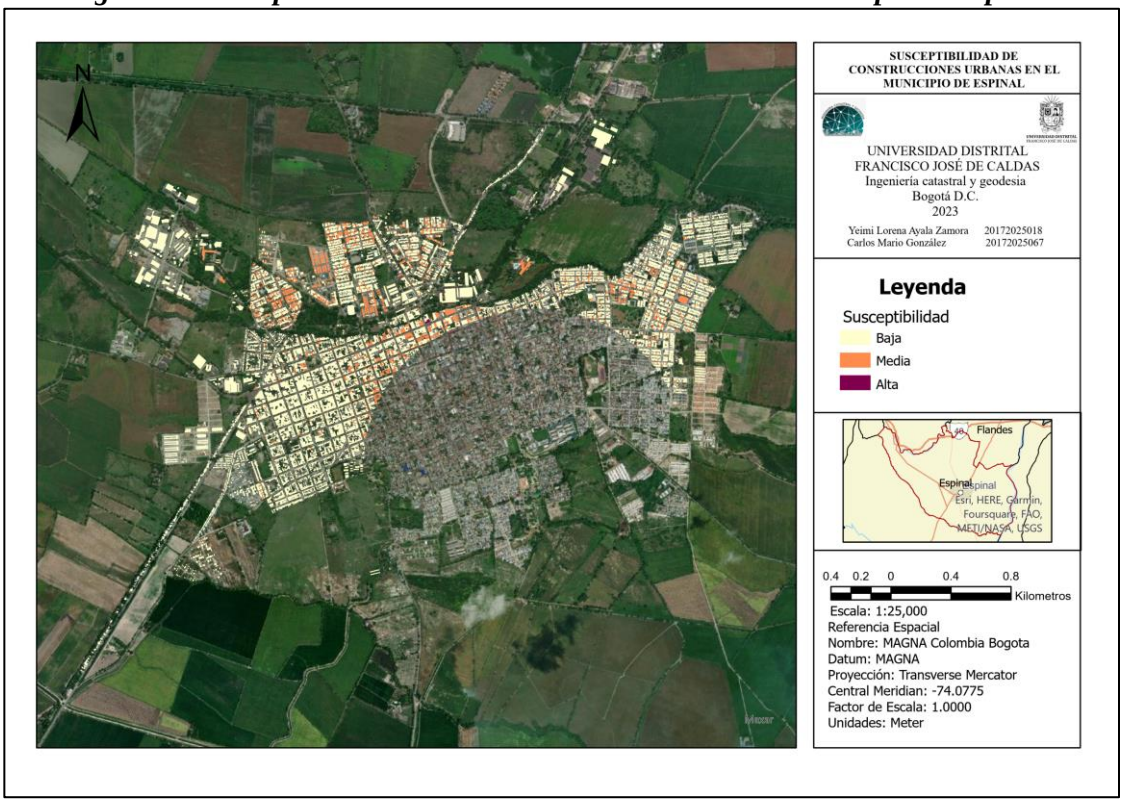
responsable, en este caso el IGAC, actualice la información sobre las construcciones correspondientes y de esta manera, sería posible calcular y obtener resultados más completos y precisos en trabajos posteriores.

En cada centro poblado o cabecera municipal, se puede aplicar la metodología explicada en el ítem 3.4.7 que permite determinar el mapa de Susceptibilidad Sísmica, esto depende de la información disponible dadas las características específicas de cada entidad territorial en cuanto a construcción, litología, número de pisos, pendiente y amenaza. Para efectos de esta monografía se obtuvieron los mapas de Susceptibilidad Sísmica de las construcciones para 11 cabeceras municipales (Esta información se encuentra en el anexo 1.4) con estos resultados se demuestra la facilidad de aplicar la metodología depende de contar con la información completa. A continuación, se presenta el análisis de los resultados de los mapas de susceptibilidad obtenidos en los municipios de Espinal, Chaparral y Fresno.

El municipio de Espinal, Tolima es el segundo municipio más poblado del departamento, con una población aproximada de 70.000 habitantes, según cifras DANE del año 2018, en la actualidad se estima una población urbana mayor a 50.000 habitantes, esto lo convierte en un municipio de gran relevancia para realizar el análisis de Susceptibilidad Sísmica. No obstante, al observar la figura 35, que representa el mapa de susceptibilidad de construcciones del municipio, se pudo evidenciar que la información espacial de construcciones no se encontraba completa. Debido a esta limitación, únicamente se pudo analizar la zona donde se disponía de información sobre el número de pisos de las construcciones.

En este caso se logró evidenciar que la mayoría de construcciones presentan una susceptibilidad baja, de acuerdo con los parámetros utilizados en el análisis, el rango de la suma de ponderados solo varía entre 7 y 13, la razón de obtener estos resultados se debe a que el municipio cuenta con un relieve plano con un porcentaje de pendiente entre 0 y 3%, así mismo más del 85% de construcciones son de un piso y dentro de la cuadricula realizada de amenaza sísmica la cabecera municipal se encuentra dentro de un cuadrante de amenaza baja. Lo que aumenta la suma de ponderados es la litología que corresponde a un suelo de aluviones finos y medios y en la clasificación realizada es una de las de mayor ponderación, aunque esta variable no es diferenciadora porque todo el municipio se encuentra sobre el mismo tipo de suelo. Es decir que la única variable que diferencia las categorías de susceptibilidad en baja, media y alta es el número de pisos de las construcciones. En la figura 61 se evidencia que las construcciones de mayor número de pisos se encuentran ubicadas entre el centro y el norte del perímetro urbano, mientras que el costado oriental y especialmente occidental presenta construcciones de un solo piso.

Figura 61. Susceptibilidad de construcciones urbanas en el municipio de Espinal.

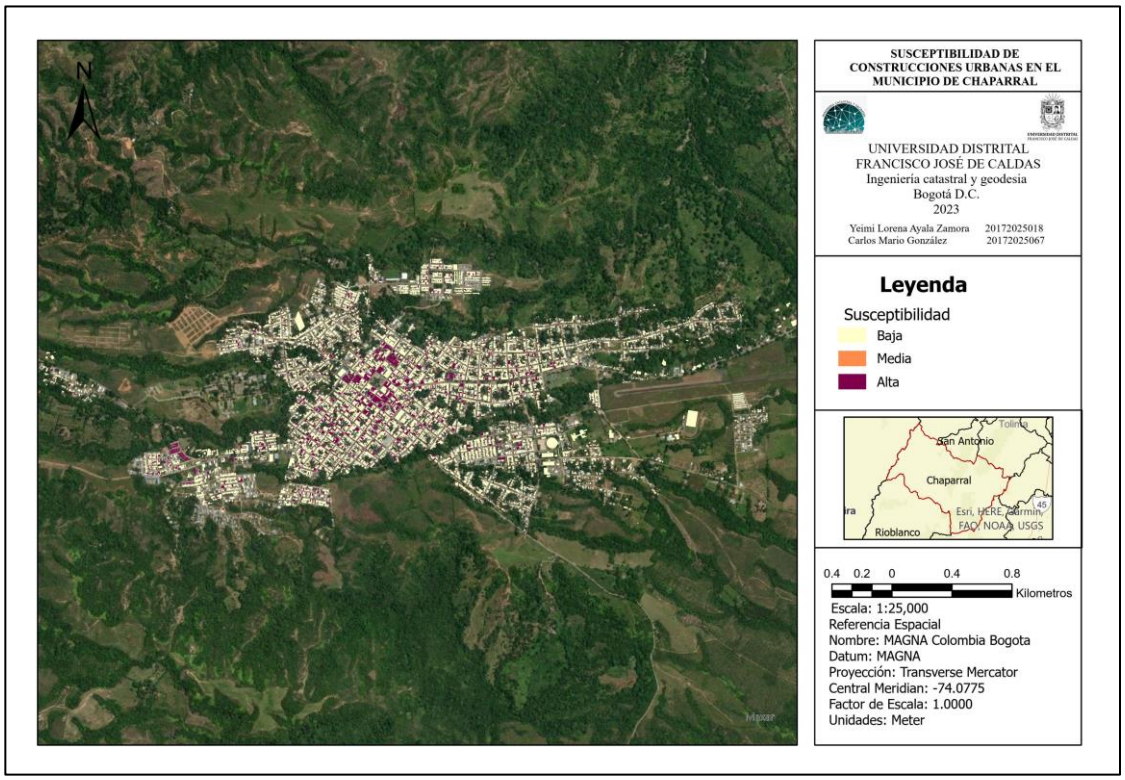


Fuente: Elaboración propia

Para el municipio de Chaparral, se contó con información completa de las construcciones, como se muestra en la figura 62 que corresponde al mapa de susceptibilidad sísmica. En este mapa, la suma de los pesos se encuentra en un rango de 9 a 15, lo que lleva a la creación de 3 categorías para facilitar la visualización. La escasa diferencia en el rango de valores se debe a que la zona urbana se encuentra en una misma configuración de pendiente y litología, específicamente "Ligeramente inclinado" y "Aluviones finos y medios" respectivamente. Por consiguiente, el peso asignado para estos dos factores fue el mismo para todas las construcciones. En cuanto a la amenaza sísmica, las construcciones se encuentran dentro de 4 cuadrantes de la cuadrícula de 5 km, pero todas corresponden a una amenaza baja. Esto significa que este factor también mantiene un mismo valor en todas las construcciones.

Con base en este análisis, se puede concluir que el único factor que diferencia las categorías de susceptibilidad en baja, media y alta es el número de pisos de las construcciones. Por lo tanto, los colores más intensos en el mapa se encuentran principalmente en la zona central del municipio, donde se ubican las construcciones con mayor cantidad de pisos. Sin embargo, se pueden visualizar construcciones con susceptibilidad alta de forma dispersa dentro del perímetro urbano, lo que permite inferir que corresponden a viviendas con más de 2 pisos.

Figura 62.Susceptibilidad de construcciones urbanas en el municipio de Chaparral.

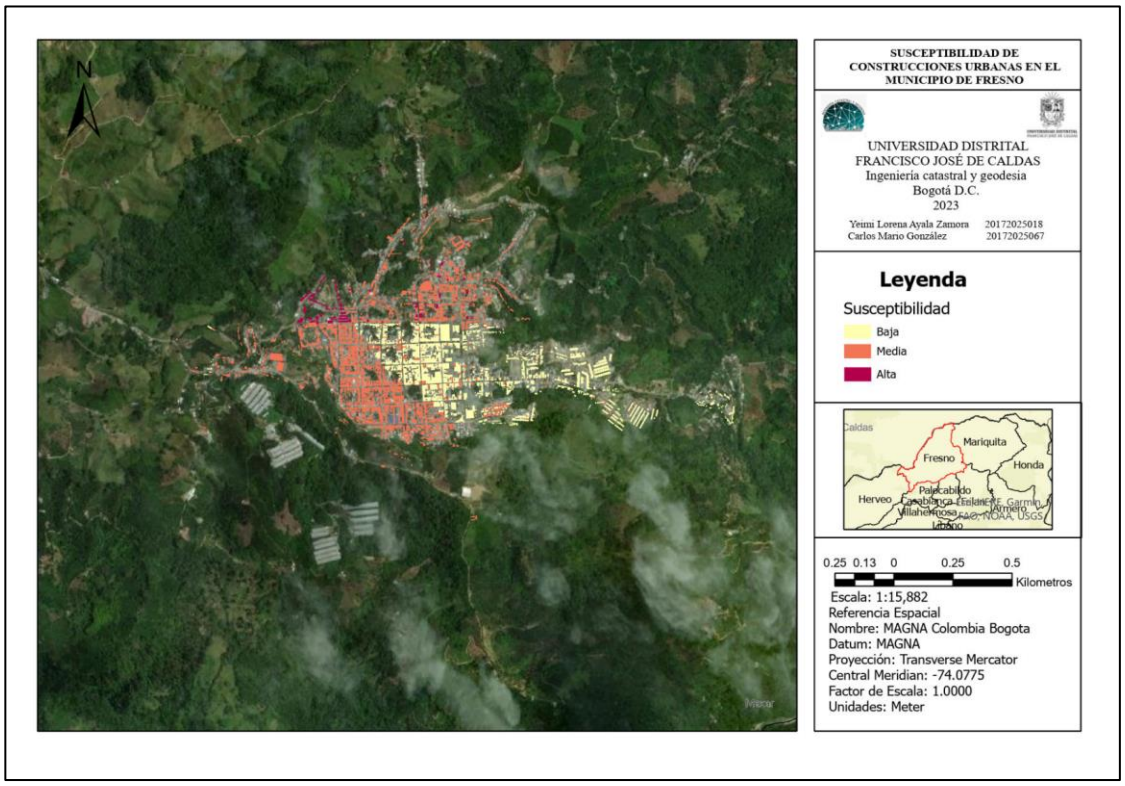


Fuente: Elaboración propia

En el caso del municipio de Fresno, tal como se muestra en la figura 63, que corresponde al mapa de susceptibilidad sísmica de construcciones urbanas, se logró una clara distinción visual entre las distintas clases de susceptibilidad. Esto fue posible debido a que se contó con información completa sobre las construcciones en la zona urbana, y la suma de los pesos presentó un amplio rango, abarcando valores entre 8 y 17.

Las tres categorías a nivel visual son notablemente distinguibles, ya que, dentro del perímetro urbano del municipio, existen dos clasificaciones de pendiente divididas sobre el sector occidental, y cada tipo de pendiente aporta un valor ponderado diferente, así mismo, las construcciones se encuentran ubicadas en 2 cuadrantes de la cuadrícula de 5km, donde el cuadrante norte corresponde a una amenaza media y el cuadrante sur a una amenaza baja. Por último, se encuentran construcciones de 1 a 8 pisos, las de mayor altura ubicadas en la parte central de Fresno y es por esto que se puede ver colores de susceptibilidad media de forma dispersa. Cabe resaltar que el factor de litología fue homogéneo para todo el municipio y corresponde a cenizas volcánicas.

Figura 63. Susceptibilidad de construcciones urbanas en el municipio de Fresno.



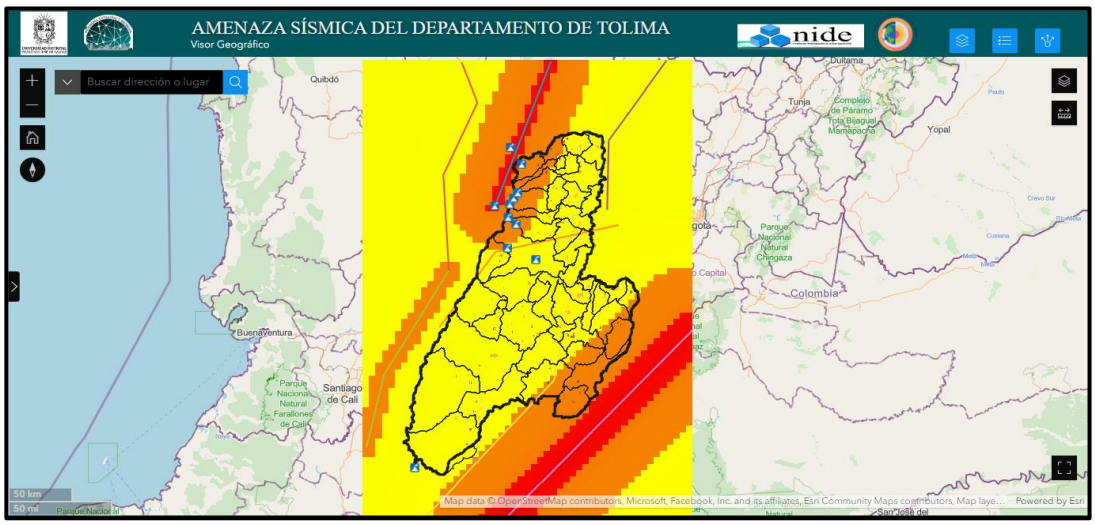
Fuente: Elaboración propia

4.2. Publicación del visor geográfico

Como se explicó en el ítem 3.4.10, el visor geográfico se permite la consulta y visualización de la información y los resultados obtenidos representados en los mapas de amenaza sísmica que corresponde con la figura 56, los mapas de aceleraciones horizontales de terreno en periodos de retorno de 100, 500, 1.000 y 2.000 años que corresponden con las figuras 57, 58, 59 y 60 respectivamente y el estudio por susceptibilidad de las construcciones del departamento el cual se presenta en el ítem 4.1.3. Este visor muestra los resultados del desarrollo teórico y aplicado que fue explicado en la metodología de el ítem 3.1 en donde se muestra el flujo de la información y que lleva a obtener un resultado de las fuentes sismotectónicas del departamento de Tolima en el período entre 1925 y 2022, que fueron realizados con el rigor académico de una metodología científica y será un insumo muy importante en investigaciones futuras realizadas por las entidades responsables como el SGC, UNGR, etc.

De acuerdo a la definición de un visor Geográfico se requieren funcionalidades como activar/desactivar capas, visualización de la leyenda, cargue de archivos externos, búsqueda y medición; por otra parte, se configuro una interfaz que permite la interacción del usuario con el mapa y diferentes datos, de fácil entendimiento y manejo. Esto se desarrolló en la interfaz de ArcGIS pro y ArcGIS Online y se publicó mediante la herramienta de “Experience Builder” de ArcGIS Online, en donde su publicación fue directa en la Web en la suite de ArcGIS con acceso público.

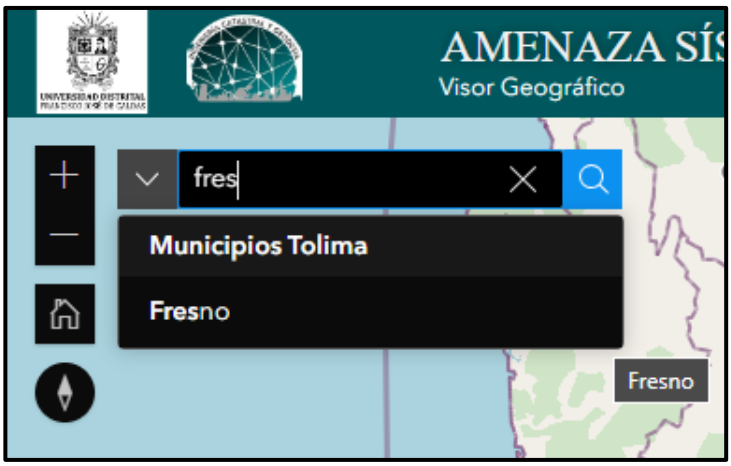
Figura 64 Vista general Geovisor



Fuente: Elaboración propia

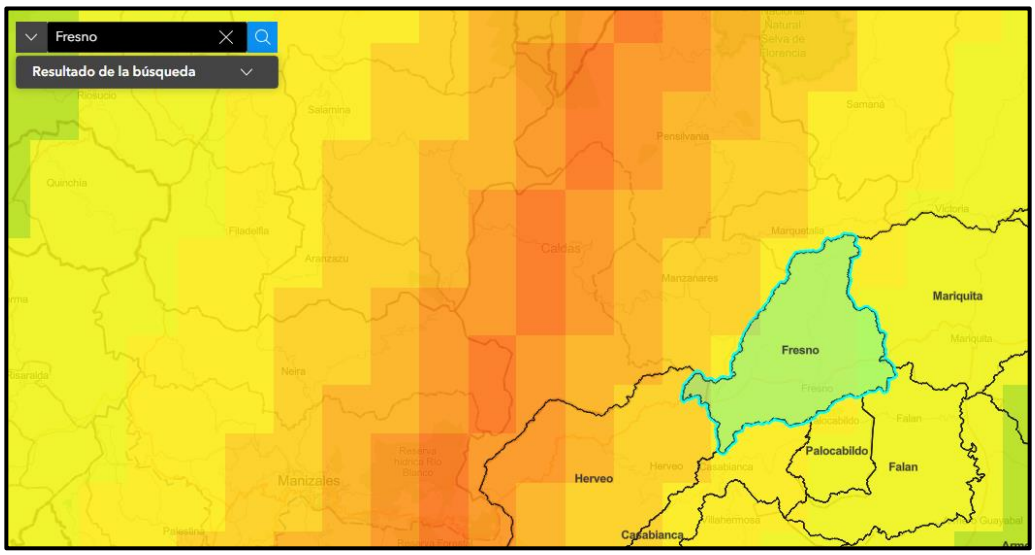
En cuanto a las herramientas utilizadas, se estableció una búsqueda acotada en los municipios del departamento de Tolima con el fin de evitar confusiones con otros lugares en el mundo; al realizar la búsqueda, la herramienta sugiere posibles resultados al usuario como se puede ver en la figura 65 y una vez que el usuario selecciona el resultado deseado, este se desplaza y resalta la búsqueda definida como se observa en la figura 66, lo que facilita una interacción detallada con los diferentes resultados y puntos de interés.

Figura 65 Herramienta de Búsqueda Geovisor



Fuente: Elaboración propia

Figura 66 Resultado de búsqueda Geovisor



Fuente: Elaboración propia

En el panel desplegable de la sección izquierda del visor geográfico, es posible cargar archivos geográficos externos, estos archivos podrán ser cargados directamente desde el equipo computacional, es decir, archivos propios, en formatos de tablas (CSV), KML, Shapefile y GeoJSON, además, se tiene la opción de cargar datos desde la web mediante su URL, así como datos alojados en el espacio de trabajo personal de ArcGIS Online de cada usuario o en los espacios compartidos de la organización y del Living Atlas de la suite de ArcGIS.

Figura 67 Herramienta de Cargue de archivos Geovisor



Fuente: Elaboración propia

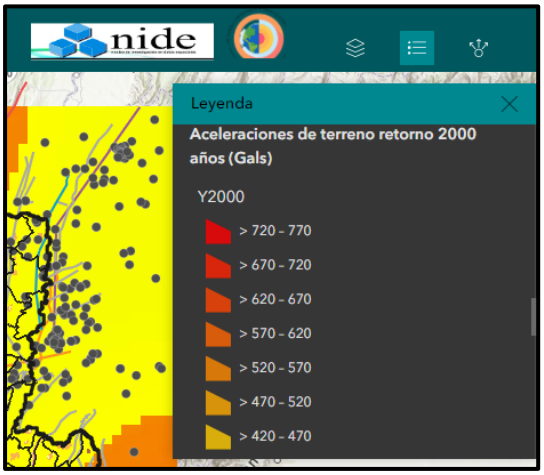
En la sección superior derecha, el usuario podrá desplegar las capas disponibles en el visor junto con su respectiva leyenda y simbología como se observa en las figuras 68 y 69.; desde estos paneles, se cuenta con la funcionalidad de activar o desactivar las capas que se desean visualizar, y al hacerlo, también se activan o desactivan las secciones correspondientes en la leyenda.

Figura 68.Visualización de capas Geovisor



Fuente: Elaboración propia

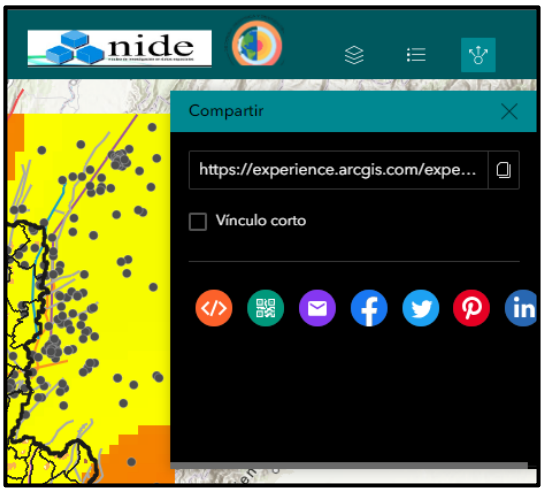
Figura 69.Visualización de Leyenda Geovisor



Fuente: Elaboración propia

Como ultima herramienta disponible en la sección superior derecha, es posible compartir la dirección web del visor geográfico mediante su link directo (https://arcg.is/qTuOS) o su código QR que se puede ver en la figura 71, al igual que es posible enviar su dirección web mediante correo electrónico y diferentes redes sociales como se puede observar en la figura 70.

Figura 70. Opciones de compartir Geovisor



Fuente: Elaboración propia

Figura 71. Código QR Geovisor

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La metodología planteada para el cálculo de la amenaza sísmica muestra resultados que se aproximan a los presentados por el Servicio Geológico Colombiano, lo cual se evidencia en los análisis de los mapas de aceleraciones horizontales de terreno donde se comparan las similitudes de los estudios; demostrando de esta manera, que la metodología desarrollada en la presente monografía es óptima para realizar estudios de amenaza sísmica con un alto nivel de precisión y con la facilidad de poder implementarse de una manera especializada en un área de interés definida.

En cuanto a los resultados de amenaza sísmica se destacaron dos áreas que presentaron una marcada tendencia de valores elevados de aceleraciones horizontales de terreno, una de estas áreas se localizada al noroccidente del departamento coincidiendo con la ubicación del sistema de fallas del Romeral y la falla de Ibagué, las cuales tienen una gran importancia desde el punto de vista sismo tectónico al afectar parte de la cordillera central en Colombia; y la otra zona al suroriente, donde se ubica la falla Frontal sobre el inicio del sistema montañoso de la cordillera oriental, de esta manera se demuestra que la presencia de las fallas activas mencionadas anteriormente, inciden en un mayor nivel de amenaza sísmica en el departamento de Tolima.

La susceptibilidad sísmica de las edificaciones en las áreas urbanas de mayor densidad poblacional se encuentra fuertemente influenciada por la geomorfología, litología y amenaza sísmica del terreno, esta relación se evidenció en la metodología desarrollada; sin embargo, la ausencia de datos de las diferentes tipologías constructivas y el vacío de información catastral obstaculizan el análisis de la susceptibilidad actual de las áreas urbanas en la región de estudio.

El visor geográfico creado, que integra los resultados derivados de la metodología desarrollada, desempeña un papel fundamental como apoyo en la formulación de planes de gestión del riesgo y en la toma de decisiones para la planificación del departamento de Tolima. Es importante resaltar que el desarrollo del mismo en la presente monografía, aporta el conocimiento base suficiente para la implementación de este tipo de herramientas en otros departamentos del país.

El trabajo realizado en campo demuestra que la aplicación de la encuesta de percepción sísmica no solo aporta y genera información de gran relevancia para el estudio y análisis de la intensidad sísmica y su representación cartográfica, sino que también es una herramienta fundamental en la gestión del riesgo territorial.

Recomendaciones

Se sugiere a las autoridades encargadas de la gestión del riesgo en los diversos municipios del departamento de Tolima que consideren la implementación de herramientas destinadas a la difusión pública de información geográfica base para facilitar estudios futuros, en temas de concernientes a la gestión del riesgo sísmico.

Es importante resaltar que la falta de información en registro 1 y 2 en los diferentes municipios del departamento de Tolima impide un análisis completo de la susceptibilidad que tienen las construcciones en caso de un evento sísmico, por esta razón, sería aconsejable aplicar la metodología propuesta en esta monografía contemplando más variables en la parametrización de la susceptibilidad de las edificaciones, una vez se disponga de información completa y actualizada.

La metodología elaborada para el análisis estadístico implementado incorpora variables de sismos históricos y fallas activas en la región de estudio; no obstante, sería aconsejable ampliar el número de variables, utilizando la misma metodología para lograr resultados aún más precisos, además, se recomienda aumentar los puntos de estudio en los cuales se calcularon las aceleraciones horizontales de terreno, lo que permitiría obtener resultados con un mayor detalle.

Para futuras implementaciones de visores geográficos por parte de entidades responsables del análisis y estudio del riesgo sísmico en el territorio, se recomienda considerar la metodología desarrollada en esta monografía, ya que cuenta con una flexibilidad de funciones que permiten ajustarse y abordar de manera efectiva las necesidades específicas que se planteen

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrahamson, N. A., & Silva, W. J. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological research letters*, *68*(1), 94-127.

Ahmad RA, Singh RP, Adris A. Seismic hazard assessment of Syria using seismicity, DEM, slope, active faults and GIS. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 1 de abril de 2017; 6:59-70.

AIS (1984) Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Estudio General del Riesgo Sísmico de Colombia. Bogotá.

Aki, K., and Lee, W. H. K. (1976), Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial model, *J. Geophys. Res.*, 81(23), 4381– 4399, doi:10.1029/JB081i023p04381.

Alcaldía de Ibagué & Universidad de los Andes. (2006, noviembre). Estudios De Amenaza, Respuesta Dinámica Y Microzonificación Sísmica Para La Ciudad De Ibagué. En Centro de Información Municipal para la Planeación Participativa. Centro De Estudios Sobre Desastres Y Riesgos CEDERI. https://cimpp.ibague.gov.co/wp-content/uploads/2017/10/CAP%C3%8DTULO-02-Amenaza-S%C3%ADsmica.pdf

Alcaldía de Melgar, Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres municipio de Melgar Tolima, Melgar Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2014.

Alfaro, A. J., González, A. F., & Macías, A. T. (2000). DESASTRES NATURALES Y DESPLAZADOS EN COLOMBIA De Desastre Natural a Catástrofe Social. Memorias de la XX Reunión de Facultades de Ingeniería

Alfaro, A., Torres, A., Jaramillo, M., Pabon, G., Junco, J., Jiménez, B., Franco, A., Páez, M., Afanador, M., Escobar, P., Ramos, A., Calpa, C., Guacaneme, J., & Pinto, R. (2000). *MICROZONIFICACION SISMICA PRELIMINAR DE IBAGUE*.

Algermissen, S.T. and D.M. Perkins (1976): A Probabilistic estímate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States, U.S. Geol. Surv. OpenFileReport76-416, 45 p., 3 plates

Alvarado, D. C. (2022.). Prueba Piloto Para El Levantamiento De Información Del Rud A Través De Plataforma Móvil Y Visualización En Visor Geográfico [Tesis de maestría]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/30273

Alvarado, M., Gabriela, C., Pérez, E., & Audemard, F. (2015). Cartografía neotectónica de la Falla de Boconó entre Tabay y La Toma, Mérida-Venezuela. Boletín de Geología, 37(2), 47-55.

Ardo-Carrasco, S. C. (2017). Uso de sistemas de información geográfica (SIG) en la valoración del potencial piscícola a nivel municipal. *ORINOQUIA*, *21*(2), 13-21. https://doi.org/10.22579/20112629.413

Barbat, AH. “El riesgo sísmico en el diseño de edificios. Calidad Siderúrgica, SRL. 1998

Beck, Ulrich. 1992. Risk Society: Towards a New Modernity. Londres: Sage. 2000. Retorno a la teoría de la «sociedad del riesgo. En: Boletín de la A.G.E. No. 30, p. 9-20

Beltrán Torres, J., Suescún, W. C., & Castillo, A. A. (2006). Evaluación de efectos sísmicos asociados mediante la utilización de SIG en Ibagué-Colombia. *Épsilon*, *1*(6), 52-61.

Bomer, J.J, Scott, S. Gand Sarma, S.K (2000). “Hazard-consistent earthquake scenarios”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19, 2000, p219-231.

Bonett Díaz, Ricardo León. “Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada” Universitat Politècnica de Catalunya. 2003

C. Xu, F.C. Dai, X.W. Xu, Y.H. Lee, GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China, Geomorphology 145–146 (2012) 70–80.

C.-G. Sun, S.-H. Chun, T.-G. Ha, C.-K. Chung, D.-S. Kim, Development and application of a GIS-based tool for earthquake-induced hazard prediction, Comput. Geotech. 35 (2008) 436–449.

Caicedo, I. F., Romero, J., Ojeda, A., Arcila, M., Alvarado, C., Alvarado, A. I., & Daza, R. (2005, diciembre). ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTIAGO DE CALI. Gov.co. https://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003002515005/documento/pdf/2105150051110000.pdf

Chang, J. C.-J., & King, W. R. (2005). Measuring the Performance of Information Systems: A Functional Scorecard. *Journal of Management Information Systems*, *22*(1), 85-115. https://doi.org/10.1080/07421222.2003.11045833

De Sanctis, L., et al. "Site effects and intervention criteria for seismic risk mitigation in the ancient city of Pompeii: The case of the Insula dei Casti Amanti." Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III. CRC Press, 2022. 214-233.

Deligiannakis G, Papanikolaou ID, Roberts G (2016) Fault specific GIS based seismic hazard maps for the Attica region, Greece. Geomorphology https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.005

Díaz, M., & Alfaro, A. Mapas de isoaceleración para Colombia utilizando la nueva generación de ecuaciones de atenuación. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia. 2008.

Diederix, H., Audemard, F., Osorio, J. A., Montes, N., Velandia, F., & Romero, J. (2006). Modelado morfotectónico de la falla transcurrente de Ibagué, Colombia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, *61*(4), 492-503.

Domínguez, D., & Gómez, H. (2016). *Implementación de un geovisor de mapas para la visualización e identificación de amenaza por movimiento de masa e inundación, prueba piloto del barrio trece de noviembre en el municipio de Medellín.* Trabajo de grado, Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Manizales. Recuperado de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2632/Gomez_Dominguez_Seminario_II_Entrega_Final.pdf?sequence=4&isAllowed=y

E. Alparslan, F. Ince, B. Erkan, C. Aydoner, H. Ozen, A. Donertas¸, S. Ergintav, F. S. Yagsan, H. Zateroglları, I. Eroglu, M. Deger, H. Elalmıs¸, M. Ozkan, A GIS model for settlement suitability regarding disaster mitigation, a case study in Bolu Turke, Eng. Geol. 96 (2008) 126–140.

Fathi-Fazl, R., Lounis, Z., & Cai, Z. (2020). Multicriteria and multilevel framework for seismic risk management of existing buildings in Canada. Journal of performance of constructed facilities, 34(2), 04020004.

Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-B). Boletín geológico, 20(2), 1-173.

Gallego, M. (2020). Diseño Sísmico Por Desempeño En Colombia. Universidad de los Andes, Colombia. https://www.virtualpro.co/biblioteca/diseno-sismico-por-desempeno-en-colombia

Garcia Martínez, L. (2013, Junio 21). "Contribución de los SIG al estudio de los riesgos naturales. El caso de Haití.". Universidad de Cantabria.

García Mayordomo, Julián & Insua-Arévalo, Juan. (2011). Seismic hazard assessment for the Itoiz dam site (Western Pyrenees, Spain). Soil Dynamics and Earthquake Engineering - SOIL DYNAM EARTHQUAKE ENG. 31. 1051-1063. 10.1016/j.soildyn.2011.03.011.

García, J. A. D., & Brenes, E. S (2005). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA UNIDAD DE FUNCIONES MATEMÁTICAS. Instituto Tecnológico de Costa Rica

Geológico Colombiano (SGC) – Grupo de Amenaza Sísmica. Fundación Global Earthquake Model (GEM). 196 pp.

Gomarasca, M. A. (2010). Basics of geomatics. *Applied Geomatics*, *2*, 137-146.

Gómez Espada, Y. (2015). Análisis de parámetros sísmicos de dos series ocurridas en el sur y este de España. Universidad Politécnica de Madrid.

Gómez, Á. P., Jalca, J. J. R., García, J. G., Sánchez, O. Q., Parrales, K. M., & Merino, J. M. (2017). *Fundamentos sobre la gestión de base de datos* (Vol. 23). 3Ciencias.

Guo, Yanming, et al. "Deep learning for visual understanding: A review." Neurocomputing 187 (2016): 27-48.

Gutiérrez, M. (2006, November). El rol de las bases de datos espaciales en una infraestructura de datos. In *GSDI-9 Conference Proceedings* (pp. 6-10).

Hamdache, Mohamed, et al. "Status of Seismic Hazard Modeling of Active Faults in Oran City,(Northwestern Algeria)." Conference of the Arabian Journal of Geosciences. Springer, Cham, 2022.

INGEOMINAS, Estudio geológico - geotécnico e identificación de amenazas geológicas en 20 cabeceras municipales del departamento del Tolima – Mariquita, INGEOMINAS ,1993

Jena, R., Pradhan, B., Beydoun, G., Al-Amri, A., & Sofyan, H. (2020). Seismic hazard and risk assessment: A review of state-of-the-art traditional and GIS models. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*(2), 50. https://doi.org/10.1007/s12517-019-5012-x

Jena, R., Pradhan, B., Beydoun, G., Al-Amri, A., & Sofyan, H. (2020). Seismic hazard and risk assessment: a review of state-of-the-art traditional and GIS models. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*, 1-21.

Kanamori, Hiroo, Egill Hauksson, and Thomas Heaton. "Real-time seismology and earthquake hazard mitigation." Nature 390.6659 (1997): 461-464.

López, M. C. R., & Castillo, A. J. A. (2009). *Dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica de Ibagué debido a la escasez de datos*. 14.

M. Alizadeh, I. Ngah, M. Hashim, B. Pradhan, A. Pour, A hybrid analytic network process and artificial neural network (ANP-ANN) model for urban earthquake vulnerability assessment, Rem. Sens. 10 (2018) 975.

M. Alizadeh, M. Hashim, E. Alizadeh, H. Shahabi, M. Karami, A. Beiranvand Pour, B. Pradhan, H. Zabihi, Multi-criteria decision making (MCDM) model for seismic vulnerability assessment (SVA) of urban residential buildings, ISPRS Int. J. GeoInf. 7 (2018) 444.

M. Ghassemi, Surface ruptures of the Iranian earthquakes 1900–2014: insights for earthquake fault rupture hazards and empirical relationships, Earth Sci. Rev. 156 (2016) 1–13.

M. Hashemi, A.A. Alesheikh, A GIS-based earthquake damage assessment and settlement methodology, Soil Dynam. Earthq. Eng. 31 (11) (2011) 1607–1617.

M.C. Ningthoujam, R.P. Nanda, A GIS system integrated with earthquake vulnerability assessment of RC building, Structure 15 (2018) 329–340.

Marín Ruiz, A. (2003, Abril). “Aplicación de los SIG al cálculo del impacto de terremotos sobre infraestructura y edificios”. Universidad de Sevilla

Martínez, L. E. (2001) Caracterización Geotécnica de Ibagué. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá.

Miranda, J. D. & Gamboa, C. A. (2018). *Desarrollo de un sistema para la detección de movimientos sísmicos usando redes neuronales artificiales*. Recuperado de: http://hdl.handle.net/20.500.11912/5725.

Moore, D. S. (2005). Estadística aplicada básica. Antoni Bosch editor.

Morales, A. (2021, septiembre 21). Los SIG aplicados a la actividad sísmica y volcánica. El caso de La Palma. MappingGIS. https://mappinggis.com/2021/09/los-sig-aplicados-a-la-actividad-sismica-y-volcanica/

N. Rahman, M.A. Ansary, I. Islam, GIS based mapping of vulnerability to earthquake and fire hazard in Dhaka city, Bangladesh, Int. J. Dis. Risk Reduct. 13 (2015) 291–300.

Nuñez Tello, A. (2001). Mapa geológico del departamento del Tolima: Geología, recursos geológicos y amenazas geológicas, 1: 250.000, memoria explicativa: Bogotá.

Núñez, A. y Murillo, A., 1982.- Geología y prospección geoquímica de las planchas 244 – Ibagué y 263 – Ortega (Tolima). Inf. 1879, Ingeominas (Ibagué): 367 p.

Núñez, A., Mosquera, D., & Vega, C. (1984). Reseña explicativa del mapa geológico preliminar plancha 263 Ortega. https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024375/documento/pdf/0101243751103000.pdf

Núñez, Mapa geológico del departamento del Tolima, Ministerio de minas y energía, 2001

OPS. (1993) "Mitigación de desastres en las instalaciones de la salud. Evaluación y reducción de las vulnerabilidad física y funcional". Organización Panamericana de la Salud. Washington D.C.

Osorio, J. A., Montes, N. E., Velandia, F. A. , Garay, J. E. A., Romero, J. A., Diederix, H., Audemard, F., & Nuñez, A. N. (2008). Paleosismología de la Falla de Ibagué. En *Libros del Servicio Geológico Colombiano*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. https://doi.org/10.32685/9789589789674 (corresponde a la bibliografía del 17)

P. Villagra, C. Rojas, R. Ohno, M. Xue, K. Gomez, A GIS-base exploration of the relationships between open space systems and urban form for the adaptive capacity of cities after an earthquake: the cased of two Chilean cities, Appl. Geogr. 48 (2014) 64–78.

Páiz, E. J., & Bendaña, R. A. (2015). Análisis de amenaza sísmica y respuesta de sitio considerando el potencial del fallamiento superficial en el Campus del Recinto Universitario "Rubén Darío" (RURD) de la UNAN-Managua. [Investigación monográfica]. Universidad nacional autónoma de Nicaragua.

Paris, G.; Machette, M.; Dart, R. y Haller, K. (2000) Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions, USGS. Open File report, CO-0284.

R. Hassanzadeh, Earthquake population loss estimation using spatial modelling and survey data: the Bam earthquake, 2003, Iran, Soil Dynam. Earthq. Eng. 116 (2019) 421–435.

Ran, J., & Nedovic-Budic, Z. (2016). Integrating spatial planning and flood risk management: A new conceptual framework for the spatially integrated policy infrastructure. Computers, Environment and Urban Systems, 57, 68-79. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.01.008

Reynaldo Argüelles, C. L., Guardado Lacaba, R., Sorhegui Ortega, R. A., & Rojas de la Cruz, R. (2019). Importancia de la gestión de riesgos para el desarrollo local. Caso de estudio Consejo Popular Caribe, Cuba.

Rodríguez Cárdenas DA, Rodríguez J. Diseño de Herramienta SIG Para La Gestión de La Información de Diagnósticos Técnicos en La Subdirección de Análisis de Riesgos y Efectos del Cambio Climático del Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) de La Ciudad de Bogotá. instname:Universidad Antonio Nariño. 10 de noviembre de 2021; Disponible en: http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5706

Rodríguez, M. Un recorrido por la sismología de Cuba. Cotilla Editorial Complutense, 2008. 295 p.

Romero López, M. C. (2007). Evaluación probabilística de la amenaza sísmica regional para la ciudad de Ibagué. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/180

Roque, P. J. C., Violanda, R. R., Bernido, C. C., & Soria, J. L. A. (2023). Earthquake Occurrences in the Pacific Ring of Fire Exhibit a Collective Stochastic Memory for Magnitudes, Depths, and Relative Distances of Events. arXiv preprint arXiv:2304.00279.

S. Karimzadeh, B. Feizizadeh, M. Matsuoka, From a GIS-based hybrid site condition map to an earthquake damage assessment in Iran: methods and trends, Int. J. Disaster Risk Reduct. 22 (2017) 23–36.

Safina Melone, S. Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico. Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, 2003. ISBN 8468815748

Santofimio, T., Cabrera, R., Mateus, A., Cardona, A., Orjuela, W., Agudelo, F., Robles, J., Eduardo, C., & Andrade, M. (2020). Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Tolima. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/paginas/pedcti-tolima.pdf

Sarria, A. (1995). Ingeniería Sísmica". Segunda Edición. Ediciones Uniandes. Bogotá, Colombia.

Sepúlveda-Jaimes, F. J., & Cabrera-Zambrano, F. H. (2018). Tomografía sísmica 3D del nido sísmico de Bucaramanga (Colombia). Boletín de Geología, 40(2), 15-33.

SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. Causas, características e impactos de los sismos. Secretaría de economía de México. 2013.

SGC & GEM, 2018. "Modelo Nacional de Amenaza sísmica de Colombia. Servicio

Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica – Innovación en investigación sismológica. (s. f.). de https://smis.org.mx/

Soeters, R. (1976) El desarrollo geomorfológico de la región de Ibagué-Girardot. Revista CIAF, 3, pp. 471-480, Bogotá.

Strasser, F. O., Bommer, J. J., & Abrahamson, N. A. (2008). Estimating ground-motion variability: Issues, insights & challenges. In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*.

Streckeisen, A., 1974. Classification and nomenclature of plutonic rocks. Geol. Runds. (Stuttgart), 63 (2): 773 – 786. 1979. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melillitic rocks. Geology (Boulder), 7 (7): 331 – 335.

Sunte, J. (2023). The Controlling Measures and Solution to Problems of Earthquake. IJSRMME, 7 (1).

T. Rashed, J. Weeks, Assessing vulnerability to earthquake hazards through spatial multicriteria analysis of urban areas, Int. J. Geogr. Inf. Sci. 17 (2002) 547–576.

Tarbuck, Edward J. y Lutgens, Frederick K. (2005). Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física. Madrid, España: Pearson Educación S.A. 686 p.

Theurer, M. M., Velasco, G., Rodríguez, J., & Terán. (2016). Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un sismo de grado 7.1 e n magnitud Richter ocurrido en Japón. *Ingeniería*, *20*(3), 137-146.

Tobler W., (1970) "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region". Economic Geography, 46(2): 234-240.

Toma-Danila, Dragos. "Local 3D geologic, geotechnical and geophysical model-a necessary step forward for assessing the local seismic hazard of a densely populated area." Present Environment and Sustainable Development. 2022.

Toro Román, M. V. (2019). Geovisor para la toma de decisiones, construcción de memoria histórica y prospectiva en Jimar. https://repository.udca.edu.co/handle/11158/2212

Ujueta-Lozano, G. Tectónica de bloques, delimitados por lineamientos de dirección NO-SE y NNE-SSO a NE-SO en el norte y nordeste de Colombia y en el noroccidente de Venezuela. Geología Colombiana, Bogotá. 2007.

USGS.gov | Science for a changing world. (s. f.). https://www.usgs.gov/

Van Lammeren, R. (2011). Geomatics in physiognomic landscape research: A Dutch view. *Research in Urbanism Series*, *2*, 73-97.

Villalón-Semanat, M., & Palau-Clares, R. (2018). Relaciones empíricas entre las magnitudes mb/Ms, Ms/Mw y mb/Mc para el área de Cuba, Jamaica y La Española. Minería y Geología, 34(2), 171-180.

Zambrano Muñoz, O. A. (s. f.). *Cuantificación de la relación frecuencia-magnitud (análisis de regresión) en el Borde Llanero: Huila-Meta-Cundinamarca-Boyacá-Casanare, a partir de datos de la RSNC.* http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13331

Zapata-Villada, J. P., Rodríguez, G., Ramírez, D., Correa-Martínez, A. M., Obando, G. y Muñoz, J. A. (2022).Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Complejo Icarcó, cordillera Central. Medellín: Servicio

Zuñiga, R. (2011, febrero). *NOTAS INTRODUCTORIAS SISMOLOGÍA*. http://www.colegionicolasesguerra.edu.co/images/documentos/leccien201777.pdf