



Prototipo para apoyar el registro y trazabilidad de estados en el proceso de fotocomparendos
aplicando tecnologías de redes distribuidas

Laura Catalina Preciado Ballén
Cristian Stiven Guzmán Tovar

Director: Julio Barón Velandia

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Sistemas

Agenda

Objetivos

Metodología

Resultados

Conclusiones

Trabajo futuro

Contexto: el sistema de fotocomparendos en Bogotá

Escala operativa (Sistema FÉNIX):

- **1.9 millones** de comparendos emitidos entre 2018–2024 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2024)
- **457,000** comparendos semestrales en promedio
- Arquitectura centralizada (BD relacional)

Indicadores de la problemática:

- Tasa de impugnación: **34.1 %**
- Carga operativa: **155,854 PQRSD** semestrales

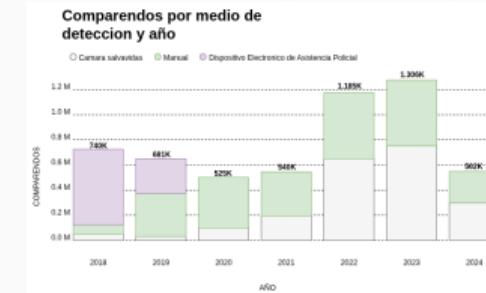


Figura 1: Comparendos emitidos por semestre

- Presunto detrimento patrimonial: **\$8,000 millones** (Contraloría de Bogotá, 2024)
- Vulnerabilidad ciudadana ante fraudes (Semana, 2023)

Formulación del problema

Pregunta de investigación

¿Cómo mitigar el riesgo de pérdida o alteración de la integridad de los datos asociados a todos los estados en el proceso de fotocomparendos en Bogotá mediante el uso de tecnologías de redes distribuidas que garanticen el registro, la trazabilidad, la autenticidad y la confidencialidad de la información?

Limitaciones del modelo actual (FÉNIX): confianza en administradores centrales, inmutabilidad no garantizada criptográficamente, trazabilidad dependiente de controles internos, auditoría opaca para la ciudadanía.

Hipótesis

Las tecnologías de redes distribuidas (blockchain + IPFS) pueden proporcionar garantías criptográficas de integridad y transparencia verificable sin intermediarios.

Objetivos

Objetivo general

Objetivo general

Desarrollar un prototipo software tecnológico que facilite el registro y la trazabilidad de los estados en el proceso de fotocomparendos en Bogotá, mediante la aplicación de tecnologías de redes distribuidas, para el fortalecimiento de la integridad y autenticidad de la información reduciendo los riesgos asociados a su confidencialidad.

Objetivos específicos

1. **Analizar** el proceso actual de registro de fotocomparendos a partir del marco jurídico, regulatorio e informes de auditoría, para identificar vulnerabilidades, requisitos funcionales y no funcionales.
2. **Desarrollar** un prototipo con arquitectura híbrida basado en blockchain permisionado (Hyperledger Fabric) y blockchain público (Ethereum), integrando almacenamiento distribuido mediante IPFS.
3. **Evaluar** la viabilidad técnica y funcional mediante un plan de pruebas que incluya inmutabilidad, trazabilidad, rendimiento y verificación de integridad de documentos.

Metodología

Enfoque metodológico: desarrollo por prototipos

Justificación del modelo:

- **Naturaleza exploratoria:** integración de tecnologías emergentes sin antecedentes en el contexto local
- **Requisitos evolutivos:** marco normativo y tecnológico en constante actualización
- **Verificación temprana:** contrastar la hipótesis central antes de un desarrollo a escala

Fases del desarrollo:

1. **Análisis de requisitos** → Marco legal + auditorías
2. **Diseño arquitectónico** → Descomposición por niveles de confianza
3. **Implementación iterativa** → Backend + Frontend + Smart Contracts
4. **Pruebas y verificación** → 80 casos automatizados

Decisión metodológica

El modelo de prototipos permite mitigar riesgos técnicos y facilitar ajustes iterativos ante cambios normativos o tecnológicos.

Arquitectura híbrida: decisión de diseño

Problema: ninguna plataforma blockchain individual satisface todos los requisitos.

- Privacidad de datos personales (Ley 1581/2012)
- Transparencia pública ciudadana (Ley 1712/2014)
- Rendimiento (457,000 comparendos semestrales)
- Costos operativos predecibles

Cuadro 1: *Componentes de la arquitectura híbrida*

| Componente | Tecnología | Justificación | TPS |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------------|--------|
| Capa privada | Hyperledger Fabric v2.5 | Control de acceso PKI, sin gas fees | 2K–20K |
| Capa pública | Ethereum (Sepolia) | Verificación ciudadana | 15–30 |
| Storage privado | IPFS privado | Evidencias sensibles | – |
| Storage público | IPFS público | Hashes de verificación | – |

Actores y funcionalidades principales

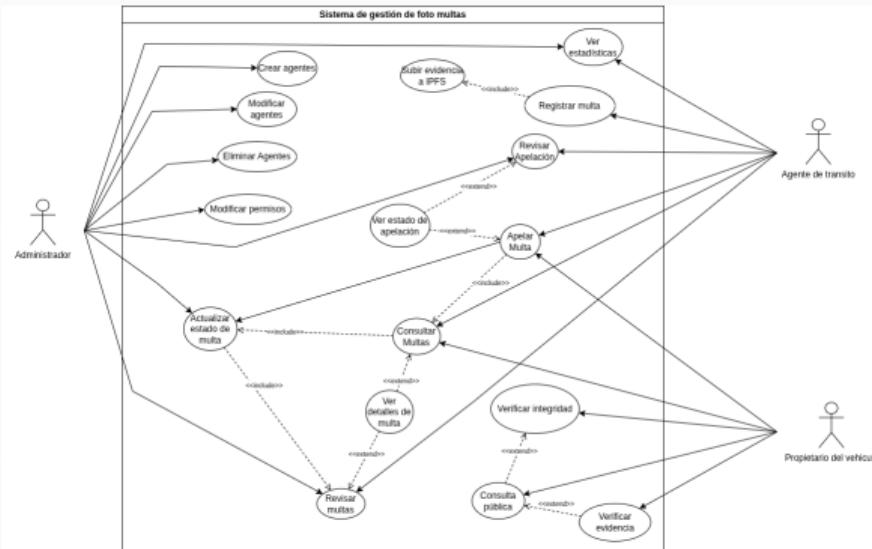


Figura 2: Diagrama de casos de uso

Actores identificados:

1. Agente de tránsito

- Registrar comparendo
- Actualizar estado

2. Ciudadano

- Consultar multa
- Verificar autenticidad
- Apelar

3. Administrador

- Gestionar sistema
- Auditlar operaciones

Flujos de proceso: diagramas de actividades

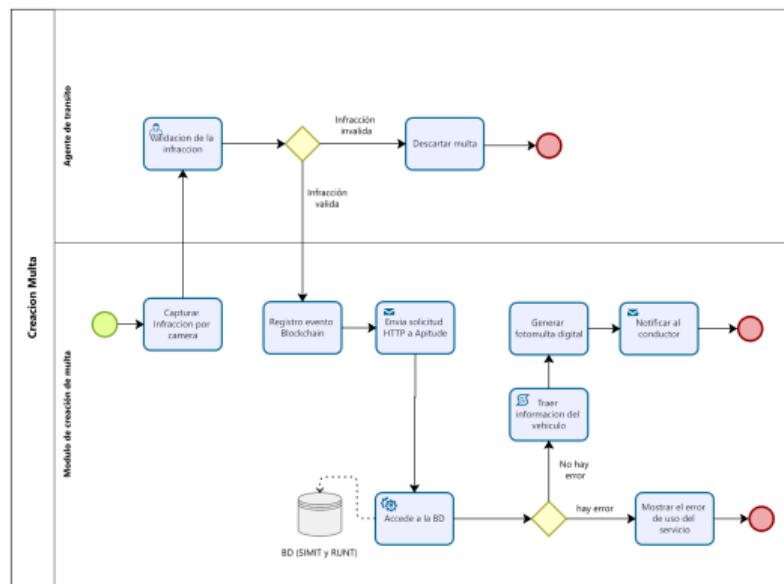


Figura 3: Registro de multa

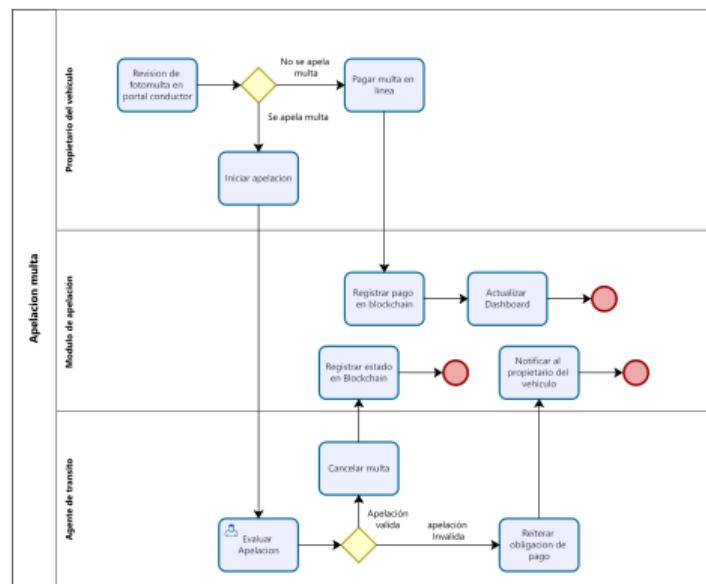


Figura 4: Proceso de apelación

Arquitectura del sistema

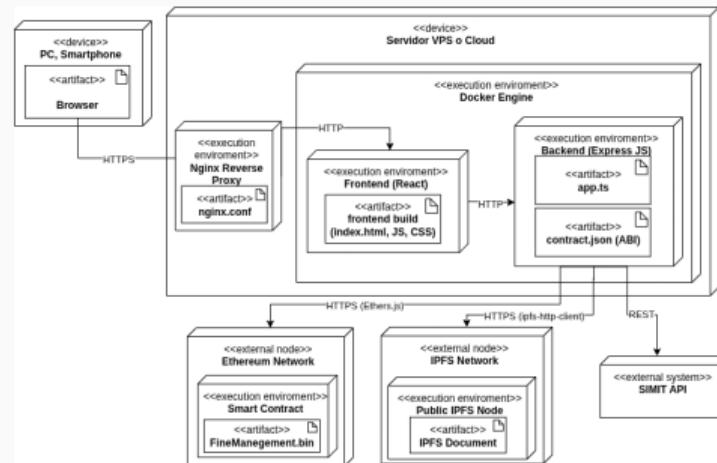


Figura 5: Diagrama de despliegue del sistema

Capas: 1. Frontend React — 2. API REST Node.js/Express — 3. Hyperledger Fabric — 4. Ethereum + IPFS público — 5. IPFS privado

Delimitaciones metodológicas del prototipo:

- **Datos sintéticos:** la verificación se realizó con datos generados mediante scripts de prueba, dado que no se dispuso de acceso a datos reales del FÉNIX, RUNT ni SIMIT.
- **Cobertura parcial de estados:** se implementaron 5 de los 8 estados del ciclo de vida (PENDING, PAID, APPEALED, RESOLVED_APPEAL, CANCELLED).
- **Volumen controlado:** se emplearon entre 50 y 100 comparendos de prueba, frente a los 457,000 semestrales registrados en producción.
- **Verificación técnica:** los resultados corresponden a una *verificación* en entorno controlado, no a una *validación* operativa institucional.

Nota metodológica

Se distingue entre *verificación* (el sistema cumple las especificaciones de diseño) y *validación* (el sistema opera adecuadamente en condiciones reales). Este trabajo se enmarca en la primera categoría.

Resultados

Plan de pruebas: cobertura del prototipo

Estrategia: 80 casos de prueba automatizados (Vitest v3.2.4) — Tasa de éxito: 100 % —
Tiempo total: 28.98s

Cuadro 2: Resultados del plan de pruebas por módulo

| Módulo | Pruebas | Éxito | Cobertura |
|----------------------------|-----------|--------------|------------------------------------|
| Utilidades (Error Handler) | 7 | 7/7 | Manejo global de errores |
| Servicios IPFS | 8 | 8/8 | Subida, recuperación, CIDs |
| Integración IPFS | 13 | 13/13 | Inmutabilidad, content-addressed |
| Seguridad: Validación | 16 | 16/16 | XSS, SQL injection, path traversal |
| Seguridad: Archivos | 10 | 10/10 | Límites 10MB, tipos válidos |
| API REST | 26 | 26/26 | CRUD, blockchain/IPFS |
| Total | 80 | 80/80 | 100 % cobertura funcional |

Pruebas de inmutabilidad

Cuadro 3: Resultados de pruebas de inmutabilidad

| ID | Caso de prueba | Resultado |
|--------|--------------------------------|--------------------------------------|
| IM-001 | Modificación directa en ledger | Transacción rechazada por consenso |
| IM-002 | Alteración de imagen en IPFS | CID diferente → Detección automática |
| IM-003 | Verificación de trazabilidad | Historial inmutable preservado |
| IM-004 | Validación de consenso | Consenso validado correctamente |

Evidencia técnica: TX Hash registro: 0xbc03e11f...42c3c069 — TX Hash actualización:
0x611b696e...d315f3e48 — CID IPFS: QmadhsypxKm7b2P2w...sp8eKMF

Resultado

En el entorno experimental, el prototipo rechazó satisfactoriamente el 100 % de los intentos de modificación no autorizada.

Métricas de desempeño

Tiempos de respuesta medidos:

- Registro completo: **¡ 3 segundos**
- Consulta de multa: **¡ 1 segundo**
- Verificación de integridad: **¡ 2 segundos**

Criterios de éxito

- ✓ Tiempo de publicación $\leq 3s$
- ✓ Coincidencia 100 % hash
- ✓ Trazabilidad completa en entorno de prueba

Interfaces desarrolladas:

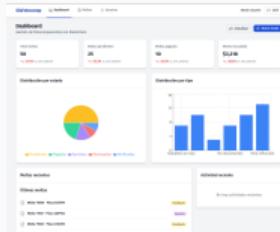


Figura 6: Dashboard del agente de tránsito



Figura 7: Consulta y verificación ciudadana

Conclusiones

Conclusiones principales

1. Viabilidad técnica demostrada:

- La arquitectura híbrida (Hyperledger Fabric + Ethereum + IPFS dual) demostró ser viable para la gestión de fotocomparendos en el entorno experimental.

2. Garantías criptográficas verificadas:

- 100 % de intentos de modificación no autorizada rechazados satisfactoriamente.
- Detección automática de alteraciones mediante *content-addressing* (CIDs).
- Tiempos de respuesta dentro de los criterios de aceptación ($\leq 3s$).

3. Modelo de confianza alternativo:

- Transición hacia confianza criptográfica verificable, conciliando privacidad (Ley 1581/2012) y transparencia (Ley 1712/2014).

Respuesta a la pregunta de investigación

Respuesta

La respuesta a la pregunta de investigación es **afirmativa** dentro del alcance experimental definido: las tecnologías de redes distribuidas permiten mitigar el riesgo de alteración de la integridad de los datos en el proceso de fotocomparendos.

Evidencia obtenida:

- Registro y trazabilidad de 5 estados del ciclo de vida con inmutabilidad criptográfica
- Detección automática de alteraciones en documentos y evidencias
- Modelo de confianza verificable sin intermediarios

Oportunidades de extensión:

- Escalamiento a volúmenes operativos reales (457,000 comparendos semestrales)
- Integración con sistemas institucionales (SIMIT, RUNT)
- Incorporación de los estados restantes del proceso
- Estudios de aceptación tecnológica

Evidencia de cumplimiento de objetivos

Cuadro 4: Cumplimiento de objetivos específicos

| Objetivo | Validación | Resultado |
|-------------------------------|----------------------------------|---|
| Análisis de vulnerabilidades | Auditoría documental y normativa | Brechas en FÉNIX identificadas; requisitos definidos |
| Desarrollo prototipo híbrido | Implementación iterativa | Arq. hexagonal: Fabric, Ethereum, IPFS dual, API REST |
| Evaluación viabilidad técnica | 80 pruebas (Vitest v3.2.4) | 100 % superadas; \leq 3s; 100 % hash match |

Síntesis

Los tres objetivos específicos se cumplieron dentro del alcance experimental definido.

Trabajo futuro

Líneas de evolución

1. Validación operativa:

- Piloto controlado con 5,000–10,000 multas reales
- Integración con SIMIT/RUNT mediante APIs reales
- Estudios de aceptación tecnológica (TAM/UTAUT) con agentes de tránsito y ciudadanos

2. Escalamiento a producción:

- Red Fabric multi-organizacional (SDM, Policía, Contraloría)
- Migración a soluciones Layer 2 (Polygon, Arbitrum)
- Auditoría formal de seguridad (Slither, MythX)

3. Extensión funcional:

- Oráculos certificadores para el estado NOTIFICADA
- Módulo de pagos (PSE, billeteras digitales)
- Sistema de apelaciones en línea automatizado

4. Replicabilidad:

- Adaptación para otras ciudades colombianas
- Estandarización de contratos inteligentes a nivel nacional
- Federación de redes Fabric intercity

Perspectiva

Los resultados obtenidos constituyen una base técnica para futuras investigaciones orientadas a la validación operativa e institucional del sistema propuesto.



Agradecimientos

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sistemas

Director

Julio Barón Velandia

Autores

Laura Catalina Preciado Ballén

Cristian Stiven Guzmán Tovar

¿Preguntas?

Referencias i

-  Contraloría de Bogotá. (2024). Auditoría de Cumplimiento al Sistema FÉNIX - Secretaría Distrital de Movilidad [Hallazgo fiscal por presunto detrimento patrimonial superior a 8000 millones de pesos].
-  Secretaría Distrital de Movilidad. (2024). Estadísticas de Comparendos Bogotá 2024 [Accessed: 2025-01-11]. <https://www.movilidadbogota.gov.co/web/observatorio>
-  Semana. (2023, 15 de diciembre). *Miles de personas en Bogotá denuncian haber sido estafadas con falsas impugnaciones de fotomultas....* <https://www.semana.com/politica/articulo/miles-de-personas-en-bogota-denuncian-haber-sido-estafadas-con-falsas-impugnaciones-de-fotomultas-semana-revela-detalles-del-millonario-negocio-de-juztoco/202353/>