

Gestión inteligente del agua: Identificación de variables en el proceso de transformación digital

Andrés Felipe Calderón Ramírez

Laura Natalia Perilla Quintero

Ricardo Andrés Ayala Garzón

Santiago Amaya Zapata

Santiago Botero García

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

PRI2IS-1L: Proyecto Integrador 2 - Estrategia de operaciones y procesos

Cesar Rene Beltrán Sotelo

Septiembre 11, 2025

Resumen

Las entidades encargadas de la gestión de sistemas de acueducto y alcantarillado en regiones periféricas o en desarrollo enfrentan una creciente presión para modernizar su operación ante desafíos estructurales, tecnológicos y climáticos. Esta presión se intensifica por la ausencia de herramientas comerciales y operativas estándar, como sistemas SCADA, plataformas ERP o gestores CRM, lo que limita la visibilidad en tiempo real y la automatización de procesos.

Este informe presenta una identificación de las variables clave y los actores involucrados en la situación actual de estos operadores regionales, así como la construcción de bucles causales que explican las dinámicas principales que afectan su desempeño. Se abordan tanto los bucles reforzadores como los balanceadores que inciden en la toma de decisiones estratégicas bajo entornos de información fragmentada.

Enfoque de Solución: La transformación digital, basada en la implementación progresiva de sensores IoT, análisis de datos de bajo costo y sistemas unificados, se analiza como una respuesta integral a los problemas de pérdidas de agua (IPC), fragmentación operativa y desconfianza social.

El trabajo se apoya en herramientas de visualización como Lucidchart y Miro para representar gráficamente las interrelaciones sistémicas y los flujos de información necesarios para superar la brecha tecnológica actual.

Palabras clave: Transformación digital, gestión hídrica, sistemas complejos, bucles causales, sostenibilidad, IoT, eficiencia operativa, modelado sistémico.

Contenido

Resumen	2
Metodología	4
Análisis sistémico: mapa mental y bucles causales	5
Actores Internos:	5
Actores Externos	6
Relaciones de causalidad circular y análisis sistémico	17
El Arquetipo Sistémico: "Límites al Crecimiento"	20
Resultados	21
Conclusiones	24

Metodología

La gestión de los sistemas de acueducto y alcantarillado a nivel regional enfrenta el reto crítico de operar en entornos con infraestructuras altamente diversas y desarticuladas. Al carecer de sistemas unificados de control y gestión (como SCADA para la operación de la red, ERP para la administración de recursos o CRM para la atención al usuario), las organizaciones operan con sistemas locales u obsoletos. Esta falta de homogeneidad tecnológica e informática dificulta drásticamente la consolidación de datos y la toma de decisiones estratégicas, limitando la capacidad del operador para responder de manera eficiente a los problemas operativos y regulatorios, lo que a su vez frena su competitividad y eficiencia. El cambio climático ha intensificado estas dificultades operativas:

- Fenómenos extremos: Las sequías prolongadas, lluvias intensas e inundaciones ponen a prueba la fragilidad de las redes de agua existentes.
- Impacto financiero: Ante la falta de control automatizado, los operadores deben invertir en sistemas de emergencia manuales y racionamientos reactivos, lo que incrementa los costos operativos.
- Tensión social: La falta de herramientas digitales genera fricciones con los gobiernos locales y las comunidades. Los usuarios, habituados a la inmediatez de la era digital, demandan mayor transparencia e información en tiempo real sobre el consumo y la calidad del agua, lo que ante la ausencia de un CRM se traduce en un desbordamiento de reclamos y una progresiva pérdida de confianza.

Para resolver estas deficiencias sin la necesidad de desplegar costosas y complejas infraestructuras tradicionales de software cerrado, se propone una transformación digital adaptativa e integral. Esta estrategia se fundamenta en la implementación de sensores IoT de bajo

costo, plataformas de análisis en la nube e inteligencia artificial para detectar fugas y fraudes directamente desde el terreno.

El objetivo principal es saltar la brecha tecnológica actual para mejorar la eficiencia operativa, reducir de forma drástica las pérdidas de agua y aumentar la transparencia de cara a los usuarios y entes reguladores. Sin embargo, la adopción de este enfoque en regiones con baja digitalización enfrenta grandes desafíos culturales, regulatorios y operativos, lo que convierte la transición en un proceso complejo y de largo plazo.

Análisis sistémico: mapa mental y bucles causales

Con el propósito de mejorar la situación y encontrar soluciones a los desafíos planteados, se identificaron los actores internos y las dificultades que enfrentan dentro del sistema de gestión hídrica, utilizando un enfoque de pensamiento sistémico. Este análisis permitió detectar problemas clave como la falta de estandarización en los procesos financieros, las resistencias internas a la digitalización y la fragmentación tecnológica entre los diferentes distritos o zonas de operación. Estos factores limitan drásticamente la eficiencia operativa y la capacidad de tomar decisiones informadas y rápidas en ausencia de sistemas centralizados (ERP/SCADA/CRM).

Actores Internos:

1. Área de Administración y Finanzas

- **Problema:** Falta de homogeneidad en el sistema de facturación y recaudo (sin soporte de un ERP), lo que genera inconsistencias en los reportes financieros, retrasos en la contabilidad e incertidumbre en los flujos de caja.

2. Dirección / Gerencia General

- **Rol:** Impulsar la construcción de un ecosistema digital de gestión hídrica inteligente y de bajo costo.
- **Problema:** Resistencias culturales internas al cambio tecnológico y dificultades de negociación con las autoridades políticas y gobiernos locales, lo que complica la implementación de nuevos procesos.

3. Operadores de Planta y Red

- **Problema:** Ausencia de telemetría y datos en tiempo real (por falta de SCADA). Esto dificulta decisiones críticas en el terreno, tales como dosificar a ciegas los químicos para potabilizar el agua, definir qué válvulas cerrar manualmente en caso de fuga y priorizar la reparación de tuberías basándose únicamente en reportes visuales o reactivos.

4. Personal Técnico y de Cuadrilla

- **Problema:** Dispersión y disparidad de herramientas técnicas entre los diferentes distritos operativos, lo que genera un rendimiento laboral deficiente, procesos de inducción lentos y limita la rotación del personal, dificultando la transferencia de conocimiento y experiencia.

Actores Externos

Del mismo modo, se identificaron los actores externos que influyen en el rendimiento del servicio de agua. Utilizando el mismo enfoque sistémico, se comprendió cómo la infraestructura obsoleta, los efectos del cambio climático y las tensiones con las comunidades afectan la gestión de los recursos y la percepción del operador regional.

1. Gobiernos Locales y Entes Reguladores

- **Problema:** Infraestructura pública antigua y heterogénea, lo que complica la planeación estratégica y las inversiones a largo plazo.
- **Impacto crítico:** Pérdidas de Agua No Contabilizada (ANC) superiores al 40% debido a fugas invisibles, fraudes (conexiones ilegales) o errores crónicos de medición manual, lo que eleva los costos de producción y agota las fuentes hídricas.
- Las redes obsoletas implican gastos desproporcionados en mantenimiento correctivo y tratamientos de potabilización complejos.

2. Cambio Climático

- **Impacto:** Sequías prolongadas que secan las fuentes, así como inundaciones y lluvias intensas que colapsan los sistemas de alcantarillado combinados.
- **Solución:** Obliga a realizar maniobras de emergencia manuales y racionamientos críticos, incrementando los costos operativos y detonando tensiones inmediatas con la comunidad y las autoridades sectoriales.

3. Usuarios / Suscriptores

- **Problema:** Información asincrónica, tardía o errónea sobre su consumo real y la calidad del agua (debido a la falta de un CRM y de micromedición inteligente). Esto genera una acumulación de reclamos comerciales y una pérdida progresiva de confianza en el prestador del servicio.

4. Comunidades Locales

- **Problema:** Desconfianza generalizada en la capacidad de gestión del operador, lo que suele derivar en protestas, bloqueos y auditorías sociales ciudadanas que ponen en riesgo la continuidad del esquema de prestación del servicio.

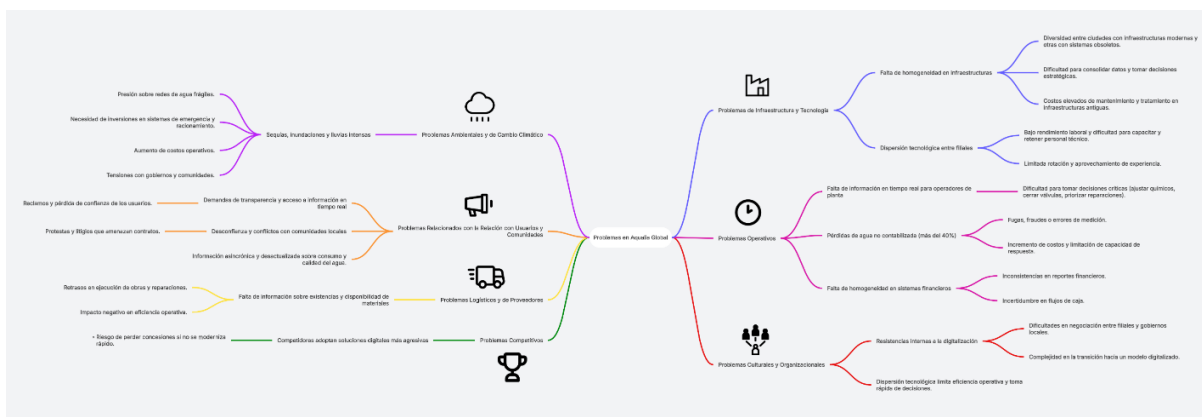
5. Proveedores de Insumos y Materiales

- **Problema:** La comparación con operadores de otras regiones que adoptan soluciones digitales ágiles ejerce presión política y social, amenazando con la intervención del servicio o la pérdida de la confianza pública si no se inicia una modernización urgente.

6. Indicadores de Referencia (Benchmarking) / Modelos Eficientes

- **Desafío:** Los competidores adoptan soluciones digitales más agresivas, lo que podría reducir las concesiones si no se moderniza rápidamente.

Dado el contexto descrito, se desarrolló un mapa mental para identificar y organizar los principales problemas que enfrenta la gestión del agua en su operación diaria. Este mapa facilita la comprensión integral de las dificultades internas y externas (Desde los cuellos de botella operativos y tecnológicos hasta las barreras culturales y ambientales), permitiendo un diagnóstico claro que sirva como base para diseñar estrategias de mejora adaptadas a entornos de baja digitalización.

Figura 1*Problemas en la Gestión Regional de Agua y Saneamiento: Clasificación y Detalles Específicos*

Nota. El mapa mental presenta una categorización de los principales problemas enfrentados en la prestación del servicio de acueducto y alcantarillado bajo entornos con baja digitalización (ausencia de SCADA, ERP y CRM). Incluye aspectos operativos, culturales, tecnológicos, ambientales, logísticos y de relación con usuarios o comunidades. Cada categoría está desglosada en problemas específicos y sus implicaciones para la sostenibilidad del recurso.

A partir de la identificación y organización de los problemas mediante el mapa mental, el siguiente paso consiste en desarrollar bucles causales que permitan analizar las interrelaciones y dinámicas internas entre los distintos factores operativos y administrativos. Estos bucles facilitarán la comprensión de cómo las deficiencias (Acentuadas por la falta de sistemas centralizados como SCADA, ERP o CRM) se refuerzan mutuamente o generan efectos secundarios. Esto proporciona una visión sistémica que es fundamental para diseñar intervenciones efectivas, viables y sostenibles en la gestión de los servicios de agua y saneamiento básico.

1. Bucle de homogeneidad tecnológica y eficiencia operativa (Refuerzo)

- (+) Infraestructura diversa y obsoleta → (+) Dificultad para consolidar datos → (-) Toma de decisiones estratégicas → (-) eficiencia operativa → (+) dificultad para invertir en modernización (+) → (+) infraestructura diversa y obsoleta.

2. Bucle de transformación digital y resistencia interna (Balance)

- (+) Transformación digital → (+) resistencia interna → (+) retraso en adopción → (-) eficiencia operativa → (+) transformación digital.

3. Bucle de información en tiempo real y toma de decisiones críticas (Refuerzo)

- (-) Información en tiempo real → (+) decisiones deficientes → (+) pérdidas y fallos → (-) información en tiempo real.

4. Bucle de dispersión tecnológica y rotación de personal (Refuerzo)

- (+) Dispersión tecnológica → (-) rendimiento y capacitación → (+) rotación y poca experiencia → (+) dispersión tecnológica.

5. Bucle de cambio climático y costos operativos (Balance)

- (+) Impacto cambio climático → (+) inversiones en sistemas de emergencia → (+) costos operativos → (-) presión sobre recursos → (+) dificultad para mantener infraestructuras → (+) impacto cambio climático.

6. Bucle de transparencia, confianza y reclamos (Balance)

- (-) Transparencia → (+) reclamos → (+) presión por transparencia → (-) inversión en sistemas de monitoreo → (-) transparencia.

7. Bucle de pérdidas de agua y capacidad de respuesta (Refuerzo)

- (+) Pérdidas de agua → (+) costos → (-) capacidad de respuesta → (-) inversión en mantenimiento → (+) pérdidas de agua.

8. Bucle de resistencias internas y dificultades de negociación (Balance)

- (+) Resistencia interna → (-) negociación → (-) implementación → (+) resistencia interna.

9. Bucle de competencia y modernización (Refuerzo)

- (+) Competidores adoptan tecnología → (+) presión para modernizar → (+) inversión en tecnología → (+) competitividad → (+) riesgo concesiones → (+) ajustes estratégicos → (+) competidores adoptan tecnología.

10. Bucle de disponibilidad de materiales y eficiencia en reparaciones (Refuerzo)

- (-) Información inventarios → (-) obras → (-) eficiencia → (+) necesidad de reparaciones → (+) demanda inventarios → (-) información inventarios.

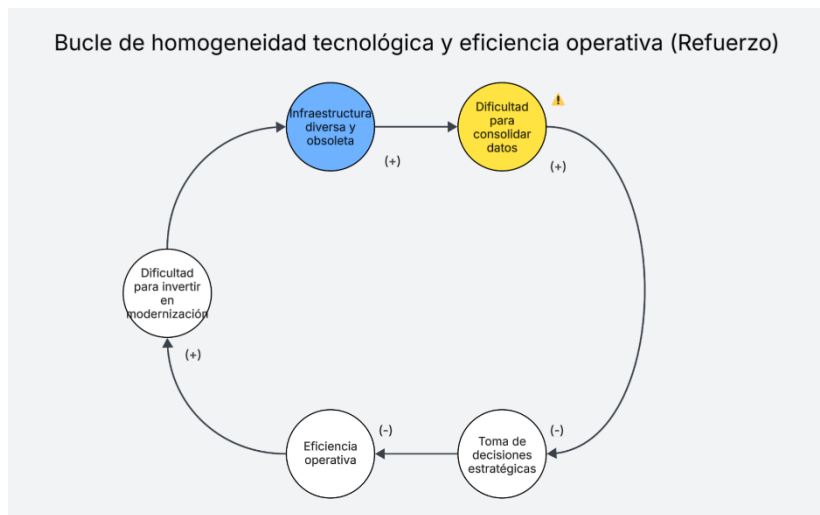
11. Bucle de tensión con comunidades y contratos de concesión (Balance)

- (+) Protestas y litigios → (+) riesgo contratos concesión → (+) presión para mejorar reputación → (-) inversión en transparencia → (+) protestas y litigios.

Con base en el análisis de los bucles causales identificados, se diseñaron diagramas sencillos que permiten representar visualmente las relaciones y dinámicas internas entre los diferentes factores que afectan la operación y gestión del servicio de agua y saneamiento. Estos diagramas facilitan la comprensión de cómo los problemas se interconectan y refuerzan mutuamente, proporcionando una herramienta clara para la toma de decisiones y el diseño de estrategias orientadas a mejorar la eficiencia, transparencia y adaptabilidad del sistema hídrico.

Figura 2

Bucle de homogeneidad tecnológica y eficiencia operativa (Refuerzo)

**Figura 3**

Bucle de transformación digital y resistencia interna (Balance)

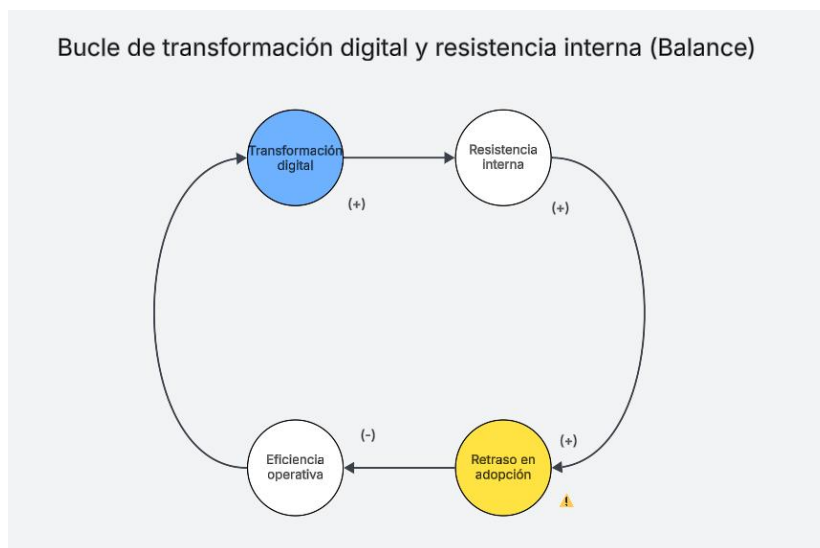


Figura 4

Bucle de información en tiempo real y toma de decisiones críticas (Refuerzo)

**Figura 5**

Bucle de dispersión tecnológica y rotación de personal (Refuerzo)

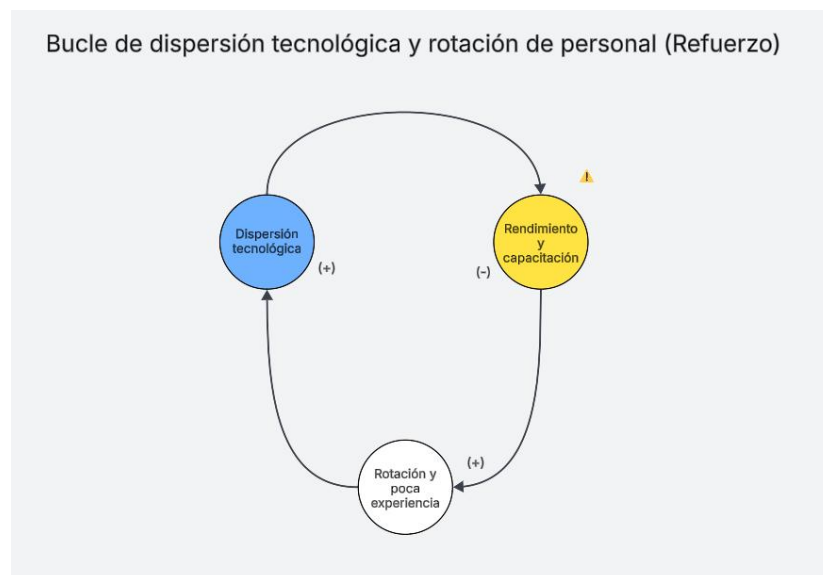
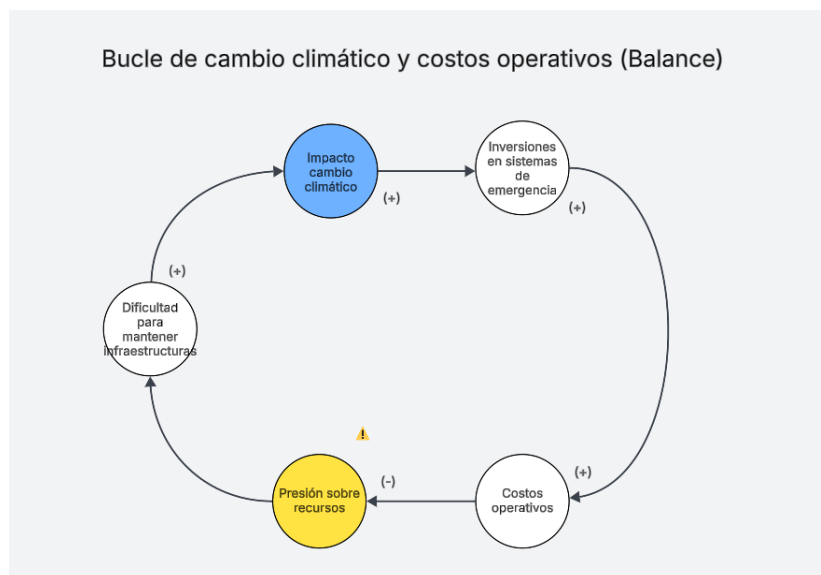


Figura 6

Bucle de cambio climático y costos operativos (Balance)

**Figura 7**

Bucle de transparencia, confianza y reclamos (Balance)

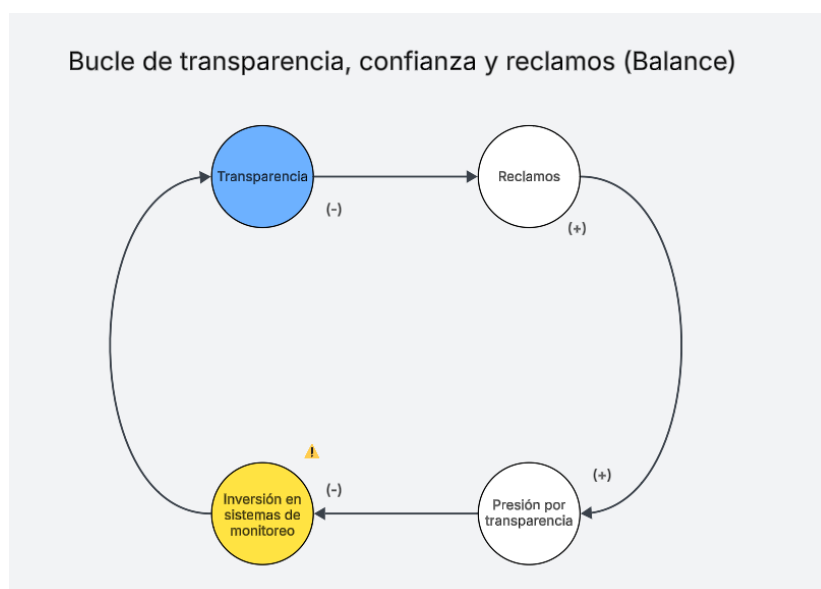
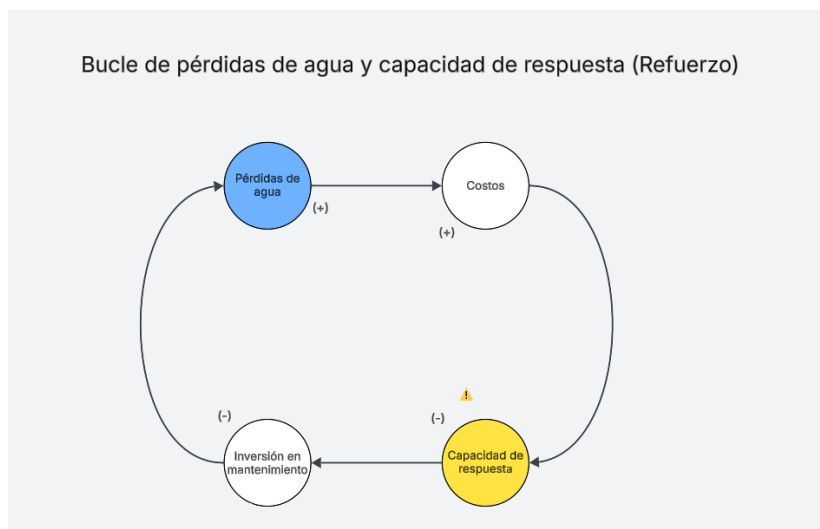


Figura 8

Bucle de pérdidas de agua y capacidad de respuesta (Refuerzo)

**Figura 9**

Bucle de resistencias internas y dificultades de negociación (Balance)

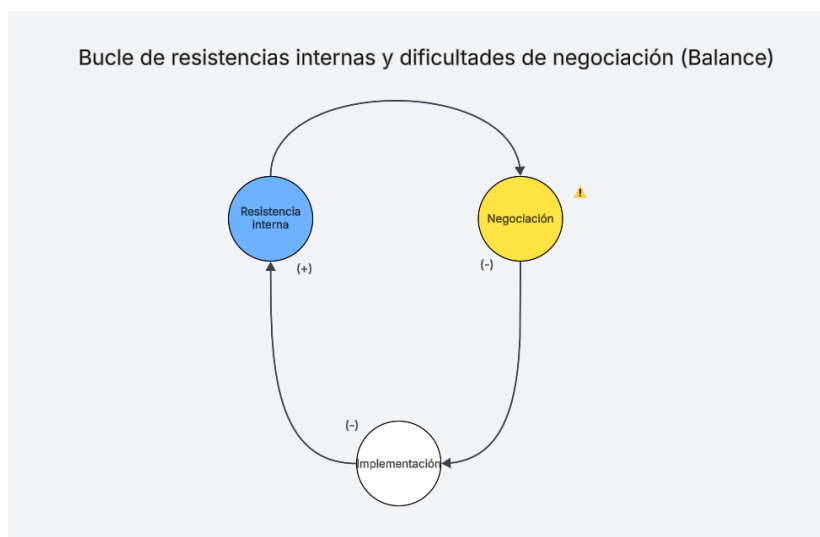
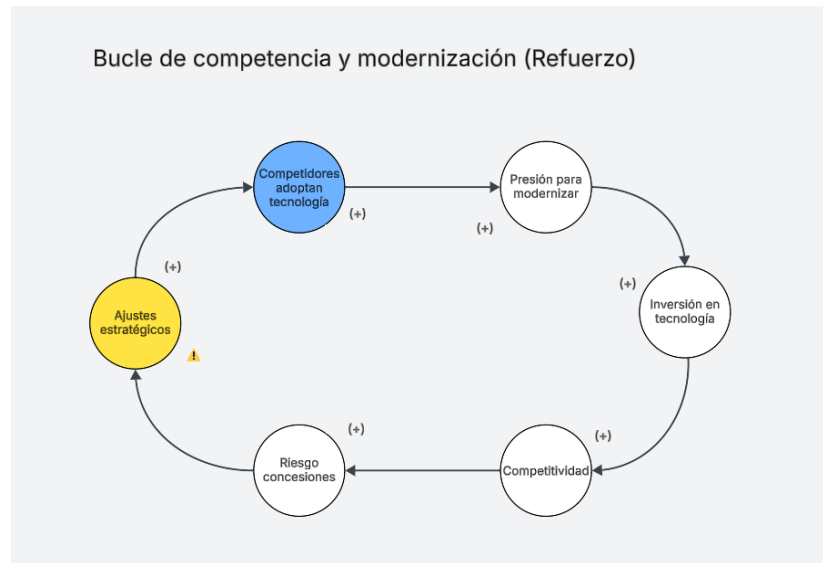


Figura 10

Bucle de competencia y modernización (Refuerzo)

**Figura 11**

Bucle de disponibilidad de materiales y eficiencia en reparaciones (Refuerzo)

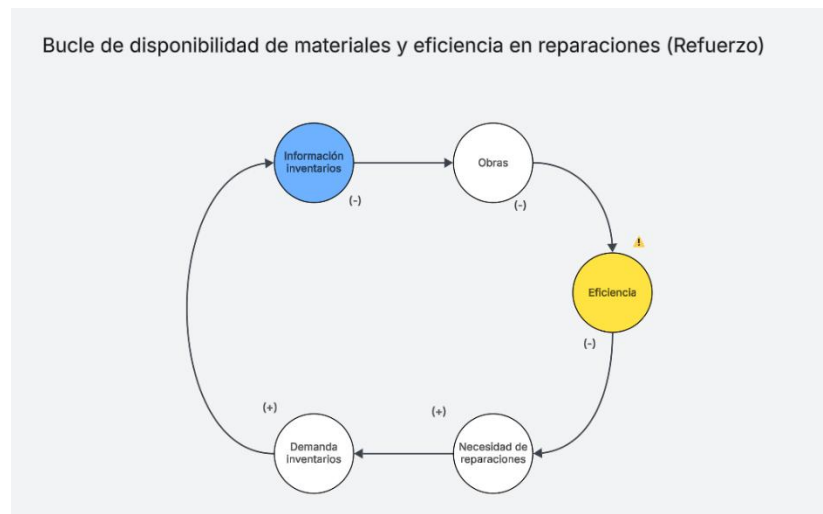
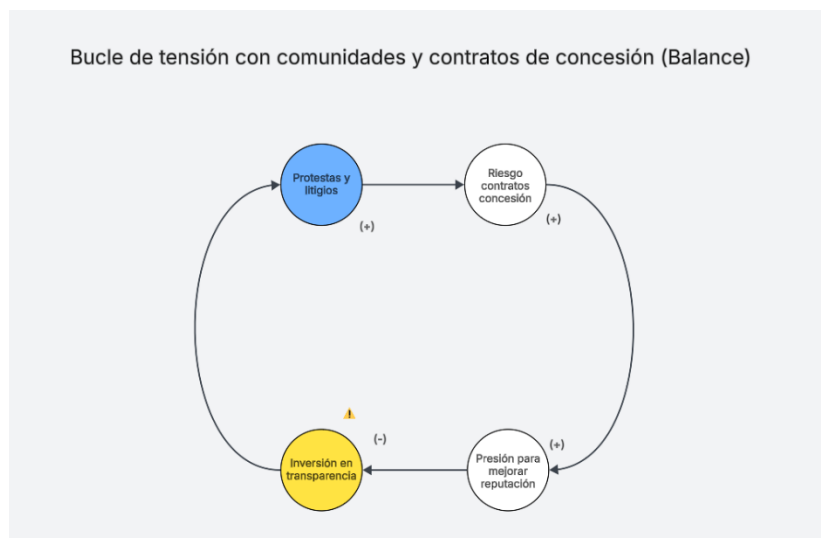


Figura 12

Bucle de tensión con comunidades y contratos de concesión (Balance)



Relaciones de causalidad circular y análisis sistémico

Para profundizar en la comprensión del entorno que rodea a la gestión del acueducto y alcantarillado en contextos con baja digitalización, se construye un mapa de sistema inicial que refleja las variables y actores principales de la operación. Sobre esta base, se identifica un arquetipo sistémico que caracteriza la naturaleza de las dinámicas e ineficiencias internas, y se determina al menos un punto de apalancamiento clave que pueda ser utilizado para mejorar la gestión, el control de pérdidas y la operación en el mediano y largo plazo.

- **Dificultad para consolidar datos:** Originada por la heterogeneidad de la infraestructura física y la ausencia de un ERP o sistema comercial centralizado, lo que restringe la capacidad de generar información unificada para la toma de decisiones.
- **Retrasos en la adopción de la transformación digital:** Asociados a la resistencia interna del personal operativo y a la falta de alineación en los procesos de cambio, lo que ralentiza la modernización tecnológica de base.
- **Decisiones operativas deficientes:** Producto de la falta de información en tiempo real (por la ausencia de telemetría o SCADA) y de la limitada integración entre el área técnica y la administrativa, lo cual incrementa la exposición a pérdidas de agua y fallos en la red.
- **Falta de rendimiento y capacitación del personal:** Consecuencia de la dispersión de herramientas manuales y la rotación de empleados de cuadrilla, lo que debilita las competencias organizacionales y la continuidad operativa.
- **Ausencia de presión efectiva sobre los recursos hídricos:** Lo que reduce la capacidad de priorizar inversiones preventivas y gestionar adecuadamente los impactos del cambio climático en las fuentes de abastecimiento.
- **Carencia de inversión en sistemas de monitoreo y micromedición:** Lo cual restringe la transparencia en los cobros y limita la confianza de las comunidades y los entes reguladores al no contar con datos claros de consumo.
- **Débil capacidad de respuesta frente a emergencias y fallos:** Derivada del aumento crónico en las pérdidas de agua no contabilizada y de la falta de inversión en mantenimiento preventivo oportuno.

- **Escasa capacidad de consenso interno:** Que obstaculiza la implementación de proyectos estratégicos en los diferentes distritos hídricos y refuerza el apego a los métodos de trabajo tradicionales.
- **Exceso de ajustes estratégicos de corto plazo:** Resultado de la presión regulatoria y las quejas comunitarias directas (ante la falta de un CRM para canalizarlas), lo que genera un entorno de planeación reactivo y de difícil sostenibilidad.
- **Disminución sostenida de la eficiencia operativa:** Que se presenta como un efecto transversal de la fragmentación tecnológica, los retrasos digitales y las decisiones tomadas a ciegas en el terreno.
- **Poca inversión en transparencia informativa:** Lo cual incrementa los reclamos ciudadanos debido a la asincronía en los datos de facturación y debilita la reputación del operador ante la opinión pública.

El Arquetipo Sistémico: "Límites al Crecimiento"

El arquetipo que mejor describe la dinámica de estos operadores regionales es el de "Límites al crecimiento".

Esfuerzos de Modernización

→ Eficiencia Operativa Frenado por → Límites Estructurales y Culturales

Inicialmente, las iniciativas locales de modernización tecnológica y digitalización básica (como la introducción de sensores IoT aislados) generan un efecto positivo inmediato en la eficiencia operativa y en la percepción del servicio. Sin embargo, este crecimiento y mejora se ven frenados en seco por restricciones estructurales preexistentes:

1. La infraestructura de tuberías y plantas totalmente obsoleta.
2. La dispersión y desconexión total de datos entre las zonas de operación.
3. Los altos costos energéticos de bombeo manual.
4. La resistencia cultural del personal habituado a operar los sistemas de forma analógica.

Estas limitaciones actúan como fuerzas de balance que reducen drásticamente el impacto de los esfuerzos de modernización y, a largo plazo, estancan la capacidad del operador para sostener mejoras continuas en el suministro de agua.

El reconocimiento de este arquetipo resulta fundamental, ya que señala que el éxito de la transformación hídrica no depende únicamente de adquirir dispositivos tecnológicos o sensores, sino de la capacidad estratégica del operador para superar de forma simultánea sus limitaciones estructurales y culturales de base.

Resultados

El análisis sistémico realizado sobre la gestión hídrica regional permitió comprender las dinámicas internas y externas que limitan la sostenibilidad, eficiencia y capacidad de respuesta de los operadores frente a los retos ambientales y regulatorios. A través del uso de mapas mentales, bucles causales y diagramas de retroalimentación, se logró identificar las principales variables críticas que afectan la prestación del servicio y los puntos de apalancamiento sobre los cuales es posible intervenir estratégicamente en entornos de baja digitalización.

En primer lugar, los bucles causales evidenciaron cómo la infraestructura obsoleta y heterogénea, combinada con la ausencia de sistemas centralizados de información, la resistencia interna a la transformación digital y la fragmentación operativa, refuerzan dinámicas que

disminuyen la eficiencia y dificultan la toma de decisiones estratégicas. De igual forma, se observó el impacto de los siguientes factores:

- **Vulnerabilidad climática:** Los efectos del cambio climático incrementan los costos operativos debido a maniobras manuales de emergencia, generando tensiones directas con comunidades y gobiernos locales.
- **Presión por transparencia:** La demanda social de información añade una presión crítica; ante la falta de datos en tiempo real (por la carencia de SCADA) y la inexistencia de canales automatizados de atención (por la falta de un CRM), se alimentan los reclamos ciudadanos y se debilita la confianza pública en el operador.

El estudio también permitió consolidar un conjunto de puntos de apalancamiento clave, considerados como nodos críticos donde convergen múltiples bucles de retroalimentación:

- **Dificultad para consolidar datos** por la heterogeneidad de la infraestructura física y la falta de un ERP base.
- **Retrasos en la adopción de la transformación digital** debido a resistencias culturales y organizativas del personal habituado a esquemas analógicos.
- **Decisiones operativas deficientes**, consecuencia directa de la falta de información y telemetría en tiempo real.
- **Falta de rendimiento y capacitación** del personal técnico ante la disparidad de herramientas en el terreno.
- **Ausencia de presión efectiva sobre los recursos**, lo que limita la priorización de inversiones preventivas.

- **Carencia de inversión en sistemas de monitoreo** y micromedición para una facturación justa.
- **Débil capacidad de respuesta** frente a emergencias, fugas masivas y fallos en la red.
- **Escasa capacidad de consenso y negociación** institucional para implementar cambios estructurales.
- **Exceso de ajustes estratégicos de corto plazo** que generan un entorno de planeación puramente reactivo.
- **Disminución sostenida de la eficiencia operativa** como un efecto transversal de la brecha tecnológica.
- **Poca inversión en transparencia informativa**, lo que incrementa los reclamos y reduce la legitimidad social.

En conjunto, estos resultados muestran que los desafíos de la gestión del agua no se reducen exclusivamente a la dimensión tecnológica, sino que incluyen factores culturales, regulatorios, financieros y organizativos. El sistema de prestación se encuentra atrapado en un arquetipo de "Límites al crecimiento", donde los esfuerzos iniciales de modernización (como la instalación de sensores IoT aislados) mejoran temporalmente la eficiencia, pero pronto se ven restringidos por las limitaciones estructurales de la red, los altos costos de mantenimiento correctivo y la resistencia cultural interna.

El reconocimiento de este arquetipo constituye el hallazgo central de la investigación. La clave del éxito para estos operadores no radica únicamente en adquirir tecnología o software costoso, sino en gestionar simultáneamente las resistencias operativas, fortalecer las competencias

técnicas del personal de cuadrilla, automatizar la transparencia de cara al usuario y rediseñar los procesos de gobernanza local. De esta manera, se podrá sostener a largo plazo una transformación digital adaptativa, resiliente, eficiente y socialmente legítima.

Conclusiones

La realización de estos laboratorios permitió obtener un mayor entendimiento de las funcionalidades internas de la gestión hídrica regional, así como identificar de manera más clara los problemas presentes en la operación y analizar cómo estos pueden agravarse si no se gestionan adecuadamente bajo un enfoque técnico y administrativo integrado.

Durante la construcción del mapa sistémico surgieron algunas dificultades, principalmente en la integración y conexión de los diferentes bucles causales, ya que representar de forma clara y comprensible la dinámica de un sistema que opera sin datos centralizados (ausencia de SCADA, ERP y CRM) resultó un reto metodológico complejo.

No obstante, el ejercicio evidenció el valor del pensamiento sistémico al mostrar cómo organizar la información de manera estructurada permite identificar los puntos críticos del operador de agua. Asimismo, se comprendió que las deficiencias existentes dentro del sistema técnico y comercial pueden convertirse en oportunidades de mejora (Mediante una transición digital gradual y de bajo costo) si se gestionan adecuadamente, pero también en factores de riesgo que impactan de forma negativa a la continuidad del servicio y a la comunidad si se descuidan.