UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Desarrollo de una aplicación móvil para la gestión de rutas basadas en algoritmos de ruta óptima

Valentina Cangrejo Sanabria
Código: 20181025122
vcangrejos@udistrital.edu.co

Angie Catalina Cataño Martínez
Código : 20191025044
accatanom@udistrital.edu.co

Modalidad de Pasantía
En cumplimiento del Acuerdo 012/2022 – Acta 018 del 13 de agosto de 2025

Director interno
Paulo Cesar Coronado Sánchez

Director Externo
Carlos Andrés Fajardo Tapias

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de ingeniería

Ingeniería Catastral y Geodesia
Bogotá D.C
Mayo, 2026

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al equipo de CTGlobal por brindarnos la oportunidad de participar y aportar en el desarrollo de este proyecto, así como por abrirnos las puertas de su organización y permitirnos fortalecer nuestras competencias en un entorno profesional y colaborativo.

De manera especial, agradecemos María Camila Rodríguez por su acompañamiento constante, su disposición y su valiosa guía en los aspectos técnicos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y consolidación de este trabajo.

Extendemos igualmente nuestro reconocimiento a nuestra alma mater, la Universidad Distrital, por proporcionarnos la formación académica, ética y profesional que hizo posible la realización de este proyecto.

A nuestras familias, les agradecemos profundamente por su apoyo incondicional, comprensión y motivación a lo largo de este proceso. Su respaldo fue esencial para superar los desafíos y mantenernos firmes en la consecución de este logro.

Finalmente, queremos agradecer a nosotras mismas, como autoras de este trabajo, por la dedicación, el compromiso y la perseverancia demostrados a lo largo de este proceso, superando los retos presentados y manteniendo la motivación hasta la culminación de esta etapa.

Este logro es el resultado del esfuerzo conjunto, el aprendizaje continuo y la convicción de aportar, desde nuestra disciplina, a la construcción de soluciones orientadas al bienestar de la sociedad.

Resumen

Este documento presenta un proyecto de grado en modalidad de pasantía orientado al fortalecimiento de la gestión del riesgo de desastres en Santa Rosa de Cabal, Risaralda. La investigación aborda la vulnerabilidad frente a inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa en el corredor del río San Eugenio (sectores Abedules y La Trinidad), donde la señalización estática resulta insuficiente ante eventos dinámicos.

Como producto principal se desarrolló una aplicación móvil en React Native y TypeScript que integra capas catastrales y de amenaza del Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo (ALDESARROLLO, 2025) con un motor propio de ruteo óptimo. Dicho motor implementa cuatro algoritmos de búsqueda en grafos —Dijkstra, A* con heurística euclidiana, Time-Dependent Dijkstra y Multi-Source Dijkstra— y dos factores catastrales específicos: el factor 4A (vulnerabilidad de obras lineales) y el factor 4B (riesgo predial adyacente). Las rutas se calculan de manera autónoma en el dispositivo, sin requerir conectividad, condición indispensable en escenarios de emergencia.

La validación se realizó mediante dos experimentos controlados: un benchmark del algoritmo Dijkstra (200 iteraciones, latencia media inferior al milisegundo, 96 % de éxito) y una comparación cuantitativa con factores catastrales que evidenció una reducción del porcentaje de rutas que atraviesan infraestructura de alto riesgo, del 19,1 % al 8,5 % en avenida torrencial. El proyecto se alinea con la Ley 1523 de 2012, el Decreto 1807 de 2014 y el Marco de Sendai 2015–2030, articulándose como instrumento complementario al Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres. La herramienta se propone como aporte concreto al cierre de la brecha entre la producción de información técnica y su traducción en instrumentos operativos para la protección de la vida en el corredor del río San Eugenio.

Palabras clave: Gestión del riesgo de desastres, Sistemas de Información Geográfica (SIG), ruteo óptimo offline, factores catastrales de vulnerabilidad, evacuación urbana.

Abstract

This document presents a final undergraduate project (internship modality) aimed at strengthening Disaster Risk Management in Santa Rosa de Cabal, Risaralda. The study addresses the systemic vulnerability to flooding, flash floods, and mass movements along the San Eugenio River corridor (Abedules and La Trinidad neighborhoods), where traditional static signage proves insufficient during dynamic events.

The main outcome is a mobile application developed in React Native and TypeScript, integrating cadastral and hazard layers from the detailed risk assessment (EDAVR; ALDESARROLLO, 2025) with a custom optimal-routing engine. The engine implements four graph-search algorithms —classical Dijkstra, A* with Euclidean heuristic, Time-Dependent Dijkstra, and Multi-Source Dijkstra— and two project-specific cadastral factors: factor 4A (linear-infrastructure vulnerability) and factor 4B (adjacent at-risk properties). Routes are computed autonomously on the user's device, with no network requirement, an indispensable condition in emergency scenarios.

Technical validation included two controlled experiments: a performance benchmark of the Dijkstra algorithm (200 iterations, sub-millisecond mean latency, 96% success rate) and a quantitative comparison with cadastral factors, which evidenced a reduction in the percentage of routes crossing high-risk infrastructure, from 19.1% to 8.5% in the flash-flood scenario. The project aligns with Colombian Law 1523 of 2012, Decree 1807 of 2014, and the Sendai Framework 2015–2030, positioning itself as a complementary instrument to the Municipal Disaster Risk Management Plan. The tool is proposed as a concrete contribution toward closing the gap between the production of technical information and its translation into operational instruments for the protection of life along the San Eugenio River corridor.

Keywords: Disaster risk management, Geographic Information Systems (GIS), offline optimal routing, cadastral vulnerability factors, urban evacuation.

Tabla de contenido

1. Introducción 7

2. Planteamiento del problema 9

3. Objetivos 10
Objetivo General 10
Objetivos Específicos 10

4. Plan de trabajo 11
Plan de trabajo general 11
Plan de trabajo por estudiante 12

5. Caracterización territorial y ambiental del área de estudio 13
Caracterización socioeconómica y uso del suelo 13
Configuración del Riesgo: Vulnerabilidad Social y Dinámicas de Ocupación 16
Configuración Geológica y Dinámica del Relieve 17
El Río San Eugenio como eje de la dinámica territorial 19
Caracterización comunitaria del riesgo 20

6. Identificación de las zonas de amenaza por inundación, avenida torrencial y movimiento en masa 21
Zonificación de Amenaza por inundación 22
Zonificación de Amenaza por avenidas torrenciales 23
Zonificación de amenaza por movimientos en masa 24

7. Marco normativo de la gestión del riesgo 26
Marco normativo Internacional 26
Marco normativo nacional 27
Marco normativo departamental (Risaralda) 28
Marco municipal (Santa Rosa de Cabal) 29

8. Estado del arte — Aplicaciones para calcular rutas y su posible uso en gestión del riesgo de desastres naturales 30

9. Metodología 33
FASE 4. Creación de GDB 33
FASE 5. Creación de la aplicación móvil 36

10. Alcances y limitaciones 46

11. Conclusiones y recomendaciones 53

12. Referencias Bibliográficas 57

Lista de figuras

Figura 1Mapa de Localización área de estudio. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025) 13
Figura 2. Mapa de usos del suelo. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025) 15
Figura 3 Mapa de elementos geomorfológicos. Fuente: ALDESARROLLO (2025) 18
Figura 4 Mapa de Zonificación de Amenaza por inundación. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025) 22
Figura 5 Mapa de Zonificación de Amenaza por avenidas torrenciales. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025) 23
Figura 6. Mapa de Zonificación de amenaza por movimientos en masa. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025) 24
Figura 7. Mapa de georreferenciación de puntos de encuentro y equipamientos. Elaboración propia 36

1. Introducción

La gestión del riesgo de desastres en Colombia se consolida como un componente estructural del ordenamiento territorial y del desarrollo, en la medida en que articula procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo del desastre. En este marco, la Ley 1523 de 2012 establece que los tres niveles de gobierno deben formular e implementar planes de gestión del riesgo para priorizar, programar y ejecutar acciones, además de realizar su seguimiento y evaluación (Congreso de Colombia, 2012, art. 32).

De manera complementaria, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) ha señalado que el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) es el instrumento mediante el cual el municipio orienta sus prioridades y organiza acciones concretas frente a escenarios de riesgo, integrándose con los demás instrumentos de planeación municipal. Esta lógica se retoma en el PMGRD de Santa Rosa de Cabal (versión 03), al definirlo como el instrumento con el cual se prioriza, formula, programa y se hace seguimiento a la ejecución de acciones asociadas a los procesos de conocimiento, reducción y manejo del riesgo, en coherencia con el nivel departamental y nacional (Secretaría de Gobierno y Tránsito de Santa Rosa de Cabal, 2020).

En Santa Rosa de Cabal esta necesidad de planificar y actuar sobre el riesgo se vuelve especialmente prioritaria por la interacción entre condiciones físicas complejas y una ocupación urbana que, en distintos sectores, se ha consolidado en proximidad a zonas susceptibles. En particular, el corredor del río San Eugenio constituye un eje territorial determinante: allí convergen dinámicas fluviales, pendientes pronunciadas y presiones urbanas que incrementan la exposición de viviendas, infraestructura y redes funcionales. Los estudios detallados desarrollados para los sectores Abedules y La Trinidad describen antecedentes recientes relevantes, como el evento ocurrido el 24 de mayo de 2022, cuando un proceso de inestabilidad represó el cauce del río San Eugenio y desencadenó inundaciones con afectaciones a viviendas y población, dentro de un patrón histórico de recurrencia (ALDESARROLLO, 2025).

A pesar de la existencia de instrumentos de planeación y estudios técnicos, persiste un reto central en la gestión del riesgo: convertir la información técnica (amenaza, vulnerabilidad, exposición) en herramientas operativas que apoyen decisiones rápidas y comprensibles en escenarios de emergencia o simulacro. En contextos urbanos, donde la infraestructura vial puede presentar cuellos de botella, y donde las condiciones de visibilidad o acceso cambian durante un

evento, la orientación basada únicamente en señalización estática resulta insuficiente. En consecuencia, se requieren soluciones que integren geolocalización, análisis de redes y rutas óptimas, y adaptación a restricciones según el tipo de emergencia, para reducir confusión, demoras y exposición innecesaria.

En ese sentido, este proyecto de grado en modalidad de pasantía se orienta al desarrollo de una aplicación móvil para la gestión de rutas de evacuación basadas en algoritmos de ruta óptima, vinculando la gestión del riesgo de desastres, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la cartografía y la ingeniería catastral aplicada al ordenamiento territorial. Si bien existen herramientas comerciales y experiencias internacionales de ruteo en escenarios de emergencia (recogidas en el estado del arte de este documento), en el municipio de Santa Rosa de Cabal no se cuenta con un instrumento operativo propio que integre los insumos cartográficos y catastrales locales —en particular las capas detalladas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo producidas en el marco del Decreto 1807 de 2014— con un motor de cálculo de rutas adaptado a los distintos escenarios de emergencia del corredor del río San Eugenio. Esta carencia limita la capacidad de respuesta tanto de la ciudadanía como de los organismos locales de gestión del riesgo.

De esta manera, la propuesta busca aportar una herramienta tecnológica que conecte el rigor del análisis espacial con la necesidad práctica de guiar a ciudadanos y entidades en el territorio. La aplicación se concibe como un componente que dialoga con la información oficial existente —insumos cartográficos del IGAC, caracterizaciones territoriales del PMGRD y resultados de los estudios detallados producidos por ALDESARROLLO (2025)—, traduciéndolos en rutas de evacuación optimizadas mediante cuatro algoritmos clásicos de búsqueda en grafos (Dijkstra, A*, Time-Dependent Dijkstra y Multi-Source Dijkstra) y dos factores catastrales específicos del proyecto: la vulnerabilidad de obras lineales y el riesgo predial adyacente. Una característica arquitectónica central es que el cálculo se ejecuta de manera autónoma en el dispositivo del usuario, sin depender de conectividad activa, condición indispensable en escenarios de emergencia donde la infraestructura de telecomunicaciones puede degradarse.

Finalmente, este proyecto se apoya en la idea de que la gestión del riesgo no se limita a producir diagnósticos: requiere fortalecer capacidades operativas y ciudadanas y facilitar decisiones en momentos críticos. Por ello, el desarrollo de una aplicación móvil con cálculo de rutas óptimas adaptadas al tipo de emergencia activa e integrables a escenarios de simulacro o de respuesta operativa se plantea como una contribución concreta a los procesos de preparación,

respuesta y reducción del riesgo en el municipio, especialmente en los sectores con antecedentes de afectación asociados al río San Eugenio y su corredor urbano (ALDESARROLLO, 2025).

2. Planteamiento del problema

En Santa Rosa de Cabal, como en muchas otras localidades, la gestión adecuada de emergencias representa un desafío significativo, especialmente en entornos urbanos con alta densidad poblacional y una infraestructura vial compleja. Durante situaciones de emergencia o simulacros —como incendios, sismos o evacuaciones masivas—, la falta de orientación clara y en tiempo real sobre las rutas de evacuación y los puntos de encuentro seguros puede generar confusión, demoras e incluso poner en riesgo la vida de las personas.

Actualmente, las rutas de evacuación suelen estar delimitadas de forma estática mediante señalizaciones físicas que, si bien son útiles, no siempre son visibles, actualizadas o eficaces en condiciones adversas. Además, no existe una herramienta tecnológica que integre la geolocalización, el análisis de rutas y la adaptación dinámica a diferentes escenarios de emergencia. Esta carencia limita la capacidad de respuesta tanto de los ciudadanos como de los organismos de gestión del riesgo.

Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar una aplicación que permita visualizar de forma interactiva y accesible las rutas de evacuación óptimas y los puntos de encuentro, utilizando algoritmos de cálculo de rutas optimas, que además consideres las restricciones pertinentes según la emergencia. Esta herramienta estaría orientada a mejorar la preparación y reacción durante simulacros y eventos reales,

3. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una aplicación móvil que permita visualizar rutas de evacuación óptimas y puntos de encuentro en Santa Rosa de Cabal, utilizando algoritmos de cálculo de rutas, con el fin de mejorar la respuesta ante situaciones de emergencia o simulacros.

Objetivos Específicos

- Analizar las condiciones geográficas y estructurales de Santa Rosa de Cabal para identificar rutas de evacuación y puntos de encuentro estratégicos.
- Diseñar e implementar un sistema de visualización web que muestre mapas con rutas de evacuación y ubicaciones seguras.
- Integrar algoritmos de búsqueda de ruta óptima (como Dijkstra o A*) que permitan calcular el trayecto más eficiente hacia un punto de encuentro en función del escenario de emergencia.
- Permitir la personalización de la aplicación según diferentes tipos de emergencia, considerando variables como bloqueos viales, zonas de riesgo y puntos de acceso restringido; así como equipamientos institucionales de salud y de seguridad.
- Validar el funcionamiento de la aplicación mediante simulacros o pruebas controladas, evaluando su eficacia, precisión y facilidad de uso por parte de los ciudadanos y las autoridades locales.

4. Plan de trabajo

Plan de trabajo general

Actividades	Semana											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fase 1. Caracterización zona de estudio												
- Adquisición y revisión bibliográfica y de fuentes secundarias sobre la caracterización general de la zona de estudio - Revisar información de las características geomorfológicas del suelo - Identificación de las características socioeconómicas del territorio - Revisión de la información disponible por trabajo de campo de la empresa												
Fase 2. caracterización de las problemáticas												
- Revisión y organización de información sobre inundaciones y deslizamientos de tierra pasados - Buscar referencias y complementar con las entrevistas de campo, la perspectiva de los ciudadanos												
Fase 3. Referencias y antecedentes de aplicaciones con datos geográficos												
- Adquisición y revisión bibliográfica y de proyectos de aplicaciones semejantes - Estado del arte de Aplicaciones - Estado del arte de la gestión del riesgo en la zona de estudio y legislación correspondiente												
Fase 4. Creación de BD geográfica												
- Analizar la información resultante del estudio, donde se limitan las zonas de riesgo - Georreferenciar los equipamientos de salud y seguridad (Hospitales, bomberos, estacione de policía, etc.) - Georreferenciar puntos de encuentro seguros - Crear una GBD que consolide toda la información geográfica capturada - Generar la cartografía temática que dé cuenta de las condiciones actuales de la zona de estudio y del resultado del proyecto.												
Fase 5. Creación de la aplicación móvil												
- Diseño de la interfaz gráfica - Desarrollo de interacción usuario - ruta - Integración de la GDB desarrollada en la fase 4 - Ejecución de pruebas funcionales con casos simulados - Pruebas iniciales de interfaz y ajustes de experiencia del usuario - Corrección de errores y optimación del algoritmo - Documentación técnica y manual del usuario												
Fase 6. Presentación final y despliegue del prototipo												

- Presentación y transferencia de conocimiento ante entidad correspondiente - Informe técnico de la pasantía (aspectos jurídicos, administrativos, financieros, tecnológicos y de mantenimiento de la aplicación) - Desarrollo del documento final pasantía - Diseño de la presentación de la pasantía y la aplicación.												

Plan de trabajo por estudiante

Plan de trabajo Valentina Cangrejo	Fase					
	1	2	3	4	5	6
Levantamiento de requerimientos y planificación del proyecto	X	X	X			
Investigación sobre tecnologías móviles y selección de stack de desarrollo			X			
Diseño de la interfaz gráfica (mockups, flujo de navegación)				X	X	
Integración del sistema de mapas y geolocalización (Google Maps, Mapbox, etc.)					X	
Visualización de rutas y puntos de encuentro en el mapa.					X	
Pruebas iniciales de interfaz y ajustes de experiencia de usuario (UX)					X	
Documentación técnica y manual de usuario						X
Presentación final del proyecto y despliegue del prototipo						X

Plan de trabajo Catalina Cataño	Fase					
	1	2	3	4	5	6
Levantamiento de requerimientos y análisis del contexto local	X	X	X			
Implementación del algoritmo de rutas óptimas (Dijkstra, A*, etc.)					X	
Personalización del cálculo de rutas según condiciones variables (bloqueos, zonas de riesgo)				X	X	
Desarrollo de interacción usuario-ruta (botones, selección, filtros)					X	
Ejecución de pruebas funcionales con casos simulados					X	
Corrección de errores y optimización del algoritmo					X	
Documentación técnica y manual de usuario						X
Presentación final del proyecto y despliegue del prototipo						X

5. Caracterización territorial y ambiental del área de estudio

Caracterización socioeconómica y uso del suelo

El municipio de Santa Rosa de Cabal, ubicado en el departamento de Risaralda, se sitúa en la vertiente occidental de la Cordillera Central de los Andes colombianos, a una altitud promedio de 1.840 m s. n. m. y con una temperatura media anual de 19 °C. Su cabecera urbana, localizada a 15 km de Pereira (véase Figura 1), está atravesada por el río San Eugenio, eje hidrográfico determinante en la configuración ambiental y socioeconómica del territorio. Asimismo, el municipio se emplaza en una zona de alta complejidad geológica y geomorfológica del Eje Cafetero, condición que incide directamente en los procesos de ocupación, uso del suelo y generación de escenarios de riesgo.

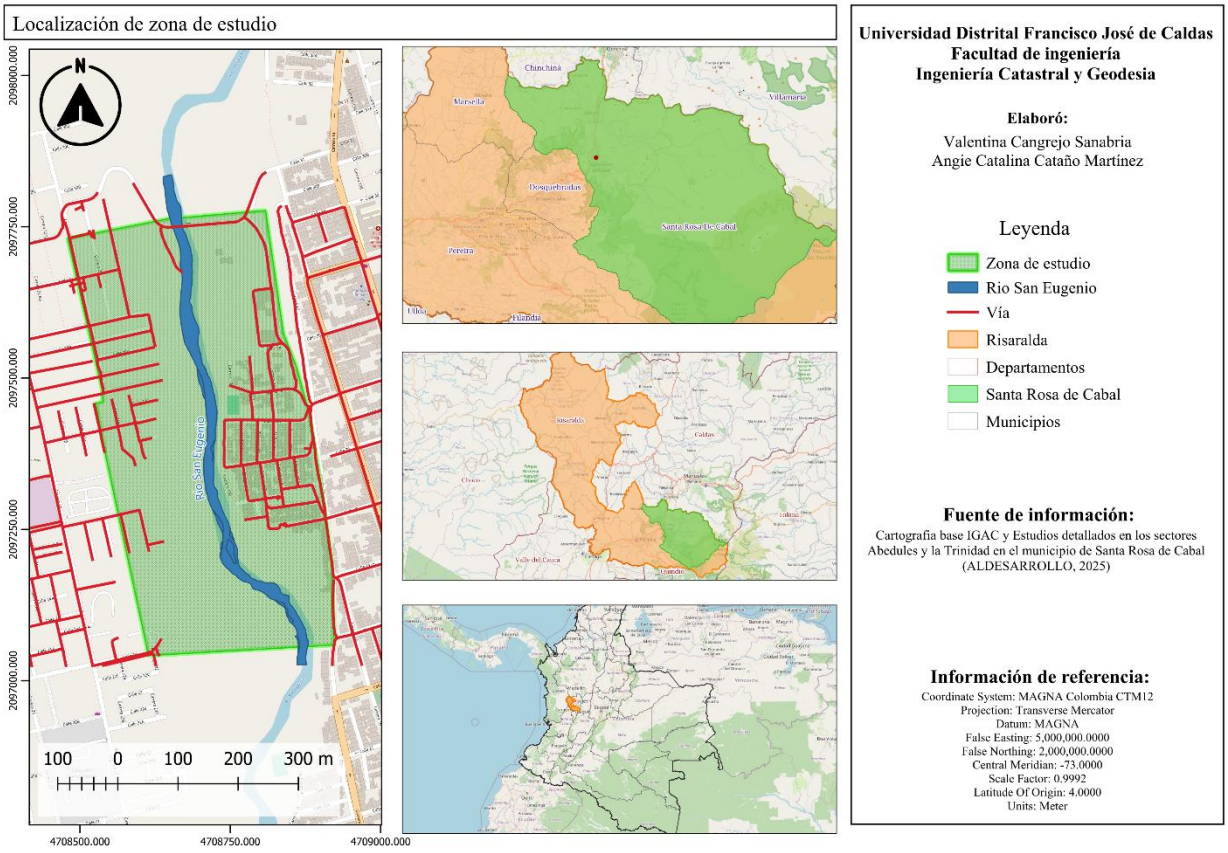


Figura 1Mapa de Localización área de estudio. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025)

Santa Rosa de Cabal cuenta con una extensión aproximada de 630 km² y una población proyectada entre 72.000 y 82.000 habitantes para el periodo 2020–2023. Cerca del 85% de esta

población se concentra en la cabecera urbana, lo que evidencia un proceso sostenido de urbanización en las últimas décadas. Este crecimiento ha incrementado significativamente la demanda de suelo urbanizable y de servicios públicos domiciliarios, particularmente en infraestructura de acueducto y alcantarillado, cuya expansión no ha logrado acompasar el ritmo de crecimiento poblacional.

Desde el punto de vista demográfico, el municipio presenta una estructura predominantemente adulta-joven, aunque con una tendencia progresiva al envejecimiento poblacional. Esta transición plantea retos en materia de planificación social, prestación de servicios de salud y sostenibilidad del desarrollo local en el mediano y largo plazo.

En cuanto al uso del suelo, el territorio conserva una vocación agropecuaria tradicional combinada con una creciente orientación hacia el turismo. En la zona rural predominan los cultivos de café, acompañados por actividades de ganadería extensiva en zonas medias y altas. Asimismo, existen áreas de conservación asociadas a ecosistemas de bosque andino y de alta montaña, lo que configura una diversidad de coberturas que incluyen conservación ambiental, turismo ecológico y producción agrícola. (véase Figura 2),

Paralelamente, la estructura económica del municipio refleja una transición desde actividades primarias hacia el fortalecimiento del sector terciario, consolidando al turismo como eje estratégico de desarrollo. Este proceso se sustenta en ventajas comparativas como las aguas termales, el Paisaje Cultural Cafetero y la proximidad al Parque Nacional Natural Los Nevados. No obstante, la caracterización de las coberturas del suelo evidencia una coexistencia compleja de usos: los territorios artificializados (21,68%) y la infraestructura vial (9,04%) soportan la dinámica urbana y comercial, mientras que persisten áreas significativas de uso agropecuario, especialmente pastos destinados a la ganadería extensiva (22,49%) y cultivos permanentes como el café.

El crecimiento urbano y la expansión de actividades económicas, en interacción con las condiciones físicas del territorio, han generado conflictos en el uso del suelo. La limitada disponibilidad de suelo urbano seguro ha favorecido la ocupación de zonas con restricciones, como áreas inundables y laderas inestables, aumentando la exposición de la población a amenazas naturales. Esta situación se ve agravada por la alta dependencia de infraestructuras críticas para el desarrollo económico, particularmente en los sectores turístico y comercial.

En este contexto, la vulnerabilidad del municipio frente a eventos naturales es significativa. Fenómenos como movimientos en masa y avenidas torrenciales han afectado históricamente la red vial, los servicios públicos y los asentamientos humanos, como se evidenció en las emergencias ocurridas en 2011 y mayo de 2022. El impacto económico también es relevante: se estima que el valor patrimonial inmobiliario expuesto en sectores como Abedules y La Trinidad asciende a aproximadamente COP 9.781 millones.

Asimismo, la recurrencia de eventos climáticos ha afectado los medios de vida de la población, con más de 350 familias damnificadas en periodos recientes. En consecuencia, la sostenibilidad del desarrollo territorial depende de la incorporación de la gestión del riesgo en los procesos de planificación, priorizando el fortalecimiento de infraestructuras, la regulación del uso del suelo y la protección de los elementos expuestos, con el fin de reducir la vulnerabilidad y garantizar la continuidad de las dinámicas económicas y sociales del municipio.

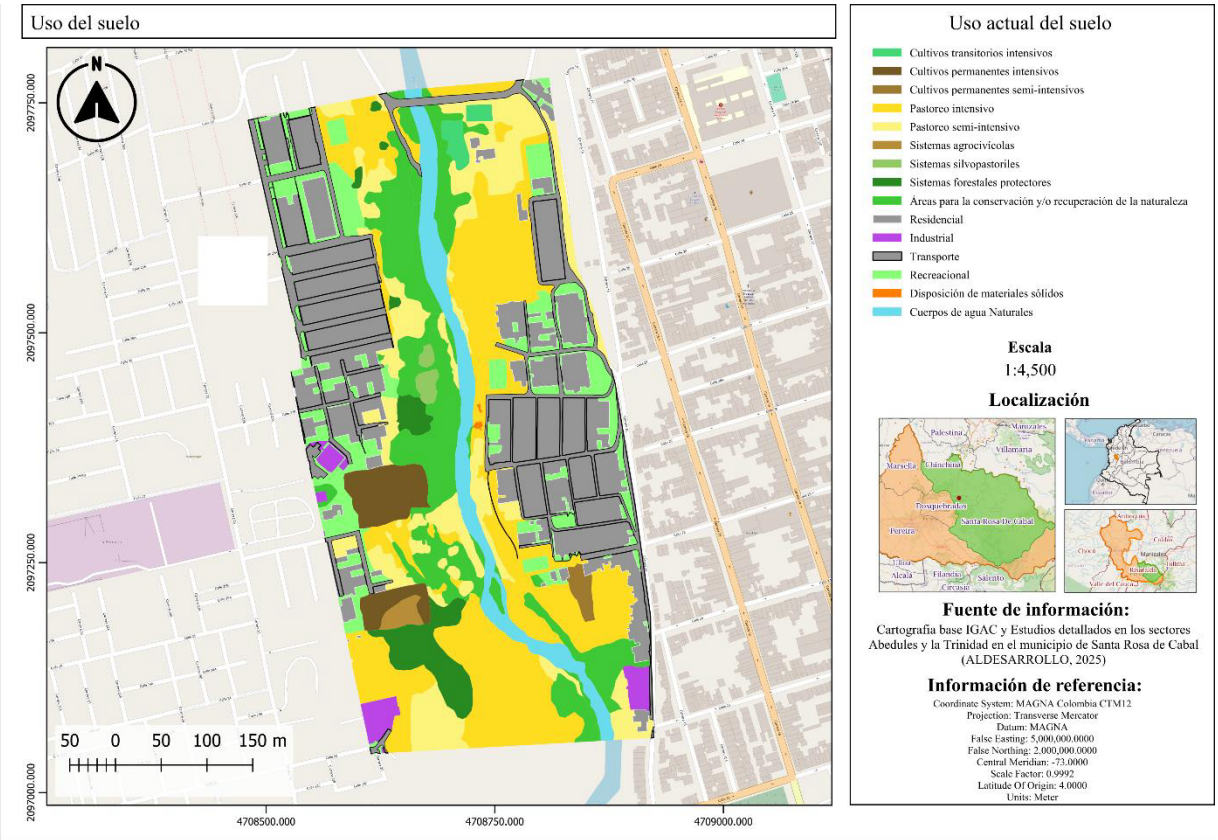


Figura 2. Mapa de usos del suelo. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025)

Configuración del Riesgo: Vulnerabilidad Social y Dinámicas de Ocupación

El patrón de asentamiento en el municipio de Santa Rosa de Cabal revela un conflicto histórico entre la expansión urbana y la dinámica natural del sistema hídrico del río San Eugenio. La ocupación del territorio se ha caracterizado por el desarrollo de asentamientos, tanto formales como informales, sobre geoformas críticas como la llanura aluvial y laderas con pendientes pronunciadas. Esta segregación espacial ha derivado en la concentración de comunidades de bajos ingresos en zonas de alta susceptibilidad biofísica, particularmente en los sectores de Abedules y La Trinidad, donde la consolidación urbana se ha dado sobre depósitos de lahar y cenizas volcánicas poco consolidadas.

La caracterización socioeconómica del área de estudio confirma una predominancia de los estratos 1 y 2, factores que se correlacionan directamente con una vulnerabilidad física elevada. Los estudios técnicos indican que el 62% de las edificaciones evaluadas presentan una vulnerabilidad alta, condición atribuida a tipologías constructivas precarias (estructuras ligeras o sin refuerzo estructural), una antigüedad superior a los 30 años y un estado de conservación deficiente. En términos demográficos, se estima que solo en el área de influencia directa residen aproximadamente 380 personas, de las cuales una proporción significativa pertenece a grupos de especial protección, como niños (0.97 por hogar), adultos mayores (0.26 por hogar) y personas con discapacidad (3.6% de las viviendas).

La recurrencia de desastres ha evidenciado la fragilidad de este patrón de asentamiento. El evento del 24 de mayo de 2022 representó un hito crítico, dejando más de 300 damnificados, 90 viviendas afectadas y la evacuación de 1,000 personas, lo que obligó a la declaratoria de calamidad pública ante la incapacidad de respuesta local. Desde una perspectiva económica, el capital inmobiliario en riesgo asciende a COP 9.781 millones, con un valor promedio de 90 millones por vivienda, lo que representa una amenaza sustancial a la estabilidad patrimonial de las familias y a las finanzas del municipio.

Finalmente, la gestión de este riesgo plantea desafíos financieros y normativos de gran escala. El estudio concluye que existe un riesgo alto no mitigable para las viviendas ubicadas dentro de la faja forestal protectora de 30 metros, cuya única alternativa técnica viable es la reubicación definitiva. Para las zonas remanentes, se requiere una inversión significativa en obras estructurales de terraceo y control de inundaciones, intervenciones que, sumadas a los procesos de gestión predial e indemnizaciones, demandan una articulación estrecha entre los

instrumentos de planificación territorial y el apoyo de entidades del orden departamental y nacional.

Configuración Geológica y Dinámica del Relieve

El territorio de Santa Rosa de Cabal se sitúa en un entorno geológico complejo, condicionado por su ubicación en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia. Esta zona se caracteriza por un relieve de alta energía y una actividad sísmica significativa, factores que determinan la estabilidad de los asentamientos urbanos. De acuerdo con las investigaciones detalladas, el subsuelo del municipio presenta una litología heterogénea, donde predominan los materiales de origen volcánico provenientes del Complejo Ruíz-Tolima. Entre estos, destacan las cenizas volcánicas y los depósitos de la Formación Santa Rosa (antiguos flujos de lodo o lahares), los cuales recubren el basamento rocoso y presentan espesores variables que influyen directamente en el comportamiento mecánico del terreno.

Desde una perspectiva estructural, el área de estudio se encuentra bajo la influencia del Sistema de Fallas Romeral, una de las estructuras geológicas más importantes del país. La presencia de fallas regionales, como la de Silvia-Pijao y la Falla Santa Rosa, no solo genera un entorno de amenaza sísmica alta, sino que también ha fracturado los materiales superficiales. Estas fracturas y pliegues crean una porosidad que facilita la infiltración de agua lluvia en el subsuelo, un factor crítico que debilita la cohesión del terreno y aumenta de manera considerable la susceptibilidad a procesos de remoción en masa.

La caracterización geomorfológica revela un paisaje transformado por la interacción entre la naturaleza y la actividad humana. Actualmente, cerca del 49% del área analizada corresponde a elementos antropogénicos, es decir, terrenos modificados por la urbanización, explanaciones y taludes de corte. El resto del territorio se divide entre zonas denudacionales (laderas naturales sometidas a erosión) y zonas fluviales asociadas directamente a la dinámica del río San Eugenio.

Finalmente, las unidades de relieve más representativas son las colinas de ceniza y las montañas lávicas, cuyas pendientes pronunciadas y suelos altamente meteorizados (desgastados) son propensos a sufrir deslizamientos traslacionales y rotacionales cuando se saturan por lluvias intensas. Por otro lado, el sistema de terrazas y llanuras de inundación del río San Eugenio, aunque ofrece superficies planas atractivas para la urbanización, constituye

una zona de alta sensibilidad técnica, debido a su susceptibilidad natural a procesos de inundación y socavación lateral por el río. La comprensión integral de estos factores es el pilar para un ordenamiento territorial que priorice la reducción del riesgo de desastres en los sectores de Abedules y La Trinidad.

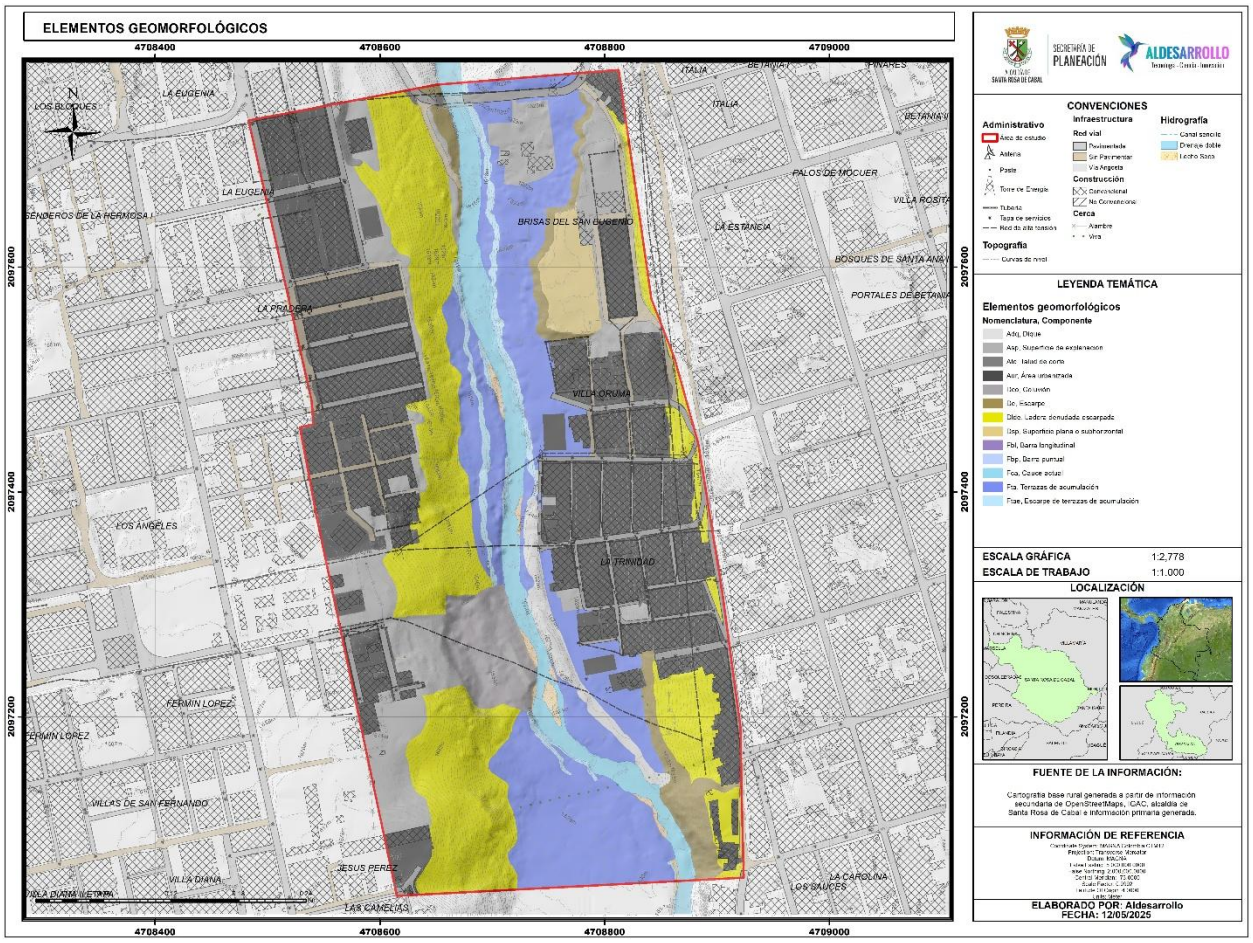


Figura 3 Mapa de elementos geomorfológicos. Fuente: ALDESARROLLO (2025)

En el área de estudio se distinguen unidades de relieve definidas por su génesis y características materiales, las cuales condicionan directamente los procesos geodinámicos:

- **Montañas y Colinas en Material Volcánico:** Predominan las montañas lávicas y colinas en cenizas volcánicas con gruesos depósitos piroclásticos (cenizas y tobas). Al encontrarse **altamente meteorizados y saturados** por la elevada pluviosidad de la zona, estos suelos presentan una alta susceptibilidad a deslizamientos de tipo traslacional y rotacional.
- **Zona de Páramo (Cuenca Alta):** La cabecera de la cuenca del río San Eugenio se localiza en la unidad paramuna. Aunque es vital como regulador hídrico, aporta un **alto potencial energético al flujo fluvial**, lo que se traduce en avenidas torrenciales de gran poder

destructivo que impactan la cuenca media y baja donde se asientan los sectores de Abedules y La Trinidad.

- **Sistema de Terrazas y Llanuras de Inundación:** Asociado directamente al corredor del río San Eugenio, constituye una unidad crítica. Si bien ofrece superficies relativamente planas para la urbanización (que representan cerca del 25% del área fluvial analizada), presenta una **vulnerabilidad intrínseca ante procesos de inundación y socavación lateral**.

Finalmente, la caracterización geomorfológica revela un paisaje transformado, donde cerca del 49% del área corresponde ya a elementos antropogénicos (urbanización y explanaciones). La integración de este conocimiento técnico es determinante para asignar usos del suelo compatibles con la estabilidad del terreno y priorizar las obras de mitigación estructural necesarias para proteger a la población expuesta.

El Río San Eugenio como eje de la dinámica territorial

El río San Eugenio constituye el eje hidrodinámico principal de Santa Rosa de Cabal y, simultáneamente, representa el factor de riesgo de mayor incidencia sobre el casco urbano. La configuración del riesgo actual no es accidental, sino el resultado de la ocupación histórica de geoformas asociadas a la dinámica fluvial del río. De acuerdo con los análisis detallados, el conflicto se concentra en dos unidades principales:

En primer lugar, la mayor parte de la consolidación urbana se asienta sobre las terrazas de acumulación de Santa Rosa. Estas geoformas, aunque proporcionan superficies aprovechables para la expansión (representando el 69.56% del ambiente fluvial analizado), poseen bordes compuestos por depósitos poco consolidados sujetos a una intensa erosión lateral y vertical. Esta inestabilidad en los escarpes de las terrazas es la que detona movimientos en masa que, al colapsar sobre el cauce, generan represamientos temporales con el potencial de desencadenar avenidas torrenciales aguas abajo.

En segundo lugar, sectores de alta vulnerabilidad social, como el barrio La Trinidad, se localizan directamente sobre la llanura de inundación o llanura aluvial. Esta ubicación los expone a una "inundación rápida" potenciada por dos factores antropogénicos críticos identificados en el tramo urbano: el efecto de estrechamiento hidráulico provocado por múltiples puentes que reducen la sección transversal del río, e infraestructuras (muros y

rellenos) que incrementan la altura y velocidad del flujo durante eventos hidrometeorológicos extremos.

Dada su condición de río "maduro o senil", el San Eugenio presenta una menor capacidad de erosión vertical pero una alta actividad lateral y de arrastre de sedimentos. Esto significa que cualquier obstrucción en el cauce —ya sea por deslizamientos de laderas o por el estrechamiento de la infraestructura vial— amplifica la energía del flujo y facilita el desbordamiento súbito hacia las áreas residenciales. Por consiguiente, la gestión del riesgo en este corredor no solo requiere obras estructurales de mitigación, sino el cumplimiento estricto del retiro mínimo obligatorio de 30 metros (faja forestal protectora), cuya ocupación inadecuada es hoy el principal determinante de la amenaza no mitigable en el municipio.

Caracterización comunitaria del riesgo

Como parte del estudio desarrollado, se evaluó la perspectiva de los ciudadanos frente a los escenarios de riesgo y vulnerabilidad frente a inundaciones, avenidas torrenciales, y deslizamientos de tierra, de la cual presentamos a continuación un resumen breve de lo encontrado por ALDESARROLLO (2025).

- **Causas de los Deslizamientos (Remoción en Masa)**
    - **Origen Antrópico:** Existe una percepción clara entre líderes comunitarios, como los del barrio Los Abedules, de que los eventos de inestabilidad, específicamente el del **24 de mayo de 2022**, se debieron a **rellenos artificiales** realizados por la misma comunidad para aplanar terrenos y construir viviendas.
    - **Problemática de Residuos:** Los habitantes asocian la inestabilidad de las laderas con la disposición inadecuada de **residuos sólidos**; observan que el arrojo de basuras en las pendientes agrava las condiciones críticas del terreno.

- **Manejo Hídrico e Infraestructura**
    - **Insuficiencia del Alcantarillado:** Los vecinos expresan una fuerte inconformidad con el estado del sistema hidrosanitario, señalando que se encuentra **deteriorado y es insuficiente** para manejar las escorrentías durante lluvias intensas.

- **Autogestión del Riesgo:** Debido a la desconfianza en la infraestructura oficial, la comunidad ha recurrido a la **construcción artesanal de trincheras, barreras temporales y cunetas** para evitar que el agua ingrese a sus hogares.

- **Percepción de Inundaciones y Avenidas Torrenciales**
  - **Terminología Común:** En el léxico cotidiano de la población no se reconoce el término técnico "avenida torrencial"; en su lugar, la gente percibe y describe estos fenómenos como **"crecientes", "avalanchas" o "taponamientos de cauce"**.
  - **Estado de Alerta Permanente:** Existe un sentimiento de vulnerabilidad constante ("tener en vilo" a la población) durante las temporadas invernales. Los habitantes de sectores como La Trinidad mantienen sus **enseres y mascotas listos** para una evacuación inmediata ante cualquier aumento del nivel del río.
- **Contraste entre Percepción y Realidad Técnica**

Es importante notar que existe una brecha entre lo que la comunidad percibe y lo que los estudios técnicos demuestran. Por ejemplo, mientras la comunidad cree que el deslizamiento de 2022 fue causado por un relleno, el análisis geológico determinó que se trató de un movimiento de material volcánico natural (lahar) de la Formación Santa Rosa, detonado por la saturación hídrica y no por intervenciones humanas.

En resumen, la gente percibe el riesgo como una combinación de abandono institucional en infraestructura (alcantarillado deficiente) y las consecuencias de la ocupación informal, lo que los obliga a vivir en un estado de preparación constante ante la inminencia de nuevos eventos.

6. Identificación de las zonas de amenaza por inundación, avenida torrencial y movimiento en masa

La zonificación de amenaza constituye un componente fundamental de la gestión del riesgo, orientado a la identificación y delimitación de áreas susceptibles a la ocurrencia de fenómenos naturales, con el propósito de incorporar esta información en los instrumentos de ordenamiento territorial. De acuerdo con los estudios técnicos realizados por

ALDESARROLLO (2025), este proceso se fundamenta en el Decreto 1807 de 2014 y se desarrolla a una escala de detalle 1:1.000 para los sectores urbanos de Abedules y La Trinidad.

En este contexto, el desarrollo de herramientas tecnológicas para la gestión de rutas de evacuación requiere como insumo base la delimitación de las áreas de peligro, obtenida a partir de modelaciones que representan el comportamiento de los fenómenos naturales. Para el caso de la presente pasantía, se utilizaron los resultados generados por ALDESARROLLO (2025), los cuales proporcionan la base técnica necesaria para el análisis y diseño de dichas rutas en los sectores de estudio.

Zonificación de Amenaza por inundación

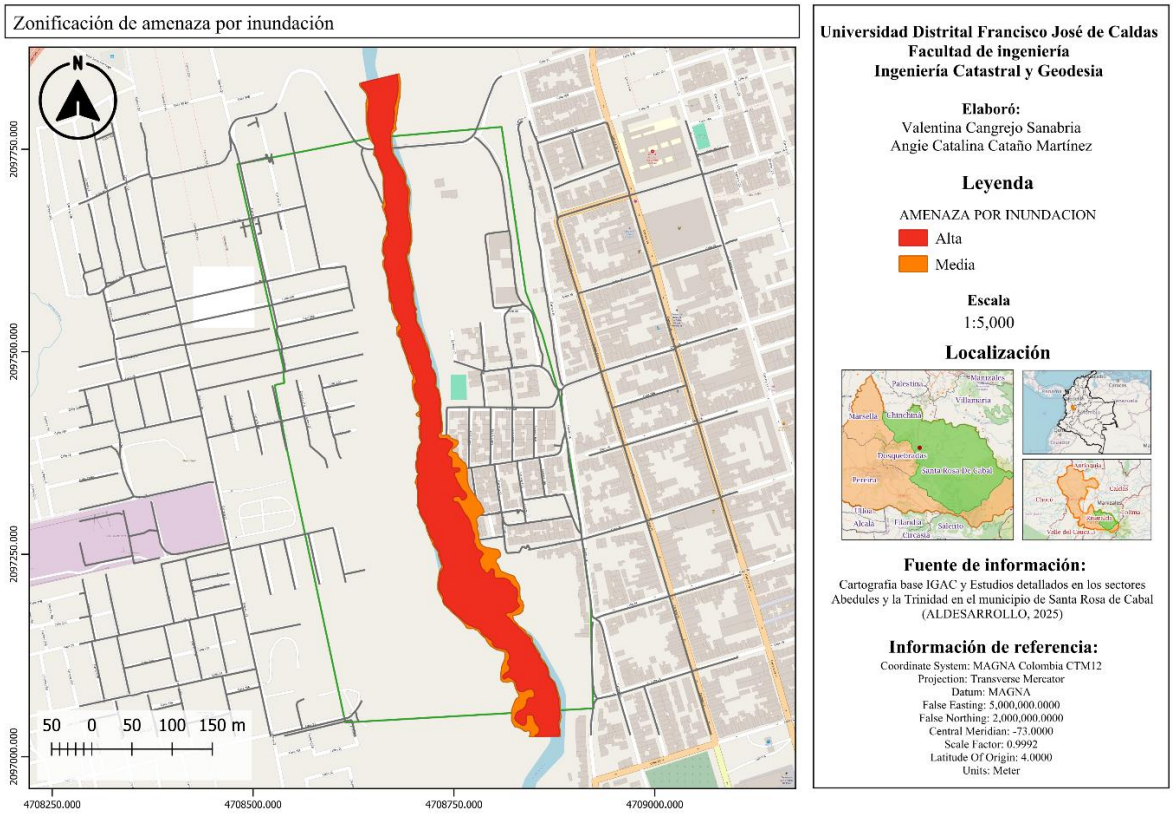


Figura 4 Mapa de Zonificación de Amenaza por inundación. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025)

La zonificación de la amenaza por inundación permitió identificar y clasificar las áreas según el comportamiento del flujo durante eventos extremos (periodo de retorno de 100 años), a partir del modelamiento hidráulico que considera la altura de la lámina de agua y la velocidad. Se obtuvo que:

- Predomina la **amenaza alta**, con aproximadamente **82,63% del área (3,41 ha)**, concentrada principalmente en zonas cercanas al cauce del río San Eugenio.
- Estas áreas presentan **profundidades superiores a 0,8 m**, con capacidad de desbordamiento lateral de hasta ~84 m, afectando principalmente sectores residenciales ubicados en la parte sur del área de estudio.
- La **amenaza media** corresponde al **17,36% del área (0,66 ha)**, localizada en sectores con pendientes mayores, donde la altura del flujo es menor, pero aún existe capacidad de generar daños por la velocidad y fuerza hidráulica.

En general, la zonificación evidencia que gran parte del área urbana analizada se encuentra en condiciones críticas frente a inundaciones, especialmente en planicies aluviales y zonas bajas adyacentes al río.

Zonificación de Amenaza por avenidas torrenciales

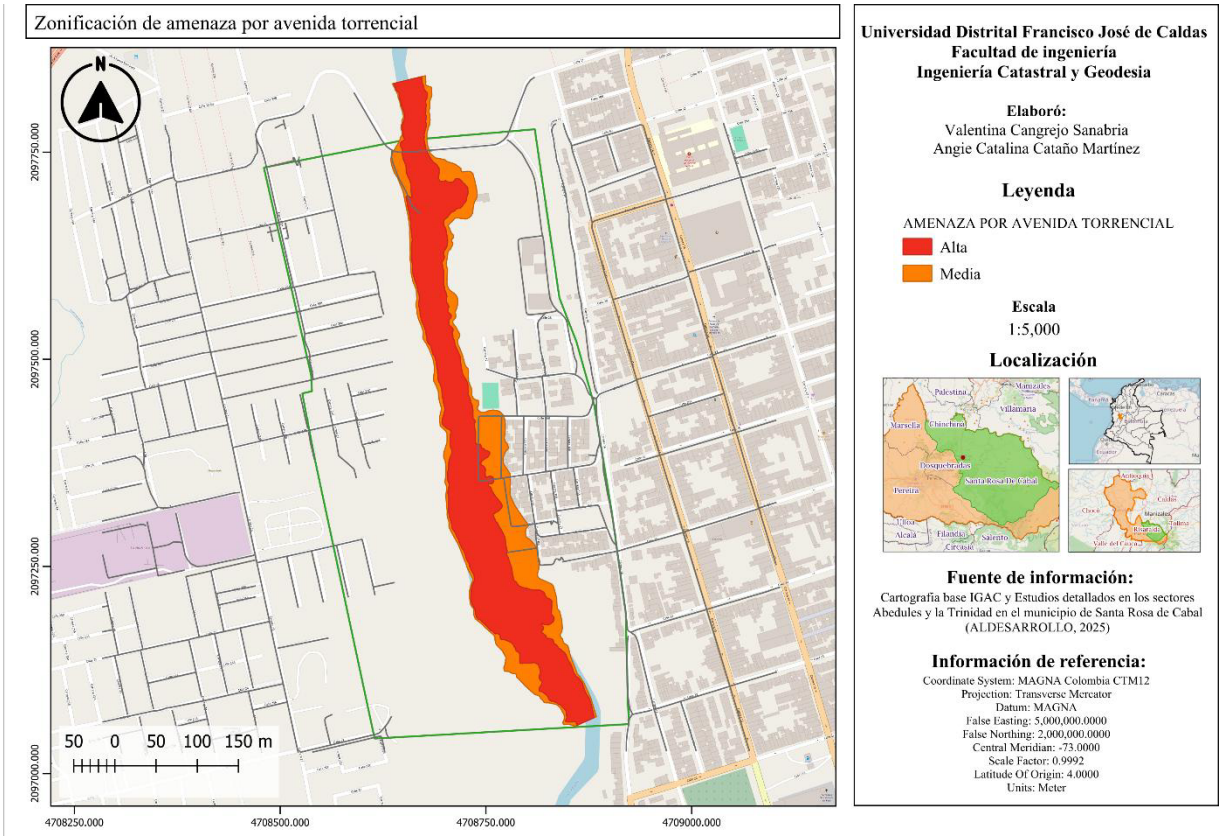


Figura 5 Mapa de Zonificación de Amenaza por avenidas torrenciales. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025)

La zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales se basó en el modelamiento bidimensional del flujo (iRIC – Nays2DH), considerando escenarios extremos (periodo de retorno de 100 años) e integrando variables como velocidad, profundidad y transporte de sedimentos.Se obtuvo que:

- Se identificaron principalmente categorías de **amenaza alta y media**, asociadas a la dinámica torrencial del sistema.
- Las **zonas de amenaza alta** corresponden a sectores altamente inestables, con **respuesta hidrológica rápida**, donde la combinación de lluvias intensas y procesos morfodinámicos puede generar eventos torrenciales con gran capacidad de arrastre de material, represamientos y cambios bruscos en el cauce.
- Las **zonas de amenaza media** presentan condiciones intermedias, donde pueden ocurrir eventos torrenciales o movimientos en masa que alimenten el flujo, especialmente en temporadas de alta precipitación.

En conjunto, esta zonificación muestra que el área no solo está expuesta a inundaciones, sino también a eventos más súbitos y energéticos como las avenidas torrenciales, que incrementan significativamente el nivel de peligro.

Zonificación de amenaza por movimientos en masa

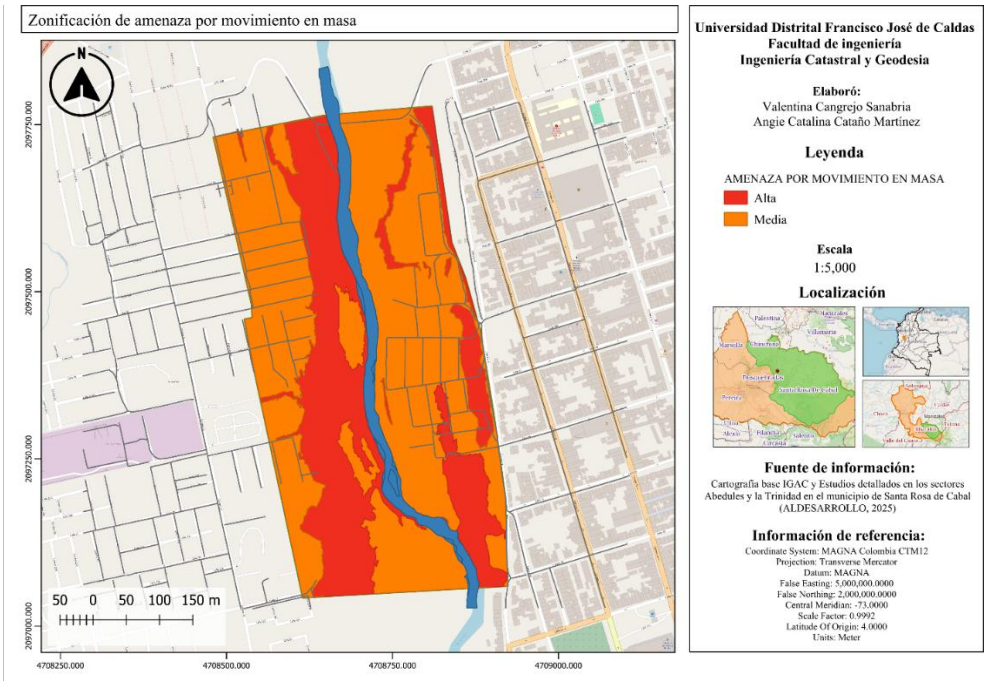


Figura 6. Mapa de Zonificación de amenaza por movimientos en masa. Elaboración propia, con base en estudio de ALDESARROLLO (2025)

La zonificación de la amenaza por movimientos en masa se realizó mediante un enfoque determinístico, integrando el análisis de susceptibilidad del terreno (condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas) con factores detonantes como la precipitación, la sismicidad y el uso del suelo.

Como resultado, se establecieron tres categorías de amenaza (alta, media y baja), con la siguiente distribución:

- **Amenaza alta**
  - Corresponde al **39,17% del área (5,39 ha)**.
  - Se localiza en zonas de **pendientes mayores a 15°**, principalmente en laderas escarpadas.
  - Está asociada a **suelos volcaniclásticos de baja compacidad** (Formación Santa Rosa), altamente susceptibles a fallas.
  - Presenta las condiciones más críticas de inestabilidad, especialmente ante **lluvias intensas o eventos sísmicos**, lo que incrementa significativamente la probabilidad de deslizamientos.
- **Amenaza media**
  - Es la categoría predominante, con 52,18% del área (7,18 ha).
  - Se ubica principalmente en la ladera izquierda del río San Eugenio, en zonas urbanizadas y laderas denudadas.
  - Asociada a pendientes moderadas (entre ~8,5° y 16,5°) y suelos fluviovolcánicos y volcaniclásticos.
  - Presenta condiciones de inestabilidad potencial, que pueden activarse ante la saturación del suelo o intervenciones antrópicas.
- **Amenaza baja**
  - Representa el 8,65% del área (1,19 ha).
  - Se localiza en zonas planas, principalmente barras aluviales cercanas al cauce del río.
  - Aunque la amenaza por movimientos en masa es baja, estas áreas pueden estar expuestas a otros procesos como inundación o socavación.

El análisis detallado permitió obtener las siguientes conclusiones espaciales:

Inundaciones: El área de afectación directa abarca 3.8 hectáreas, de las cuales el 82.63% (3.14 ha) se clasifica como amenaza alta. Esta categoría se concentra en las zonas bajas de la llanura aluvial, afectando principalmente los asentamientos residenciales al sur del área de estudio.

Avenidas Torrenciales: La afectación total es mayor, alcanzando 4.89 hectáreas, con 3.49 ha en categoría alta. La extensión de esta amenaza es más amplia lateralmente (entre 30 y 75 metros) debido a la carga de sedimentos y la energía del flujo, especialmente en el sector del puente donde existen riesgos de represamiento.

Movimientos en Masa: La vertiente izquierda del río presenta un 32.40% de amenaza alta, definida por pendientes superiores a 15° y suelos poco consolidados de la Formación Santa Rosa.

7. Marco normativo de la gestión del riesgo

El proyecto se enmarca en un conjunto acotado de instrumentos normativos que articulan la gestión del riesgo de desastres desde el nivel internacional hasta el municipal y que sustentan, de manera directa, la formulación y operación del aplicativo desarrollado. Se presentan a continuación únicamente los instrumentos con incidencia efectiva en el proyecto.

Marco normativo Internacional

- **Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030**

Acuerdo internacional adoptado por las Naciones Unidas en 2015 que orienta las políticas de gestión del riesgo a nivel global (UNDRR, 2017). Establece como objetivo principal la reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas asociadas (vidas, medios de subsistencia, salud, bienes económicos, sociales, culturales y ambientales), y plantea cuatro prioridades de acción: (i) comprender el riesgo, (ii) fortalecer la gobernanza del riesgo, (iii) invertir en reducción del riesgo para la resiliencia y (iv) mejorar la preparación para responder y "reconstruir mejor". La pertinencia frente al proyecto radica en que Sendai incentiva explícitamente el desarrollo de estrategias locales de reducción del riesgo y de preparación ante desastres, lo cual incluye la planificación de evacuaciones y los sistemas de alerta para proteger vidas en eventos extremos.

Marco normativo nacional

- **Ley 1523 de 2012 — Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.**

Constituye el principal marco normativo vigente en Colombia en materia de gestión del riesgo (Congreso de la República, 2012). Mediante esta ley se adoptó formalmente la Política Nacional de Gestión del Riesgo y se creó el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). La Ley define la GRD como un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de estrategias y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres. Su artículo 32 exige que los tres niveles de gobierno formulen e implementen planes de gestión del riesgo como parte de sus procesos de planificación del desarrollo y ordenamiento territorial. La pertinencia para este proyecto es directa: la Ley 1523 mandata la existencia de planes de emergencia y evacuación a nivel local, y el aplicativo se enmarca en las políticas que de ella se derivan, contribuyendo tanto al proceso de conocimiento del riesgo (mapeando zonas de amenaza y rutas seguras) como al de manejo de desastres (mejorando la preparación y la respuesta ante emergencias).

- **Decreto 1807 de 2014 — Incorporación de la gestión del riesgo en los POT.**

Este decreto, expedido por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, reglamenta cómo debe incorporarse la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Establece que, al formular o revisar el POT, el municipio debe garantizar la delimitación y zonificación de áreas de amenaza (por fenómenos como inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales) y la delimitación de áreas con condiciones de riesgo, además de definir las medidas específicas para su mitigación. Los estudios detallados a escala 1:1.000 producidos por ALDESARROLLO (2025) para los sectores Abedules y La Trinidad fueron formulados bajo este marco, y constituyen el insumo geográfico principal del aplicativo (capas de amenaza y exposición catastral). Por tanto, el Decreto 1807 es la norma que habilita y exige la información técnica que el proyecto traduce en rutas de evacuación.

- **Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres 2015–2025.**

Adoptado mediante el Decreto Presidencial 308 de 2016, es el instrumento estratégico que desarrolla la política de la Ley 1523 (Presidencia de la República, 2016). Define objetivos, programas y proyectos prioritarios para gestionar el riesgo en Colombia durante el periodo 2015-2025, alineados con el Marco de Sendai. Sus metas incluyen la reducción del número de personas afectadas por desastres, la disminución de pérdidas económicas, el aumento del conocimiento sobre riesgo y el fortalecimiento de la gobernanza. El Plan Nacional resalta la importancia de la preparación y respuesta eficiente; de allí deriva la exigencia de que todos los municipios cuenten con rutas de evacuación, planes de contingencia y sistemas de alerta, lineamiento al que el aplicativo aporta de manera concreta.

- **Ley 388 de 1997 — Ordenamiento Territorial.**

Esta ley convirtió la gestión del riesgo en un determinante obligatorio del ordenamiento territorial al exigir que los planes de ordenamiento (POT y PBOT) incluyan en sus determinantes la identificación de amenazas naturales y la zonificación de áreas de riesgo (Congreso de la República, 1997). Para Santa Rosa de Cabal, la Ley 388 sustenta jurídicamente la integración de la información de amenaza por inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales en la planeación urbana, condición previa para que las rutas de evacuación calculadas por el aplicativo sean coherentes con el régimen de uso del suelo del municipio.

Marco normativo departamental (Risaralda)

Plan Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres de Risaralda. En cumplimiento de la Ley 1523, el departamento de Risaralda formuló su Plan Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres (PDGRD), adoptado mediante el Decreto Departamental 786 de 2012. El PDGRD establece la política, objetivos y estrategias de gestión del riesgo en el ámbito departamental, articulándose con el Plan Nacional y sirviendo de guía para los municipios. Para Santa Rosa de Cabal, el PDGRD garantiza que los esfuerzos municipales —incluido el aplicativo desarrollado en esta pasantía— se inserten en una estrategia regional coherente,

aspecto relevante en escenarios donde la respuesta a una emergencia requiere coordinación interinstitucional con municipios vecinos o entidades de orden departamental.

Marco municipal (Santa Rosa de Cabal)

- **Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD).**

Es el instrumento de planificación integral del municipio en materia de riesgo (Alcaldía de Santa Rosa de Cabal, 2020). Diagnostica el contexto local, prioriza escenarios de riesgo y define un plan de acción con programas y proyectos en los procesos de conocimiento, reducción y manejo de desastres. Entre los escenarios priorizados figura precisamente el riesgo de avenidas torrenciales e inundaciones en la cuenca urbana del río San Eugenio, dado el antecedente de eventos como la avalancha de 2011 y la inundación de mayo de 2022 que afectaron barrios enteros. El PMGRD plantea, dentro de sus líneas de acción, el diseño de rutas de evacuación y protocolos de respuesta para las comunidades asentadas en áreas inundables, lineamiento que el aplicativo materializa de forma operativa.

- **Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD).**

Órgano colegiado creado conforme a la Ley 1523 y establecido formalmente en Santa Rosa de Cabal mediante el Decreto Alcaldicio 173 de 2012, con coordinación técnica ajustada por el Decreto 026 de 2019. El CMGRD es la instancia que aprueba el PMGRD, declara situaciones de calamidad pública local cuando proceden y coordina la respuesta interinstitucional ante emergencias. Es, además, el usuario estratégico institucional previsto para el aplicativo: se concibe como herramienta de apoyo a la toma de decisiones del CMGRD, a la planificación de evacuaciones y a la articulación con cuerpos de socorro, autoridades locales y organismos de seguridad.

- **Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT).**

El PBOT vigente del municipio fue adoptado mediante el Acuerdo Municipal 028 de 2000, en cumplimiento de la Ley 388 de 1997. El plan identifica zonas de amenaza dentro del municipio e incluye determinantes como la prohibición de urbanizar las rondas cercanas a cuerpos de agua y la adopción de la norma sismorresistente para nuevas construcciones.

Aunque el PBOT vigente data de hace más de dos décadas y se encuentra en proceso de actualización, su estructura cartográfica y sus determinantes de uso del suelo constituyen el contexto urbano sobre el cual operan las rutas de evacuación calculadas por el aplicativo.

8. Estado del arte — Aplicaciones para calcular rutas y su posible uso en gestión del riesgo de desastres naturales

- **Enfoques basados en modelos multi-agente (Agent-Based Modelling, ABM)**

Los ABM simulan el comportamiento individual (agentes) y sus interacciones sobre una red (calles, nodos, refugios) para reproducir evacuaciones y congestiones emergentes. Dos trabajos recientes muestran aplicaciones directas a evacuación por inundación/tsunami y su uso pedagógico/participativo.

Takabatake et al. proponen una metodología que integra simulaciones ABM con Q-learning (reinforcement learning) para optimizar rutas de evacuación a nivel individual, incorporando tiempo de inundación, congestión vial y capacidad de refugios; en sus experimentos la metodología redujo mortalidad ~60% frente a la estrategia "ruta más corta". El método alterna simulaciones ABM y actualización de tablas estado-acción-recompensa para refinar rutas.

Pawlik et al. usan ABM en un proyecto de investigación-acción con escolares para enriquecer modelos de evacuación con datos sociales (p. ej. tiempos de inicio de evacuación) y, además de mejorar la validez del modelo, muestran que el proceso participativo favorece comprensión y preparación comunitaria. Esto sugiere que ABM no solo sirve para optimizar rutas sino también como herramienta de educación y co-producción de datos.

ABM permite simular escenarios realistas (con comportamiento humano y congestión) y, combinado con RL, generar guías de evacuación adaptativas que reduzcan cuellos de botella y sobrecarga de refugios. Además, la participación comunitaria mejora datos y aceptación.

- **Aprendizaje por refuerzo (Reinforcement Learning, Q-learning) aplicado a rutas de evacuación**

El uso de RL permite aprender políticas de ruta que consideran recompensas formadas por tiempos hasta inundación, congestión y capacidad de refugios. Takabatake et al. muestran cómo Q-learning puede optimizar rutas individuales usando las salidas de una ABM como datos de entrenamiento, iterando hasta convergencia.

Permite incorporar dinámicas temporales y congestión que los algoritmos clásicos (Dijkstra/A*) no modelan; sin embargo, requiere cómputo iterativo y validación en terreno, y los ajustes de recompensas son críticos para evitar rutas "extrañas" (p. ej. rutas largas que maximizan recompensa, pero retrasan llegada a refugios).

- **Modelos matemáticos / Vehicle Routing para operación integrada (evacuación + distribución de ayuda)**

Insani, Taheri & Abdollahian proponen una modelización matemática del problema integrado de evacuación y distribución de ayuda en etapas tempranas de una inundación. Presentan un VRP (vehicle routing problem) con características reales: multi-viaje, split-delivery, ventanas de cierre en puntos de recogida, incertidumbre en demanda y reutilización de vehículos; como solución práctica emplean un metaheurístico (algoritmo genético modificado) para hallar soluciones cercanas al óptimo con tiempos de resolución razonables.

Útil para la logística de vehículos en evacuaciones asistidas (transporte de personas vulnerables + entrega de insumos), proponiendo soluciones que reducen el número de vehículos necesarios y que son aplicables a planificación operativa.

- **Rutas con criterios de accesibilidad y GIS (aplicaciones urbanas y web)**

Herramientas GIS que calculan rutas óptimas incorporando atributos físicos (pendiente, ancho, altura libre, iluminación, escaleras) muestran que es factible personalizar rutas según el usuario (por ejemplo, personas en silla de ruedas). El trabajo del proyecto PATRAC (Queraltó, Valls, Biere) desarrolla una plataforma web que genera MDT/ ejes de calle desde nubes de puntos, evalúa obstáculos y ofrece rutas adaptadas por tipo de discapacidad, además de recursos visuales (vídeo 3D del recorrido).

Esas técnicas pueden reutilizarse para evacuar poblaciones vulnerables (p. ej. personas con movilidad reducida) priorizando rutas seguras y accesibles cuando la simple «distancia

más corta» no es adecuada. También permiten pre-evaluar barreras físicas que en emergencias podrían ser críticas.

- **Algoritmos GPS / en gadgets y aplicaciones web para respuesta inmediata**

Revisiones sobre algoritmos de trayectorias GPS describen A*, Beam search y heurísticas utilizadas en plataformas comerciales (Google Maps, HERE); discuten la importancia del tiempo esperado (no solo la distancia) y limitaciones de los dispositivos/gadgets. Además, trabajos de implementación local (aplicación web IPS-YA para ambulancias en Bogotá) muestran cómo APIs de mapas y haversine/herramientas web pueden implementarse para cálculo de rutas de emergencia en contextos reales.

Las APIs comerciales y los algoritmos GPS son la base para sistemas de guía instantánea en emergencias (ambulancias, alertas a población), pero deben complementarse con modelos dinámicos (inundación, congestión, capacidad) para situaciones de desastre.

- **Gaps, desafíos y líneas futuras**

Integración temporal y operativa: pocos trabajos integran simultáneamente inundación (onset timing), congestión dinámica y capacidad de refugios a escala individual; Takabatake avanza en esto pero su aplicabilidad operacional requiere interoperabilidad con datos en tiempo real.

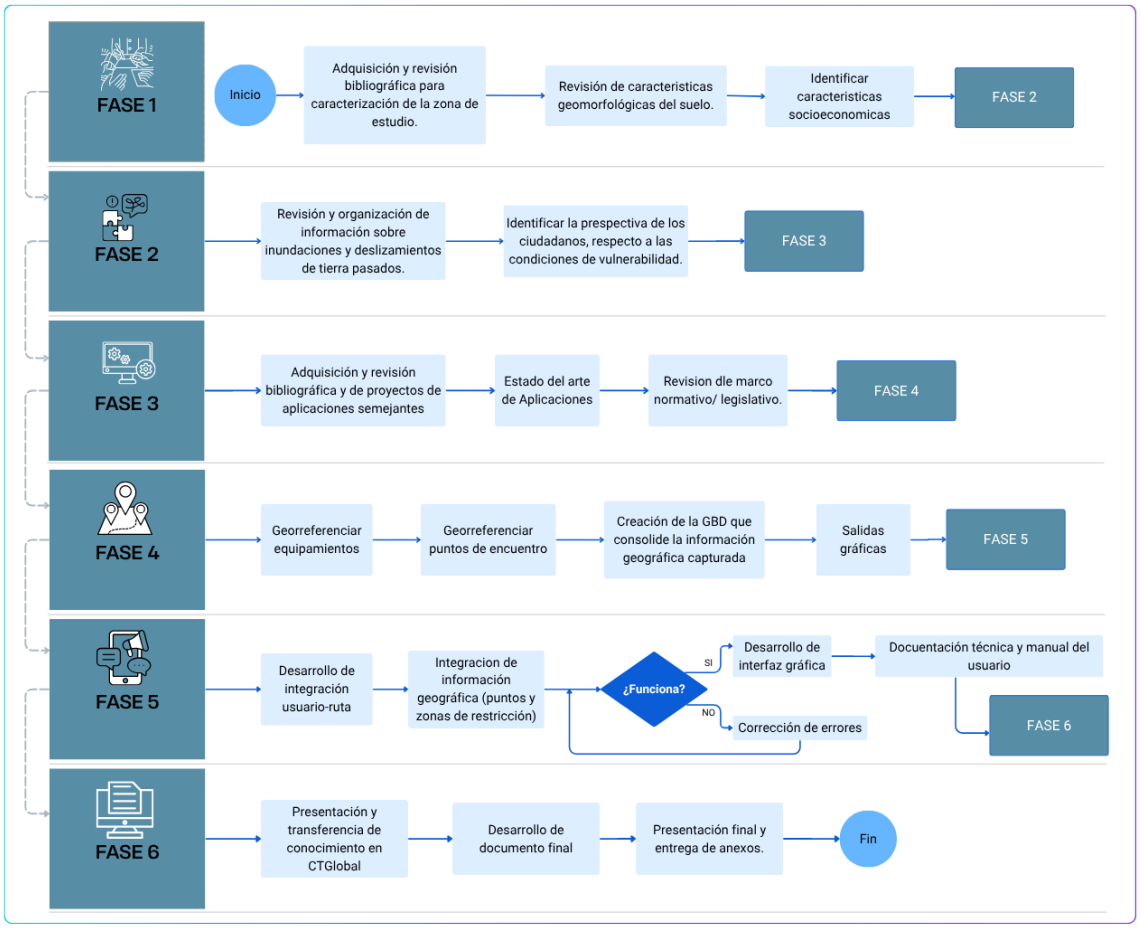
Validación en terreno y datos sociales: Pawlik muestra la ventaja de recoger datos sociales (parámetros de inicio de evacuación) vía procesos participativos; sin embargo, se necesitan más estudios multi-contexto.

Escalabilidad y tiempo real: RL+ABM es prometedor pero exigente computacionalmente; para usarlo en sistemas operativos se requieren infraestructuras para simulación rápida o aproximaciones (surrogates).

Atención a poblaciones vulnerables: integrar criterios de accesibilidad (pendiente, ancho, etc.) en modelos de evacuación es poco frecuente pero crítico; el trabajo de PATRAC ofrece metodologías concretas para incorporar estos atributos.

Logística integrada (vehículos + ayuda): los modelos VRP integrados ayudan a la planificación de recursos (vehículos, insumos) en las fases tempranas de inundación.

9. Metodología



Cómo se evidenció en los capítulos anteriores, el desarrolle de las fases 1 a 3 fue de carácter investigativo, teórico, y descriptivo, elementos fundamentales para entender y desarrollar las fases 4 y 5, que se describen a continuación:

FASE 4. Creación de GDB

- **Descripción de la GDB**

En el anexo 1, se adjunta la GDB del cual se describe a continuación su estructura y el contenido de la base de datos geográfica (File Geodatabase) denominada SantaRosa.gdb, la cual constituye el núcleo de información espacial para el proyecto. Esta base de datos está organizada bajo estándares de sistemas de información geográfica (SIG) para facilitar el análisis multitemático y la gestión del territorio.

Estructura General

La GDB se organiza en tres niveles principales: Feature Datasets (Conjuntos de datos de objetos), Feature Classes (Capas de información) y un Ráster. Esta jerarquía garantiza que los datos compartan el mismo sistema de referencia espacial y estén agrupados lógicamente por temática.

Contenido Detallado

Feature Dataset: Analisis_Amenaza

Este conjunto de datos agrupa las capas vectoriales dedicadas a la evaluación de riesgos y fenómenos naturales. Es fundamental para la gestión del riesgo de desastres.

- AVENIDA_TORRENCIAL: Representa las áreas susceptibles o registros de flujos de lodo y escombros.
- Geomorfologia: Describe las formas del relieve y la composición del terreno.
- INUNDACION: Delimita las zonas con recurrencia o amenaza de desbordamiento de cuerpos de agua.
- MOVIMIENTO_MASA: Contiene la información sobre inestabilidad de laderas (deslizamientos).
- Pto_Encuentro: Capa de tipo puntual que identifica sitios seguros para la población en caso de emergencia.

Feature Dataset: Carto_Base

Contiene la cartografía de referencia necesaria para contextualizar los análisis. Son los datos fundamentales sobre los cuales se construye el modelo territorial.

- Base_Catastral_Predios: Información sobre la división de la propiedad (lotes/predios).
- Equipamientos: Ubicación de infraestructuras de servicio público y social (hospitales, colegios, estaciones de policía, etc.)..
- LMpio: Límite administrativo municipal de Santa Rosa.
- Rio_San_Eugenio: Representación del eje o cuerpo hídrico principal del área de estudio.
- Uso_Suelo: Clasificación del territorio según su actividad (urbano, rural, forestal, etc.).

- Vias: Red de infraestructura de transporte y conectividad.

Capa Ráster

OrtoSantaRosa_20211120: Se trata de una ortofotografía con fecha del 20 de noviembre de 2021. Proporciona una imagen real y actualizada del terreno, sirviendo de base visual para la fotointerpretación y validación de las capas vectoriales.

- **Selección de los puntos de encuentro**

De acuerdo con los lineamientos técnicos de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y las guías operativas para planes de evacuación y simulacros, la selección de los puntos de encuentro para escenarios de inundación y avenidas torrenciales en el municipio de Santa Rosa de Cabal, específicamente en el área urbana aledaña al río San Eugenio, se fundamentó en el análisis previo de riesgos desarrollado por CTGlobal, orientado a garantizar la protección de la vida y la integridad de la población.

En este marco, los sitios definidos se localizaron por fuera de las áreas susceptibles a inundación y/o avenidas torrenciales, en espacios con condiciones físicas estables, seguras y con capacidad suficiente para la concentración temporal de la población evacuada, evitando la generación de nuevos riesgos por aglomeración o exposición a amenazas secundarias. Asimismo, se priorizaron lugares claramente identificables, accesibles mediante las rutas de evacuación, que permiten la organización, el conteo y la atención inicial de las personas, incluyendo población con movilidad reducida y otros grupos vulnerables.

De manera complementaria, y en coherencia con los principios de respuesta establecidos por la UNGRD, se consideró la proximidad funcional a equipamientos estratégicos de atención de emergencias, tales como estaciones de bomberos, puestos de policía y centros de salud, con el fin de facilitar la atención oportuna, la coordinación interinstitucional y el traslado de personas afectadas, fortaleciendo así la capacidad de respuesta ante eventos de inundación en el sector del río San Eugenio.

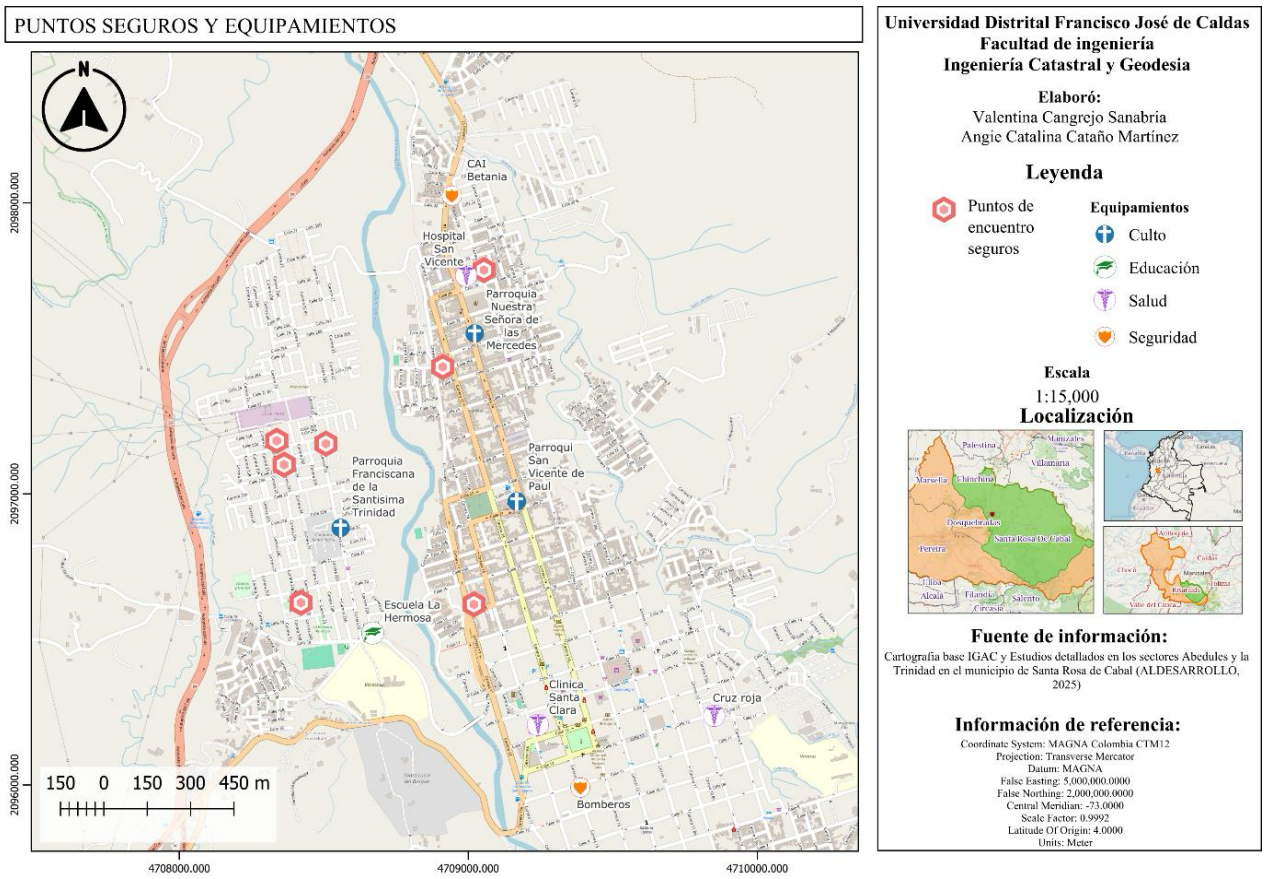


Figura 7. Mapa de georreferenciación de puntos de encuentro y equipamientos. Elaboración propia

FASE 5. Creación de la aplicación móvil

A continuación, se describe el desarrollo del aplicativo EvacuApp, prototipo móvil construido como producto principal de la pasantía. La descripción se centra en lo efectivamente implementado y verificable en el código fuente; los manuales detallados (técnico, de usuario, modelo de requisitos y métricas de calidad) se incluyen como anexos al final del documento.

5.1. Arquitectura general de la aplicación

EvacuApp se desarrolló bajo una arquitectura de componentes funcionales con estado distribuido, característica del ecosistema React Native moderno: las pantallas y componentes son funciones que reciben props y se reactualizan automáticamente cuando cambian; la lógica reutilizable se encapsula en hooks personalizados; y el estado global compartido entre pantallas se gestiona mediante el patrón Context API de React. La organización del código sigue los estándares

de la plataforma Expo, que implementa un sistema de enrutamiento basado en archivos (file-based routing) mediante Expo Router.

La estructura del proyecto se distribuye en los siguientes directorios:

Directorio	Función
app/	Pantallas principales del aplicativo. Cada archivo representa una ruta navegable (login, onboarding, map, visor, emergency, cuenta, prepare, training, statistics, about). El archivo _layout.tsx define el contenedor de navegación.
components/	Componentes reutilizables de interfaz: el contenedor principal del mapa (MapViewContainer), el contenedor del Visor catastral (MapVisorContainer), modales de detalle (refugios, reportes ciudadanos, exposición catastral, vista 360°, grupos familiares, personas desaparecidas), paneles de capas, badges, leyendas y la barra de navegación inferior.
context/	Contextos de estado global: AuthContext (sesión Firebase), RouteContext (parámetros y resultados del flujo de evacuación) y VisorContext (estado del visor territorial entre cambios de tab).
src/algorithms/	Motor de ruteo local: implementaciones propias de Dijkstra, A*, Time-Dependent Dijkstra, Multi-Source Dijkstra, una estructura MinHeap para la cola de prioridad y el módulo catastroCostFactors que calcula las penalizaciones derivadas de las capas catastrales.
src/hooks/	Hooks personalizados que encapsulan la lógica reutilizable: bootstrap del grafo (useGraphBootstrap), planificación de rutas (useRoutePlanning), pipeline del flujo rápido de evacuación (useQuickRoutePipeline), seguimiento GPS (useLocationTracking), generación de isócronas para el mapa de calor (useIsochrones), entre otros.
src/services/	Clientes y servicios de dominio: autenticación con Firebase, clientes HTTP de los endpoints REST del backend (reportes, alertas, grupos familiares, municipios), motor local de ruteo (localRouter), servicio del grafo (graphService), servicio de tiempos del frente de amenaza

	(hazardTimingService), servicio de reportes con clustering local (reportsService), entre otros.
data/	Datos espaciales empaquetados con la aplicación: grafo vial OSM en formato JSON, capas de amenaza por tipo de emergencia, capas catastrales (predios, vulnerabilidad de edificaciones, vulnerabilidad de obras lineales, riesgo por tipo de emergencia, pendientes, elementos expuestos), inventarios de refugios e instituciones de salud y seguridad, y resultados precalculados de la exposición catastral.

Flujo general de la aplicación. Al abrir el aplicativo, el usuario se autentica mediante Firebase (correo electrónico con verificación obligatoria para reportes ciudadanos). La pantalla de inicio (Home) ofrece accesos rápidos a tres flujos principales:

1. **Flujo Evacua (pantalla map.tsx):** el usuario configura los parámetros de la emergencia mediante un sheet inferior (tipo de amenaza, modo de origen, modo de destino, perfil de movilidad). El aplicativo orquesta el cálculo de la ruta óptima, valida intersecciones con zonas de riesgo y traza el recorrido sobre el mapa.
2. **Flujo Visor (pantalla visor.tsx):** el usuario explora el territorio activando capas catastrales y de amenaza, consulta detalles de predios y refugios, accede al modal de cuantificación del riesgo (exposición catastral en pesos) y reporta incidentes ciudadanos.
3. **Flujos complementarios:** capacitación (training.tsx), preparación (prepare.tsx), estadísticas (statistics.tsx), gestión de cuenta y grupo familiar (cuenta.tsx) y emergencia (emergency.tsx, con acceso directo a la línea 123).

5.2. Lenguaje de programación y tecnologías utilizadas

El desarrollo se realizó en TypeScript 5.9, superconjunto tipado de JavaScript. La elección de TypeScript responde a tres ventajas relevantes para una aplicación de uso crítico:

- Seguridad de tipos: detección de errores en tiempo de compilación, lo que reduce los fallos en producción.
- Documentación implícita: los tipos explícitos en interfaces, props y estados sirven como documentación viva del código.

- Compatibilidad con el ecosistema React Native: TypeScript se integra de forma nativa con React y React Native, permitiendo tipar componentes, hooks y contextos de forma robusta.

Las dependencias técnicas principales del aplicativo son:

Categoría	Tecnología	Versión
Runtime	React Native	0.81
Framework	Expo SDK	54
Navegación	Expo Router + React Navigation	6 / 7
Mapas	react-native-maps + Google Maps SDK	1.20
Autenticación	Firebase Auth (JS SDK)	12
Almacenamiento local	AsyncStorage	2.2
Geolocalización	expo-location	19
Operaciones geométricas	Turf.js	7.3
Codificación de polilíneas	@mapbox/polyline	1.2
WebView (vista 360°)	react-native-webview	13.15
Cliente HTTP	axios	1.13

El aplicativo consume un **backend propio** desarrollado en FastAPI con PostgreSQL + PostGIS para la sincronización de reportes ciudadanos, alertas clusterizadas y grupos familiares; sin embargo, el cálculo de rutas y la visualización de las capas locales operan de manera autónoma en el dispositivo.

5.3 Algoritmo para el cálculo de la ruta óptima

Estrategia general: motor de ruteo local

El cálculo de rutas óptimas en EvacuApp se ejecuta localmente en el dispositivo, sin dependencia de servicios externos en tiempo real. Esta decisión arquitectónica responde a una premisa central de la gestión del riesgo de desastres: en una emergencia real (avenida torrencial, movimiento en masa, inundación severa), las antenas de telefonía móvil pueden caer, la red pública saturarse o la conectividad volverse intermitente. Un servicio de evacuación que dependa de una

API externa para calcular la ruta queda inutilizado precisamente en el momento en que más se necesita.

Por esta razón, la fase técnica del proyecto incluyó la implementación de un motor de ruteo propio en TypeScript, que opera sobre un grafo vial pre-construido y empaquetado con la aplicación. Esta decisión cierra la brecha entre lo que declara la tesis (ruteo con algoritmos como Dijkstra y A*) y lo que ejecuta el código (los mismos algoritmos, ya no delegados a una caja negra de terceros).

Construcción del grafo vial

El grafo de calles que alimenta el motor de ruteo se construyó offline mediante el script scripts/build-graph.js, que consume datos de OpenStreetMap a través de la Overpass API para el bounding box del municipio (latitudes 4,8355°–4,9099° N; longitudes −75,6426°–−75,5793° O). El resultado es un grafo dirigido con **6.538 nodos y 13.363 aristas**, consolidado en un único archivo JSON (~3,4 MB) que se incluye en el APK.

A cada arista se le asignó un costo de tránsito en segundos para cada uno de los tres perfiles de movilidad considerados (peatonal, ciclista y vehicular), calculado a partir de su longitud y de velocidades de referencia derivadas de la literatura técnica:

- Peatonal: 1,2–1,3 m/s (~4,3–4,7 km/h), tomando como referencia los valores reportados por Fruin (1971) para flujo peatonal urbano.
- Ciclista: 3,5–5,5 m/s (~13–20 km/h), ajustado por tipología de vía.
- Vehicular: 8–25 m/s (~29–90 km/h), con valores conservadores en función del relieve montañoso del Eje Cafetero.

Adicionalmente, las aristas que intersecan los polígonos de amenaza producidos por ALDESARROLLO (2025) reciben una etiqueta de categoría de amenaza (Alta, Media o Baja) por cada tipo de emergencia (inundación, avenida torrencial, movimiento en masa). Asimismo, mediante un cruce espacial con las capas de vulnerabilidad de obras lineales y predios catastrales en riesgo, cada arista almacena los atributos catastrales que alimentan posteriormente los factores 4A y 4B descritos más adelante.

Algoritmos de búsqueda implementados

El motor de ruteo incluye cuatro algoritmos disponibles a través de una fachada única (src/services/localRouter.ts), seleccionables según el escenario:

Dijkstra clásico. Implementación basada en un MinHeap binario sobre arreglos tipados (Float64Array para distancias, Int32Array para predecesores). Su complejidad temporal es O((n + m) log n), donde n = nodos y m = aristas; para el grafo de Santa Rosa de Cabal (~6,5 mil nodos y ~13 mil aristas), el tiempo de ejecución medio en un dispositivo Android de gama media es inferior a 1 milisegundo por cálculo, según el benchmark realizado (200 iteraciones, latencia media 0,427 ms).

A (A-estrella).* Variante de Dijkstra dirigida por una heurística euclidiana sobre las coordenadas geográficas (latitud, longitud) del nodo evaluado y el destino. La heurística cumple la propiedad de admisibilidad —nunca sobreestima el costo restante—, lo que garantiza matemáticamente la optimalidad de la ruta devuelta. A* es el algoritmo predeterminado cuando no hay emergencia activa y como fallback ante condiciones donde el algoritmo Time-Dependent no encuentra solución.

Time-Dependent Dijkstra. Variante temporal de Dijkstra en la que el costo de cruzar una arista depende del momento en que el evacuado entra en ella. Esta dependencia modela el avance del frente de amenaza: una vía que hoy permite el paso en 60 segundos puede estar comprometida en 300 segundos por la llegada del flujo torrencial. El módulo hazardTimingService define los tiempos de avance del frente por categoría de amenaza (por ejemplo, para avenida torrencial: Alta = 300 s, Media = 900 s, Baja = 1.800 s), bajo el supuesto de cobertura uniforme dentro de cada zona; se reconoce como trabajo futuro la sustitución de estas constantes por un raster de tiempos de llegada generado mediante simulación hidráulica con software como iRIC-Nays2DH.

Multi-Source Dijkstra. Variante invertida del algoritmo clásico que parte simultáneamente de un conjunto de destinos (puntos de encuentro) y avanza hacia el origen. Permite seleccionar el destino óptimo entre todos los puntos de encuentro válidos en una sola ejecución, sin necesidad de calcular una ruta independiente hacia cada uno. Esta variante se utiliza cuando el usuario elige el modo "destino más cercano".

Modelo de costos: penalizaciones por riesgo

Sobre el costo nominal de cada arista (segundos para recorrerla en el perfil seleccionado), el motor aplica penalizaciones multiplicativas según el escenario activo:

Penalización por amenaza activa. Cuando el usuario selecciona un tipo de emergencia, las aristas que cruzan zonas de la categoría correspondiente se penalizan con un multiplicador configurable. Los valores por defecto son: ×8 para amenaza Alta, ×4 para amenaza Media y ×1 para Baja. Esto induce al algoritmo a preferir rutas que esquiven zonas de alto riesgo, sin descartarlas por completo cuando son la única alternativa viable.

Factores catastrales (4A y 4B). Como aporte específicamente catastral del proyecto, se incorporan dos dimensiones adicionales de penalización aplicables únicamente al perfil peatonal y solo cuando hay una emergencia activa:

- **Factor 4A — Vulnerabilidad de obras lineales.** Penaliza tramos viales que el estudio EDAVR de ALDESARROLLO clasifica como estructuralmente frágiles ante el fenómeno (corona de deslizamiento, muros débiles, taludes inestables). El multiplicador adicional por categoría es +2,0 para Alta, +0,6 para Media y +0,15 para Baja.
- **Factor 4B — Riesgo predial adyacente.** Penaliza vías cuyo entorno cercano contiene predios catastralmente clasificados en riesgo Alto, Medio o Bajo para la emergencia activa. El multiplicador suma +0,25 por cada predio Alto cercano, +0,08 por cada Medio y +0,02 por cada Bajo.

Ambos factores se combinan con un tope total de **4,0×** sobre el costo nominal, garantizando que ninguna arista quede efectivamente excluida y que la ruta siempre exista cuando hay conectividad topológica entre origen y destino.

Bloqueos por reportes ciudadanos. Los reportes ciudadanos de bloqueo vial generados desde la propia aplicación se traducen, mediante un proceso de clustering geoespacial, en un conjunto de aristas marcadas como **intransitables** durante la búsqueda (blockedEdgeIds). Cuando una arista pertenece a este conjunto, el algoritmo la salta directamente, redirigiendo la ruta por trayectos alternativos.

Selección automática del algoritmo según escenario

La fachada computeRoute selecciona el algoritmo apropiado en función de los parámetros del usuario:

Escenario	Algoritmo aplicado
Evacuación con emergencia activa	Time-Dependent Dijkstra con factores catastrales
Cálculo sin emergencia (preview)	A* con heurística euclidiana
Time-Dependent sin solución	Fallback a A* sin restricciones temporales
Modo "destino más cercano" entre múltiples refugios	Multi-Source Dijkstra

Flujo del cálculo

El proceso completo sigue las siguientes fases:

1. **Mapeo a nodos del grafo.** Las coordenadas de origen y destino (provistas por el GPS o seleccionadas manualmente sobre el mapa) se asocian a sus nodos más cercanos mediante una búsqueda de proximidad basada en la fórmula de Haversine.
2. **Recopilación de bloqueos vigentes.** Se consultan los reportes ciudadanos clusterizados que aplican al tipo de emergencia activa y se construye el conjunto blockedEdgeIds.
3. **Ejecución del algoritmo.** Según el escenario, se ejecuta Dijkstra, A*, Time-Dependent o Multi-Source. La función devuelve la secuencia óptima de aristas, el costo total acumulado y la duración estimada en cada perfil.
4. **Validación de seguridad.** La polilínea resultante se contrasta con los polígonos de amenaza activos (Alta y Media) mediante la función booleanIntersects de Turf.js. Si algún tramo cruza una zona de riesgo, se identifica y se segmenta para diferenciarlo visualmente en el mapa.

Visualización. La ruta se renderiza sobre el mapa interactivo de la aplicación, con los segmentos seguros en azul y los segmentos que atraviesan zonas de amenaza en rojo, acompañados del resumen de distancia total y tiempo estimado de evacuación.

Este pipeline se ejecuta íntegramente en el dispositivo del usuario, sin necesidad de conexión a internet para el cálculo, lo que garantiza la disponibilidad del sistema en condiciones de telecomunicaciones degradadas, escenario habitual durante un desastre.

5.4. Módulos funcionales del aplicativo

Más allá del cálculo de rutas, EvacuApp integra varios módulos que dan soporte al ciclo completo de gestión del riesgo a nivel ciudadano:

Visor territorial. Pantalla independiente que permite explorar el territorio sin ejecutar un cálculo de evacuación. El usuario activa o desactiva capas (amenaza por tipo de emergencia, vulnerabilidad de edificaciones, vulnerabilidad de obras lineales, riesgo predial, pendientes, predios catastrales) y consulta la cuantificación de la exposición catastral mediante un modal que reporta, por categoría de amenaza, el número de edificaciones expuestas, el valor catastral y el valor de mercado agregados, entre otras métricas. El estado del visor se persiste en VisorContext para que el usuario pueda alternar con otros módulos sin perder los toggles activados ni la región del mapa.

Reportes ciudadanos. Cualquier usuario autenticado con correo verificado puede emitir un reporte geolocalizado sobre incidentes que afecten la movilidad o la seguridad: bloqueo vial, inundación localizada, deslizamiento, sendero obstruido o categoría general "otro". El reporte se guarda localmente en AsyncStorage y se sincroniza con el backend cuando hay conectividad. Cuando el sistema detecta tres o más reportes coincidentes en un radio de 30 metros, eleva el grupo a una alerta pública (PublicAlert) que se traduce en aristas marcadas como intransitables durante el ruteo, redirigiendo automáticamente las rutas calculadas para los demás usuarios.

Comunidad: grupos familiares y personas desaparecidas. El aplicativo permite crear o unirse a grupos familiares mediante un código compartible; los miembros pueden compartir su ubicación entre sí durante una emergencia para coordinar el reencuentro en el punto de evacuación. El módulo de personas desaparecidas permite reportar y consultar casos abiertos, con foto y descripción.

Información preventiva. Cinco lecciones de capacitación basadas en lineamientos de la UNGRD, una guía de preparación que incluye un kit recomendado de 72 horas y un plan familiar, y una pantalla de estadísticas con datos abiertos del municipio.

Vista 360°. Para cada punto de encuentro, el aplicativo permite visualizar el sector mediante una vista panorámica de Google Street View, lo que ayuda al usuario a familiarizarse con el lugar antes de una eventual evacuación.

5.5. Funcionamiento offline

Una característica arquitectónica diferencial del aplicativo es que el cálculo de rutas y la visualización de las capas territoriales operan sin requerir conectividad. Esta autonomía se logra mediante tres decisiones de diseño:

1. Empaquetado del grafo vial dentro del APK. El grafo OSM (~3,4 MB) se compila junto con el aplicativo y se carga al iniciar la sesión.
2. Almacenamiento local de capas espaciales. Todas las capas catastrales y de amenaza, así como los inventarios de refugios e instituciones, se incluyen como recursos del aplicativo en formato GeoJSON.
3. Motor de ruteo en el dispositivo. Las cuatro variantes del algoritmo (Dijkstra, A*, Time-Dependent y Multi-Source) están implementadas en TypeScript y se ejecutan localmente, sin depender de servicios remotos.

Las funciones que sí requieren conectividad —sincronización de reportes ciudadanos con el servidor, autenticación inicial, descarga de teselas del mapa base de Google Maps— se degradan elegantemente: el aplicativo continúa calculando rutas y desplegando las capas de amenaza locales, aunque no haya red disponible. El mapa base de Google Maps, en cambio, requiere conexión para cargar teselas no cacheadas previamente; por ello se recomienda, como buena práctica, abrir el aplicativo al menos una vez con conectividad en el área de estudio para precargar el mapa de fondo. La incorp oración de teselas vectoriales empaquetadas en el APK queda planteada como trabajo futuro..

5.6. Compilación y distribución

El aplicativo se compila como APK Android instalable mediante EAS Build, el servicio de compilación en la nube de Expo, que genera binarios firmados con el keystore del proyecto. La distribución se realiza de manera directa a usuarios y evaluadores mediante el archivo APK adjunto en los anexos, sin necesidad de pasar por una tienda de aplicaciones para esta fase de prototipo. La clave de Google Maps utilizada por el aplicativo se restringe en Google Cloud Platform por package name (com.ctglobal.rutasevacuacion) y por SHA-1 del keystore, evitando su uso desde otros aplicativo.

10. Alcances y limitaciones

Alcances

El presente proyecto tiene como alcance principal el desarrollo de una aplicación móvil orientada a la visualización y al cálculo de rutas de evacuación óptimas en escenarios de emergencia, aplicada al contexto urbano del municipio de Santa Rosa de Cabal, con énfasis en el corredor del río San Eugenio (sectores Abedules y La Trinidad). La herramienta integra capacidades de geolocalización, visualización cartográfica, análisis de redes y procesamiento espacial, permitiendo al usuario identificar rutas seguras hacia los puntos de encuentro previamente definidos en coordinación con los lineamientos de la UNGRD y los estudios detallados producidos por ALDESARROLLO (2025).

Alcance técnico — motor de ruteo

Desde el componente técnico de ruteo, la aplicación implementa un motor propio que opera sobre un grafo vial de 6.538 nodos y 13.363 aristas construido a partir de OpenStreetMap y enriquecido con las capas catastrales y de amenaza del estudio EDAVR. Sobre dicho motor se integran cuatro algoritmos clásicos de búsqueda en grafos:

- Dijkstra,
- A* con heurística euclidiana,
- Time-Dependent Dijkstra (que modela el avance temporal del frente de amenaza), y
- Multi-Source Dijkstra (para la selección óptima entre múltiples puntos de encuentro).

El usuario configura los parámetros del cálculo según el escenario: tipo de emergencia (inundación, avenida torrencial o movimiento en masa), perfil de desplazamiento (peatonal, bicicleta o vehículo), modo de origen (ubicación GPS o selección manual sobre el mapa) y modo de destino (más cercano, exploración por mapa de calor de tiempos de evacuación, o equipamientos institucionales de salud y seguridad).

El motor incorpora, además, dos factores catastrales propios del proyecto que constituyen el aporte específicamente alineado con la disciplina de Ingeniería Catastral y Geodesia: el factor 4A de vulnerabilidad de obras lineales y el factor 4B de riesgo predial adyacente. Asimismo, el aplicativo integra los reportes ciudadanos en tiempo de cálculo: cuando un clúster de tres o más reportes coincidentes en un radio de 30 metros se eleva a alerta pública, las aristas afectadas se marcan como intransitables, redirigiendo automáticamente las rutas calculadas para los demás usuarios.

Alcance técnico — módulos complementarios

Más allá del cálculo de rutas, el aplicativo incluye los siguientes módulos funcionales:

Visor territorial: exploración interactiva de las capas catastrales y de amenaza con activación selectiva de toggles, consulta del modal de cuantificación de la exposición catastral (número de edificaciones, valor catastral y valor de mercado agregados por categoría de amenaza) y visualización de pendientes, vulnerabilidad de edificaciones, vulnerabilidad de obras lineales y riesgo predial.

Reporta: Reportes ciudadanos geolocalizados con foto, sincronizados con un backend propio en FastAPI cuando hay conectividad y clusterizados localmente para la generación de alertas públicas.

Comunidad: módulo de grupos familiares con código compartible para la coordinación durante una evacuación, y módulo de personas desaparecidas para reporte y consulta de casos abiertos.

Información preventiva: capacitación basada en lineamientos de la UNGRD, guía de preparación con kit de 72 horas y plan familiar, y vista panorámica 360° de los puntos de encuentro mediante Google Street View.

Autenticación: sesión con Firebase Auth, con verificación obligatoria de correo electrónico para la creación de reportes ciudadanos.

Alcance arquitectónico — operación autónoma del cálculo

Una característica diferencial del aplicativo es que el cálculo de rutas y la visualización de las capas territoriales operan de manera autónoma en el dispositivo del usuario, sin requerir conectividad activa. El grafo vial, las capas catastrales y de amenaza, y los inventarios de refugios e instituciones se empaquetan dentro del archivo de instalación (APK) y se cargan al iniciar la sesión. Las funciones que sí requieren conectividad —sincronización de reportes ciudadanos con el servidor, descarga de teselas del mapa base, autenticación inicial— se degradan elegantemente: el aplicativo continúa calculando rutas y desplegando capas locales aunque no haya red disponible. Esta decisión arquitectónica responde a una premisa de la gestión del riesgo: en una emergencia real, la infraestructura de telecomunicaciones puede degradarse o caer por completo, y un sistema dependiente de una API remota quedaría inutilizado precisamente en el momento crítico.

Alcance del componente cartográfico

El proyecto contempla la estructuración de una base de datos geográfica (Geodatabase) que consolida los insumos espaciales utilizados por el aplicativo: puntos de encuentro georreferenciados, equipamientos institucionales (salud y seguridad), capas de amenaza por inundación, avenida torrencial y movimiento en masa, capas catastrales (predios, vulnerabilidad de edificaciones, vulnerabilidad de obras lineales, riesgo por tipo de emergencia, pendientes, elementos expuestos) y el grafo vial procesado. La base de datos se entrega como anexo del proyecto en formato File Geodatabase (.gdb), garantizando su interoperabilidad con software SIG estándar.

Alcance documental

Adicionalmente, se desarrollan productos complementarios que fortalecen la documentación del sistema y facilitan su uso, mantenimiento y posible escalabilidad: modelo de requisitos, manual técnico de arquitectura del sistema, manual del usuario y documento de métricas de calidad, todos disponibles como anexos del presente trabajo.

Alcance académico

En términos académicos, el proyecto aporta a la articulación entre la gestión del riesgo de desastres y el uso aplicado de la geomática, particularmente en la integración de algoritmos de optimización de rutas con información catastral oficial producida bajo el Decreto 1807 de 2014. La validación cuantitativa del aporte catastral —comparación de rutas con y sin factores 4A/4B sobre 50 pares origen-destino para cada tipo de emergencia, con reducción consistente del porcentaje de rutas que atraviesan infraestructura de alto riesgo— constituye evidencia empírica del valor agregado de la información catastral oficial al modelado de evacuaciones, y abre la posibilidad de su replicación en otros municipios con estudios EDAVR equivalentes.

Limitaciones

A pesar de los aportes del proyecto, existen diversas limitaciones que deben ser reconocidas explícitamente en aras de la transparencia metodológica que demanda un trabajo de carácter académico.

Limitaciones del modelo

Tiempos de avance del frente de amenaza. El módulo de ruteo dependiente del tiempo (Time-Dependent Dijkstra) requiere conocer el instante en que cada zona del territorio queda comprometida por el fenómeno. En esta versión, dichos tiempos se asignaron como constantes razonables por categoría de amenaza y tipo de emergencia (por ejemplo, para avenida torrencial: Alta = 5 min, Media = 15 min, Baja = 30 min), bajo el supuesto de cobertura uniforme. En una iteración posterior, estos valores deberían provenir de simulación hidráulica del cauce del río San Eugenio mediante software especializado como iRIC-Nays2DH (utilizado por ALDESARROLLO en la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales), produciendo un raster de tiempos de llegada por celda territorial.

Calibración de los factores de penalización. Los multiplicadores aplicados al costo de tránsito de cada arista ante una emergencia activa (×8 para amenaza Alta, ×4 para Media; y los factores 4A y 4B con tope combinado de 4,0×) se establecieron a partir de los rangos sugeridos en el Anteproyecto y de la lógica del Decreto 1807 de 2014. Una calibración formal

con literatura especializada en modelos de evacuación peatonal y, en lo posible, con factores observados en simulacros locales, fortalecería su justificación cuantitativa.

Velocidades peatonales y de movilidad. El grafo se construyó con velocidades de referencia tomadas de la literatura clásica (Fruin, 1971) y de configuraciones estándar de motores de ruteo abiertos, con ajustes a la baja en función del relieve montañoso de Santa Rosa de Cabal. No se realizaron aforos locales con evacuados reales que permitieran calibrar estos valores específicamente para la zona de estudio. En particular, no se modeló el efecto diferencial de grupos vulnerables (niños, adultos mayores, personas con movilidad reducida) sobre los tiempos de evacuación.

Limitaciones técnicas para producción

Cobertura del grafo vial. El grafo OSM contiene 6.538 nodos y 13.363 aristas, de las cuales el 2 % están etiquetadas con categorías de amenaza por su intersección con las capas EDAVR. La tasa de éxito del 96 % reportada en el experimento de validación técnica evidencia la presencia de algunos componentes desconectados en los sectores periféricos del bounding box, fenómeno habitual en datos colaborativos abiertos. Para un despliegue oficial, se recomienda complementar la red OSM con cartografía vial actualizada de la administración municipal.

Recálculo automático en background. Si bien el aplicativo permite al usuario solicitar el recálculo de la ruta cuando aparecen nuevas condiciones (un reporte ciudadano, un cambio de configuración), no implementa un mecanismo de re-ruteo automático en segundo plano durante una evacuación activa. La activación del recálculo requiere una acción explícita del usuario.

Pruebas automatizadas y observabilidad. El proyecto, en su carácter de prototipo funcional, no incluye una suite de pruebas unitarias automatizadas ni un sistema de monitoreo de errores en producción (Sentry o equivalente). Se realizaron pruebas funcionales manuales sistemáticas y experimentos cuantitativos controlados, los cuales se documentan en la sección

de Validación. Para un despliegue a escala real, una suite de pruebas regresivas y un sistema de observabilidad serían condiciones recomendables.

Hardening de seguridad informática. Se identificaron tres vectores de seguridad cuya mitigación queda como trabajo futuro: la configuración por defecto del CORS en el backend, la validación server-side de la verificación de correo electrónico para creación de reportes ciudadanos (la validación client-side está activa) y la verificación cruzada de identidad en el clúster de reportes para prevenir inyección de alertas falsas. La restricción de la clave de Google Maps API por package y SHA-1 fue resuelta antes de la entrega final del aplicativo.

Limitaciones de cobertura geográfica

El sistema fue calibrado y probado para Santa Rosa de Cabal con datos del estudio EDAVR específico del corredor del río San Eugenio (sectores Abedules y La Trinidad). La extensión a otros municipios requeriría una nueva ingesta de capas de amenaza, vulnerabilidad y catastro, así como la reconstrucción del grafo vial para la nueva zona. La arquitectura actual contempla esta extensibilidad como posible, pero no parametrizada de origen.

Limitaciones de validación

Por restricciones temporales y logísticas del marco de pasantía, no fue posible incluir en este trabajo: (i) pruebas de usabilidad con usuarios finales residentes en Santa Rosa de Cabal; (ii) validación institucional formal con la Dirección de Gestión del Riesgo del municipio o entidades afines (Defensa Civil, Bomberos, UNGRD); y (iii) un simulacro coordinado en territorio con activación de los flujos del aplicativo en condiciones controladas. Estas validaciones se reservan como condición indispensable para una eventual fase de implementación operativa y se detallan en la sección de Trabajo futuro.

Aclaración importante: funcionamiento offline

El cálculo de rutas, la consulta de las capas de amenaza, los inventarios de refugios e instituciones y la visualización de la polilínea de evacuación operan de manera autónoma en el dispositivo, sin requerir conectividad activa. Esta autonomía es una decisión arquitectónica deliberada y constituye una fortaleza diferencial en el contexto de la gestión del riesgo: durante eventos extremos la infraestructura de telecomunicaciones puede fallar, y un sistema que

dependa de una API remota para calcular rutas queda inutilizado precisamente cuando más se necesita.

Sin embargo, debe matizarse el alcance de esta autonomía. El mapa base que provee el contexto visual de las calles y edificaciones —servido por Google Maps mediante teselas— requiere conexión a internet para cargar zonas que el dispositivo aún no haya visualizado. La aplicación se beneficia del caché que el SDK de Google Maps mantiene automáticamente en disco: una vez que el usuario ha abierto el aplicativo con conexión en la zona de estudio, las teselas de Santa Rosa de Cabal quedan disponibles temporalmente sin red. No obstante, en una instalación reciente sin conectividad inicial, la polilínea de la ruta se renderizaría sobre un fondo vacío y dificultaría la orientación visual del usuario.

Como recomendación operativa para un eventual despliegue, la primera apertura del aplicativo debería realizarse con conectividad en el área de estudio, lo cual deja precargado el mapa base. Como trabajo futuro se propone la incorporación de teselas vectoriales empaquetadas con la aplicación —en formato MBTiles, OSMdroid o equivalente— que garantizarían la operación completamente offline del mapa base, eliminando esta dependencia residual.

- **Descripción de anexos**

Como complemento al desarrollo del proyecto, se incluyen una serie de anexos que documentan y soportan tanto el funcionamiento técnico como el uso de la aplicación:

- **Repositorio:** Contiene el código fuente completo del proyecto, organizado en módulos (componentes, servicios, utilidades, contexto, entre otros), permitiendo su revisión, mantenimiento y futura ampliación.
- **APK ejecutable:** Archivo instalable de la aplicación para dispositivos Android, que permite su ejecución sin necesidad de un entorno de desarrollo, facilitando pruebas funcionales y validación por parte de usuarios o evaluadores.
- **Anexo Modelo de requisitos:** Documento en el que se especifican los requerimientos funcionales y no funcionales de la aplicación, incluyendo las necesidades del usuario, restricciones del sistema.

- **Manual técnico de desarrollo y arquitectura del sistema (Frontend y Backend):** Documento que describe la arquitectura del sistema, la estructura del código, las tecnologías utilizadas y los procesos de implementación, orientado a desarrolladores que requieran comprender, mantener o extender la aplicación.
- **Manual del usuario:** Guía dirigida a los usuarios finales, en la que se explica el uso de la aplicación, sus funcionalidades principales, la configuración de parámetros y la interpretación de los resultados, especialmente en escenarios de emergencia o simulacros.
- **Métricas de calidad:** Documento en el que se definen y evalúan indicadores de desempeño del sistema, tales como tiempo de respuesta en el cálculo de rutas, precisión de la geolocalización, usabilidad de la interfaz y estabilidad de la aplicación. Estas métricas permiten validar el cumplimiento de los requisitos establecidos y sirven como base para la mejora continua del sistema.

11. Conclusiones y recomendaciones

Sobre el diagnóstico territorial

El desarrollo del presente proyecto permitió evidenciar que la gestión del riesgo de desastres en Santa Rosa de Cabal enfrenta un desafío estructural: la brecha entre la producción de información técnica especializada —como los estudios detallados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo formulados bajo el Decreto 1807 de 2014— y la disponibilidad de instrumentos operativos que traduzcan dicha información en decisiones rápidas y comprensibles durante una emergencia. La caracterización de los sectores Abedules y La Trinidad confirmó condiciones de alta vulnerabilidad sistémica, derivadas de la interacción entre factores físicos (geomorfología, dinámica fluvial, configuración geológica) y procesos de ocupación urbana sobre geoformas críticas del corredor del río San Eugenio. En este contexto, las estrategias tradicionales basadas en señalización estática resultan insuficientes para responder a la complejidad y dinamismo de los eventos naturales que afectan al municipio.

Sobre el aporte técnico del aplicativo

Como respuesta a esta brecha, se desarrolló EvacuApp, un aplicativo móvil construido en React Native y TypeScript que integra capacidades de geolocalización, visualización cartográfica, análisis de redes y procesamiento espacial. La principal decisión arquitectónica del aplicativo fue la implementación de un motor propio de ruteo en el dispositivo, en lugar de delegar el cálculo a un servicio externo. Esta decisión —motivada por la premisa de que la infraestructura de telecomunicaciones puede degradarse durante un evento extremo— se materializó en un grafo vial pre-construido a partir de OpenStreetMap (6.538 nodos, 13.363 aristas) y en cuatro algoritmos clásicos de búsqueda en grafos integrados sobre dicho grafo: Dijkstra clásico, A* con heurística euclidiana, Time-Dependent Dijkstra y Multi-Source Dijkstra. La implementación de cuatro variantes algorítmicas, en lugar de las dos contempladas en el objetivo específico original (Dijkstra o A*), constituye un aporte adicional al alcance previsto.

Sobre el aporte específicamente catastral

Como contribución alineada con la disciplina de Ingeniería Catastral y Geodesia, el aplicativo incorpora dos factores catastrales propios del proyecto: el factor 4A de vulnerabilidad de obras lineales y el factor 4B de riesgo predial adyacente, ambos derivados del estudio EDAVR de ALDESARROLLO (2025) y aplicados como penalizaciones multiplicativas al costo de tránsito de las aristas afectadas, exclusivamente en perfil peatonal y bajo emergencia activa. La validación cuantitativa de este aporte —un experimento controlado con 50 pares origen-destino para cada uno de los tres tipos de emergencia— evidenció una reducción consistente en el porcentaje de rutas que atraviesan infraestructura de alto riesgo: del 19,1 % al 8,5 % en el escenario de avenida torrencial, del 18,4 % al 12,2 % en inundación, y del 12,2 % al 10,2 % en movimiento en masa. Este resultado constituye evidencia empírica del valor agregado que aporta la información catastral oficial al modelado de evacuaciones, y abre la posibilidad de su replicación en otros municipios con estudios EDAVR equivalentes.

Sobre la articulación con el marco normativo

El proyecto se enmarca en el cumplimiento de la Ley 1523 de 2012 y se articula con el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Santa Rosa de Cabal, así como con el Marco de Sendai 2015–2030. Esta alineación permite entender al aplicativo no como una herramienta aislada, sino como un instrumento complementario dentro de los procesos de conocimiento, reducción y manejo del riesgo establecidos por el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Particularmente, el Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD) figura como usuario estratégico institucional previsto para el aplicativo, junto con los cuerpos de socorro y las autoridades locales que conforman la red operativa de respuesta ante emergencias.

Sobre la perspectiva social

Desde una perspectiva social, la incorporación de este tipo de herramientas puede contribuir a reducir la incertidumbre y mejorar la capacidad de respuesta de la población, especialmente en comunidades que históricamente han estado expuestas a eventos recurrentes en el corredor del río San Eugenio. La caracterización comunitaria realizada por ALDESARROLLO evidenció el estado de alerta permanente con que vive la población durante las temporadas invernales; herramientas digitales que traduzcan la información técnica en orientaciones accionables pueden complementar las estrategias de comunicación del riesgo y favorecer la apropiación del conocimiento territorial.

Sobre los límites del trabajo

El aplicativo entregado tiene el carácter de prototipo funcional. Su despliegue operativo a escala real requiere completar procesos que escapan al alcance temporal de la pasantía: validación con usuarios finales en territorio, validación institucional formal con la Dirección de Gestión del Riesgo del municipio, sustitución de las constantes de tiempo de avance del frente por raster de tiempos de llegada provenientes de simulación hidráulica, calibración de los factores de penalización con literatura especializada, y empaquetado de teselas vectoriales del mapa base para garantizar operación completamente offline (en la versión actual, el cálculo de rutas opera sin conectividad pero el mapa base de Google requiere conexión inicial para

precargar las teselas del área de estudio). Estas limitaciones se documentan en detalle en la sección correspondiente y se reflejan en las recomendaciones siguientes.

Recomendaciones

Se proponen las siguientes líneas de trabajo para una fase posterior, ordenadas por prioridad operativa:

Validación operativa con usuarios y autoridades locales. Diseño y ejecución de pruebas de usabilidad con población residente en los sectores Abedules y La Trinidad, articulación formal con la Dirección de Gestión del Riesgo del municipio, y realización de un simulacro coordinado con activación del aplicativo en condiciones controladas. Esta validación es condición previa a un despliegue público.

Integración con simulación hidráulica. Sustitución de las constantes de tiempo de avance del frente de amenaza por un raster de tiempos de llegada generado mediante simulación con iRIC-Nays2DH —software ya empleado por ALDESARROLLO en la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales— para los tres tipos de emergencia.

Calibración con literatura especializada. Revisión bibliográfica formal sobre factores de penalización en algoritmos de evacuación peatonal y ajuste de los multiplicadores actuales (×8 para amenaza Alta, factores 4A y 4B) con base en evidencia comparada y, en lo posible, con datos observados en simulacros locales.

Aforos locales de velocidades peatonales. Recolección de datos de velocidad en zona de estudio diferenciados por grupos demográficos (niños, adultos mayores, personas con discapacidad), para sustituir las velocidades de referencia tomadas de la literatura clásica (Fruin, 1971).

Empaquetado de teselas del mapa base. Incorporación de teselas vectoriales pre-renderizadas de Santa Rosa de Cabal en formato MBTiles o equivalente, distribuidas dentro del APK, para garantizar que el contexto cartográfico de las calles y edificaciones esté disponible incluso en escenarios sin conectividad previa. Con esto, la operación del aplicativo durante una emergencia real con telecomunicaciones caídas dejaría de depender del caché temporal del SDK de Google Maps.

Hardening técnico para producción. Implementación de pruebas automatizadas para los algoritmos críticos, refactor del componente principal del módulo de evacuación, integración de un sistema de monitoreo de errores (Sentry o equivalente), implementación de

re-ruteo automático en background con WebSockets, y cierre de los vectores de seguridad informática identificados (configuración de CORS, validación server-side de la verificación de correo, verificación cruzada de identidad en el clúster de reportes).

Extensibilidad multimunicipio. Parametrización del sistema para ingesta de datos catastrales y de amenaza de otros municipios del país, con vista a una solución replicable a nivel nacional bajo el marco del Decreto 1807 de 2014. La arquitectura actual contempla esta extensibilidad como posible pero no parametrizada de origen.

Articulación institucional con la UNGRD y el SNGRD. Evaluación del aplicativo como herramienta complementaria a los planes de emergencia municipales y posible inclusión en los protocolos de respuesta del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.

12. Referencias Bibliográficas

ALDESARROLLO. (2025). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) — Santa Rosa de Cabal 2024–2027*. Alcaldía Municipal de Santa Rosa de Cabal.

Alcaldía Municipal de Santa Rosa de Cabal. (2012). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD)*. https://www.santarosa.gov.co

Alcaldía Municipal de Santa Rosa de Cabal. (2019). *Plan de Desarrollo Municipal 2020–2023 "Santa Rosa de Cabal, primero la gente"*. https://www.santarosa.gov.co

Alcaldía Municipal de Santa Rosa de Cabal. (2020). *Estrategia Municipal de Respuesta a Emergencias (EMRE)*. Secretaría de Gobierno y Tránsito.

Concejo Municipal de Santa Rosa de Cabal. (2000). *Acuerdo 028 de 2000, por el cual se adopta el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) del municipio de Santa Rosa de Cabal*. https://www.santarosa.gov.co

Congreso de la República de Colombia. (1997). *Ley 388 de 1997, por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 3 de 1991 y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 43.091. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0388_1997.html

Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres*. Diario Oficial No. 48.411. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1523_2012.html

Cooke, K. L., & Halsey, E. (1966). The shortest route through a network with time-dependent internodal transit times. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, *14*(3), 493–498. https://doi.org/10.1016/0022-247X(66)90009-6

Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2009). *Introduction to algorithms* (3rd ed.). MIT Press.

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, *1*(1), 269–271. https://doi.org/10.1007/BF01386390

Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design*. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.

Gobernación de Risaralda. (2012). *Decreto 786 de 2012, por el cual se adopta el Plan Departamental de Gestión del Riesgo de Desastres (PDGRD) de Risaralda*. Gaceta Departamental.

Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, *4*(2), 100–107. https://doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136

Insani, N., Sa'adah, U., & Pradana, M. S. (2021). Implementation of Dijkstra's algorithm for evacuation route planning in tsunami-prone areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *732*(1), 012089. https://doi.org/10.1088/1755-1315/732/1/012089

Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER). (2022). *IPS-YA: Sistema de información para la atención de emergencias en Bogotá D.C.* Alcaldía Mayor de Bogotá. https://www.idiger.gov.co

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). *Decreto 1807 de 2014, por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial*. Diario Oficial No. 49.279.

OpenStreetMap Foundation. (2024). *OpenStreetMap — colaborative geographic database* [Conjunto de datos geográficos]. https://www.openstreetmap.org

Pawlik, M., Augustyniak, P., & Strzelecki, A. (2020). A multi-criteria pedestrian routing algorithm for emergency evacuation in urban areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *51*, 101876. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101876

Presidencia de la República de Colombia. (2016). *Decreto 308 de 2016, por el cual se adopta el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD) "Una estrategia de desarrollo 2015–2025"*. Diario Oficial No. 49.785.

Queraltó, P., Riera, P., & Saurí, D. (2019). GIS-based evacuation routing for flash-flood-prone Mediterranean watersheds. *Natural Hazards*, *97*(2), 765–784. https://doi.org/10.1007/s11069-019-03670-9

Takabatake, T., Shibayama, T., Esteban, M., Achiari, H., Nurisman, N., & Pratama, M. B. (2018). Simulated tsunami evacuation behavior of local residents and visitors in Kamakura, Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *28*, 35–46. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.019

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030*. Naciones Unidas. https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030