



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

**Jurado:** Roberto Pava

# 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):

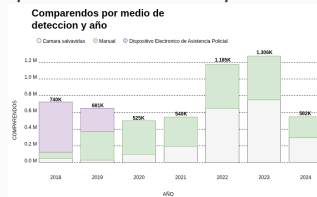
- **1.9 millones** de comparendos emitidos entre 2018–2024 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2024)
- **457,000** comparendos semestrales en promedio
- Arquitectura centralizada (BD relacional)

## Indicadores de la problemática:

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

**Figura 1**

*Comparendos emitidos por semestre*



Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad (2024).

- 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

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 permissionado (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:** 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:** una sola plataforma blockchain no satisface simultáneamente todos los requisitos.

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

**Tabla 1**

*Componentes de la arquitectura híbrida*

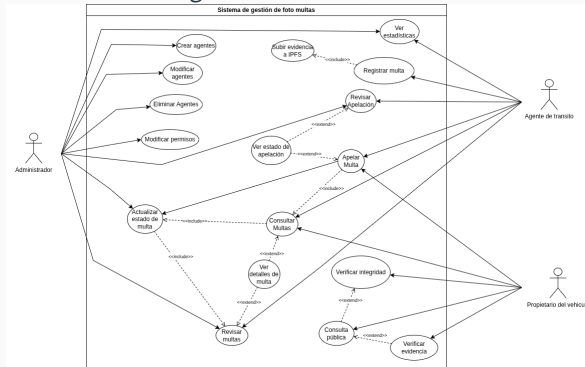
Componente	Tecnología	Justificación	TPS
Capa privada	Hyperledger Fabric v2.5	Control de acceso PKI, sin gas fees	2K–20K
Capa pública	Ethereum (Sepolia)	Verificación ciudadana	15–30
Storage privado	IPFS privado	Evidencias sensibles	–
Storage público	IPFS público	Hashes de verificación	–

Fuente: Elaboración propia.

# Actores y funcionalidades principales

**Figura 1**

*Diagrama de casos de uso*



Fuente: Elaboración propia.

## Actores identificados:

### 1. Agente de tránsito

- Registrar comparendo
- Actualizar estado

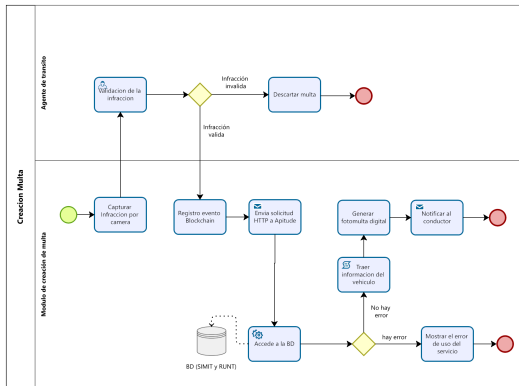
### 2. Ciudadano

- Consultar multa
- Verificar autenticidad
- Apelar

### 3. Administrador

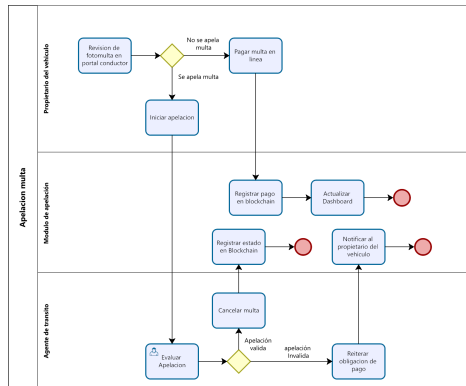
- Gestionar sistema
- Auditar operaciones

**Figura 2**  
*Registro de multa*



Fuente: Elaboración propia.

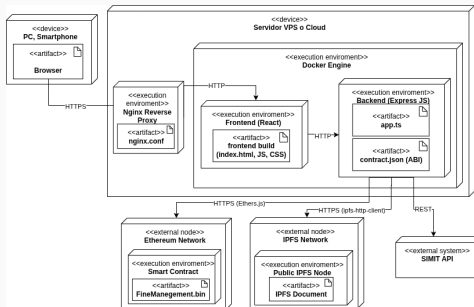
**Figura 3**  
*Proceso de apelación*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4

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
<b>Total</b>	<b>80</b>	<b>80/80</b>	<b>100 % cobertura funcional</b>

Fuente: Elaboración propia.

**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.

## Tiempos de respuesta medidos:

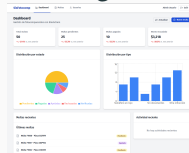
- Registro completo: < **3 segundos**
- Consulta de multa: < **1 segundo**
- Verificación de integridad: < **2 segundos**

## Criterios de éxito

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

**Figura 1**

*Dashboard del agente de tránsito*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2**

*Consulta y verificación ciudadana*



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).

# 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



**Tabla 1**

*Cumplimiento de objetivos específicos*

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

Fuente: Elaboración propia.

## Síntesis

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

## Trabajo futuro

---

## 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

- Antonopoulos, A. M., & Harding, D. A. (2023). *Mastering Bitcoin: Programming the Open Blockchain*. O'Reilly Media
- 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.].
- van Steen, M., & Tanenbaum, A. S. (2017). *Sistemas Distribuidos* (3.<sup>a</sup> ed.) [Traducción de Distributed Systems, 3rd edition]. distributed-systems.net. <https://www.distributed-systems.net/index.php/books/ds3/>
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.



# **Agradecimientos**

**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sistemas

**Director**

Julio Barón Velandia

¿Preguntas?

---