

## Modelo de gestión de activos para empresas de infraestructuras hídricas

Pablo Aparicio-Ruiz, Luis Onieva, Jesús Muñuzuri, Cristóbal Ramos-Salgado

Recibido: 30 de Noviembre de 2021

Aceptado: 2 de Febrero de 2022

<https://doi.org/10.37610/dyo.v77i0.621>

### Resumen

La gestión de los activos y su renovación generalmente se planifican a nivel anual y operativo. Sin embargo, a nivel estratégico y táctico, las empresas de infraestructuras buscan modelos de gestión que permitan analizar sus activos, su evolución y la detección de aquéllos que deben ser renovados e incorporados antes en las planificaciones a medio y largo plazo. Además, es necesario definir el esfuerzo financiero y su aplicación temporal. Dicho esfuerzo debe permitir que la cartera de activos que conforman la red hídrica esté alineada con los objetivos de gestión de activos de la organización. El seguimiento de los objetivos, entre ellos el mantenimiento sostenible de la infraestructura de red, se puede desarrollar en base a indicadores de gestión que faciliten su renovación. Los indicadores permiten analizar el estado o fortaleza de la organización y constituyen un factor de oportunidad para mejorar la eficiencia en la administración de los activos cuando se combinan las estrategias financieras y las no financieras.

### Palabras clave

Gestión de activos, gestión del agua, redes hidráulicas, modelo de gestión, infraestructuras de aguas

## 1. Introducción

Las infraestructuras de aguas son un servicio público, estratégico y básico que requiere de importantes inversiones en activos. Si bien, se espera que el servicio de abastecimiento y saneamiento de nuestras ciudades funcione correctamente, y se mantenga en buen estado durante su vida útil. La realidad es que la inversión pública es menor de la necesaria. Si bien, en ocasiones, este empeoramiento se debe a la falta de inversión, en otras se debe a la falta de un criterio técnico frente a otros intereses.

La aplicación de criterios técnicos en la gestión del reparto de dicha inversión en base a un análisis coste-beneficio permitiría alcanzar la sostenibilidad económica del sector. Por otra parte, el modelo de gestión debe buscar la autosuficiencia financiera, que requiere que las tarifas de agua reflejen fielmente los costes reales en los que incurrirá el sistema. El artículo 9 de la Directiva Marco del Agua (Unión Europea 2000) invita a efectuar los cálculos pertinentes o

necesarios para tener en cuenta el principio de recuperación de los costes tomando en consideración los pronósticos a largo plazo del servicio (incluida la financiación de medidas preventivas o correctivas) y la inversión (incluida la renovación de infraestructuras).

Definir dichos criterios permite una priorización consistente de la inversión, y, por tanto, una visión objetiva para el consenso en la decisión entre los distintos departamentos o áreas de la organización, que de forma objetiva reflejen las prioridades y el riesgo (aspectos no financieros) junto con la capacidad de inversión en la renovación de los activos (aspecto financiero).

Financiar el reemplazo de las infraestructuras que pronto fallarán es un problema generalizado en diversos países. En 2001 la asociación estadounidense de obras hidráulicas (AWWA) decía “Estamos en los albores de la era del reemplazo ... habrá un conflicto creciente entre la necesidad de reemplazar la infraestructura desgastada y la necesidad de invertir en el cumplimiento de los nuevos estándares regulatorios” (American Water Works Association 2001).

Siendo el agua un recurso básico para el desarrollo, el consumidor de estos servicios es muy exigente, y, por tanto, las empresas de gestión de aguas son muy reacias al riesgo, especialmente en el caso del abastecimiento. Para éstas, la gestión y mantenimiento de sus activos se convierte en una decisión estratégica en presencia de incertidumbre. El análisis de datos de la red hídrica junto con un correcto mantenimiento de la información del estado de la red se convierte en una herramienta fundamental para mejorar la toma de decisiones que conforman la estrategia de planificación de inversiones que ayuda a garantizar la sostenibilidad de dichas infraestructuras.



Pablo Aparicio-Ruiz (1)  
[pabloaparicio@us.es](mailto:pabloaparicio@us.es)

Luis Onieva (1)  
[onieva@us.es](mailto:onieva@us.es)

Jesús Muñuzuri (1)  
[munuzuri@us.es](mailto:munuzuri@us.es)

Cristóbal Ramos-Salgado (1)  
[cramos7@us.es](mailto:cramos7@us.es)

(1) Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n 41092

La gestión sostenible de la infraestructura de la red de agua potable y alcantarillado afecta a múltiples departamentos que gestionan los aspectos administrativos, financieros y operativos que involucran a ingenieros, arquitectos, economistas y sus diversos perfiles técnicos. Si bien la gestión de los activos está delimitada por los recursos financieros disponibles, el sistema debe orientarse a mantener unos niveles de calidad exigidos que la organización debe definir. Los gestores de estos activos deben ser expertos en i) el análisis financiero de la infraestructura construida en distintos horizontes temporales de estudio (corto, medio y largo plazo); y 2) en otras variables implicadas, de carácter no financiero, cuyo comportamiento se debe analizar a través de indicadores. Por ejemplo, indicadores que definan la calidad, nivel de servicio u otros aspectos considerados clave en el cumplimiento del plan estratégico de la organización. Estos indicadores permiten representar en el modelo la estructura multidisciplinar de la organización.

En estas empresas, el presupuesto anual está diseñado para planificar los gastos en base a diversos presupuestos. Hay dos capítulos fundamentales, el presupuesto dedicado a la obsolescencia de la red, y el presupuesto dedicado a la conservación de la red actual. A nivel de decisión, ambos capítulos están vinculados, un elemento de la red puede ser sustituido por su estado de conservación, o por pertenecer a tramos de la red más amplios que deben ser repuestos por obsolescencia. En algunas organizaciones, ambos presupuestos se encuentran separados, aunque conforman gran parte de las órdenes de trabajo y construcción de la red de forma conjunta. Independiente a estos presupuestos más generales, existen otros presupuestos o dotaciones financieras que se dedican a infraestructuras ya sean especiales o estratégicas, que deben ser tenidos en cuenta en el modelo.

El valor de la red de aguas se deprecia continuamente al igual que el estado de los materiales. El primero está justificado por la vida útil esperada, y el segundo dependerá del mantenimiento planificado.

Los gestores necesitan una herramienta que les permita evaluar y planificar las necesidades de actuación sobre los activos en base a métricas establecidas para las dimensiones de rendimiento, coste y riesgo (Cardoso, Santos Silva, et al. 2012). Esto implica la búsqueda de un criterio técnico que permita evaluar la edad y el deterioro potencial de la infraestructura, el cual debe ser combinado con un criterio económico que armonice las decisiones de aplicación de órdenes de trabajo y reemplazamiento de redes de aguas por su obsolescencia de forma programada.

El crecimiento de las ciudades no tiene un patrón constante y homogéneo. En muchos casos se produjeron con las consecuentes inversiones en la red. Sin embargo, el presupuesto para la red obsoleta es más homogéneo y necesita una previsión a largo plazo que permita la

renovación de aquellos tramos que están llegando al final de su vida útil o tienen una cantidad excesiva de acciones correctivas o reparaciones. Normalmente se calcula en base a un presupuesto que debe hacer frente a la amortización real de esos activos.

Por supuesto, se puede mejorar el estado de la red mediante un correcto seguimiento de los programas de mantenimiento centrados en el análisis predictivo, ya sea basado en análisis estadísticos, probabilísticos o en la inteligencia artificial (Amaitik & Buckingham 2018; Robles-Velasco et al. 2020) o aprendizaje automático (Robles-Velasco et al. 2021). Además, el seguimiento se puede gestionar a través de un actualizado análisis del estado de la red, que puede realizarse de forma más eficiente con robots (Andrade-Pineda et al. 2019), que permitiría mejorar el mantenimiento.

Las herramientas de gestión de activos pueden ayudar a la identificación de escenarios futuros, a través del modelado de situaciones que permitan detectar necesidades, riesgos y vulnerabilidades en los planes de inversión. A continuación, se presentan algunos de los criterios y elementos a tener en cuenta en la gestión de estos activos, que se pueden analizar en el desarrollo de un modelo de gestión.

Este trabajo está organizado de la siguiente forma. El segundo apartado describe los elementos de decisión que pueden ser incorporados al modelo de gestión. En el tercer apartado se presenta el modelo que describe las fases del proceso de toma de decisiones. A continuación, se realiza la discusión de los resultados y, finalmente, se exponen las principales conclusiones obtenidas.

## 2. Elementos de decisión

Siguiendo los planteamientos de la norma ISO 55000 (ISO-55000 2014), la gestión de activos involucra el balance de los costes, oportunidades y riesgos que desempeñan estos activos en los objetivos de la organización. Para conseguir dicho balance se requiere de una alineación de diferentes elementos de influencia en la gestión.

Siguiendo el mapa conceptual que desarrolla el Instituto de Gestión de Activos (The Institute of Asset Management, Reino Unido), la gestión de los activos se desarrolla desde tres perspectivas: a) la financiera, basada en la evaluación del coste-efectividad del activo, b) la perspectiva del rendimiento, representada por la eficiencia del activo, y c) la perspectiva de riesgo, basada en la seguridad, fiabilidad, disponibilidad y sostenibilidad.

Siendo conscientes de este modelo conceptual y general de gestión de activos, que se presenta en la Figura 1, en este artículo se ha tratado de desarrollar un modelo de gestión de la priorización de las inversiones.

**Figura 1** Mapa conceptual de gestión de activos modificado (basado en The Institute of Asset Management).



A la hora de desarrollar la planificación de la gestión de los activos, en este caso las tuberías que forman la red de aguas, se debe tener en cuenta que el plan estratégico de la empresa está influenciado por: a) sus clientes, que esperan un funcionamiento correcto y un buen estado de la vida útil de la red, b) la legislación, que fuerza a la adaptación en la renovación de los materiales y normativas, y, c) los inversores, que requieren de transparencia y rentabilidad del desarrollo de la gestión de los activos. Sin perder de vista que existen limitaciones de recursos y que las personas que intervienen son de distintos departamentos y perfiles técnicos. Además, en la toma de decisiones se deben contemplar los riesgos asociados, que vienen especialmente representados por la depreciación de la red y el empeoramiento del estado de los materiales.

De esta forma, para poder tomar una decisión sobre los activos se requiere un correcto mantenimiento de la información. Los sistemas de información constituyen la base del modelo (el conocimiento del activo). Estos sistemas permiten el desarrollo constante de un análisis de datos regido por el seguimiento de métricas que conforman las tres perspectivas, principalmente el rendimiento, los costes y los riesgos. Para poder desarrollar dicho análisis, junto a los criterios técnicos, se deben desarrollar herramientas de inteligencia artificial y “machine learning” que permitirían tomar la decisión sobre los activos. A continuación, se detallan los elementos de decisión.

## 2.1. Riesgo y nivel de servicio

Las empresas de gestión de aguas son muy reacias al riesgo debido a la necesidad y urgencia del recurso con el

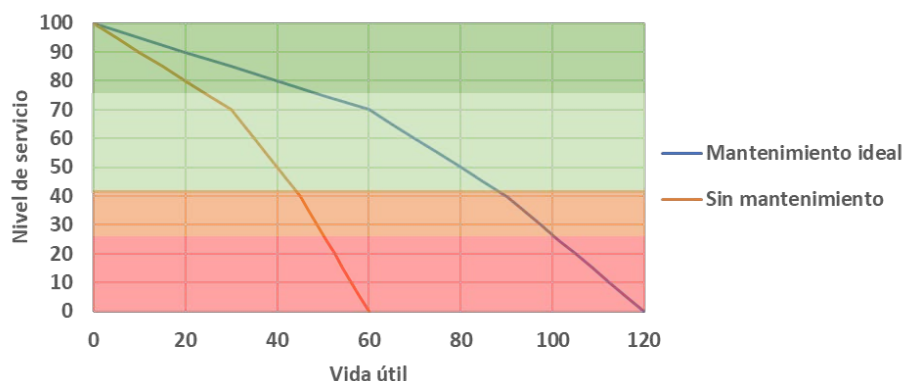
que trabajan. La depreciación de la red y el empeoramiento del estado de los materiales requiere de una gestión del riesgo que pretende evitar que las infraestructuras fallen. El riesgo de una rotura supondría averías en las infraestructuras anexas, daños en las propiedades anexas (privadas y públicas), daños medioambientales e incluso de salud pública.

El principal beneficio de una buena gestión de infraestructuras se encuentra en la reducción de los riesgos o mejora de la fiabilidad del sistema, que repercute en una reducción en los gastos de mantenimiento y en la mejora de la seguridad. Se espera que la correcta elección de la inversión en infraestructuras genere ahorros a largo plazo.

La elección de los materiales involucrados en la decisión, por tanto, puede minimizar el coste operativo a largo plazo y, por otra parte, el mantenimiento puede alargar la vida útil de estos activos. La terotecnología es por tanto una línea estratégica para el futuro de estas decisiones.

Con el objetivo de conocer en qué momento se debe renovar un activo se analiza su rendimiento. Un ejemplo es el nivel de servicio, que es un indicador utilizado para compendiar el estado de funcionamiento de un elemento de la red a partir de una curva que representa su grado de deterioro. A partir de ella se puede estimar la vida restante del activo, que se encuentra entre una situación sin mantenimiento y una situación ideal o teórica. La situación ideal se corresponde usualmente con la vida esperada del activo en el momento de su adquisición. Véase la Figura 2.

**Figura 2** Nivel de servicio frente a la vida útil (elaboración propia).



Las compañías de aguas están haciendo un gran esfuerzo para planificar de la mejor manera posible los reemplazos anuales de tuberías, en base a la probabilidad de fallo y sus consecuencias. En (Robles-Velasco et al. 2020) se estimó para un caso de estudio, que alrededor del 30% de los fallos podrían haberse evitado reemplazando solo el 3% de las tuberías de la red por año. La combinación de las técnicas de predicción con el resto de los elementos del modelo que se presenta supondría un ahorro en costes, que permitiría una mayor calidad de servicio y una gestión más sostenible de la infraestructura.

El proceso de toma de decisiones en la gestión de activos requiere considerar una estrategia de gestión del riesgo. El riesgo puede ser definido por un conjunto de criterios. Para incorporar estos criterios que in-teraccionan en la decisión se pueden aplicar técnicas multicriterio que permiten ponderar los criterios que deben ser tenidos en cuenta. La aplicación de estas técnicas permite integrar tanto el conocimiento científico como el conocimiento experto en el proceso de decisión a la hora de elegir los activos que deben ser reemplazados en base al riesgo. En (Salehi et al. 2018) se detalla una revisión de los modelos desde 1996 a 2016, y de los criterios utilizados en dichos modelos.

## 2.2. Marco regulador

La Directiva Marco del Agua (Unión Europea 2000), junto a los marcos de regulación nacionales (RD 140/2003) e internacionales tienen una gran influencia en la sustitución de las conducciones de agua, en base a las características técnicas que se establecen, por estar referidos a los productos de construcción en contacto con el agua de consumo humano y los vertidos contaminantes a los cauces. Si bien sus cambios se reflejan a largo plazo y pueden motivar el cambio más urgente de unos elementos de la red frente a otros. Por ejemplo, en 1999 se decidió en la Unión Europea la eliminación del fibrocemento (UE 99/77/CE). Por tanto, los marcos regulatorios pueden forzar adelantar la renovación de la red dependiendo de los materiales o las normativas de construcción.

## 2.3. Marco financiador

El libro verde de la gobernanza del agua en España (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico 2020) destaca que el envejecimiento de las infraestructuras se está convirtiendo, en la mayoría de los países ricos, en una de las principales amenazas para la sostenibilidad de los servicios.

El estudio destaca que estas circunstancias exigen un replanteamiento de los mecanismos de financiación de las infraestructuras hacia un futuro de mayor eficiencia. Se destaca que, en la actualidad, existe un déficit de inversión en mantenimiento y renovación.

La diversidad de estructuras de estas compañías (pequeñas, agrupadas en mancomunidades, metropolitanas, etc.) junto a su carácter privado o público, permiten definir diversos marcos de financiación. Así, en la decisión del reparto de la inversión pueden existir limitaciones o restricciones justificadas en base a términos poblacionales, a la inversión municipal, al tamaño y la tipología de la red, etc. En cualquier caso, la inversión está delimitada a un conjunto de zonas o áreas de decisión e influencia y con unos criterios y restricciones que suelen empobrecer la calidad de la solución final elegida.

## 2.4. Orientación de la maximización de los activos

Uno de los retos de los proveedores de servicio de aguas es maximizar el valor de los activos existentes (OECD 2016). Para poder orientar la decisión es necesario registrar y conocer los datos de actuaciones internas y externas a la empresa en el entorno de la red. Las actuaciones internas están influenciadas, por ejemplo, por el valor de la demanda o el caudal de evacuación. Las actuaciones externas se refieren, por ejemplo, a obras que otros servicios realizan en los acerados o las vías por las que generalmente discurre la red de aguas.

Si bien existen elementos difíciles de prever, por depender de decisiones empresariales o privadas ajenas a la empresa, es importante evitar duplicidades de gestión. Resulta conveniente identificar aquellas inversiones que serán acometidas o financiadas por organismos externos tanto públicos como privados (por ejemplo: CC.AA., mancomunidades, diputaciones, urbanizaciones privadas, etc.).

En cualquier caso, las mejoras y actuaciones repercutirán en el estado de la red y en la solvencia de los operadores en base a una buena gestión de la demanda y en unos niveles aceptables de servicio y riesgo. Por otra parte, el gestor debe identificar infraestructuras estratégicas (industriales, grandes centros laborales, comerciales o de ocio) y críticas (hospitales y otras reguladas como tales) cuya gestión requiere un especial tratamiento en la renovación de los activos.

Una parte de los ingresos de las compañías de agua provienen de las tarifas de los servicios de agua. La decisión de gestión debe buscar una redistribución de las tarifas que permita la sostenibilidad económica de la red y la universalidad del bien que debe tener una tarifa basada en la asequibilidad y equidad social. Por otra parte, los activos de la red no pueden ser tratados de forma individual, por lo que el enfoque clásico del ciclo de vida no es directamente aplicable (Alegre et al. 2014), teniendo que ser analizados (los activos) en su conjunto.

El proceso de optimización de los activos conlleva la utilización de indicadores (KPI), que la empresa gestora del activo deberá definir. Según (Cardoso et al. 2012) el sistema se evalúa utilizando las métricas establecidas para las dimensiones de rendimiento, coste y riesgo sobre un horizonte temporal. Así, los KPI conforman el marco de evaluación de la estrategia definida por la organización para alcanzar sus objetivos que generalmente se reflejan en su visión y misión.

La evaluación del servicio que se quiere optimizar no se debe reducir a un único indicador o a una serie universal de indicadores de desempeño. En la norma ISO 24512 (ISO 2007) se presentan algunos ejemplos de estos indicadores, como la ineficiencia en el uso o la disponibilidad del recurso hídrico. En la sección 4 se abordarán algunos indicadores que podrían ser aplicados en los planteamientos de decisión de la siguiente sección.

### 3. Modelo del proceso de toma de decisiones

Un sistema de gestión de activos debe establecer herramientas que permitan implantar, mantener y mejorar el sistema a partir de la comprensión de la organización y su contexto (ISO-55000 2014). El siguiente modelo de gestión pretende ayudar en la toma de decisiones necesaria.

El modelo, véase la Figura 3, se basa en un conjunto de fases. En primer lugar, se deben conocer los capítulos presupuestarios actuales y el reparto o la influencia de las zonas sobre las que se quiere definir el plan de acción y renovación de los activos, así como el tipo de red (arterias, colectores o redes secundaria). Además, se deben definir las limitaciones presupuestarias asociadas a las intervenciones. Esta información permitirá orientar la inversión que se puede realizar en la gestión de los activos y las limitaciones existentes para repartir dicha inversión en la red hídrica de la organización.

En segundo lugar, se debe determinar el riesgo. La definición de un índice de riesgo requiere de la aplicación de técnicas de ponderación y elección discreta; por ejemplo, en (Muñuzuri et al. 2020) se presenta un modelo para calcular un índice de riesgo, basado en una técnica de ponderación, que define un índice de prioridad para el reemplazo de las tuberías en una red. Este índice se basa en dos factores relacionados con la condición de la tubería (la probabilidad de fallo y sus fugas) y tres factores relacionados con las consecuencias del fallo de la tubería (demanda no atendida en abastecimiento, el flujo máximo en saneamiento y la relevancia de ésta). Cada elemento de ponderación, a su vez, se podría analizar con técnicas de predicción aplicando “machine learning” (por ejemplo, véase el estudio sobre predicción de roturas aplicando la regresión logística de (Robles-Velasco et al. 2020)). Otros investigadores se centran en simular tasas de deterioro a partir de modelos estadísticos (Ouellet & Duchesne 2018), que se pueden utilizar para pronosticar la evolución del estado de la red de alcantarillado bajo diferentes estrategias de inversión (Caradot et al. 2020).

En tercer lugar, la determinación de criterios operativos que propone determinar los límites en la formación de unidades de actuación, obras, las cuales se forman con criterios técnicos, como son la rehabilitación por agotamiento o proximidad del agotamiento de la vida útil u otras motivaciones que se reflejan a partir de un índice del riesgo definido en el paso anterior. En el desarrollo de este modelo no se plantean otras circunstancias como la previsión de crecimientos en el consumo o actuaciones externas correspondientes a otros capítulos económicos, aunque sí otros criterios operativos de la organización como la formación de las obras respecto a distancias, formas, entornos, o limitaciones en su formación como, por ejemplo, la gestión del tráfico.

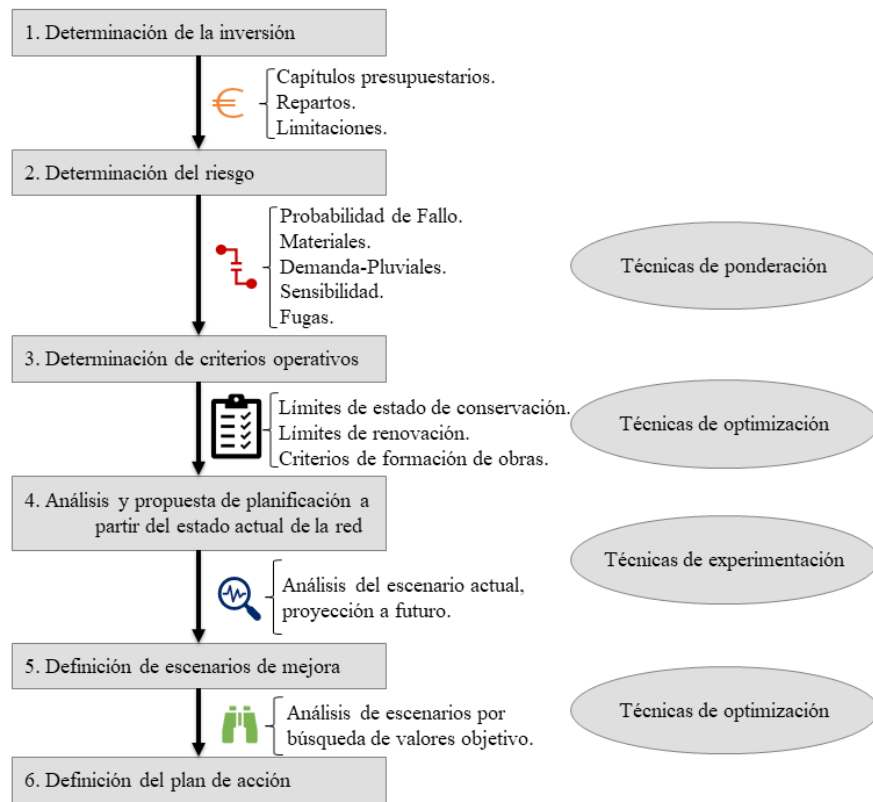
Las empresas de agua no planifican ni realizan actividades de reemplazo en elementos individuales. Actualmente, existen técnicas de optimización que permiten organizar estos activos en unidades de intervención que faciliten la mejora de la red de aguas, mediante una jerarquización de las soluciones y un reparto lógico en la planificación y análisis de las intervenciones. En (Ramos-Salgado et al. 2021) se propone una metodología para diseñar los programas de intervención de las infraestructuras hidráulicas, integrando las intervenciones a través de un algoritmo que se desarrolla



en dos etapas en las cuales se agrupan las tuberías de suministro de agua y alcantarillado en obras de sustitución

prácticas y eficientes, en función de su proximidad y su prioridad de renovación.

**Figura 3** Modelo de gestión de activos de infraestructuras del agua (elaboración propia).



En cuarto lugar, se combinarían los criterios y elementos obtenidos para conformar un análisis y propuesta de planificación a partir del estado actual de la red, en el cual se desgrane, a partir del escenario actual, cuáles son las acciones de mejora proyectadas en el horizonte de tiempo definido. Se trata de aplicar un conjunto de experimentaciones y simulaciones de hipótesis futuras. Por ejemplo, en (Ramos-Salgado et al. 2022) se implementa con éxito una estrategia de gestión de activos de infraestructura y la planificación de las inversiones a largo plazo.

En quinto lugar, se definen situaciones objetivo y, mediante técnicas de optimización, se buscan combinaciones de parámetros cuya variación permitiría alcanzar los objetivos. Por ejemplo, un incremento del presupuesto permitiría mejorar la vida útil de la red, en el periodo de tiempo marcado.

En el paso final del proceso, se calculan las prioridades numéricas para cada una de las alternativas de decisión. Los indicadores aplicados desde el estado actual (paso 4) hasta alcanzar los mejores escenarios (paso 5) definen la capacidad relativa de las alternativas para lograr el objetivo. Finalizado el proceso de optimización, la solución constituye un plan de acción. La solución obtenida es precisa y se basa

en datos digitalizados, pero no todos los aspectos se pueden automatizar. El plan de acción propuesto debe ser revisado por expertos o miembros de la organización que incorporarán su conocimiento sobre el contexto de las obras planteadas. La solución obtenida, que se debe considerar una solución preliminar, es que debe ser revisada y proyectada teniendo en cuenta aspectos no incorporados al modelo como: colapsos puntuales, mala calidad de la información disponible, vertidos, etc.

El proceso de planificación y el desarrollo de la estrategia de gestión de activos se puede desarrollar siguiendo el modelo de la Figura 3. El modelo definido permite desarrollar en una herramienta de resolución basada en la aplicación criterios técnicos razonados. La herramienta que aplicaría el modelo permitiría identificar escenarios futuros y moderar situaciones para detectar necesidades, riesgos y vulnerabilidades de los planes de inversión. A medida que se desarrolla el año planificado, el contexto cambia, la red se modifica, así como los datos o conocimiento de los activos. Así el plan de acción se desarrolla a corto plazo, analizando la evolución de los indicadores a largo plazo. Si bien, el modelo debe formar parte de un ciclo de mejora continua o ciclo de vida de los activos del agua que permitiría orientar la estrategia de gestión.

## 4. Resultados y discusión

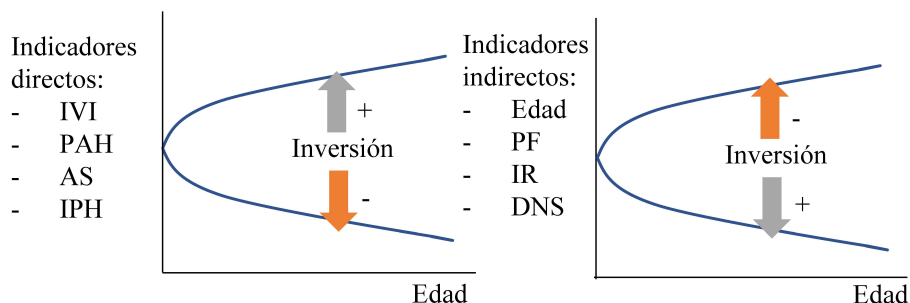
El modelo ha sido probado en el desarrollo de varios proyectos de transferencia en los que se han marcado cuatro métricas o indicadores claves de análisis de la situación de la red: el Índice de Valor de la Infraestructura (IVI), la Probabilidad de Fallo (PF), el Índice de Riesgo (IR) y la edad (EDAD) (Alegre et al. 2014), si bien podrían utilizarse otros indicadores. Por supuesto, se requiere la identificación de objetivos estratégicos medibles.

En la guía para gestión de activos de sistemas de abastecimiento de agua y aguas residuales (ISO-24516 2016) se presenta un proceso de evaluación, en el que se indica que es necesario obtener resultados de investigación

para evaluar las condiciones deficientes de la red y realizar una comparación con los requerimientos, que permita identificar las deficiencias que justifican la planificación. De esta forma, se pueden obtener los indicadores de rendimiento para comparar el rendimiento general de una red con los requisitos de rendimiento con los cuales se quiere alinear la empresa.

La herramienta desarrollada define dos modelos de resolución. El primero, basado en la etapa 4, el análisis en el horizonte temporal de planificación y porcentaje de incremento de la inversión anual. El segundo, basado en la etapa 5, la definición de objetivos centrados en un cambio del estado actual de la red respecto al IVI, PF, IR y EDAD.

**Figura 4** Ejemplo de indicadores para el modelo de gestión.



Es interesante observar que los criterios anteriores no son independientes ya que la edad está relacionada con el IVI de la red. Este indicador, orientado a los activos, se basa en la vida útil de cada elemento, en las curvas de depreciación y en el coste de reemplazo actual, siendo un indicador del valor actual de la infraestructura frente al valor de reposición de ésta. Por otra parte, como se observa en la Figura 4, el riesgo y la probabilidad de fallo aumentan con la edad y, además, la probabilidad de fallo tiene un peso en el índice de riesgo.

La planificación de la reposición de activos con criterios técnicos puede eliminar riesgos altos y mejorar de forma significativa el valor y estado de los activos. Equilibrar la inversión para alinear los objetivos de la organización requiere de la búsqueda de indicadores para el modelo de gestión.

Existen indicadores que: a) son directamente proporcionales a la inversión, ya que el aumento de la inversión supone una mejora del IVI, del porcentaje de activos por habitante (PAH), del aumento de los Activos en Servicio (AS) y de la Inversión aplicada Por Habitante (IPH), b) indirectos, ya que el aumento de la inversión supone una reducción de la EDAD de la red, de su PF o de su IR, al igual que una reducción en la Demanda No Satisfecha (DNS), y c) otros, que se puedan plantear relacionados con la calidad de servicio como las incidencias, quejas de los clientes, usuarios afectados por las intervenciones, fluidez del tráfico afectado, o incidencias económicas en el entorno.

El desarrollo de la solución mediante indicadores permite mejorar la seguridad de la red al minimizar el riesgo. La determinación de los criterios operativos para formar las obras permite el escalonamiento de las obras mediante criterios de prioridad y desempeño. La agrupación de los activos se constituye como una relación de infraestructuras que cumple con criterios de capacidad y recursos.

En el futuro se podrían incorporar otros parámetros como las molestias relacionadas con los residentes y transeúntes, retrasos en el tráfico, cortes de suministros, cortes de accesos, ruido y otros factores o implicaciones sociales que pudieran afectar a dichas agrupaciones de activos.

## 5. Conclusiones

El desarrollo del marco metodológico y sus aplicaciones permite mejorar la toma de decisiones y aporta una visión estratégica de la que se benefician los gestores al obtener una nueva perspectiva sobre la evolución de la red y la integración de los diferentes departamentos o áreas funcionales de la empresa a la hora de buscar una solución conjunta y alineada con los objetivos estratégicos. Además, los modelos proyectados permiten desarrollar una comunicación e interacción entre las distintas áreas implicadas, un ecosistema en el que la información de los activos de la red hídrica, previamente dispares, están más interconectados, estableciendo y motivando en la organización una mejora de los datos necesarios para seguir analizando la realidad de la red de aguas.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y la Consejería de Economía, Conocimiento, Empresas y Universidad de la Junta de Andalucía, dentro del Programa Operativo FEDER 2014-2020. Ref.: CEI-8-TEP127.

## 7. Referencias

- ALEGRE, H., VITORINO, D. & COELHO, S. (2014). «Infrastructure value index: A powerful modelling tool for combined long-term planning of linear and vertical assets». *Procedia Engineering*, 89, pp. 1428–1436, doi:10.1016/j.proeng.2014.11.469.
- AMAITIK, N. M. & BUCKINGHAM, C. D. (2018). «Developing a hierarchical fuzzy rule-based model with weighted linguistic rules: A case study of water pipes condition prediction». In: *Proceedings of Computing Conference 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 30–40.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, A. (2001). *Dawn of the Replacement Era: Reinvesting in Drinking Water Infrastructure: an Analysis of Twenty Utilities' Needs for Repair and Replacement of Drinking Water Infrastructure*.
- ANDRADE-PINEDA, J. L., ROMERO RODRÍGUEZ, H., RODRÍGUEZ CASTAÑO, A., PÉREZ GRAU, F. J., CARPES HORTAL, G. & OLLERO BATURONE, A. (2019). «Diseño y desarrollo de un robot aéreo para la inspección de colectores de saneamiento». In: *XL Jornadas de Automática*. pp. 647–654.
- CARADOT, N., RIECHEL, M., ROUAULT, P., CARADOT, A., LENGEMANN, N., ECKERT, E., RINGE, A., CLEMENS, F. & CHERQUI, F. (2020). «The influence of condition assessment uncertainties on sewer deterioration modelling». *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(2), pp. 287–296, doi:10.1080/15732479.2019.1653938.
- CARDOSO, M. A., SANTOS SILVA, M., COELHO, S. T., ALMEIDA, M. C., COVAS, D. I. & SANTOS SILVAT COELHO M C ALMEIDA, M. S. (2012). «Urban water infrastructure asset management-a structured approach in four water utilities», doi:10.2166/wst.2012.509.
- CARDOSO, M. A., SILVA, M. S., COELHO, S. T., ALMEIDA, M. C. & COVAS, D. I. C. (2012). «Urban water infrastructure asset management – a structured approach in four water utilities». *Water Science and Technology*, 66(12), pp. 2702–2711, doi:10.2166/wst.2012.509.
- ISO-24516 (2016). *Guidelines for the management of assets of water supply and wastewater systems*.
- ISO-55000 (2014). *Asset management. Overview, principles and terminology*.
- ISO (2007). *ISO/DIS 24512. Service activities relating to drinking water and wastewater - Guidelines for the management of drinking water utilities and for the assessment of drinking water services*.
- MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, G. DE E. (2020). *Libro Verde de la Gobernanza del Agua en España*.
- MUÑUZURI, J., RAMOS, C., VÁZQUEZ, A. & ONIEVA, L. (2020). «Use of discrete choice to calibrate a combined distribution and sewer pipe replacement model». *Urban Water Journal*, 17(2), pp. 100–108, doi:10.1080/1573062X.2020.1748205.
- OECD (2016). «Water , growth and finance. Polity perspectives». OECD, better policies for better lives, (August), p. 36.
- OUELLET, M. & DUCHESNE, S. (2018). «A method to consider replaced pipes in modeling of sewer pipe deterioration». *Urban Water Journal*, 15(4), pp. 392–397, doi:10.1080/1573062X.2018.1455883.
- RAMOS-SALGADO, C., MUÑUZURI, J., APARICIO-RUIZ, P. & ONIEVA, L. (2021). «A decision support system to design water supply and sewer pipes replacement intervention programs». *Reliability Engineering & System Safety*, 216, p. 107967, doi:10.1016/j.ress.2021.107967.
- RAMOS-SALGADO, C., MUÑUZURI, J., APARICIO-RUIZ, P. & ONIEVA, L. (2022). «A comprehensive framework to efficiently plan short and long-term investments in water supply and sewer networks». *Reliability Engineering & System Safety*, 219, p. 108248, doi:10.1016/J.RESS.2021.108248.
- ROBLES-VELASCO, A., CORTÉS, P., MUÑUZURI, J. & BARBADILLA-MARTÍN, E. (2020). «Aplicación de la regresión logística para la predicción de roturas de tuberías en redes de abastecimiento de agua». *Dirección y Organización*, 70(70), pp. 78–85, doi:10.37610/DYO.V0I70.570.
- ROBLES-VELASCO, A., MUÑUZURI, J., ONIEVA, L. & RODRÍGUEZ-PALERO, M. (2021). «Trends and applications of machine learning in water supply networks management». *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(1), p. 45, doi:10.3926/jiem.3280.



ROBLES-VELASCO, ALICIA, CORTÉS, P., MUÑUZURI, J. & ONIEVA, L. (2020). «Prediction of pipe failures in water supply networks using logistic regression and support vector classification». *Reliability Engineering & System Safety*, 196, p. 106754, doi:10.1016/j.res.2019.106754.

SALEHI, S., TABESH, M. & JALILI GHAZIZADEH, M. (2018). «HRDM Method for Rehabilitation of Pipes in Water Distribution Networks with Inaccurate Operational-Failure Data». *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(9), p. 04018053, doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000943.

UNIÓN EUROPEA (2000). Directiva 2000/60/CE del parlamento europeo y del consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.