



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

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

Presentado por:

Laura Catalina Preciado Ballén
Cristian Stiven Guzmán Tovar

Director: Julio Barón Velandia, PhD

Jurado: Roberto Pava Díaz, PhD

Agenda

Contexto y formulación del problema

Objetivos

Metodología e implementación

Validación y pruebas

Demostración del prototipo

Conclusiones y aportes

Trabajo futuro

¿Preguntas?

Contexto y formulación del problema

Contexto: el sistema de fotocomparendos en Bogotá

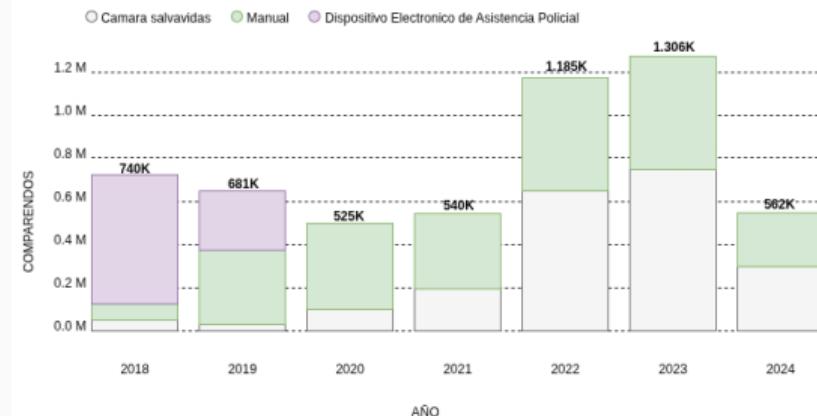
Escala operativa (Sistema FÉNIX):

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

Figura 1

Comparendos emitidos por semestre

Comparendos por medio de detección y año



Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad (2024).

Indicadores de la problemática

Gestión ciudadana

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

Impacto fiscal

- Presunto detrimento patrimonial: **\$8,000 millones** (Contraloría de Bogotá, 2024)

Vulnerabilidades identificadas:

- Fraude a ciudadanos mediante intermediarios ilegales (Semana, 2023)
- Confianza en administradores centrales sin garantías criptográficas
- Inmutabilidad no verificable por la ciudadanía
- Auditoría opaca para el control institucional

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 e implementación

Enfoque metodológico: desarrollo por prototipos

Justificación del modelo:

- **Naturaleza exploratoria:** tecnologías emergentes sin antecedentes locales
- **Requisitos evolutivos:** marco normativo en constante cambio
- **Verificación temprana:** validar hipótesis antes de escalar

Decisión metodológica

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

Ciclo iterativo de prototipado



Arquitectura híbrida: decisión de diseño

Problema: una sola plataforma blockchain no satisface simultáneamente todos los requisitos.

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

Tabla 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	–

Fuente: Elaboración propia.

Actores y funcionalidades principales

Figura 2

Diagrama de casos de uso



Fuente: Elaboración propia.

Actores identificados:

1. Agente de tránsito

- Registrar comparendo
- Actualizar estado

2. Ciudadano

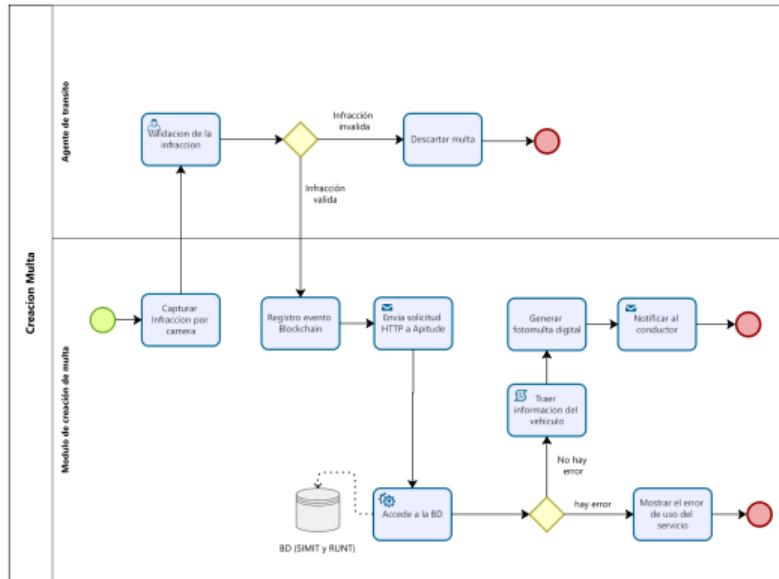
- Consultar multa
- Verificar autenticidad
- Apelar

3. Administrador

- Gestionar sistema
- Auditlar operaciones

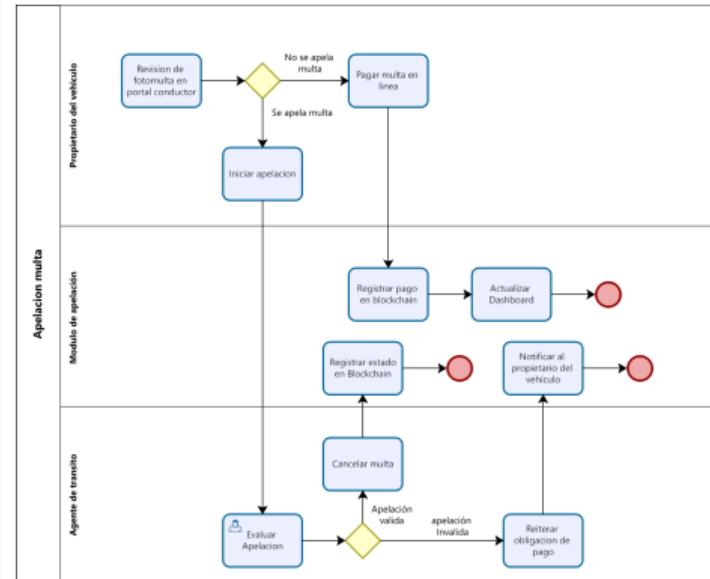
Flujos de proceso: diagramas de actividades

Figura 3
Registro de multa



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4
Proceso de apelación

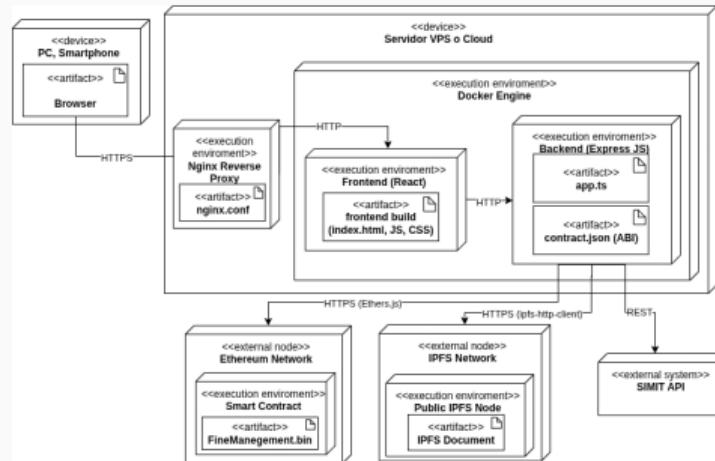


Fuente: Elaboración propia.

Arquitectura del sistema

Figura 5

Diagrama de despliegue del sistema



Fuente: Elaboración propia.

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.

Validación y pruebas

Plan de pruebas: cobertura del prototipo

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

Tabla 1

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

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas de inmutabilidad

Tabla 2

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

Fuente: Elaboración propia.

Evidencia: TX registro: 0xbc03e11f...42c3c069 — TX actualización: 0x611b696e...d315f3e48 — CID:
QmadhsypxKm7...sp8eKMF

Resultado

En el entorno experimental, el prototipo rechazó 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

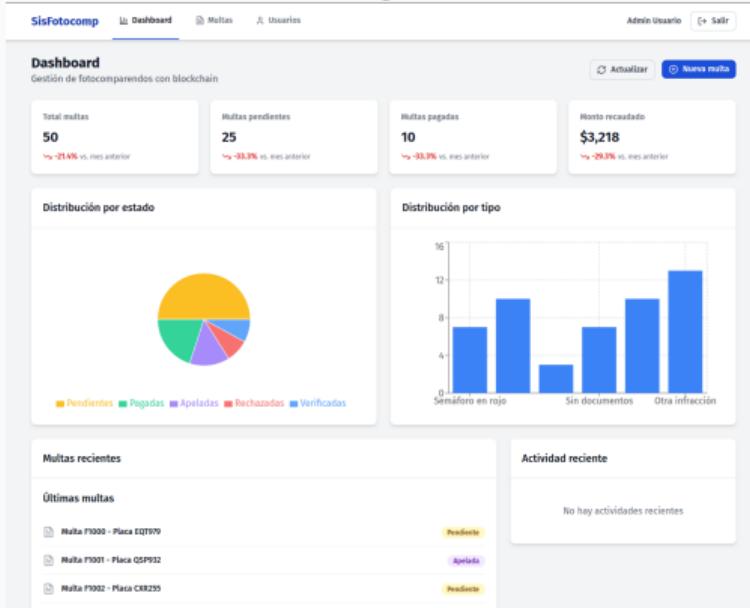
Resultado general

Todos los criterios de aceptación fueron satisfechos en el entorno experimental. Los tiempos de respuesta se mantuvieron dentro de los umbrales definidos en el plan de pruebas.

Interfaces del prototipo

Figura 6

Dashboard del agente de tránsito



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7

Consulta y verificación ciudadana

Consulta de Multas

Ingrese sus datos para consultar multas pendientes

Placa del vehículo: KOX256

Verificación de seguridad:

This reCAPTCHA is for testing purposes only. Please report to the site admin if you are seeing this.

I'm not a robot

reCAPTCHA
Privacy - Terms

Consultar

Fuente: Elaboración propia.

Demostración del prototipo

Demostración del prototipo

Flujo del ciudadano:

1. Consulta de multa por número de comparendo
2. Verificación de autenticidad de evidencia fotográfica
3. Proceso de apelación

Flujo del agente de tránsito:

1. Registro de nuevo comparendo con evidencia
2. Actualización de estado del comparendo
3. Consulta de trazabilidad completa

Verificación en tiempo real

Se demostrará el registro en Hyperledger Fabric, la publicación de hashes en Ethereum y el almacenamiento de evidencias en IPFS.

Conclusiones y aportes

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).

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.

Referencias principales (1/2)

- Antonopoulos, A. M., & Harding, D. A. (2023). *Mastering Bitcoin: Programming the Open Blockchain*. O'Reilly Media
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.
- van Steen, M., & Tanenbaum, A. S. (2017). *Sistemas Distribuidos* (3.^a ed.) [Traducción de Distributed Systems, 3rd edition]. distributed-systems.net. <https://www.distributed-systems.net/index.php/books/ds3/>
- Cachin, C. (2018). Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric [Accessed: 2025-05-07]. *arXiv preprint arXiv:1801.10228*. <https://arxiv.org/abs/1801.10228>
- Benet, J. (2014). IPFS—Content Addressed, Versioned, P2P File System. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1407.3561>

Referencias principales (2/2)

- Contraloría General de la República de Colombia. (2024). Informe de Auditoría 170100-0054-24: Auditoría de Cumplimiento a la Secretaría Distrital de Movilidad [Auditoría realizada a la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá D.C.].
- Yousfi, N., Kmimech, M., Abbassi, I., Hamdi, H., & Graiet, M. (2022). ITS Traffic Violation Regulation Based on Blockchain Smart Contracts. *International Conference on Computational Collective Intelligence*, 459-471. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16210-7_38
- Chen, C.-L., Tu, C.-Y., Deng, Y.-Y., Huang, D.-C., Liu, L.-C., & Chen, H.-C. (2024). Blockchain-enabled transparent traffic enforcement for sustainable road safety in cities. *Sustainable Cities: Smart Technologies and Cities*, 6, 1426036. <https://doi.org/10.3389/frsc.2024.1426036>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, X., & Wang, H. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International journal of web and grid services*, 14(4), 352-375
- Adel, K., Elhakeem, A., & Marzouk, M. (2023). Decentralized System for Construction Projects Data Management Using Blockchain and IPFS. *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(4), 342-359



Agradecimientos

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

Director

Julio Barón Velandia, PhD

Jurado

Roberto Pava Díaz, PhD

Grupo académico

GLUD — GNU/Linux Universidad Distrital

¿Preguntas?
