

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO - CHILE



**“IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA COLABORATIVO DE
PREVENCIÓN DE INCENDIOS URBANO-FORESTALES
BASADO EN IA Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA: CASO
PYROPREV”**

AYRTON ISMAEL ALBERTO PÉREZ PINO

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA**

Profesor Guía: Mauricio Figueroa
Profesor Correferente: Nicolás Rojas

Octubre - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Implementación de sistema colaborativo de prevención de incendios urbano-forestales basado en IA y participación ciudadana: Caso PyroPrev

Nombre del candidato(a): Ayrton Ismael Alberto Pérez Pino

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Informática

Campus: Casa Central Valparaíso

Departamento: Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Figueroa Colarte, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses

☐ 12 meses

☐ 2 años

☐ 3 años

☐ 5 años

☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 19-10-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 19/10/2026

Firma:



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Implementación de sistema colaborativo de prevención de incendios urbano-forestales basado en IA y participación ciudadana: Caso PyroPrev

Ayrton Ismael Alberto Pérez Pino

ayrton.perez@usm.cl

Profesor guía: Mauricio Figueroa Colarte

Resumen: Los incendios urbano-forestales representan una amenaza relevante para comunidades expuestas a vegetación combustible, donde la prevención temprana y la disponibilidad de información comprensible resultan fundamentales. PyroPrev, desarrollado inicialmente como una herramienta de análisis preventivo individual asistido por inteligencia artificial, presentaba la limitación de mantener sus resultados restringidos al usuario. Esta memoria aborda su evolución hacia un sistema colaborativo que incorpora reportes comunitarios georreferenciados, acceso multiusuario, seguimiento y validación de acciones de mitigación y herramientas de geovisualización mediante mapa interactivo y mapa de calor. La solución fue validada mediante once pruebas funcionales controladas y una evaluación exploratoria con cinco participantes seleccionados mediante una muestra de conveniencia. Las pruebas funcionales presentaron el comportamiento esperado, incluyendo casos de acceso, autorización y ausencia de reportes. La evaluación con usuarios mostró valoraciones favorables en las dimensiones de facilidad de uso y utilidad percibidas dentro del contexto evaluado, aunque se identificaron dificultades en la localización del mapa, el acceso a reportes desde los marcadores y la interpretación del mapa de calor. En conjunto, los resultados muestran la factibilidad de complementar el análisis preventivo individual existente en PyroPrev con mecanismos de participación comunitaria y visualización territorial, manteniendo delimitado su carácter preventivo y orientativo.

Palabras Clave: Incendios urbano-forestales, prevención, inteligencia artificial, participación ciudadana, geovisualización.

1. Introducción

1.1 Contexto

Los incendios forestales representan una amenaza relevante para comunidades, ecosistemas e infraestructura, especialmente en zonas de interfaz urbano-forestal, donde áreas habitadas se encuentran próximas a vegetación combustible. En estos territorios, la exposición de personas, viviendas e infraestructura hace especialmente relevante la adopción de medidas preventivas antes de una emergencia.

En Chile, esta problemática adquiere especial importancia debido a la frecuencia e impacto de los incendios forestales. El incendio Complejo Las Tablas–Reserva Nacional Lago Peñuelas, ocurrido en febrero de 2024, afectó extensamente zonas de interfaz urbano-forestal de la Región de Valparaíso y provocó graves pérdidas civiles y materiales [1]. Asimismo, CONAF señala que gran parte de los incendios forestales del país se relaciona con causas antrópicas [2], reforzando la importancia de que las comunidades puedan reconocer condiciones de riesgo y adoptar medidas preventivas en su entorno.

1.2 Antecedentes de solución inicial: PyroPrev

PyroPrev fue desarrollado inicialmente como un proyecto grupal en el contexto de la Feria de Software de la Universidad Técnica Federico Santa María. La aplicación fue concebida como una herramienta de apoyo a la



prevención de propagación de incendios forestales, utilizando análisis de imágenes mediante inteligencia artificial para identificar factores de riesgo presentes en el entorno habitacional y entregar información comprensible a usuarios no especializados.

La primera versión del producto se enfocó en el análisis individual: el usuario podía capturar o cargar fotografías del entorno, solicitar un análisis asistido por inteligencia artificial y obtener factores de riesgo junto con recomendaciones de mitigación. Sin embargo, sus resultados permanecían asociados al usuario que realizaba el análisis, sin mecanismos para generar, compartir o visualizar territorialmente información preventiva comunitaria. Esta limitación motiva la incorporación de una dimensión colaborativa y georreferenciada en la nueva versión.

1.3 Delimitación del aporte de esta memoria

El desarrollo original de PyroPrev fue realizado como un proyecto grupal en el contexto de Feria de Software. Antes del presente trabajo, el producto ya contaba con una aplicación móvil Android, un backend, mecanismos de autenticación, análisis de imágenes mediante inteligencia artificial, identificación y clasificación de factores de riesgo, generación de recomendaciones preventivas e historial de análisis individuales. Estas capacidades constituyen la base tecnológica reutilizada en esta memoria.

El aporte individual de este trabajo consistió en el diseño e implementación de una extensión comunitaria que incorpora un flujo independiente para generar y publicar reportes georreferenciados, persistencia y consulta compartida de información, seguimiento y validación colaborativa de acciones de mitigación y herramientas de geovisualización mediante marcadores y mapa de calor. Asimismo, se desarrolló la validación de estas funcionalidades mediante pruebas controladas y una evaluación exploratoria con usuarios.

1.4 Motivación

La motivación de este trabajo es extender PyroPrev desde un enfoque individual hacia un sistema que permita aprovechar comunitariamente información preventiva. La posibilidad de publicar y consultar reportes georreferenciados permite reunir observaciones generadas por distintos usuarios y visualizar territorialmente su distribución, incorporando una dimensión colectiva que no se encontraba disponible en la versión inicial.

Desde una perspectiva ingenieril, esta evolución requiere integrar las capacidades preexistentes de análisis visual asistido por inteligencia artificial con nuevos mecanismos de persistencia compartida, georreferenciación, acceso multiusuario, seguimiento colaborativo y geovisualización. El desafío consiste, por tanto, en articular estos componentes dentro de una extensión coherente con la arquitectura existente de PyroPrev.

1.5 Definición inicial del problema

La versión inicial de PyroPrev permite realizar análisis preventivos individuales, pero sus resultados permanecen asociados al usuario que los genera. En consecuencia, no dispone de mecanismos específicos para registrar, publicar, consultar y dar seguimiento de forma comunitaria a información preventiva georreferenciada.

El desafío abordado en esta memoria consiste en extender PyroPrev mediante mecanismos colaborativos que faciliten la generación, consulta, seguimiento y geovisualización de reportes comunitarios. Su propósito es apoyar el intercambio de información preventiva y la concientización a nivel territorial, sin pretender demostrar una reducción directa de la ocurrencia, propagación o impacto de los incendios forestales.

1.6 Propuesta de solución

La solución propuesta consiste en incorporar a PyroPrev un flujo comunitario independiente para generar y publicar nuevos reportes georreferenciados, consultarlos mediante una vista compartida y representarlos territorialmente mediante marcadores y un mapa de calor. Además, se incorpora un mecanismo colaborativo de seguimiento de acciones de mitigación, en el cual otros usuarios pueden informar intervenciones realizadas y el autor del reporte conserva la responsabilidad de aprobarlas o rechazarlas.

La extensión reutiliza las capacidades existentes de análisis preventivo y las integra con mecanismos de persistencia compartida, acceso multiusuario y geovisualización. De esta manera, el análisis individual original se mantiene separado del nuevo componente comunitario.

1.7 Objetivos

El objetivo general de esta memoria es implementar un sistema colaborativo orientado a apoyar la prevención de propagación de incendios urbano-forestales basado en inteligencia artificial y participación ciudadana, que complemente el análisis automático de factores de riesgo existente en PyroPrev con mecanismos de colaboración y geovisualización comunitaria, con el fin de facilitar el registro, intercambio, seguimiento y visualización territorial de información preventiva.

Para cumplir este objetivo, se consideran los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar la arquitectura del sistema colaborativo, integrando el análisis automático de imágenes existente en PyroPrev con la gestión de reportes georreferenciados, datos geoespaciales y acceso multiusuario.
2. Implementar mecanismos de participación comunitaria para la generación y publicación de reportes georreferenciados de riesgo, incorporando su visualización mediante un mapa interactivo y un mapa de calor, junto con un sistema colaborativo de seguimiento y validación de acciones de mitigación.
3. Evaluar el funcionamiento de las funcionalidades colaborativas implementadas mediante pruebas controladas y realizar una evaluación exploratoria con usuarios que considere la ejecución de tareas, la facilidad de uso percibida, la comprensión y la utilidad percibida de los mecanismos de participación comunitaria y geovisualización.

1.8 Metodología de trabajo y validación

La metodología corresponde a un enfoque ingenieril aplicado sobre un producto de software existente. A partir del análisis de PyroPrev y de las limitaciones de su enfoque individual, se diseñaron e implementaron nuevos componentes para soportar reportes comunitarios georreferenciados, persistencia compartida, acceso multiusuario, seguimiento colaborativo y geovisualización, integrándolos con las capacidades preexistentes de análisis y autenticación.

La validación se desarrolló en dos etapas. Primero, se ejecutaron pruebas funcionales controladas para verificar los principales flujos, controles de acceso y mecanismos de geovisualización. Posteriormente, se realizó una evaluación exploratoria con usuarios mediante tareas representativas y un cuestionario propio destinado a recoger apreciaciones sobre facilidad de uso percibida, comprensión y utilidad percibida.

1.9 Organización del Informe

El informe se organiza en ocho capítulos. Tras la introducción, el Capítulo 2 desarrolla el problema abordado y el Capítulo 3 presenta el marco teórico y estado del arte. Los Capítulos 4 y 5 describen, respectivamente, el diseño de la solución y su implementación. El Capítulo 6 presenta la metodología de validación, mientras que el Capítulo 7 expone y discute sus resultados. Finalmente, el Capítulo 8 presenta las conclusiones, limitaciones y líneas de trabajo futuro.



2. Definición del Problema

Los incendios forestales constituyen una amenaza relevante para Chile, especialmente en zonas de interfaz urbano-forestal, donde espacios habitados se encuentran próximos a vegetación combustible. Durante la temporada 2023-2024, CONAF registró 5.846 incendios y 71.923 hectáreas afectadas al 21 de abril de 2024 [1], mientras que sus registros históricos muestran que se trata de un fenómeno recurrente a nivel nacional [3]. Además, CONAF señala que el 99,7 % de los incendios forestales en Chile tiene origen humano [2], reforzando la importancia de las acciones preventivas.

En este contexto, los residentes pueden contribuir mediante la identificación y mitigación de factores de riesgo presentes en su entorno. Sin embargo, además de las dificultades para reconocer estas condiciones, existe una limitación cuando la información preventiva permanece aislada y no puede registrarse, compartirse o aprovecharse comunitariamente. Esta última dimensión constituye el foco del problema abordado en esta memoria.

2.1 Problema Central

El problema central abordado corresponde a la dificultad para registrar, compartir, dar seguimiento y visualizar territorialmente información preventiva sobre factores de riesgo presentes en zonas urbano-forestales mediante mecanismos digitales accesibles y colaborativos.

En PyroPrev, esta problemática se manifiesta en que la versión inicial permite identificar factores de riesgo y generar recomendaciones, pero mantiene los análisis dentro del ámbito personal. En consecuencia, no dispone de mecanismos para generar reportes comunitarios georreferenciados, consultarlos entre distintos usuarios o realizar un seguimiento colaborativo de sus acciones de mitigación. La extensión desarrollada busca abordar esta brecha mediante un flujo comunitario independiente, acceso multiusuario y herramientas de geovisualización.

2.2 Causas del Problema

Se identifican tres condiciones principales asociadas al problema: barreras de participación y coordinación comunitaria, dificultades para comprender y compartir información preventiva y dispersión de la información disponible.

2.2.1 Baja Participación Ciudadana en la Prevención

Una primera causa corresponde a las barreras de participación y coordinación ciudadana en actividades preventivas. En un estudio realizado con habitantes de comunidades de interfaz urbano-forestal de Cerro Los Placeres, Valparaíso, Sapiains et al. identificaron baja participación y debilidad en las interacciones comunitarias entre los factores relevantes para desarrollar planes de prevención [4]. En este contexto, la ausencia de mecanismos simples para registrar y compartir observaciones preventivas puede limitar el aprovechamiento colectivo de la información identificada por los propios residentes.

2.2.2 Dificultades para Comprender y Compartir Información Preventiva

Una segunda causa corresponde a las dificultades para reconocer factores de riesgo, comprender las medidas preventivas disponibles y comunicar esta información. Oliveira et al., a partir de 282 cuestionarios aplicados a residentes de zonas afectadas por incendios en Portugal, identificaron dificultades en la comprensión de conceptos asociados al riesgo de incendios y un conocimiento limitado sobre instrumentos y medidas vinculadas con su mitigación y autoprotección. Los autores destacan además la necesidad de adaptar la comunicación y educación preventiva a las características de las comunidades expuestas [5].

La necesidad de compartir estas observaciones también ha sido abordada mediante mecanismos participativos. En talleres de cartografía desarrollados con comunidades expuestas a incendios en Tasmania, Haworth et al. observaron que la elaboración compartida de mapas favorecía el intercambio y consulta de conocimiento local [6]. En PyroPrev, la versión inicial facilita el análisis individual, pero no permite que sus resultados sean compartidos y utilizados comunitariamente.

2.2.3 Dispersión de Información Preventiva

Una tercera causa corresponde a la dispersión entre antecedentes técnicos disponibles y observaciones locales generadas por los propios residentes. Cuando estas últimas no se documentan o comparten, resulta difícil relacionarlas territorialmente y aprovecharlas junto con otras fuentes de información preventiva.

Partidário et al. evidenciaron el valor de integrar conocimiento local mediante talleres de cartografía participativa en Monchique, Portugal, donde se recopilaban y georreferenciaban observaciones sobre riesgos, vulnerabilidades y medidas preventivas para complementar registros técnicos existentes [7]. En PyroPrev, esta dispersión se manifiesta específicamente en el aislamiento de los análisis individuales; la extensión desarrollada aborda esta limitación reuniendo reportes comunitarios georreferenciados, sin incorporar directamente bases de datos institucionales.

2.3 Efectos del Problema

2.3.1 Conocimiento Compartido Limitado de las Condiciones del Entorno

Cuando las observaciones locales permanecen aisladas, los residentes pueden desconocer condiciones identificadas por otros usuarios, dificultando el aprovechamiento colectivo de información preventiva. En PyroPrev, esta limitación se manifiesta en que los análisis de la versión inicial permanecen asociados exclusivamente a cada usuario, sin un espacio compartido para su consulta.

2.3.2 Dificultades de Coordinación y Seguimiento de Medidas Preventivas

La ausencia de información compartida también dificulta coordinar y dar seguimiento a las medidas preventivas, ya que los usuarios no pueden conocer qué intervenciones han sido informadas o cuáles continúan pendientes. Aunque la versión inicial de PyroPrev genera recomendaciones individuales, no permite que distintos usuarios participen en el seguimiento y validación de acciones asociadas a un reporte común.

2.3.3 Visibilidad Territorial Limitada de las Condiciones Reportadas

Cuando las observaciones no pueden relacionarse mediante su ubicación geográfica, resulta difícil reconocer su distribución espacial o identificar sectores donde se concentra una mayor cantidad de registros. La versión inicial de PyroPrev no permite representar conjuntamente los análisis de distintos usuarios, por lo que carece de una perspectiva territorial compartida de la información preventiva.

2.4 Árbol del Problema

La Figura 1 sintetiza las relaciones entre las causas, el problema central y sus principales efectos. En su base se representan las barreras de participación y coordinación, las dificultades para comprender y compartir información preventiva y su dispersión; en el centro, la dificultad para registrar, compartir, dar seguimiento y visualizar territorialmente esta información mediante mecanismos accesibles y colaborativos; y como efectos,

la limitación del conocimiento compartido, las dificultades de seguimiento y la escasa visibilidad territorial de las condiciones reportadas.

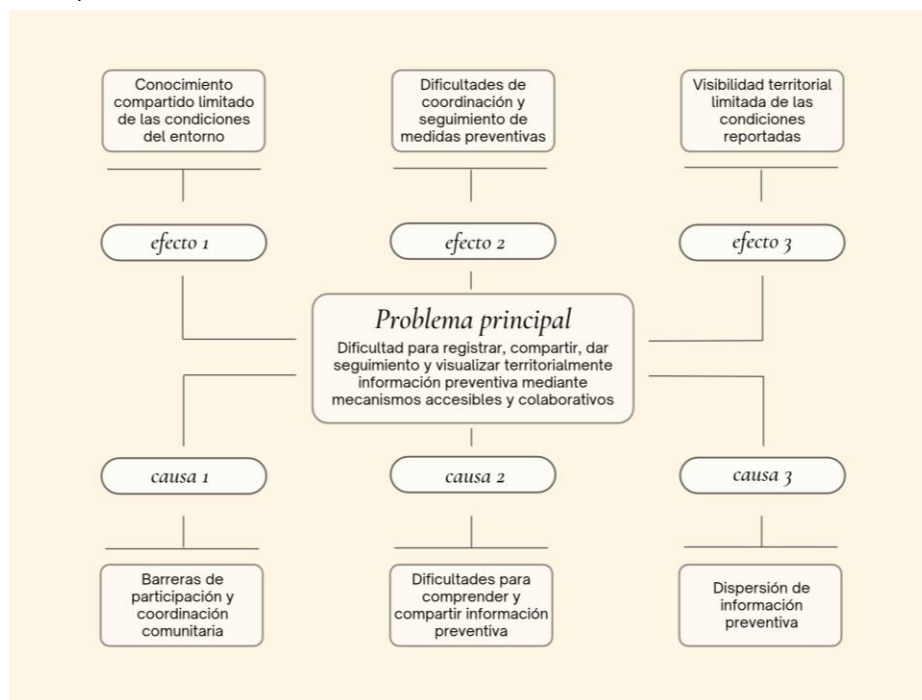


Figura 1. Árbol del Problema

Fuente: Elaboración propia

2.5 Justificación como Problema Complejo de Ingeniería

El problema abordado puede considerarse complejo desde la ingeniería porque requiere integrar múltiples componentes técnicos y sociales dentro de una solución informática. Acredita CI señala que estos problemas pueden requerir conocimiento profundo y especializado, involucrar aspectos técnicos y no técnicos, carecer de soluciones obvias y exigir la articulación de múltiples componentes o subproblemas [8]. En este caso, la solución combina desarrollo móvil, inteligencia artificial preexistente, persistencia compartida, datos geoespaciales, acceso multiusuario, interacción colaborativa, geovisualización y consideraciones de privacidad.

Además, el sistema opera con información generada por usuarios y debe presentar resultados comprensibles sin inducir interpretaciones incorrectas. Por ello, el desafío no consiste únicamente en implementar nuevas funcionalidades, sino en integrar las capacidades existentes de PyroPrev con mecanismos comunitarios y geoespaciales dentro de una solución coherente y accesible.

2.6 Delimitación del Problema

Esta memoria se limita al apoyo preventivo y la concientización comunitaria mediante herramientas digitales. PyroPrev no pretende reemplazar organismos oficiales de prevención, fiscalización, combate o gestión de emergencias, ni predecir incendios o emitir diagnósticos oficiales de riesgo territorial. Su alcance comprende la identificación preventiva de factores de riesgo y, en el componente comunitario, la generación, publicación, seguimiento y visualización de reportes georreferenciados, cuya información debe interpretarse como orientativa.

3. Marco Teórico y Estado del Arte

Este capítulo presenta los principales conceptos y antecedentes que sustentan la evolución de PyroPrev hacia un sistema colaborativo de prevención de incendios urbano-forestales. La revisión se organiza en torno a cuatro ejes: prevención y factores de riesgo en zonas de interfaz urbano-forestal, uso de inteligencia artificial para apoyar el análisis preventivo, participación ciudadana y geovisualización comunitaria, y soluciones o enfoques relacionados.

3.1 Prevención y Factores de Riesgo en Interfaz Urbano-Forestal

La prevención de incendios forestales comprende las acciones realizadas antes de la ocurrencia de una emergencia con el propósito de reducir su probabilidad de inicio o limitar sus consecuencias. CONAF distingue entre prevención, entendida como las actividades destinadas a evitar la generación de incendios por acción u omisión de las personas, y mitigación, asociada a intervenciones sobre la vegetación destinadas a impedir o retardar la propagación del fuego [2].

En zonas de interfaz urbano-forestal esta prevención también involucra el entorno inmediato de las viviendas. FireSmart utiliza el concepto de *Home Ignition Zone* para representar el área comprendida hasta 30 metros alrededor de una edificación, identificando diferentes zonas de prioridad y recomendando medidas como eliminar acumulaciones de vegetación seca y materiales combustibles, mantener adecuadamente árboles y arbustos, además de reducir la continuidad de los combustibles alrededor de la propiedad [9].

Estos antecedentes permiten establecer que una parte relevante de la prevención domiciliaria depende de condiciones físicamente observables. En este contexto, PyroPrev utiliza fotografías del entorno habitacional como entrada para apoyar la identificación de factores de riesgo y generar recomendaciones preventivas. El análisis realizado por la aplicación debe entenderse como un apoyo orientativo para el usuario y no como sustituto de una inspección especializada.

3.2 Inteligencia Artificial Aplicada al Análisis Preventivo

Los modelos de lenguaje multimodales extienden las capacidades de los modelos de lenguaje tradicionales mediante la incorporación de distintas modalidades de entrada, entre ellas imágenes y texto. Esto permite desarrollar tareas como comprensión visual, descripción de contenido y razonamiento basado en información gráfica. La literatura reciente identifica estas capacidades como una de las principales aplicaciones de los modelos multimodales modernos [10].

El uso de modelos de lenguaje también ha comenzado a estudiarse específicamente en dominios vinculados con incendios forestales. Epstein y Seielstad utilizaron un LLM para analizar información almacenada en el *Wildland Fire Decision Support System* de Estados Unidos, procesando registros correspondientes a 6.630 grandes incendios para identificar elementos relacionados con barreras a la propagación del fuego. El modelo fue posteriormente contrastado con interpretación humana, mostrando la posibilidad de utilizar LLM para extraer y estructurar información relevante en un dominio especializado [11].

En PyroPrev, estas capacidades se emplean para interpretar fotografías proporcionadas por los usuarios e identificar factores de riesgo presentes en el entorno. Los resultados obtenidos son estructurados de forma comprensible e incluyen una clasificación general del nivel de riesgo, la cual también forma parte de los reportes generados desde el flujo comunitario. Tanto el análisis como esta clasificación poseen un carácter preventivo y orientativo.

El componente de inteligencia artificial utilizado para interpretar fotografías y generar análisis preventivos forma parte de la versión original de PyroPrev y constituye una capacidad preexistente reutilizada en este



trabajo. La contribución de la presente memoria no comprende el desarrollo o entrenamiento de un nuevo modelo de inteligencia artificial ni la evaluación de la precisión de sus resultados, sino su integración funcional en un flujo comunitario que permite generar y publicar reportes georreferenciados a partir de los análisis obtenidos.

3.3 Participación Ciudadana y Geovisualización Comunitaria

La prevención de incendios en zonas habitadas posee también una dimensión comunitaria. En Chile, CONAF ejecuta desde 2015 el programa Comunidades Preparadas frente a los Incendios Forestales, orientado especialmente a sectores rurales y de interfaz urbano-forestal. El programa busca que las comunidades identifiquen vulnerabilidades, desarrollen planes preventivos y adopten un rol activo en la autoprotección de su entorno [12].

Esta aproximación también se ha aplicado en la Región de Valparaíso. En 2024, CONAF informó un trabajo conjunto con comunidades de las regiones de Valparaíso y Ñuble orientado a fortalecer las capacidades de coordinación entre gobiernos regionales, municipios y vecinos para reducir el riesgo de incendios forestales en zonas de interfaz urbano-forestal [13].

Desde una perspectiva tecnológica, esta participación puede vincularse con el concepto de información geográfica voluntaria, en el cual los ciudadanos actúan como generadores de información espacial mediante herramientas digitales [14]. En PyroPrev, este principio se materializa al incorporar un flujo comunitario que aprovecha las capacidades de análisis previamente existentes en la aplicación para generar reportes georreferenciados visualizables por otros usuarios.

La participación propuesta no se limita a la publicación y consulta de información. Los usuarios también pueden colaborar en el seguimiento de las acciones de mitigación asociadas a un reporte comunitario. Para mantener la trazabilidad de esta información, el cumplimiento de una acción requiere posteriormente la validación del usuario que publicó el reporte, evitando que terceros puedan confirmar unilateralmente que un riesgo ha sido mitigado.

Esta participación adquiere además una dimensión territorial mediante la representación geográfica de los reportes. CONAF emplea información georreferenciada en su Análisis Nacional de Riesgo de Incendios Forestales para identificar áreas críticas y apoyar estrategias de prevención y mitigación [15]. En PyroPrev, el mapa y el mapa de calor cumplen una función distinta: representar la ubicación y concentración de reportes comunitarios aportados por los usuarios. Por lo tanto, estas visualizaciones no constituyen mapas oficiales de riesgo ni predicciones de incendios, sino una representación comunitaria de la información preventiva registrada en la aplicación.

3.4 Soluciones y Enfoques Relacionados

Existen distintas iniciativas que abordan parcialmente las dimensiones consideradas en PyroPrev. Entre los antecedentes orientados a la prevención y gestión de incendios se encuentran FireSmart, que proporciona recomendaciones para reducir factores de riesgo en el entorno domiciliario [9]; Comunidades Preparadas de CONAF, enfocado en la organización y capacitación comunitaria [12]; y el Análisis Nacional de Riesgo de CONAF, que utiliza información georreferenciada para identificar áreas críticas [15]. En el ámbito de la inteligencia artificial, Epstein y Seielstad estudiaron el uso de modelos de lenguaje para analizar registros de incendios forestales y extraer información especializada [11].

Desde una perspectiva tecnológica, también se identifican experiencias que incorporan mecanismos de recopilación y visualización de información territorial. Partidário et al. utilizaron cartografía participativa para reunir observaciones locales sobre riesgos y medidas preventivas [7], mientras que FIRE-RES Geo-Catch permite capturar fotografías georreferenciadas de vegetación y compartirlas mediante un visor geográfico

[16]. Por su parte, People&Fire incorpora un sistema webGIS para simular y visualizar escenarios de riesgo [17], y WildfireGO combina reportes ciudadanos, clasificación de imágenes mediante inteligencia artificial e información satelital para apoyar la detección y verificación de incendios [18].

La Tabla 1 resume las características de estas iniciativas y su relación con PyroPrev, considerando sus mecanismos de análisis, participación ciudadana, geovisualización y seguimiento de acciones preventivas.

Tabla 1. Comparación de soluciones y enfoques relacionados

Fuente: Elaboración propia

Iniciativa o enfoque	Alcance y mecanismo	Inteligencia artificial	Participación y geovisualización	Seguimiento de mitigaciones
FireSmart [9]	Prevención domiciliaria mediante guías y recomendaciones	No	Orientación preventiva comunitaria, sin mapa de reportes	Recomienda medidas, sin seguimiento digital
Comunidades Preparadas CONAF [12]	Capacitación y elaboración de planes preventivos	No	Organización y participación comunitaria	Planificación preventiva, sin validación mediante reportes
Análisis Nacional de Riesgo CONAF [15]	Evaluación territorial del riesgo	No	Mapas basados en información georreferenciada institucional	No es su propósito
Epstein y Seielstad [11]	Análisis de registros especializados sobre incendios	LLM aplicado a registros textuales	No contempla aportes ciudadanos ni mapas de reportes	No es su propósito
Cartografía participativa de Monchique [7]	Identificación comunitaria de riesgos y medidas	No	Observaciones locales georreferenciadas mediante cartografía participativa	Identificación de medidas, sin validación digital
FIRE-RES Geo-Catch [16]	Recopilación de fotografías de combustibles forestales	Análisis automatizado considerado para etapas posteriores	Fotografías georreferenciadas y visor webGIS	No documentado
People&Fire [17]	Evaluación y simulación de escenarios de riesgo	Modelos de riesgo, sin IA visual	Visualización territorial mediante webGIS	No documentado
WildfireGO [18]	Detección y verificación de incendios	Clasificación de imágenes	Reportes ciudadanos, datos satelitales y mapa interactivo	Validación de eventos, no de mitigaciones
PyroPrev	Análisis preventivo y reportes comunitarios	Gemini, capacidad existente reutilizada	Reportes georreferenciados, marcadores y mapa de calor	Registro de acciones y validación por el autor

Estos antecedentes muestran que existen enfoques para la prevención domiciliaria, participación comunitaria, análisis territorial y aplicación de inteligencia artificial, además de sistemas que integran algunas de estas capacidades tecnológicas. Sin embargo, cada iniciativa responde a propósitos y escalas diferentes. La nueva versión de PyroPrev combina el análisis visual preventivo existente con la generación de reportes



comunitarios georreferenciados, su consulta compartida y mecanismos de seguimiento y validación de acciones de mitigación. Su contribución se sitúa en la integración de estas funcionalidades dentro de una aplicación orientada a usuarios no especializados, sin reemplazar las herramientas institucionales ni constituir un sistema de predicción o gestión de emergencias.

4. Solución Propuesta

La solución propuesta extiende PyroPrev mediante un flujo comunitario independiente del análisis individual existente. La nueva versión incorpora generación y publicación de reportes georreferenciados, acceso multiusuario, seguimiento colaborativo de acciones de mitigación y herramientas de geovisualización, reutilizando las capacidades preexistentes de análisis preventivo mediante inteligencia artificial.

4.1 Evolución de PyroPrev y Alcance de la Solución

La versión inicial de PyroPrev estaba orientada al análisis preventivo individual mediante fotografías, identificación de factores de riesgo, clasificación general y generación de recomendaciones. La nueva versión mantiene estas capacidades e incorpora, de forma paralela, un flujo comunitario desde el cual se generan nuevos análisis destinados específicamente a su publicación.

Los reportes comunitarios incorporan información geográfica, pueden ser consultados por otros usuarios autenticados y permiten el seguimiento compartido de sus acciones de mitigación. La validación definitiva de una acción permanece bajo responsabilidad del autor del reporte. La Tabla 2 resume las principales diferencias entre ambas versiones.

Tabla 2. Evolución funcional de PyroPrev

Fuente: Elaboración propia

Característica	Versión inicial	Nueva versión
Análisis visual asistido por IA	Sí	Sí
Identificación de factores de riesgo	Sí	Sí
Clasificación del nivel de riesgo	Sí	Sí
Recomendaciones y plan de acción	Sí	Sí
Publicación de reportes comunitarios	No	Sí
Reportes comunitarios georreferenciados	No	Sí
Acceso multiusuario a reportes	No	Sí
Seguimiento comunitario de acciones	No	Sí
Validación de acciones por autor del reporte	No	Sí
Mapa interactivo	No	Sí
Mapa de calor	No	Sí

4.2 Requerimientos del Sistema

A partir de las limitaciones de la versión inicial de PyroPrev y de las funcionalidades contempladas en su extensión colaborativa, se identifican los requerimientos funcionales y no funcionales de la solución. Los primeros describen los mecanismos necesarios para generar, consultar y gestionar información preventiva compartida, mientras que los segundos establecen criterios relacionados con la privacidad, autorización, facilidad de uso e integridad de los datos. La Tabla 3 presenta estos requerimientos, vinculando los funcionales con los casos de prueba utilizados posteriormente en la validación.

Tabla 3. Requerimientos de la nueva versión de PyroPrev

Fuente: Elaboración propia

ID	Requerimiento	Verificación
RF-01	Permitir la generación y publicación de reportes comunitarios georreferenciados.	PF-01
RF-02	Permitir que distintos usuarios consulten los reportes publicados.	PF-02
RF-03	Permitir que terceros informen acciones de mitigación realizadas, manteniéndolas pendientes de validación.	PF-03
RF-04	Permitir al autor del reporte aprobar acciones informadas por otros usuarios.	PF-04
RF-05	Permitir al autor rechazar acciones informadas sin considerarlas mitigadas.	PF-05
RF-06	Restringir la visibilidad de solicitudes pendientes y compartir el estado actualizado tras su validación.	PF-06
RF-07	Representar los reportes georreferenciados mediante marcadores en un mapa interactivo.	PF-07
RF-08	Representar la concentración espacial de reportes mediante un mapa de calor.	PF-08
RNF-01	Restringir la consulta de análisis personales a su propietario y el acceso a reportes comunitarios publicados a usuarios autenticados de la aplicación.	Inspección de implementación y prueba de acceso sin autenticación
RNF-02	Restringir al autor del reporte la aprobación o rechazo de propuestas de mitigación y el cierre definitivo del reporte.	Inspección del backend y prueba de autorización
RNF-03	Presentar estados de interfaz comprensibles ante disponibilidad de reportes, ausencia de datos, pérdida de autenticación y errores de comunicación.	Evaluación exploratoria
RNF-04	Mantener la persistencia y consistencia de los estados asociados a reportes y acciones de mitigación durante su consulta y actualización multiusuario.	PF-02, PF-04, PF-05 y PF-06

Los requerimientos no funcionales expresan criterios relevantes para la solución, aunque su inclusión no implica que todos hayan sido evaluados exhaustivamente mediante las pruebas realizadas.

4.3 Diseño General y Arquitectura de la Solución

La solución mantiene separados los flujos individual y comunitario. En el primero, los análisis permanecen asociados al historial personal del usuario. En el segundo, el usuario inicia un nuevo análisis desde la sección Comunidad, destinado desde su origen a convertirse en un reporte georreferenciado y compartido.

Ambos flujos reutilizan las capacidades preventivas existentes de PyroPrev, pero el comunitario incorpora publicación, acceso multiusuario, seguimiento colaborativo y geovisualización. La Figura 2 sintetiza esta relación funcional.

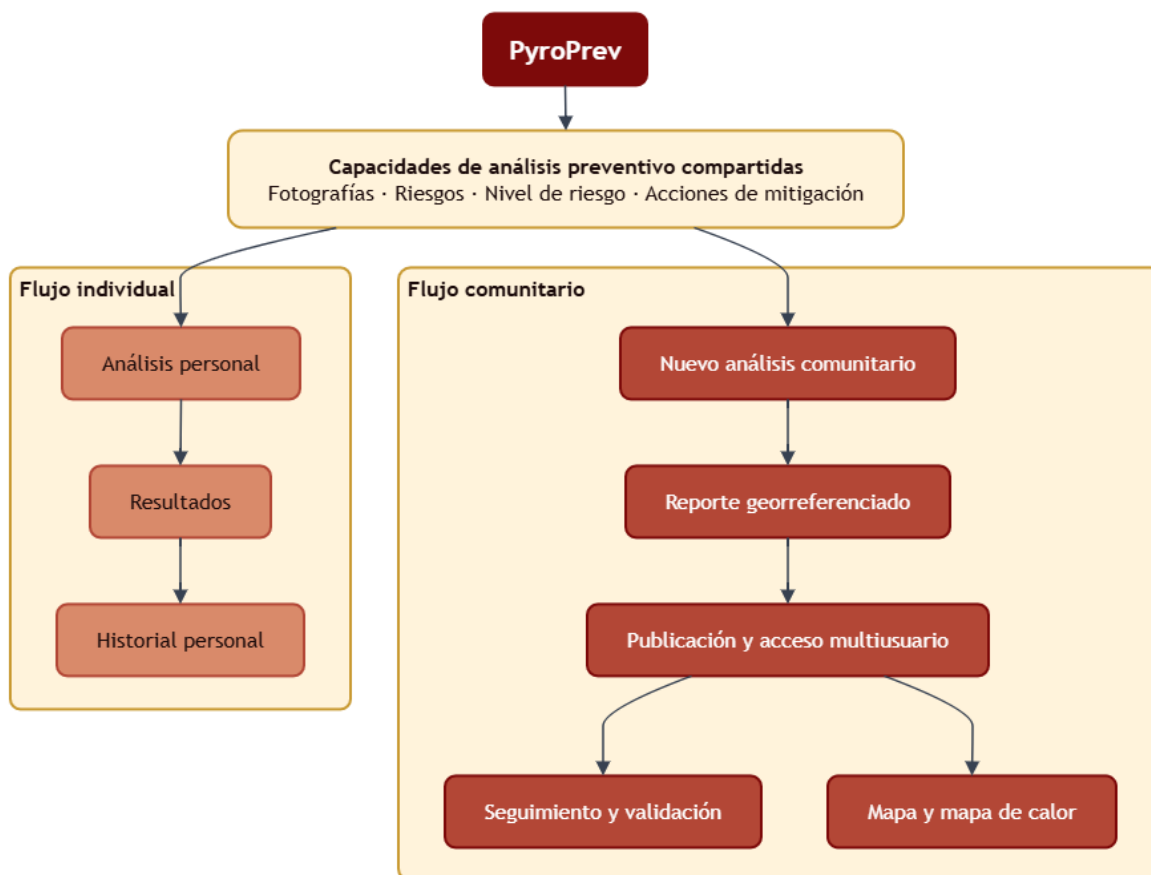


Figura 2. Flujos funcionales individual y comunitario de PyroPrev

Fuente: Elaboración propia

Técnicamente, PyroPrev mantiene una arquitectura cliente-servidor compuesta por una aplicación Android desarrollada en Kotlin y un backend Python/Flask. El backend concentra la lógica de negocio, autenticación, autorización y gestión de reportes; SQLite y SQLAlchemy almacenan la información estructurada; Cloudflare R2 almacena las imágenes; y la integración preexistente con Google Gemini realiza el análisis preventivo. La aplicación incorpora Google Maps SDK y android-maps-utils para representar marcadores y el mapa de calor a partir de las coordenadas entregadas por el backend. La Figura 3 resume estas relaciones.

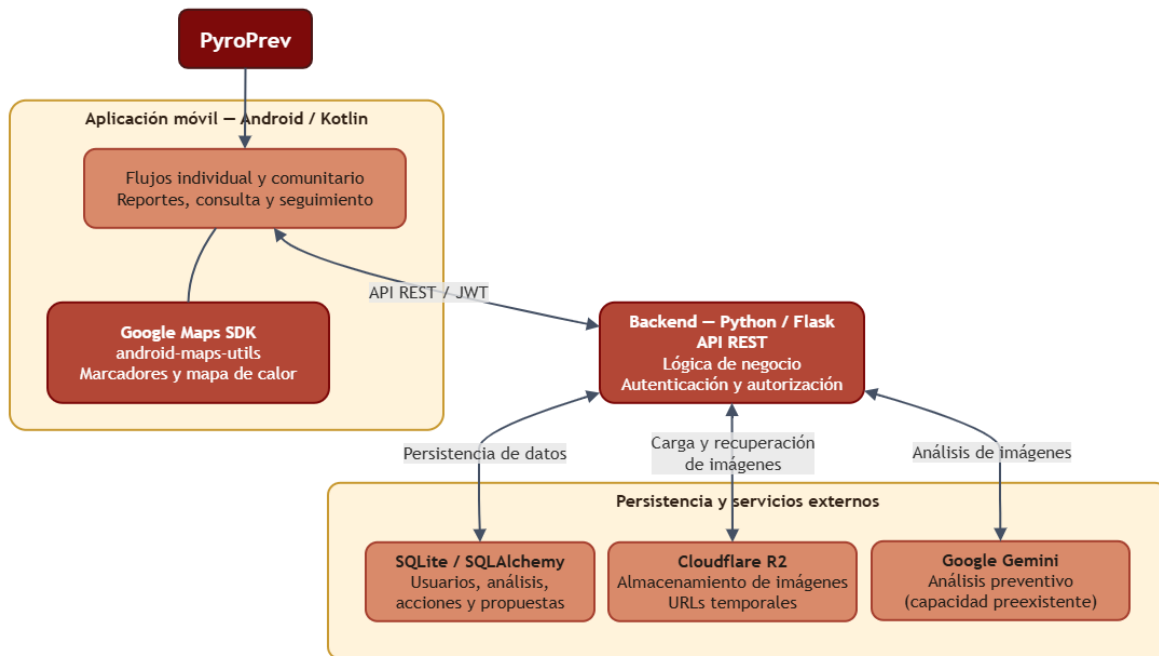


Figura 3. Arquitectura técnica de la nueva versión de PyroPrev

Fuente: Elaboración propia

Las funcionalidades comunitarias requieren autenticación mediante JWT. El backend valida además la autorización de las operaciones sensibles, como la resolución de propuestas de mitigación y el cierre de reportes, antes de modificar la información persistida. Por tanto, estos controles no dependen únicamente de las restricciones de la interfaz móvil.

4.4 Generación y Publicación de Reportes Georreferenciados

Los reportes comunitarios se generan mediante un flujo específico dentro de la sección Comunidad. El usuario inicia allí un nuevo análisis que reutiliza las capacidades preventivas de PyroPrev para identificar factores de riesgo y generar acciones de mitigación, pero cuyo resultado queda destinado a publicación comunitaria y no al historial personal.

Cada reporte incorpora información geográfica y, una vez publicado, puede ser consultado por otros usuarios autenticados y utilizado por los mecanismos de seguimiento y geovisualización. La ubicación registrada permite representar territorialmente los reportes, aunque su tratamiento implica las consideraciones de privacidad descritas en la Sección 4.6.

4.5 Participación Comunitaria, Seguimiento y Geovisualización

Los usuarios autenticados pueden consultar reportes comunitarios y participar en el seguimiento de sus acciones de mitigación. Un usuario puede informar que una medida fue realizada, pero su validación definitiva corresponde al autor del reporte, manteniendo la trazabilidad de los cambios.

Los reportes también pueden consultarse territorialmente mediante marcadores y un mapa de calor. Los marcadores representan ubicaciones individuales, mientras que el mapa de calor muestra únicamente la concentración espacial de reportes registrados en PyroPrev y no una estimación de riesgo o probabilidad de incendio.



De esta manera, el componente comunitario combina consulta compartida, seguimiento de acciones y geovisualización para aprovechar colectivamente la información preventiva generada por los usuarios.

La versión actual no incorpora mecanismos específicos de moderación, denuncia, detección de duplicados o caducidad automática. En consecuencia, los reportes corresponden a aportes de usuarios y no a información verificada por una entidad especializada, aspecto que constituye una oportunidad de evolución futura.

4.6 Consideraciones de Privacidad y Uso Responsable

Los reportes comunitarios se vinculan internamente al usuario que los genera, pero su vista compartida no expone el correo electrónico ni la identidad personal del autor. Los análisis personales permanecen restringidos a su propietario; los reportes comunitarios no publicados, a su creador; y los publicados pueden ser consultados por usuarios autenticados de PyroPrev. Por tanto, la publicación corresponde a visibilidad dentro de la comunidad autenticada y no a acceso anónimo desde Internet.

Las fotografías se almacenan en Cloudflare R2 y son recuperadas mediante URLs temporales generadas por el backend. Los reportes publicados incluyen además coordenadas geográficas exactas para su representación territorial. La versión actual no aplica anonimización espacial ni reducción de precisión, por lo que fotografías y ubicación pueden contener información sensible del entorno; este aspecto constituye una limitación de privacidad.

Finalmente, la información entregada por PyroPrev posee un carácter preventivo y orientativo. Los reportes, clasificaciones y visualizaciones no corresponden a diagnósticos oficiales ni reemplazan las indicaciones de organismos especializados.

5. Implementación

La implementación se realizó sobre la versión existente de PyroPrev, extendiendo la aplicación móvil y el backend para incorporar reportes comunitarios, persistencia y consulta compartida, seguimiento de mitigaciones y geovisualización. El desarrollo reutilizó las capacidades preexistentes de análisis preventivo y autenticación, manteniendo separados los flujos individual y comunitario.

5.1 Integración Tecnológica de la Nueva Versión

La nueva versión reutiliza la arquitectura y tecnologías de PyroPrev original, incorporando los componentes requeridos por el flujo comunitario. La Tabla 4 resume las principales tecnologías y su responsabilidad dentro de la extensión desarrollada.

Tabla 4. Componentes tecnológicos de la nueva versión de PyroPrev

Fuente: Elaboración propia

Componente	Tecnología principal	Rol en la nueva versión
Aplicación móvil	Android / Kotlin	Base existente extendida con el componente comunitario
Backend	Python / Flask	Base existente ampliada para gestionar reportes y colaboración multiusuario
Análisis preventivo	Google Gemini	Capacidad existente reutilizada en los análisis comunitarios

Componente	Tecnología principal	Rol en la nueva versión
Persistencia compartida	SQLite / SQLAlchemy y Cloudflare R2	Almacenamiento de reportes comunitarios, información asociada e imágenes
Geovisualización	Google Maps SDK / android-maps-utils	Incorporación de mapa, marcadores y mapa de calor

El backend Flask fue extendido para gestionar reportes compartidos, coordenadas geográficas, propuestas de mitigación y reglas de autorización, mientras que la aplicación Android incorporó las interfaces comunitarias y las herramientas de geovisualización mediante Google Maps SDK y android-maps-utils.

Durante la generación de un análisis, Android envía las imágenes al backend mediante solicitudes HTTP autenticadas con JWT. El servidor utiliza la integración preexistente con Google Gemini para obtener el análisis preventivo, persiste mediante SQLAlchemy la información estructurada y almacena las imágenes procesadas en Cloudflare R2. En el flujo comunitario, el análisis permanece inicialmente sin publicar hasta que su creador ejecuta explícitamente la acción de publicación.

Para la consulta comunitaria, el backend recupera los reportes publicados y genera URLs temporales para sus imágenes. Android recibe la información y las coordenadas asociadas, que utiliza para construir los marcadores y el mapa de calor. Así, el backend concentra procesamiento, persistencia y control de acceso, mientras que la aplicación móvil gestiona la interacción y representación geográfica.

5.2 Modelo de Datos del Componente Comunitario

La extensión reutiliza la entidad Analisis para representar tanto análisis individuales como reportes comunitarios, diferenciados mediante tipo_analisis y atributos asociados a publicación y georreferenciación. Cada análisis pertenece a un usuario y puede contener múltiples imágenes y acciones; los análisis personales pueden asociarse además a un perfil.

Las imágenes se representan mediante Imagen, almacenando en la base de datos la referencia object_key al archivo disponible en Cloudflare R2. Las acciones preventivas se representan mediante Accion, mientras que PropuestaMitigacion permite registrar intervenciones informadas por otros usuarios junto con su estado pendiente, aprobado o rechazado.

La resolución definitiva de una propuesta corresponde al autor del reporte, permitiendo mantener separada la acción original de las intervenciones posteriores y preservar su trazabilidad. La Figura 4 presenta las principales entidades y relaciones involucradas.

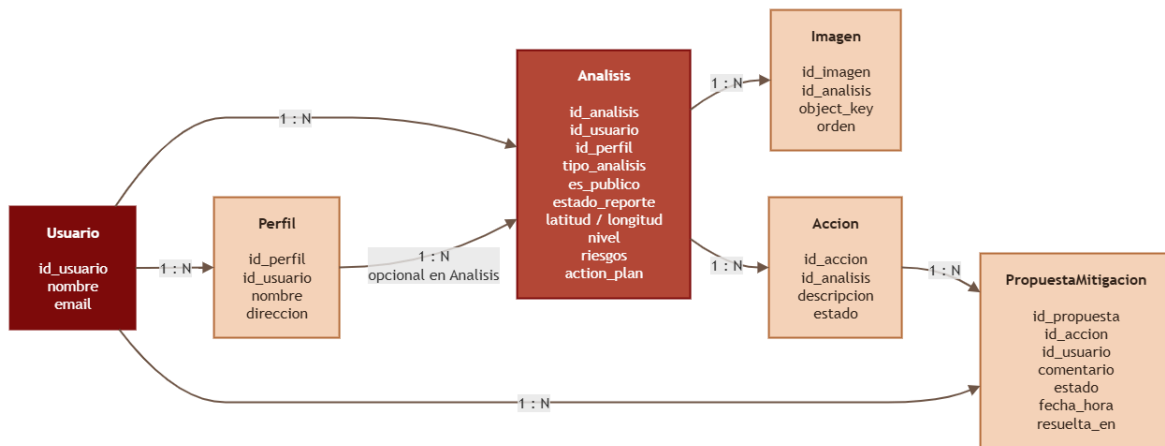


Figura 4. Modelo de datos simplificado de la nueva versión de PyroPrev

Fuente: Elaboración propia

5.3 Implementación del Componente Comunitario

La aplicación incorporó una sección Comunidad independiente del historial personal, desde la cual los usuarios pueden consultar reportes publicados o iniciar un nuevo análisis destinado específicamente a publicación. El flujo reutiliza el análisis preventivo existente y añade la información geográfica y los mecanismos necesarios para su almacenamiento y consulta compartida.

Una vez publicado, el reporte expone a los usuarios autenticados las fotografías, factores de riesgo, nivel general y acciones de mitigación asociadas. La Figura 5 muestra las principales etapas de este flujo en la aplicación.

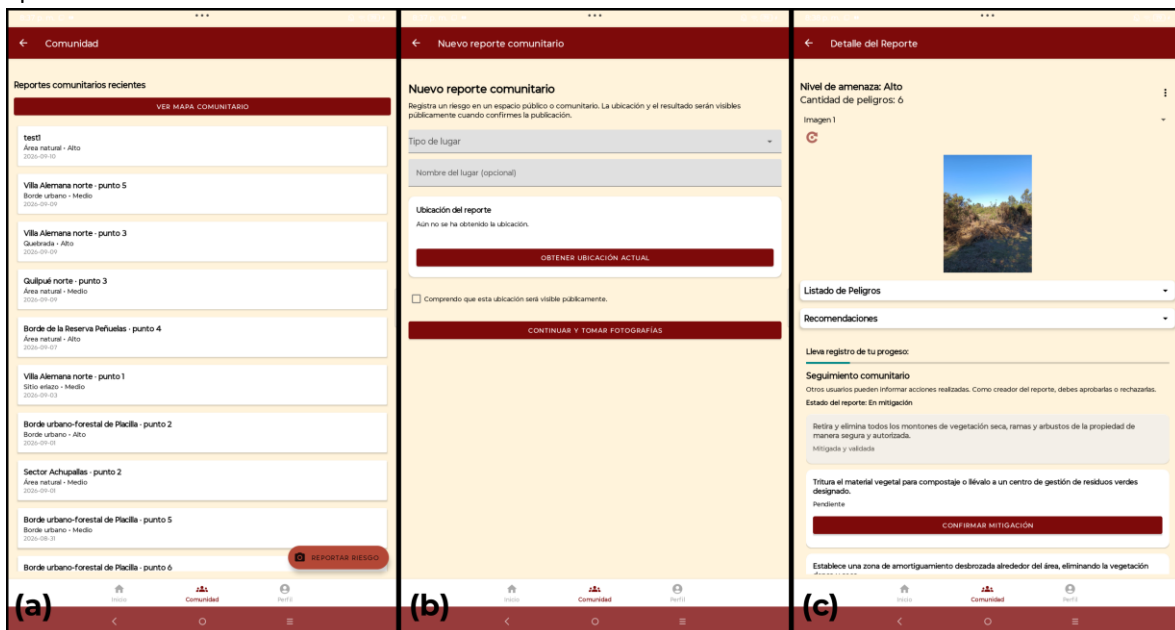


Figura 5. Flujo de generación y publicación de un reporte comunitario: (a) sección Comunidad; (b) realización del análisis comunitario; (c) reporte publicado

Fuente: Elaboración propia

5.4 Seguimiento Colaborativo de Acciones de Mitigación

El seguimiento colaborativo permite que un usuario informe la realización de una acción pendiente, generando una propuesta que permanece a la espera de resolución. La aprobación o rechazo definitivo corresponde al autor del reporte, evitando que un tercero modifique unilateralmente su estado.

Esta autorización se verifica en el backend mediante la identidad contenida en el JWT. Antes de resolver una propuesta, el servidor comprueba que el usuario autenticado sea el creador del análisis asociado y, si no lo es, rechaza la solicitud sin modificar el estado persistido. El cierre definitivo del reporte aplica igualmente una comprobación de propiedad y exige que todas sus acciones se encuentren validadas.

Una vez aprobada una propuesta, el estado actualizado queda disponible para los usuarios que consultan el reporte. La Figura 6 muestra las principales etapas de este proceso.

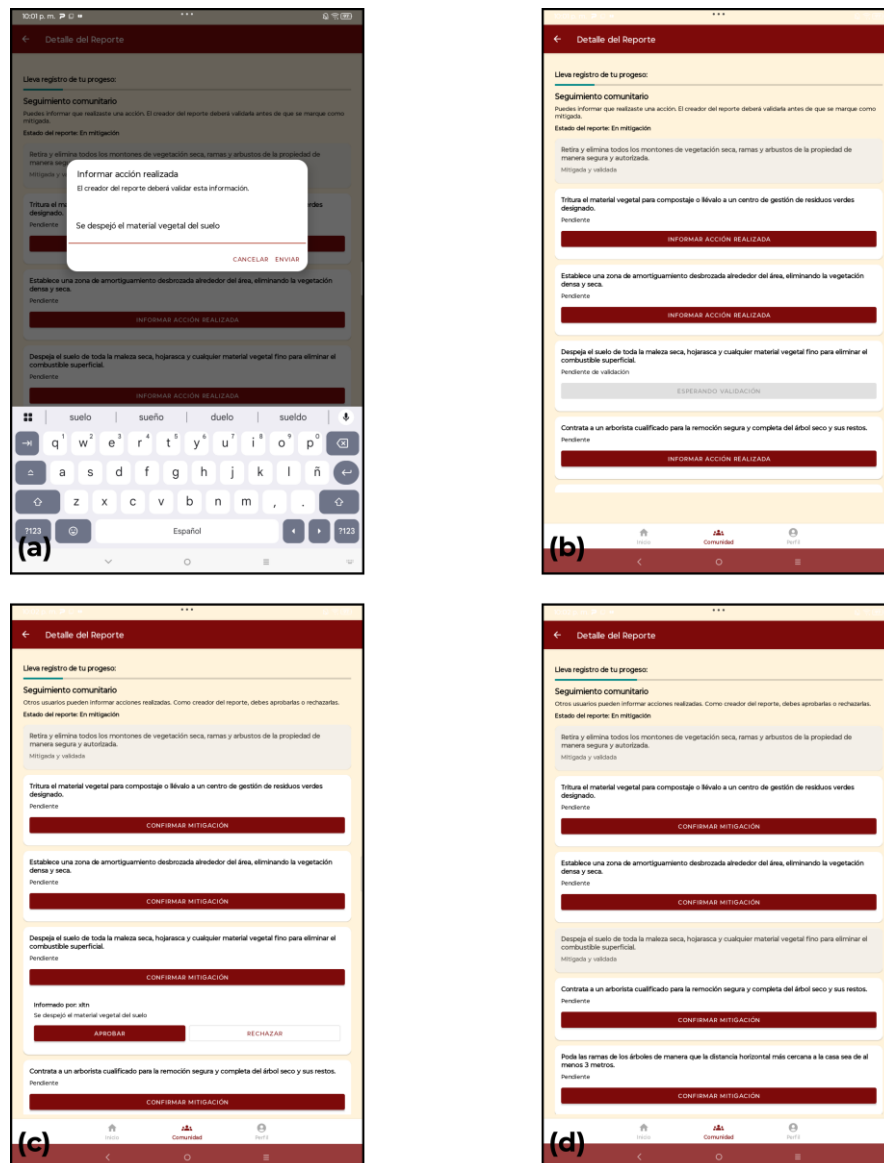


Figura 6. Seguimiento colaborativo de una acción de mitigación: (a) registro de una acción realizada por un usuario de la comunidad; (b) acción en espera de validación; (c) revisión de la mitigación por el autor del reporte; (d) acción mitigada y validada

Fuente: Elaboración propia

5.5 Geovisualización de Reportes Comunitarios

Los reportes publicados se representan geográficamente mediante marcadores construidos a partir de sus coordenadas. Desde esta vista, el usuario puede seleccionar un marcador y acceder posteriormente al reporte correspondiente.

La aplicación incorpora además un mapa de calor generado con las coordenadas disponibles mediante android-maps-utils. Su intensidad representa exclusivamente la concentración espacial de reportes y no una estimación de riesgo o probabilidad de incendio. La Figura 7 muestra ambas formas de visualización.

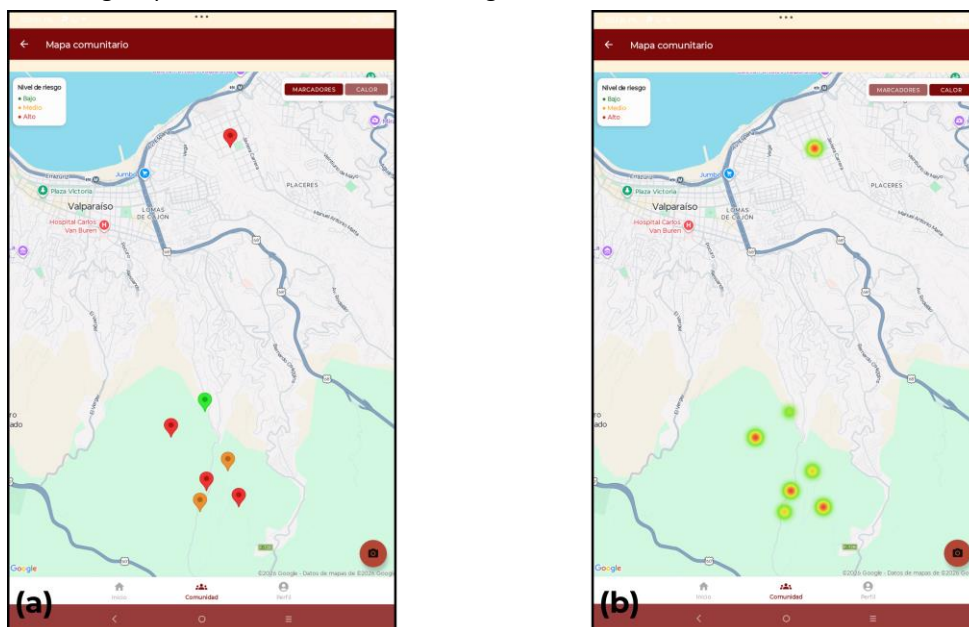


Figura 7. Geovisualización de reportes comunitarios en un sector de Valparaíso: (a) visualización mediante marcadores según nivel de riesgo; (b) mapa de calor correspondiente a la concentración espacial de reportes.

Fuente: Elaboración propia

6. Validación

La validación de la nueva versión de PyroPrev se estructuró en dos etapas: pruebas funcionales controladas para verificar los principales mecanismos implementados y una evaluación exploratoria con usuarios destinada a observar la ejecución de tareas y recoger apreciaciones sobre facilidad de uso percibida, comprensión y utilidad percibida.

6.1 Diseño de la Validación

La primera etapa consideró casos de prueba asociados a generación, publicación y consulta de reportes, seguimiento y validación de mitigaciones, controles de acceso y autorización y geovisualización. Para cada caso se definió previamente un resultado esperado y posteriormente se registró su cumplimiento bajo condiciones controladas.

La segunda etapa correspondió a una evaluación exploratoria con cinco usuarios, quienes realizaron un conjunto común de tareas. Se registró si cada tarea era completada sin ayuda, con ayuda o no completada y, posteriormente, se aplicó un cuestionario propio sobre facilidad de uso percibida, comprensión y utilidad percibida.

Los participantes fueron seleccionados mediante una muestra de conveniencia y presentaban distintos rangos etarios y niveles de familiaridad con aplicaciones móviles. Debido al tamaño reducido y al carácter exploratorio de la evaluación, los resultados se analizaron descriptivamente y no buscan representar estadísticamente a residentes de zonas de interfaz urbano-forestal ni estimar la aceptación de PyroPrev en dicha población.

6.2 Pruebas Funcionales

Los casos de prueba funcionales se presentan en la Tabla 5 y fueron ejecutados bajo condiciones controladas utilizando distintas cuentas y reportes preparados para verificar los flujos definidos.

Tabla 5. Casos de prueba funcionales de la nueva versión de PyroPrev

Fuente: Elaboración propia

ID	Caso de prueba	Resultado esperado
PF-01	Generación y publicación de un reporte comunitario	El análisis se completa y queda publicado como reporte dentro de la sección Comunidad
PF-02	Consulta multiusuario	Un reporte publicado puede ser consultado desde una cuenta diferente a la del autor
PF-03	Registro de una acción realizada	Un usuario distinto al autor puede informar una acción de mitigación y esta queda en espera de validación
PF-04	Aprobación de una mitigación	El autor puede aprobar la acción informada y esta queda registrada como mitigada y validada
PF-05	Rechazo de una mitigación	El autor puede rechazar una acción informada sin que esta quede registrada como mitigada
PF-06	Visibilidad y actualización del estado de mitigación	La solicitud pendiente mantiene visibilidad restringida hasta su validación por el autor, tras lo cual el estado actualizado queda disponible para todos los usuarios.
PF-07	Visualización mediante marcadores	Los reportes georreferenciados son representados en las ubicaciones correspondientes dentro del mapa
PF-08	Visualización mediante mapa de calor	Al utilizar un conjunto controlado de reportes con diferentes proximidades geográficas, se observa una mayor intensidad visual en las zonas con mayor concentración de reportes, independientemente de su nivel de riesgo.
PF-09	Consulta comunitaria sin autenticación	Una solicitud de información comunitaria sin un JWT válido es rechazada y no entrega información de los reportes.
PF-10	Resolución de propuesta por usuario no autorizado	Un usuario distinto del autor del reporte no puede aprobar ni rechazar una propuesta de mitigación y su intento no modifica el estado persistido.
PF-11	Consulta sin reportes comunitarios disponibles	Ante una consulta exitosa sin reportes, la vista Comunidad informa la ausencia de datos y el mapa se carga sin marcadores ni mapa de calor, mostrando el estado vacío correspondiente.

6.3 Evaluación Exploratoria con Usuarios

La evaluación exploratoria se realizó con cinco participantes seleccionados mediante una muestra de conveniencia, incorporando distintos rangos etarios y niveles de familiaridad con aplicaciones móviles. Su propósito fue observar la interacción con las funcionalidades comunitarias y obtener una primera apreciación sobre facilidad de uso percibida, comprensión y utilidad percibida.



No existe un tamaño muestral universal para pruebas de usabilidad, pues depende del tipo de evaluación, la complejidad del sistema y las características de sus usuarios [19]. Además, se ha advertido que la regla de cinco usuarios puede ser insuficiente para detectar problemas exhaustivamente [20]. Por ello, los resultados se interpretan únicamente como evidencia exploratoria y descriptiva, sin inferencias estadísticas ni generalización a una población mayor.

La muestra incluyó tres participantes de 18–29 años con familiaridad tecnológica declarada de 4 o 5 sobre 5, uno de 45–59 años con nivel 3 y uno de 60 años o más con nivel 3. Estas variables se utilizaron únicamente para describir la muestra y no como sustitutos del contexto de uso, ya que no se caracterizaron específicamente aspectos como residencia en zonas de interfaz urbano-forestal, experiencia previa con incendios o participación preventiva comunitaria.

Antes de comenzar, se informó a los participantes que la actividad formaba parte de la evaluación de esta memoria, que su participación era voluntaria y que se evaluaba la aplicación y no sus conocimientos. Todos realizaron las cuatro tareas presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Tareas definidas para la evaluación con usuarios

Fuente: Elaboración propia

ID	Tarea
T1	Ingresar a la sección Comunidad, consultar un reporte publicado e identificar su nivel de riesgo y una acción de mitigación pendiente.
T2	Informar como realizada una acción de mitigación pendiente del reporte consultado e indicar brevemente la acción efectuada.
T3	Desde la perspectiva del autor del mismo reporte, revisar la acción informada anteriormente y aprobarla para completar su validación.
T4	Acceder al mapa comunitario, visualizar los reportes mediante marcadores y mapa de calor y, posteriormente, acceder a la información de un reporte desde la vista de marcadores.

Para cada tarea se registró si fue completada sin ayuda, con ayuda o no completada, junto con las principales dificultades observadas. Estas categorías se utilizaron descriptivamente y no como una puntuación global de usabilidad.

Finalizadas las tareas, los participantes respondieron un cuestionario propio compuesto por caracterización básica, cinco afirmaciones de facilidad de uso percibida (U1–U5), cinco de utilidad percibida (UT1–UT5), dos preguntas de comprensión (C1–C2) y dos preguntas abiertas. Las afirmaciones utilizaron una escala Likert de 1, “Totalmente en desacuerdo”, a 5, “Totalmente de acuerdo”. Al no tratarse de un instrumento estandarizado, sus resultados se interpretan únicamente como apreciaciones de los participantes y no como una puntuación generalizable de usabilidad. El instrumento completo se presenta en los anexos.

El cuestionario se aplicó mediante Google Forms y no solicitó nombres dentro de sus preguntas. Aunque el acceso al formulario se realizó mediante una cuenta de Google, el análisis no utiliza ni reporta correos electrónicos u otros identificadores personales.

La evaluación con usuarios se concentró en las nuevas funcionalidades colaborativas; por ello, no incluyó una tarea específica sobre análisis mediante inteligencia artificial, capacidad preexistente de PyroPrev cuya integración comunitaria fue considerada en las pruebas funcionales.

7. Resultados y Discusión

Este capítulo presenta los resultados de las pruebas funcionales y de la evaluación exploratoria con usuarios. Estos últimos se interpretan descriptivamente debido al tamaño reducido de la muestra y se utilizan principalmente para identificar fortalezas y dificultades de interacción.

7.1 Resultados de las Pruebas Funcionales

Los once casos definidos en la Sección 6.2 presentaron el comportamiento esperado. PF-01 a PF-08 verificaron los principales flujos comunitarios y de geovisualización, mientras que PF-09 a PF-11 comprobaron acceso no autenticado, autorización de operaciones sensibles y funcionamiento ante ausencia de reportes.

Tabla 7. Resultados de las pruebas funcionales

Fuente: Elaboración propia

ID	Caso de prueba	Resultado
PF-01	Generación y publicación de un reporte comunitario	Cumple
PF-02	Consulta multiusuario	Cumple
PF-03	Registro de una acción realizada	Cumple
PF-04	Aprobación de una mitigación	Cumple
PF-05	Rechazo de una mitigación	Cumple
PF-06	Visibilidad y actualización del estado de mitigación	Cumple
PF-07	Visualización mediante marcadores	Cumple
PF-08	Visualización mediante mapa de calor	Cumple
PF-09	Consulta comunitaria sin autenticación	Cumple
PF-10	Resolución de propuesta por usuario no autorizado	Cumple
PF-11	Consulta sin reportes comunitarios disponibles	Cumple

PF-06 comprobó que una propuesta pendiente mantiene visibilidad restringida hasta su resolución y que, una vez aprobada, el estado actualizado queda disponible para los demás usuarios. Adicionalmente, PF-09 verificó el rechazo mediante HTTP 401 de consultas comunitarias sin un JWT válido; PF-10 comprobó mediante HTTP 403 que un usuario distinto del autor no puede resolver una propuesta y que el intento no modifica el estado persistido; y PF-11 verificó la presentación correcta del estado vacío cuando no existen reportes disponibles.

El cumplimiento funcional no permite, por sí solo, caracterizar la interacción de los usuarios, aspecto abordado en la evaluación siguiente.

7.2 Resultados de la Evaluación con Usuarios

7.2.1 Ejecución de tareas

La Tabla 8 resume el desempeño de los participantes en las cuatro tareas realizadas durante la evaluación.

Tabla 8. Desempeño en las tareas durante la evaluación con usuarios

Fuente: Elaboración propia

Participante	T1	T2	T3	T4
P1	Sin ayuda	Sin ayuda	Sin ayuda	No completada
P2	Con ayuda	Sin ayuda	Sin ayuda	Con ayuda



Participante	T1	T2	T3	T4
P3	Sin ayuda	Sin ayuda	Sin ayuda	Sin ayuda
P4	Sin ayuda	Sin ayuda	Sin ayuda	Con ayuda
P5	Con ayuda	Con ayuda	Sin ayuda	Con ayuda

T1 fue completada sin ayuda por 3 de 5 participantes (60 %) y con ayuda por 2 de 5 (40 %), principalmente por dificultades para identificar información dentro de los reportes. T2 fue completada sin ayuda por 4 de 5 (80 %) y con ayuda por 1 de 5 (20 %), quien requirió asistencia para localizar la opción destinada a informar una mitigación. T3 fue completada sin ayuda por los 5 participantes (100 %). En contraste, T4 presentó el menor nivel de autonomía: 1 de 5 (20 %) la completó sin ayuda, 3 de 5 (60 %) requirieron asistencia y 1 de 5 (20 %) no la completó. Las dificultades se concentraron en localizar el mapa comunitario y descubrir que el resumen de un marcador permitía acceder al reporte asociado.

7.2.2 Facilidad de Uso Percibida y Utilidad Percibida

Para caracterizar la facilidad de uso percibida se analizaron las respuestas a las afirmaciones U1–U5. La Tabla 9 presenta los promedios obtenidos para cada una de ellas.

Tabla 9. Resultados descriptivos del cuestionario de facilidad de uso percibida

Fuente: Elaboración propia

Ítem	Promedio
U1. Consulta de reportes comunitarios	4,6
U2. Claridad de la información de los reportes	4,2
U3. Comprensión del proceso de informar una mitigación	4,6
U4. Comprensión de la diferencia entre informar y validar	4,6
U5. Uso de las herramientas de visualización del mapa	4,4

Las respuestas fueron favorables dentro de la evaluación realizada, con promedios entre 4,2 y 4,6. El menor valor correspondió a la claridad de la información presentada en los reportes (U2), mientras que la consulta de reportes (U1) y los aspectos asociados a informar y validar mitigaciones (U3 y U4) alcanzaron los valores más altos.

De forma complementaria, las afirmaciones UT1–UT5 permitieron recoger la utilidad percibida de las principales funcionalidades comunitarias. Sus resultados se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados descriptivos del cuestionario de utilidad percibida

Fuente: Elaboración propia

Ítem	Promedio
UT1. Consulta compartida de reportes	4,6
UT2. Participación comunitaria en el seguimiento	4,6
UT3. Validación definitiva por el autor	5,0
UT4. Utilidad de los marcadores	4,8
UT5. Utilidad del mapa de calor	4,6

Los resultados de utilidad percibida presentaron promedios entre 4,6 y 5,0. El valor más alto correspondió a UT3, sobre la validación definitiva de una mitigación por el autor del reporte, mientras que las funcionalidades de consulta compartida, seguimiento y geovisualización también obtuvieron valoraciones favorables.

Debido al carácter exploratorio de la evaluación, al tamaño reducido de la muestra y al uso de un cuestionario propio, estos promedios se interpretan únicamente como una síntesis descriptiva de las respuestas obtenidas. No constituyen una medición estandarizada de usabilidad ni evidencia de aceptación de PyroPrev por parte de la población objetivo.

7.2.3 Comprensión y discusión de la evaluación con usuarios

El seguimiento colaborativo presentó resultados consistentes entre desempeño y comprensión: T3 fue completada sin ayuda por los 5 participantes (100 %), los 5 de 5 identificaron correctamente en C1 que la validación definitiva corresponde al autor y UT3 obtuvo un promedio de 5,0.

En geovisualización se observó una diferencia entre percepción y desempeño. Aunque U5 obtuvo un promedio de 4,4, en T4 solo 1 de 5 participantes (20 %) completó la tarea sin ayuda, evidenciando que una valoración subjetiva favorable no implica necesariamente una ejecución autónoma satisfactoria. Las principales dificultades estuvieron relacionadas con localizar el mapa y acceder a un reporte desde un marcador.

En C2, 3 de 5 participantes (60 %) interpretaron correctamente el mapa de calor como concentración de reportes, mientras que 2 de 5 (40 %) lo asociaron al nivel de riesgo promedio. Como mejora se propone una denominación explícita, como “Densidad de reportes comunitarios”, acompañada de una leyenda que aclare que no representa riesgo territorial.

En conjunto, la evaluación identificó fortalezas en el seguimiento colaborativo y dificultades principalmente asociadas a la geovisualización. Estos resultados son exploratorios y no generalizables a una población mayor.

7.3 Trazabilidad entre Objetivos y Evidencia

La Tabla 11 relaciona cada objetivo específico con la principal evidencia desarrollada y los resultados asociados.

Tabla 11. Trazabilidad entre objetivos específicos y evidencia del trabajo

Fuente: Elaboración propia

Objetivo específico	Evidencia principal	Resultado asociado
OE1. Diseñar la arquitectura del sistema colaborativo.	Requerimientos del sistema, arquitectura funcional y técnica, integración tecnológica y modelo de datos descritos en los Capítulos 4 y 5.	Se definió e implementó una arquitectura cliente-servidor que integra el análisis preventivo existente con reportes georreferenciados, persistencia compartida, autenticación, seguimiento colaborativo y geovisualización.
OE2. Implementar mecanismos de participación comunitaria y geovisualización.	Implementación del flujo comunitario, publicación y consulta multiusuario, seguimiento y validación de mitigaciones, mapa interactivo y mapa de calor; PF-01 a PF-11.	Las funcionalidades definidas fueron implementadas y los casos de prueba funcionales presentaron el comportamiento esperado, incluyendo controles de acceso, autorización y estados sin información disponible.
OE3. Evaluar el funcionamiento de las funcionalidades colaborativas y realizar una	PF-01 a PF-11, desempeño en T1–T4, afirmaciones U1–U5 y UT1–UT5, preguntas C1–C2 y respuestas abiertas.	Se verificó el funcionamiento técnico de los componentes y se caracterizó exploratoriamente la interacción de cinco participantes, identificando fortalezas y



Objetivo específico	Evidencia principal	Resultado asociado
evaluación exploratoria con usuarios.		dificultades principalmente asociadas a la geovisualización.

Los tres objetivos específicos cuentan así con evidencia asociada al diseño, implementación y validación realizada, considerando el carácter exploratorio y no generalizable de la evaluación con usuarios.

8. Conclusiones

Esta memoria permitió extender PyroPrev desde un enfoque preventivo individual hacia un sistema que incorpora mecanismos colaborativos y georreferenciados para registrar, compartir, dar seguimiento y visualizar territorialmente información preventiva. Respecto del primer objetivo específico, se diseñó una arquitectura cliente-servidor que integra la aplicación Android, el backend Flask, persistencia mediante SQLite y SQLAlchemy, almacenamiento de imágenes en Cloudflare R2, la integración preexistente con Google Gemini y las herramientas de geovisualización de Google Maps. Asimismo, se definieron requerimientos y un modelo de datos capaz de soportar los flujos individual y comunitario junto con sus controles de acceso y autorización.

En relación con el segundo objetivo, se implementó un flujo comunitario independiente para generar y publicar reportes georreferenciados, consultarlos entre usuarios autenticados y participar en el seguimiento de sus acciones de mitigación. Los usuarios pueden informar intervenciones realizadas, mientras que su aprobación o rechazo definitivo corresponde al autor del reporte y es verificado por el backend. La solución incorpora además marcadores y un mapa de calor destinado exclusivamente a representar la ubicación y concentración espacial de los reportes comunitarios.

Respecto del tercer objetivo, las funcionalidades desarrolladas fueron evaluadas mediante once pruebas funcionales controladas, todas con el comportamiento esperado, incluyendo casos de acceso no autenticado, autorización de operaciones sensibles y ausencia de reportes. Complementariamente, se realizó una evaluación exploratoria con cinco participantes. T3 fue completada sin ayuda por los cinco participantes, mientras que T4 presentó mayores dificultades, siendo completada autónomamente por solo 1 de 5. Asimismo, 3 de 5 participantes interpretaron correctamente el mapa de calor como concentración de reportes, evidenciándose oportunidades de mejora principalmente en la geovisualización.

Las respuestas del cuestionario mostraron valoraciones favorables en las dimensiones de facilidad de uso y utilidad percibidas dentro del contexto evaluado. Sin embargo, estos resultados corresponden a una muestra de conveniencia reducida y a un instrumento propio, por lo que no constituyen una medición estandarizada de usabilidad ni permiten inferir aceptación de PyroPrev por parte de la población objetivo.

Entre las principales limitaciones se encuentran la falta de representatividad de la muestra y de una caracterización exhaustiva de su contexto territorial, la ausencia de una evaluación de precisión del componente de inteligencia artificial preexistente y la falta de evaluaciones formales de seguridad, privacidad, rendimiento y escalabilidad. Además, los reportes dependen de aportes de usuarios y no incorporan actualmente mecanismos generales de moderación, denuncia, detección de duplicados o caducidad automática. En materia de privacidad, los reportes publicados mantienen coordenadas precisas y fotografías accesibles para usuarios autenticados, sin mecanismos de anonimización espacial.

Como trabajo futuro se propone ampliar la evaluación con residentes de zonas de interfaz urbano-forestal, mejorar la visibilidad e interacción de las herramientas de geovisualización y aclarar explícitamente que el mapa de calor representa densidad de reportes. También resulta pertinente incorporar mecanismos de moderación y control de calidad, estrategias de reducción de precisión geográfica y evaluaciones específicas de seguridad, privacidad, rendimiento y escalabilidad.

En síntesis, la contribución de esta memoria corresponde al diseño, implementación y validación de una extensión comunitaria que integra las capacidades preventivas preexistentes de PyroPrev con mecanismos de participación, persistencia compartida y geovisualización. No comprende el desarrollo de un nuevo modelo de inteligencia artificial y mantiene un carácter orientativo, diferenciado de los sistemas oficiales de prevención y gestión de incendios.

Referencias

- [1] Corporación Nacional Forestal (CONAF), "CONAF entregó balance de incendios temporada 2023-2024," 26 abr. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.conaf.cl/conaf-entrego-balance-de-incendios-temporada-2023-2024/>
- [2] Corporación Nacional Forestal (CONAF), "Prevención y mitigación." [En línea]. Disponible en: <https://www.conaf.cl/incendios/prevencion-y-mitigacion/>
- [3] Corporación Nacional Forestal (CONAF), "Ocurrencia y daño histórico nacional, 1985–2024," 28 may. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.conaf.cl/centro-documental/ocurrencia-y-dano-historico-nacional-1985-2023/>
- [4] R. Sapiains, A. M. Ugarte, P. Aldunce, G. Marchant, J. A. Romero, M. E. González y V. Inostroza-Lazo, "Local Perceptions of Fires Risk and Policy Implications in the Hills of Valparaíso, Chile," *Sustainability*, vol. 12, no. 10, art. 4298, may. 2020, doi: 10.3390/su12104298.
- [5] R. Oliveira, S. Oliveira, J. L. Zêzere y D. X. Viegas, "Uncovering the perception regarding wildfires of residents with different characteristics," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 43, art. 101370, 2020, doi: 10.1016/j.ijdrr.2019.101370.
- [6] B. Haworth, J. Whittaker y E. Bruce, "Assessing the application and value of participatory mapping for community bushfire preparation," *Applied Geography*, vol. 76, pp. 115–127, 2016, doi: 10.1016/j.apgeog.2016.09.019.
- [7] M. Partidário et al., "Using Participatory Mapping to Foster Community-Based Disaster Risk Reduction in Forest Fire-Prone Areas: The Case of Monchique in Portugal," *Fire*, vol. 5, no. 5, art. 146, 2022, doi: 10.3390/fire5050146.
- [8] Acredita CI, "Definiciones." [En línea]. Disponible en: <https://www.acreditaci.cl/es/acreditacion-ingenierias/base-cientifica/definiciones/>
- [9] FireSmart BC, *FireSmart BC Begins At Home Guide*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://firesmartbc.ca/resource/firesmart-bc-homeowners-manual/>
- [10] D. Caffagni et al., "The Revolution of Multimodal Large Language Models: A Survey," en *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2024*, Bangkok, Thailand, pp. 13590–13618, ago. 2024, doi: 10.18653/v1/2024.findings-acl.807.
- [11] M. D. Epstein y C. A. Seielstad, "Learning from Wildfire Decision Support: large language model analysis of barriers to fire spread in a census of large wildfires in the United States (2011–2023)," *International Journal of Wildland Fire*, vol. 34, no. 9, art. WF25051, sep. 2025, doi: 10.1071/WF25051.
- [12] Corporación Nacional Forestal (CONAF), "Comunidades Preparadas frente a los incendios forestales." [En línea]. Disponible en: <https://www.conaf.cl/incendios/prevencion-y-mitigacion/comunidades-preparadas-frente-a-los-incendios-forestales/>
- [13] Corporación Nacional Forestal (CONAF), "Chile trabaja en reducción del riesgo de incendios forestales," 9 oct. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.conaf.cl/chile-trabaja-en-reduccion-del-riesgo-de-incendios-forestales/>
- [14] M. F. Goodchild, "Citizens as sensors: web 2.0 and the volunteering of geographic information," *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, no. 7, pp. 8–10, 2007.
- [15] Corporación Nacional Forestal (CONAF), "Análisis Nacional de Riesgo de Incendios Forestales y Zonas de Interfaz." [En línea]. Disponible en: <https://www.conaf.cl/incendios/analisis-nacional-de-riesgo-de-incendios-forestales/>
- [16] E. Kutchartt et al., "FIRE-RES Geo-Catch: a mobile application to support reliable fuel mapping at a pan-European scale," *iForest - Biogeosciences and Forestry*, vol. 16, no. 5, pp. 268–273, 2023, doi: 10.3832/ifer4376-016.
- [17] N. Mileu, J. L. Zêzere y R. Bergonse, "People&Fire webGIS tool for wildfire risk assessment," *MethodsX*, vol. 12, art. 102709, 2024, doi: 10.1016/j.mex.2024.102709.
- [18] S. Puttinaovaratt et al., "WildfireGO: A Multi-Source Wildfire Detection and Validation System Integrating Crowdsourcing, Satellite Hotspots, and Deep Learning," *Applied System Innovation*, vol. 9, no. 7, art. 136, 2026, doi: 10.3390/asi9070136.
- [19] O. L. Aiyegbusi, "Key methodological considerations for usability testing of electronic patient-reported outcome (ePRO) systems," *Quality of Life Research*, vol. 29, pp. 325–333, 2020, doi: 10.1007/s11136-019-02329-z.
- [20] A. Cazañas, A. de San Miguel y E. Parra, "Estimating Sample Size for Usability Testing," *Enfoque UTE*, vol. 8, supl. 1, pp. 172–185, 2017, doi: 10.29019/enfoqueute.v8n1.126.



Anexos

1. Instrumento de Evaluación con Usuarios

La evaluación con usuarios consideró la realización de cuatro tareas representativas del componente comunitario de PyroPrev y la posterior aplicación de un cuestionario de facilidad de uso percibida, utilidad percibida y comprensión.

Antes de comenzar, se informó a cada participante que la actividad formaba parte de la evaluación realizada para esta memoria y que su participación era voluntaria. Posteriormente, se entregó la siguiente indicación: *La prueba busca evaluar la aplicación y no tus conocimientos. Si alguna parte no resulta clara o no sabes cómo continuar, indícalo. Puedes utilizar la aplicación con normalidad y comentar cualquier dificultad que encuentres.*

1.1 Tareas de evaluación

T1. Consulta de un reporte comunitario

Ingresa a la sección Comunidad, consulta uno de los reportes publicados e identifica su nivel de riesgo y una acción de mitigación pendiente. En esta tarea solo debes consultar la información; no informes todavía ninguna acción como realizada.

T2. Registro de una acción de mitigación

Ahora imagina que realizaste una de las acciones de mitigación pendientes del reporte anterior. Registra en la aplicación que la acción fue realizada e indica brevemente qué se hizo.

T3. Validación por parte del autor

Ahora utiliza la aplicación desde la perspectiva del autor del mismo reporte utilizado anteriormente. Localiza la acción informada en la tarea anterior, revísala y apruébala para que quede validada.

T4. Geovisualización de reportes

Accede al mapa comunitario y visualiza los reportes tanto mediante marcadores como mediante el mapa de calor. Luego, vuelve a la vista de marcadores, selecciona uno de ellos y accede al reporte asociado para consultar su información.

Durante la ejecución de cada tarea se registró si esta fue completada sin ayuda, completada con ayuda o no completada, junto con observaciones sobre las dificultades encontradas.

1.2 Cuestionario posterior a la prueba

Caracterización del participante

1. Rango etario

- 18–29
- 30–44
- 45–59
- 60 o más

2. ¿Qué tan familiarizado se considera con el uso de aplicaciones móviles?

Escala de 1 a 5:

1 = Nada familiarizado

5 = Muy familiarizado

Escala de respuesta



Para las afirmaciones de facilidad de uso percibida y utilidad percibida se utilizó la siguiente escala:

- 1 = Totalmente en desacuerdo
- 2 = En desacuerdo
- 3 = Ni de acuerdo ni en desacuerdo
- 4 = De acuerdo
- 5 = Totalmente de acuerdo

Facilidad de uso percibida

- U1.** Me resultó sencillo encontrar y consultar los reportes comunitarios.
- U2.** La información presentada dentro de los reportes me resultó clara.
- U3.** El proceso para informar una acción de mitigación realizada me resultó comprensible.
- U4.** Comprendí la diferencia entre informar una acción realizada y validarla definitivamente como mitigada.
- U5.** Me resultó sencillo utilizar las herramientas de visualización disponibles en el mapa.

Utilidad percibida

- UT1.** Considero útil que los reportes generados por distintos usuarios puedan consultarse en un espacio común.
- UT2.** Considero útil que otros usuarios puedan participar en el seguimiento de las acciones de mitigación.
- UT3.** Considero útil que la validación definitiva de una mitigación corresponda al autor del reporte.
- UT4.** La visualización mediante marcadores me resulta útil para conocer la ubicación de los reportes comunitarios.
- UT5.** El mapa de calor me resulta útil para reconocer sectores con mayor concentración de reportes.

Comprensión

C1. ¿Quién determina finalmente que una acción de mitigación queda validada?

- Cualquier usuario que consulte el reporte.
- El usuario que informó la acción.
- El autor del reporte.
- El sistema automáticamente.

C2. ¿Qué información representa principalmente el mapa de calor de PyroPrev?

- El nivel de riesgo promedio de los reportes presentes en cada sector.
- La concentración espacial de reportes comunitarios.
- La ubicación individual de cada reporte mediante un punto específico.
- La cantidad de acciones de mitigación pendientes en cada sector.

Preguntas abiertas

- A1.** ¿Hubo alguna parte de la aplicación que resultara difícil de comprender o utilizar?
- A2.** ¿Qué cambiaría o mejoraría del componente comunitario de PyroPrev?