



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Desarrollo de un conjunto de herramientas de soporte a la decisión y su implementación en un plan de gestión técnica para la renovación de redes de abastecimiento y saneamiento de agua

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

Juan Camilo Parra Toro

Dirigida por:

Dr. Ricardo Cobacho Jordán

Dr. Enrique Cabrera Rochera

Valencia, Junio de 2013

Agradecimientos

Quiero manifestar mi agradecimiento al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España, y al Instituto Tecnológico del Agua (ITA) de la Universidad Politécnica de Valencia, por brindarme la oportunidad de disfrutar la beca doctoral FPI a través del proyecto GESTAM. También a todas las empresas gestoras de aguas que colaboraron en esta investigación, aportando datos sin ningún interés.

Con los doctores Ricardo Cobacho Jordán y Enrique Cabrera Rochera adquiero una deuda para toda la vida. Ellos me han brindado sus conocimientos y consejos en la asesoría de esta investigación doctoral. Al doctor Enrique Cabrera Marcet le agradezco sus sabias palabras. A todo el equipo del ITA, entre ellos: los doctores Francisco Arregui, Jorge García-Serra y Vicent Espert. Tengo muy presente el apoyo de Francisco Valero, Mario Dubois y Carlos Martínez.

Con especial cariño recuerdo las discusiones técnicas y el tiempo pasado con los doctores Javier Soriano y Miguel Ángel Pardo. Quiero hacer un reconocimiento público al doctor Jabier Almandoz, pues su trabajo lo considero la semilla del mío, y sus indicaciones, invaluable. En la misma línea, a los doctores Yehuda Kleiner y Balvant Rajani, por el tiempo que me dedicaron en Canadá. Debo hacer una especial mención al personal del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid: al decano y doctor honoris causa José Javier Rodríguez, por apoyarme moral y técnicamente; al decano Libardo Londoño, y a los coordinadores Mario León Montoya y Gloria Helena Henao, por su gestión; a Juan Carlos Valdés y Oscar Velásquez, por su tozudez para que yo terminara este ciclo.

A mis amigos de Valencia, los cuales recuerdo, no sólo con amor, sino también con gran admiración: María Isabel Montoya, Daniel Mejía, Mario Tavera, Diana Quevedo. Un meritorio reconocimiento a mis amigos de Medellín, por soportarme: Julio Rendón, Karina Cuervo, Lina Hincapié, Lina Restrepo. No hago más extensa la lista, pero aquí y allá faltan muchos.

Agradezco mucho a mi familia: a Carlos Mauricio, el mejor hermano que se puede tener. A Libia, Andrés, Sebastián y Leidy. A mis sobrinas Sofía y Alejandra, y a mi sobrino Juan José. A Margarita, Olga y David.

Dedico esta tesis a mis padres, Berta y Hugo, quienes me brindaron su amor incondicional y apoyo en todo momento. A Blanca, por quien profeso mi más profundo amor. Ella me enseña cada día a ser mejor persona. A Tomás, que le da sentido a todos mis esfuerzos.

Resumen

Esta tesis doctoral resulta de gran interés para las entidades operadoras y gestoras de sistemas de abastecimiento y saneamiento de agua que se encuentran interesadas en adoptar mecanismos holísticos para establecer necesidades de intervención en sus redes, atendiendo a una visión global de las políticas de la empresa, y no sólo al desempeño estructural de las tuberías.

El objetivo general de la presente investigación es proponer una metodología de soporte a la decisión flexible, que incluya una forma para capturar la experiencia experta y su grado de incertidumbre asociado, y además que permita evaluar los criterios de mayor relevancia local, dentro del proceso tendiente a establecer las necesidades de intervención de tuberías y sectores de la red, haciendo uso de la lógica difusa como núcleo matemático fundamental que da estructura a la propuesta. Otros objetivos que complementan al anterior, se enfocan en la realización de un repaso detallado de los elementos influyentes en el proceso de deterioro de una tubería, en la revisión de protocolos de inspección y evaluación, y así mismo en un análisis crítico de diversas estructuras decisionales, que a juicio del autor resultan relevantes en el contexto de este estudio.

La metodología propuesta para asignar prioridades de intervención se basa en el uso de la lógica difusa como eje fundamental, y en la definición y análisis de espacios decisionales para relacionar criterios relevantes. El problema de la incorporación de la incertidumbre que el experto posee para caracterizar cada criterio se ve debidamente solventado con la construcción de funciones matemáticas difusas, e igualmente con la conformación de matrices difusas de agregación. La propuesta permite simplificar el proceso al definir unidades de decisión, y reducir o eliminar totalmente la necesidad de utilizar pesos de importancia, al proponer una forma en que se pueden relacionar múltiples espacios de decisión.

Como aporte principal de la investigación doctoral, se expone la estructura de la metodología decisional propuesta mediante la incorporación de la lógica difusa y su

combinación con el análisis del espacio de decisión, y su aplicación a una red de abastecimiento del mediterráneo español. Los resultados se presentan a nivel de tuberías individuales, asignando un valor de prioridad de intervención a cada una de las 10485 tuberías que conforman la muestra poblacional elegida, y a nivel de sectores de la red, para 10 zonas del sistema. A través de diferentes análisis de sensibilidad se evidencian las fortalezas y debilidades de la propuesta.

Otros aportes presentados en la tesis, que revisten especial importancia en este contexto, se plasman en: las aplicaciones de cuatro diferentes metodologías mediante igual número de casos de estudio (tanto para sistemas de abastecimiento como para sistemas de saneamiento), la presentación de un conjunto de directrices para la integración de bases de datos relativas a la gestión patrimonial de infraestructura; la propuesta de un plan básico de actuación para llevar a cabo procesos de intervención en las redes, aplicable en empresas gestoras de cualquier tamaño, y que implementa la metodología de decisión basada en lógica difusa; y la exposición de una herramienta informática sencilla, en la cual se sistematiza la metodología decisional propuesta, y que puede servir de ejemplo a las entidades gestoras para el desarrollo de un paquete más robusto y a medida de sus necesidades.

Abstract

This doctoral thesis is highly relevant to water supply and sewerage entities interested in adopting holistic ways in order to establish intervention priorities in their networks, attending to a company's policies global vision, and not only to the structural performance of the pipes.

The main objective of the present research is to provide a flexible decision support methodology that includes a way to capture the expert knowledge and its related uncertainty, and to allow an assessment of the most relevant local criteria, inside the process leaded to establish interventions needs for individual pipes and network sectors, making use of fuzzy logic as the mathematical core that frame the approach. Other goals that complement the one mentioned above are focused on the execution of a detailed review of the elements that can have influence in the pipe deterioration process, on the examination of inspection and assessment protocols, and on the critical analysis of different decision structures, that in opinion of the author of these thesis, that can be relevant in the context of this study.

The proposed methodology, directed to estimate intervention priorities, is based on the use of fuzzy logic as fundamental axis, and in the definition and analysis of decision spaces to relate relevant criteria. The problem of incorporating the uncertainty that the expert have when characterizing each criterion is suitably addressed by means of the construction of fuzzy mathematical functions, as well as with the conformation of fuzzy aggregation matrixes. The approach allows simplifying the process by the definition of decision units, and reduces or entirely eliminates the necessity of using importance weights by the establishment of a way to relate multiple decision spaces.

As the main contribution of this doctoral research, the structure of the decision methodology by fuzzy logic and its integration with the decision space analysis are introduced. In addition, a case of study to illustrate the use of the methodology is included. This example is referred to a Spanish Mediterranean water supply network. The results are presented at a level of individual pipes, calculating a priority

value for each of 10485 pipes that integrate the population sample, and at a level of network sectors, for 10 zones of the systems. Through different sensitivity analysis, strengths and weaknesses of the proposed methodology have been identified.

Other contributions included in the present thesis, which take special importance in this context, are expressed in the performance of four different methodologies through identical number of study cases (for both supply and wastewater systems); the introduction of a set of guidelines for integrating databases associated to infrastructure asset management; an approach of a basic actuation plan to execute intervention processes in companies that manage systems of any size, that includes a decision support tool based on fuzzy logic; and the exposure of a simple informatics program in which the proposed methodology is systematized, and that can be useful as an example for the entities in order to develop a more robust and customized package.

Resum

Esta tesi doctoral resulta de gran interès per a les entitats operadores i gestores de sistemes d'abastiment i sanejament d'aigua que es troben interessades a adoptar mecanismes holístics per a establir necessitats d'intervenció en les seues xarxes, atenent a una visió global de les polítiques de l'empresa, i no sols a l'exercici estructural de les conduccions.

L'objectiu general de la present investigació és proposar una metodologia de suport a la decisió flexible, que incloga una forma per a capturar l'experiència experta i el seu grau d'incertesa associat, i a més que permeta avaluar els criteris de major rellevància local, dins del procés tendent a establir les necessitats d'intervenció de conduccions i sectors de la xarxa, fent ús de la lògica difusa com a nucli matemàtic fonamental que dóna estructura a la proposta. Altres objectius que complementen a l'anterior, s'enfoquen en la realització d'un repàs detallat dels elements influents en el procés de deteriorament d'una conducció, en la revisió de protocols d'inspecció i avaluació, i així mateix en una anàlisi crítica de diverses estructures de decisió, que a juí de l'autor resulten rellevants en el context d'aquest estudi.

La metodologia proposada per a assignar prioritats d'intervenció es basa en l'ús de la lògica difusa com a eix fonamental, i en la definició i anàlisi d'espais de decisió per a relacionar criteris rellevants. El problema de la incorporació de la incertesa que l'expert posseix per a caracteritzar cada criteri es veu degudament resolt amb la construcció de funcions matemàtiques difuses, i igualment amb la conformació de matrius difuses d'agregació. La proposta permet simplificar el procés al definir unitats de decisió, i reduir o eliminar totalment la necessitat d'utilitzar pesos d'importància, al proposar una forma en què es poden relacionar múltiples espais de decisió.

Com a aportació principal de la investigació doctoral, s'exposa l'estructura de la metodologia de decisió proposta per mitjà de la incorporació de la lògica difusa, la seua combinació amb l'anàlisi de l'espai de decisió, i la seua aplicació a una xarxa

d'abastiment del mediterrani espanyol. Els resultats es presenten a nivell de conduccions individuals, assignant un valor de prioritat d'intervenció a cada una de les 10.485 canonades que conformen la mostra poblacional triada, i a nivell de sectors de la xarxa, per a 10 zones del sistema. A través de diferents anàlisis de sensibilitat s'evidencien les fortaleses i debilitats de la proposta.

Altres aportacions presentats en la tesi, que revisten especial importància en aquest context, es plasmen en: les aplicacions de quatre diferents metodologies per mitjà del mateix nombre de casos d'estudi (tant per a sistemes d'abastiment com per a sistemes de sanejament), la presentació d'un conjunt de directrius per a la integració de bases de dades relatives a la gestió patrimonial d'infraestructura; la proposta d'un pla bàsic d'actuació per a dur a terme processos d'intervenció en les xarxes, aplicable en empreses gestores de qualsevol grandària, i que implementa la metodologia de decisió basada en lògica difusa; i l'exposició d'una ferramenta informàtica senzilla, en la qual se sistematitza la metodologia de decisió proposta, i que pot servir d'exemple a les entitats gestores per al desenvolupament d'un paquet més robust i a mesura de les seues necessitats.

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VII
RESUM.....	IX
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	31
1.1 Justificación e intención de la tesis	34
1.2 Objetivos y ámbito de aplicación de la tesis	40
1.2.1 Objetivo general.....	40
1.2.2 Objetivos específicos	41
1.2.3 Ámbito de aplicación de la tesis	42
1.3 Contexto	43
1.3.1 Motivaciones generales	43
1.3.2 Proyectos recientes de gran impacto en el ámbito de la intervención de sistemas de abastecimiento y saneamiento	48
1.4 Estructura de la tesis.....	50
CAPÍTULO 2 PROCESO DE FALLO DE UNA TUBERÍA	55
2.1 Factores relevantes en el proceso de fallo de una tubería	57
2.1.1 La época de instalación como marco histórico-tecnológico	57
2.1.2 Diámetro	58
2.1.3 Longitud.....	59
2.1.4 Material de la tubería	61
2.1.5 Condiciones del suelo	67
2.1.6 Presión.....	68
2.1.7 Historial de fallos.....	69
2.1.8 Ubicación geográfica de la tubería	70
2.2 Causas del fallo de una tubería.....	71
2.2.1 Fallos causados por defectos de fábrica	71
2.2.2 Fallos causados por defectos de instalación	72
2.2.3 Fallos causados por procesos corrosivos.....	74
2.2.4 Fallos causados por movimientos del suelo	75
2.2.5 Fallos causados por variaciones de temperatura	76
2.2.6 Fallos asociados a los diversos usos del suelo	76

2.2.7	Fallos asociados a la variación climática estacional	77
2.2.8	Fallos causados por excavaciones adyacentes.....	78
2.2.9	Fallos causados por factores hidráulicos.....	78
2.3	Descripción de los tipos de fallo	79
2.3.1	Rotura circular y longitudinal (circumferential crack – longitudinal crack)	79
2.3.2	Rotura puntual y longitudinal debida a la corrosión (corrosion pit - longitudinal corrosion pit)	81
2.3.3	Corte en la campana (bell split).....	83
2.3.4	Rotura en espiral (spiral crack)	84
2.3.5	Corte en forma de cuña (wedge splitting).....	85
2.4	Tipos de fallos esperados según su localización	86
2.4.1	Fallos localizados en el tramo central de la tubería	86
2.4.2	Fallos localizados en las uniones con otras tuberías.....	86
2.4.3	Fallos localizados en las uniones mecánicas de tuberías con accesorios	87
2.4.4	Fallos localizados en uniones soldadas entre dos tuberías	87

CAPÍTULO 3	TÉCNICAS DE INSPECCIÓN, PROTOCOLOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN Y BASES DE DATOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL DETERIORO DE TUBERÍAS.....	89
3.1	Técnicas de inspección.....	91
3.1.1	Técnicas de inspección en tuberías metálicas	92
3.1.2	Técnicas de inspección en tuberías de concreto reforzado	94
3.2	Protocolos para la evaluación de la condición de tuberías de transporte de agua.....	96
3.2.1	Propuesta del NRC	97
3.2.2	Propuesta de WRc.....	100
3.2.3	Propuesta del CERIU.....	103
3.2.4	Propuesta de integración de los protocolos WRc y CERIU	104
3.3	Algunas directrices para la integración de bases de datos y su enfoque hacia la estimación del deterioro de activos enterrados	105
3.3.1	Campo ID. Identidad Única de la tubería.....	108
3.3.2	Campo Edad. Datos reales y datos estimados.....	108
3.3.3	Campo fecha. Compatibilidad de formatos.....	109
3.3.4	Campo Observaciones. Compatibilidad entre bases de datos	109
3.3.5	Base de datos del inventario de activos enterrados. Control de su estructura.....	109
3.3.6	Base de datos del inventario de activos enterrados. Validación y actualización de su información	110
3.3.7	Base de datos de intervenciones. Naturaleza de sus registros	111
3.3.8	Base de datos de intervenciones. Seguimiento de los procesos.....	111
3.3.9	Base de datos del modelo hidráulico de la red	111
3.3.10	Base de datos de opinión experta	112
3.3.11	Base de datos de inspecciones mediante CCTV.....	112

3.3.12	Datos de entrada para el sistema de indicadores de gestión y para el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red.....	113
3.3.13	Datos de entrada para el sistema de información geográfica	113
3.3.14	Resultados generados por el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red	114
3.3.15	Resultados generados por el sistema de indicadores de gestión	114
3.3.16	Protocolos de gestión de bases de datos internas	114
3.3.17	Programación de revisiones periódicas a las bases de datos internas	115
3.3.18	Cambios en las bases de datos internas.....	115
3.3.19	Disponibilidad de nueva información en bases de datos internas.....	116
3.3.20	Control de usuarios de las bases de datos internas	116
3.3.21	Información general sobre bases de datos externas	116
3.3.22	Consultas a bases de datos externas.....	117
3.3.23	Control a la información aportada por contratistas	117
3.3.24	Diagnóstico del grado de gestión de las bases de datos.....	118

CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE PRIORIDADES DE INTERVENCIÓN MEDIANTE LÓGICA DIFUSA.....

4.1	Objetivos.....	127
4.2	Fundamentos matemáticos generales de la lógica difusa	128
4.2.1	Definición matemática de número difuso.....	128
4.2.2	Fuzificación y funciones de pertenencia difusas.....	129
4.2.3	Adaptación de la lógica a los conjuntos difusos	133
4.2.4	Agregación mediante proposiciones con reglas difusas	137
4.2.5	Técnicas gráficas de inferencia	140
4.2.6	Defuzificación a valores escalares	143
4.3	Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la intervención de tuberías de abastecimiento basado en criterios estructurales y de servicio mediante lógica difusa	145
4.3.1	La Lógica Difusa en el contexto de la intervención de redes	145
4.3.2	Características lógica difusa que la hacen adecuada para sustentar un modelo de priorización de redes a la intervención.....	146
4.3.3	Enfoque basado en el estudio del espacio decisional mediante lógica difusa	148
4.3.4	Proceso de elección de criterios para definir el espacio de decisión	156
4.3.5	Fase de construcción de conjuntos difusos y fuzificación de valores característicos de las tuberías para cada criterio	163
4.3.6	Fase de agregación difusa de criterios mediante análisis de espacio de decisión.....	170
4.3.7	Fase de defuzificación mediante método de centro de áreas.....	178
4.3.8	Priorización de tuberías a la intervención.....	179
4.3.9	Método simplificado de priorización de sectores a la renovación	180

4.4	Resultados: ejemplo de aplicación de la metodología propuesta a una red de abastecimiento del Mediterráneo Español.....	181
4.4.1	Descripción de la red	181
4.4.2	Criterios utilizados para conformar un primer espacio decisional	188
4.4.3	Resultados de la fase de fuzificación	191
4.4.4	Unidades de decisión generadas para la fase de agregación	195
4.4.5	Resultados de la fase de defuzificación	199
4.4.6	Lista priorizada de tuberías a la renovación	202
4.4.7	Lista priorizada de sectores a la renovación	208
4.4.8	Sensibilidad de los resultados entre espacio decisional tridimensional (Edad, Presión y Fallos considerados simultáneamente) y ponderación de dos espacios decisionales bidimensionales (50%: Edad y Fallos, 50%: Presión y Fallos)	209
4.4.9	Sensibilidad de los resultados ante la variación de los números difusos iniciales de la variable Edad.....	212
4.4.10	Sensibilidad de los resultados ante la variación de los números difusos iniciales de la variable Presión	214
4.4.11	Sensibilidad de los resultados ante la variación de los números difusos iniciales de la variable Número de fallos/(km*año)	216
4.4.12	Sensibilidad de los resultados ante la variación de las matrices de agregación	219
4.4.13	Criterios utilizados para conformar un segundo espacio decisional.....	222
4.4.14	Resultados de la fase de fuzificación del segundo espacio decisional	223
4.4.15	Unidades de decisión generadas para la fase de agregación del segundo espacio decisional.....	225
4.4.16	Resultados de la fase de defuzificación del segundo espacio decisional	229
4.4.17	Lista priorizada de tuberías a la renovación para el segundo espacio decisional.....	229
4.4.18	Lista priorizada de sectores a la renovación para el segundo espacio decisional.....	231
4.4.19	Sensibilidad de los resultados ante la variación de las matrices de agregación para el segundo espacio decisional	232
4.4.20	Iteración adicional para agregar los espacios de decisión 1 y 2	234
4.4.21	Resultados de la fase de defuzificación de los espacios de decisión 1 y 2..	237
CAPÍTULO 5 DESARROLLOS PREVIOS A LA LÓGICA DIFUSA.....		241
5.1	Objetivos y estructura de las propuestas.....	243
5.1.1	Objetivos.....	243
5.1.2	Estructura de las propuestas.....	243
5.2	Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de tuberías de abastecimiento mediante Sumas Ponderadas.....	244
5.2.1	Base metodológica de las Sumas Ponderadas	244

5.2.2	Ejemplo de aplicación de la metodología de Sumas Ponderadas a una red de abastecimiento del norte de España	246
5.2.3	Resultados finales de prioridad a la renovación	260
5.2.4	Enseñanzas y crítica a la propuesta.....	264
5.3	Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de tuberías de abastecimiento mediante Programación Por Compromiso	266
5.3.1	Base metodológica de la Programación Por Compromiso.....	266
5.3.2	Ejemplo de aplicación de la metodología de Programación Por Compromiso a una red de abastecimiento del norte de España.....	271
5.3.3	Resultados finales de prioridad a la renovación	275
5.3.4	Enseñanzas y crítica a la propuesta.....	285
5.4	Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de sectores mediante el Proceso de Jerarquías Analíticas	286
5.4.1	Base metodológica del Proceso de Jerarquías Analíticas	286
5.4.2	Ejemplo de aplicación de la metodología de Proceso de Jerarquías Analíticas a una red de abastecimiento del norte de España	288
5.4.3	Resultados finales de prioridad a la renovación	298
5.4.4	Enseñanzas y crítica de la propuesta.....	305
5.5	Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de tuberías de saneamiento mediante Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio	306
5.5.1	Base metodológica de la Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio	306
5.5.2	Ejemplo de aplicación de la metodología de Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio a una red de saneamiento de los Andes Colombianos	326
5.5.3	Resultados finales de prioridad a la renovación	340
5.5.4	Enseñanzas y crítica a la propuesta.....	349

CAPÍTULO 6	PLAN BÁSICO DE ACTUACIÓN PARA LA GESTIÓN TÉCNICA	
	DE REDES DE TRANSPORTE DE AGUA	352
6.1	¿En qué consiste el plan básico de actuación para la gestión técnica de redes de transporte de agua?	354
6.2	¿Por qué implementar un plan básico de actuación?	355
6.3	Aportes más relevantes del esquema de plan básico de actuación propuesto.....	356
6.4	Algunas consideraciones económicas indispensables	358
6.5	Módulos del plan básico de actuación propuesto	368
6.5.1	Módulo de planeación	373
6.5.2	Módulo de mantenimiento, evaluación y predicción	395
6.5.3	Módulo de mejora continua	398
6.6	Recursos para la ejecución del plan básico de actuación.....	411
6.6.1	Distribución de funciones según área de la empresa	411

6.6.2	Fuentes de financiación	412
6.7	Propuesta de estructura óptima de una base de datos de un sistema de transporte de agua	413
6.7.1	Hoja de inventario en infraestructura (H1)	413
6.7.2	Hoja de incidencias (H2)	415
6.7.3	Hoja de intervenciones (H3)	417
6.8	Indicadores de desempeño fundamentales	418
6.9	Balances hídricos: enfoque hacia la autorización del consumo y enfoque hacia la medición del consumo	425
6.9.1	Balance hídrico enfocado hacia la autorización del consumo	425
6.9.2	Balance hídrico enfocado hacia la medición del consumo	428

CAPÍTULO 7	SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DE PRIORIDADES DE INTERVENCIÓN MEDIANTE LÓGICA DIFUSA	432
7.1	Estructura modular del código informático	434
7.1.1	Módulo de gestión de bases de datos externas [CodODBC]	435
7.1.2	Módulo de Lógica Difusa [CodMatematicaDifusa]	435
7.1.3	Módulo de informe de resultados [CodInforme]	437
7.2	Procedimiento general de uso de la aplicación	438
7.2.1	Captura de datos externos y configuración de una base de datos única de trabajo	438
7.2.2	Conformación de elementos de la Lógica Difusa [FormDtosDifusos]	442
7.2.3	Conformación de matrices de agregación y defuzificación	445
7.2.4	Reporte de resultados	448
7.2.5	Otros formularios	450
7.2.6	Otros productos incluidos en el reporte de resultados	454
7.3	Bondades y desarrollos futuros de la aplicación informática	456
7.3.1	Bondades	456
7.3.2	Desarrollos futuros	457

CAPÍTULO 8	CONCLUSIONES, APORTES Y FUTURAS INVESTIGACIONES... 460	
8.1	Conclusiones	462
8.1.1	Aspectos sobre la toma de decisión enfocada a la intervención de redes de abastecimiento o saneamiento	463
8.1.2	Aspectos sobre los criterios influyentes y su forma de evaluación	465
8.1.3	Aspectos sobre las metodologías previas para la determinación de las prioridades de intervención	466
8.1.4	Sobre la Lógica Difusa como metodología finalmente propuesta para la determinación prioridades de intervención	468
8.1.5	Sobre la gestión de bases de datos relacionadas con el patrimonio en infraestructura de la empresa	471
8.1.6	Sobre la sistematización del proceso de toma de decisión	472

8.2	Aportes de esta tesis.....	473
8.3	Investigaciones futuras	474
CAPÍTULO 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		476
CAPÍTULO 10 ANEXOS.....		488
Anexo I Listado de variables de gestión		490
Anexo II Indicadores complementarios basados en el balance enfocado a la medición de consumos		500
II.1	A nivel de la gestión general	500
II.2	A nivel de la red	501
II.3	A nivel de la medida.....	502
II.4	A nivel del control de acometidas.....	503

Lista de tablas

Tabla 1. Estructura general de la tesis.....	52
Tabla 2. Pesos para defectos estructurales y operativos. Protocolo NRC (Modificada de: NRC, 2004)	98
Tabla 3. Clasificación de la condición desde rangos de calificación estructural o calificación operativa según método de máximo peso. Protocolo del NRC (Zhao, 2001)	100
Tabla 4. Prioridad a la rehabilitación según el protocolo del NRC (Zhao, 2001)	100
Tabla 5. Pesos para defectos estructurales y operativos. Protocolo WRc (Modificada de: NRC, 2004)	101
Tabla 6. Clasificación de la condición desde rangos de calificación estructural o calificación operativa según método de máximo peso. Protocolo del WRc (WRc, 2001)	102
Tabla 7. Clasificación de la condición según defectos operativos o estructurales. Protocolo CERIU (Chughtai y otros, 2011)	103
Tabla 8. Clasificación de defectos y pesos de importancia (Chughtai y otros, 2011)	104
Tabla 9. Índice de Condición Combinado. Propuesta de integración de protocolos de WRc y CERIU	105
Tabla 10. Ayuda para el diagnóstico del estado actual de la gestión de bases de datos relacionadas con el deterioro de la red.....	119
Tabla 11. Ejemplo de pesos asignados a criterios, con variación entre 0 y 100	121
Tabla 12. Resultados finales de diagnóstico del grado de gestión actual de las bases de datos	122
Tabla 13. Matriz de relaciones causales entre las variables m y n.....	150
Tabla 14. Procedimiento sistemático para definir los criterios locales relevantes que conforman el espacio de decisión	159
Tabla 15. Ejemplo de valores de posibilidad de falla en función de la edad, la presión de servicio y el número de fallos. Tasa de deterioro normal.	175
Tabla 16. Resultados de la regla de inferencia de Mamdani	177
Tabla 17. Resumen de la limpieza hecha a la base de datos del ejemplo de aplicación....	182
Tabla 18. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 1	196
Tabla 19. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 2.....	196
Tabla 20. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 3.....	197
Tabla 21. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 4.....	197
Tabla 22. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 5.....	197
Tabla 23. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 6.....	198
Tabla 24. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 7.....	198
Tabla 25. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 8.....	199
Tabla 26. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio	204
Tabla 27. Lista de las 20 últimas tuberías de toda la red con menor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio	205

Tabla 28. Lista de las 20 primeras tuberías de cada sector con mayor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio	206
Tabla 29. Lista de las 20 últimas tuberías de cada sector con menor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio	207
Tabla 30. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación	208
Tabla 31. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, según la metodología de cubos decisionales y Lógica Difusa, y lista de prioridad según la metodología alterna de pesos de importancia para parejas de criterios y Lógica Difusa	210
Tabla 32. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación mediante la metodología de cubos decisionales y Lógica Difusa, y lista de prioridad de sectores según la metodología alterna de pesos de importancia para parejas de criterios y Lógica Difusa	211
Tabla 33. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Edad.	213
Tabla 34. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Edad.	213
Tabla 35. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Presión.	215
Tabla 36. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Presión.	216
Tabla 37. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Número de fallos/km/año.	217
Tabla 38. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Número de fallos/km/año.	218
Tabla 39. Variaciones en las matrices decisionales que hacen parte del proceso de agregación	219
Tabla 40. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.	221
Tabla 41. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.	221
Tabla 42. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 1 del segundo espacio decisional	226
Tabla 43. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 2 del segundo espacio decisional	226
Tabla 44. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 3 del segundo espacio decisional	227
Tabla 45. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 4 del segundo espacio decisional	227

Tabla 46. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 5 del segundo espacio decisional	227
Tabla 47. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 6 del segundo espacio decisional	228
Tabla 48. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 7 del segundo espacio decisional	228
Tabla 49. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 8 del segundo espacio decisional	229
Tabla 50. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el segundo espacio decisional	230
Tabla 51. Lista de las 20 últimas tuberías de toda la red con menor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el segundo espacio decisional	230
Tabla 52. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación para el segundo espacio decisional.....	231
Tabla 53. Variaciones en las matrices decisionales que hacen parte del proceso de agregación	232
Tabla 54. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red, con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.	233
Tabla 55. Lista de las 20 últimas tuberías de toda la red, con menor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.	234
Tabla 56. Matriz de posibilidad de posibilidad de falla para agregación de espacios decisionales 1 y 2	236
Tabla 57. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad final a la renovación, después de agregar los espacios decisionales 1 y 2.....	238
Tabla 58. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación para el segundo espacio decisional.....	239
Tabla 59. Características físicas de las tuberías incluidas en el estudio (Almandoz y otros, 2005)	248
Tabla 60. Calificación de cada tubería según edad. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005).....	255
Tabla 61. Calificación de cada tubería según número de roturas por año y unidad de longitud. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)	256
Tabla 62. Calificación de cada tubería según pérdida de capacidad hidráulica. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)	256
Tabla 63. Calificación de cada tubería según variaciones en la red por ocurrencia de fuga. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)	257
Tabla 64. Calificación de cada tubería según variaciones en la red por ocurrencia de un incendio. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)	257

Tabla 65. Calificación de cada tubería ante el tiempo de renovación óptimo según modelo de Shamir y Howard (Almandoz y otros, 2005)	258
Tabla 66. Calificación de cada tubería ante la deficiencia en los estándares de servicio por la suspensión del abastecimiento de agua (Almandoz y otros, 2005)	259
Tabla 67. Matriz de valoración semántica y calificación de cada tubería ante el impacto ambiental causado por una rotura (Almandoz y otros, 2005).....	260
Tabla 68. Resultado final de la aplicación del modelo de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005).....	260
Tabla 69. Resultados de la aplicación del modelo decisional de sumas ponderadas. Análisis de sensibilidad (1) ante la variación de pesos de importancia de los criterios. Mayor importancia al criterio edad.....	261
Tabla 70. Resultados de la aplicación del modelo decisional de sumas ponderadas. Análisis de sensibilidad (2) ante la variación de pesos de importancia de los criterios. Mayor importancia al criterio capacidad hidráulica.....	262
Tabla 71. Resultados de la aplicación del modelo decisional de sumas ponderadas. Análisis de sensibilidad (3) ante la variación de pesos de importancia de los criterios. Mayor importancia al criterio impacto ambiental.	263
Tabla 72. Listado de tuberías de estudio	271
Tabla 73. Valores ideales y anti-ideales de los criterios pertenecientes al grupo “Fundamentales”.....	273
Tabla 74. Valores ideales y anti-ideales de los criterios pertenecientes al grupo “Hidráulicos”	273
Tabla 75. Valores ideales y anti-ideales de los criterios pertenecientes al grupo “Especiales”	273
Tabla 76. Parámetros $F(x)$, S y distancia de las alternativas al valor ideal del grupo “Fundamentales”.....	274
Tabla 77. Parámetros $F(x)$, S y distancia de las alternativas al valor ideal del grupo “Hidráulicos”	275
Tabla 78. Parámetros $F(x)$, S y distancia de las alternativas al valor ideal del grupo “Especiales”	275
Tabla 79. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso simple.....	276
Tabla 80. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso y de la ponderación de distancias en su última fase.....	277
Tabla 81. Variaciones introducidas en los pesos de los criterios del grupo “Fundamentales” para la realización del análisis de sensibilidad de los resultados.....	278
Tabla 82. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso con ponderación de distancias en su última fase final, ante la variación en los pesos de los criterios del grupo “Fundamentales”	278

Tabla 83. Aumento introducido en el peso del grupo de criterios “Fundamentales” para la realización del análisis de sensibilidad de los resultados generados mediante la programación por compromiso y la ponderación de distancias en la fase final ...	281
Tabla 84. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso con ponderación de distancias en su última fase ante el aumento del peso del grupo “Fundamentales”	281
Tabla 85. Aumento introducido en el peso del grupo de criterios “Fundamentales” para la realización del análisis de sensibilidad de los resultados generados mediante la programación por compromiso simple	283
Tabla 86. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso simple ante el aumento del peso del grupo de criterios “Fundamentales”	283
Tabla 87. Nivel de exceso de fugas en acometidas del sector 1	293
Tabla 88. Nivel de exceso de fugas en tuberías de distribución del sector 1	293
Tabla 89. Calificación por sector según su nivel de exceso de fugas	294
Tabla 90. Tiempo desde la última inspección para el sector 1	294
Tabla 91. Calificación por sector según el tiempo transcurrido desde la última inspección	295
Tabla 92. Calificación asignada a los criterios según su importancia general	295
Tabla 93. Situación socio-ambiental del sector 1	296
Tabla 94. Calificación por sector según su situación socio-ambiental	297
Tabla 95. Matriz que relaciona parejas de criterios	299
Tabla 96. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio NEF	300
Tabla 97. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio SSA	300
Tabla 98. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio TUI	300
Tabla 99. Matriz que relaciona alternativas individuales y criterios	303
Tabla 100. Nueva calificación asignada a los criterios según su importancia general	304
Tabla 101. Características para la asignación del factor de incertidumbre “a”	310
Tabla 102. Características para la asignación del factor de incertidumbre “b”	311
Tabla 103. Calificación de la condición de la tubería según rangos L/D y material	318
Tabla 104. Calificación de la condición según el registro de fallos	324
Tabla 105. Calificación de la condición según el registro de obstrucciones	325
Tabla 106. Rangos de variación de la relación L/D para diferentes materiales: concreto (muestra de estudio), PVC y acero	336
Tabla 107. Pesos de importancia para la determinación de la calificación de la condición	340
Tabla 108. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con mayor prioridad a la intervención según la calificación de la condición	341
Tabla 109. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con menor prioridad a la intervención según la calificación de la condición	342
Tabla 110. Pesos de importancia para la determinación de la calificación de la condición. Análisis de sensibilidad	345

Tabla 111. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con mayor prioridad a la intervención según la calificación de la condición tras variaciones en el conjunto de pesos de importancia.....	346
Tabla 112. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con menor prioridad a la intervención según la calificación de la condición tras variaciones en el conjunto de pesos de importancia.....	346
Tabla 113. Secuencia de limpieza para una base de datos de una empresa de abastecimiento.....	381
Tabla 114. Porcentaje de registros descartados por material y época de instalación tras la primera etapa de limpieza.....	381
Tabla 115. Matriz de decisión en una base de conocimiento experto.....	388
Tabla 116. Asignación de funciones en un plan de actuación.....	412
Tabla 117. Campos de la hoja de inventarios.....	414
Tabla 118. Campos de la hoja de incidencias.....	416
Tabla 119. Campos de la hoja de intervenciones.....	417
Tabla 120. Indicadores de desempeño de la IWA comúnmente utilizados para evaluar la disponibilidad y las pérdidas de agua en un sistema de abastecimiento.....	418
Tabla 121. Indicadores de desempeño de la IWA comúnmente utilizados para evaluar la calibración de instrumentos, la inspección, la renovación y la frecuencia de fallos en un sistema de abastecimiento.....	419
Tabla 122. Indicadores ambientales para redes de saneamiento.....	421
Tabla 123. Indicadores físicos y operacionales para redes de saneamiento.....	422
Tabla 124. Indicadores de calidad del servicio para redes de saneamiento.....	423
Tabla 125. Variables de volumen y de balance hídrico de una red de abastecimiento basado en la autorización de consumos.....	490
Tabla 126. Variables del balance hídrico de una red de abastecimiento basado en la medición de consumos.....	491
Tabla 127. Variables de infraestructura, de abonados y de tipo financiero.....	492
Tabla 128. Variables relativas a la operación de una red de abastecimiento.....	493
Tabla 129. Variables ambientales para indicadores de redes de saneamiento.....	494
Tabla 130. Variables de infraestructura para indicadores de redes de saneamiento.....	495
Tabla 131. Variables operacionales para indicadores de redes de saneamiento.....	496
Tabla 132. Variables demográficas para indicadores de redes de saneamiento.....	497
Tabla 133. Variables de calidad del servicio para indicadores de redes de saneamiento ..	497

Lista de figuras

Figura 1. Características de la lógica difusa en el contexto de GPI	41
Figura 2. Micrografía de la fundición gris (izquierda) y de la fundición dúctil (derecha)	58
Figura 3. Variación de la correlación lineal entre la longitud y el número de roturas	61
Figura 4. Reducción del diámetro en una tubería de fundición gris de diámetro 4 pulgadas	62
Figura 5. Fallo por corrosión en tubería de fundición dúctil	63
Figura 6. Tuberías de fundición dúctil con recubrimiento de zinc	63
Figura 7. Fallo en la unión entre tubería y codo debido a un deficiente galvanizado	64
Figura 8. Proceso de fundición para una tubería de gran diámetro	64
Figura 9. Fallo por exposición del refuerzo metálico	65
Figura 10. Tubería de fibrocemento utilizada en red de alcantarillado (izquierda). Refuerzos de fibra de amianto (derecha)	66
Figura 11. Fallo frágil	67
Figura 12. Fuga en empalme de tubería plástica	68
Figura 13. Junta de caucho en la unión campana-espiga	73
Figura 14. Fallo de conducción de hormigón relacionado con movimiento en masa	76
Figura 15. Esquema de rotura circular	80
Figura 16. Rotura circular	80
Figura 17. Esquema de rotura longitudinal	81
Figura 18. Rotura longitudinal	81
Figura 19. Esquema de rotura puntual por corrosión	82
Figura 20. Hoyo producido por corrosión	82
Figura 21. Esquema de rotura longitudinal por corrosión	83
Figura 22. Esquema de corte en la campana	83
Figura 23. Corte en la campana	84
Figura 24. Rotura en espiral	85
Figura 25. Esquema de corte en forma de cuña	85
Figura 26. Propuesta de localización del defecto mediante sistema de agujas del reloj (WRc, 2001)	101
Figura 27. Niveles de interacción de las bases de datos del modelo de deterioro y de los sistemas de indicadores de gestión y de apoyo a la decisión para la renovación o rehabilitación de la red	107
Figura 28. Formas geométricas de funciones de pertenencia más comunes: trapezoidal, triangular, gaussiana y unitaria (adaptada de Berthold, 2003)	129
Figura 29. Características de un número difuso (adaptada de Ross, 2004)	131
Figura 30. Adición de números difusos (adaptada de Berthold, 2003)	132
Figura 31. Conjunción tipo I (adaptada de Berthold, 2003)	133
Figura 32. Conjunción tipo II (adaptada de Berthold, 2003)	134
Figura 33. Disyunción tipo I (adaptada de Berthold, 2003)	135
Figura 34. Disyunción tipo II (adaptada de Berthold, 2003)	135

Figura 35. Inferencia de Mamdani (adaptada de Ross, 2004).....	141
Figura 36. Modelo de Sugeno (adaptada de Ross, 2004)	142
Figura 37. Modelo de Tsukamoto (adaptada de Ross, 2004).....	142
Figura 38. Valor defuzificado X^*_A mediante el método de centro de área (adaptada de Ross, 2004)	144
Figura 39. Valor defuzificado X^*_A mediante el método del principio de máximas pertenencias (adaptada de Ross, 2004)	144
Figura 40. Valor defuzificado X^*_A mediante el método de promedio de pertenencias máximas (adaptada de Ross, 2004)	145
Figura 41. Esquema general de un conjunto difuso compuesto por cuatro números difusos representativos de un criterio de análisis	149
Figura 42. Esquema de un conjunto difuso de salida, compuesto por seis números difusos. Su área difusa se convierte a un valor puntual representativo de los efectos de los criterios involucrados	150
Figura 43. Espacio de decisión bidimensional conformado por todas las posibles decisiones D_{AiBj} tras el cruce de los i números que representan al criterio A, y los j números que representan al criterio B.....	152
Figura 44. Espacio de decisión tridimensional.....	153
Figura 45. Relación entre dos espacios decisionales	154
Figura 46. Unidades de decisión (cubos) para el análisis de un espacio decisional tridimensional	154
Figura 47. Número difuso triangular "media", descriptivo del criterio Edad.....	164
Figura 48. Número difuso trapezoidal "media", descriptivo del criterio Edad	164
Figura 49. Evaluación de una tubería de 12.5 años de edad en un número difuso representativo del criterio edad, correspondiente al estado "media"	165
Figura 50. Ejemplo de universo de discurso de un conjunto difuso que representa el criterio edad	167
Figura 51. Evaluación de una tubería de 12.5 años de edad en un conjunto difuso representativo del criterio edad.....	168
Figura 52. Evaluación de una tubería de 12.5 años de edad tras variaciones en el conjunto difuso representativo del criterio edad	168
Figura 53. Evaluación de una tubería de 1.6 fallos/km/año en un conjunto difuso representativo del criterio fallos	169
Figura 54. Evaluación de una tubería con una presión de servicio de 35 m.c.a. en un conjunto difuso representativo del criterio presión	169
Figura 55. Unidades de decisión 1, 2, 3 y 4.....	171
Figura 56. Cubos decisionales 5, 6, 7 y 8	173
Figura 57. Conjunto difuso representativo de la posibilidad de falla.....	177
Figura 58. Área resultante tras aplicar el proceso de agregación	178
Figura 59. Longitud instalada en cada década por material	184

Figura 60. Distribución de tuberías por material (FD: fundición dúctil, UR: fibrocemento, PE: polietileno, FG: fundición gris)	184
Figura 61. Longitud instalada acumulada en cada año por material	185
Figura 62. Porcentaje instalado cada año respecto al total del material hasta 2004	185
Figura 63. Ocurrencia de fallos por km y año en función del material	186
Figura 64. Longitud instalada por material y diámetro en cada sector	188
Figura 65. Edad promedio de las tuberías de la red por material y sector	189
Figura 66. Presión de servicio promedio de las tuberías de la red por material y sector	190
Figura 67. Evaluación de tuberías de los sectores 1, 5, 7 y 10 según el conjunto difuso edad definido para la red de estudio.....	192
Figura 68. Evaluación de tuberías de los sectores 1, 5, 7 y 10 según el conjunto difuso presión definido para la red de estudio.....	193
Figura 69. Evaluación de tuberías de los sectores 1, 5, 7 y 10 según el conjunto difuso fallos definido para la red de estudio.....	194
Figura 70. División del espacio decisional en ocho unidades de decisión	195
Figura 71. Conjunto difuso resultado de la posibilidad de falla.....	200
Figura 72. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S1-81771	201
Figura 73. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S5-46466	201
Figura 74. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S7-50189	202
Figura 75. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S10-58331.....	202
Figura 76. División del espacio segundo decisional en ocho unidades de decisión	225
Figura 77. Números difusos descriptivos del primer espacio decisional	235
Figura 78. Números difusos descriptivos del segundo espacio decisional.....	236
Figura 79. Conjunto difuso de la posibilidad de falla final, para proyectar los resultados de la agregación de los espacios decisionales 1 y 2.....	237
Figura 80. Estructura típica de la matriz de ponderación de alternativas	245
Figura 81. Orden de prioridad de alternativas en función del valor de la agregación final..	246
Figura 82. Cambios en las distancias de compromiso de cada grupo de criterios ante variaciones introducidas en los pesos de los criterios que lo componen	279
Figura 83. Cambios en los resultados finales ante variaciones introducidas en los pesos de los criterios, mediante el uso de la programación por compromiso y la ponderación de distancias en última fase.....	280
Figura 84. Cambios en los resultados finales ante variaciones introducidas en los pesos de los grupos de criterios, mediante el uso de programación por compromiso y la ponderación de distancias en última fase.....	282

Figura 85. Cambios en los resultados finales ante variaciones introducidas en los pesos de los grupos de criterios, mediante el uso de la programación por compromiso simple.....	284
Figura 86. Estructura básica del Método de las Jerarquías Analíticas	286
Figura 87. Sector 1 del distrito de Gros: Mons, falda del monte Ulía, parte alta del barrio de Intxaurreondo	289
Figura 88. Sector 2 del distrito de Gros: parte alta del barrio de Gros, centro de Intxaurreondo, parte baja del barrio de Ulía.....	290
Figura 89. Sector 3 del distrito de Gros: Barrio de Egía, Gros centro, playa de la Zurriola.	290
Figura 90. Porcentaje de la longitud total de la red según diámetro.....	326
Figura 91. Distribución de longitudes instaladas en cada red por cada tipo de agua	327
Figura 92. Distribución de longitudes instaladas por diámetro. Red secundaria	327
Figura 93. Distribución de longitudes instaladas por diámetro. Colectores e interceptores	328
Figura 94. Distribución de longitudes instaladas desde 1950 hasta 2010.....	329
Figura 95. Comportamiento de dos tasas representativas de la dinámica de la red secundaria: tasa de fallos y de obstrucciones por km de red existente	329
Figura 96. Calificación del criterio edad para la muestra de estudio (tuberías de concreto)	331
Figura 97. Calificación del criterio edad para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC).....	332
Figura 98. Calificación del criterio profundidad de instalación para la muestra de estudio (t. de concreto)	333
Figura 99. Calificación del criterio profundidad de instalación para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)	334
Figura 100. Calificación del criterio L/D para la muestra de estudio (tuberías de concreto)	335
Figura 101. Calificación del criterio L/D para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC).....	335
Figura 102. Calificación del criterio pendiente para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)	337
Figura 103. Calificación del criterio desempeño de la tubería debido al estado de las acometidas que recibe, para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)	338
Figura 104. Calificación del criterio registro de fallos para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de PVC)	339
Figura 105. Calificación del criterio registro de obstrucciones para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de PVC)	340
Figura 106. Calificación de la condición mediante la metodología propuesta y comparación con resultados de inspección mediante circuito cerrado de TV y combinación de otros criterios.....	343
Figura 107. Calificación de la condición mediante la metodología propuesta y comparación con resultados de inspección mediante circuito cerrado de TV y combinación de	

otros criterios. Análisis de sensibilidad de los resultados ante la variación en los pesos de importancia	348
Figura 108. Establecimiento del periodo óptimo de renovación en función de los costos tradicionales esperados	361
Figura 109. Efecto de la consideración de costos adicionales de renovación y mantenimiento sobre el periodo óptimo de renovación (Cabrera y otros, 2007)	363
Figura 110. Esquema de plan básico de actuación para una empresa de abastecimiento	370
Figura 111. Esquema de plan básico de actuación para una empresa de saneamiento	372
Figura 112. Limpieza de una base de datos de abastecimiento: secuencia de etapas y estadísticos de información descartada	383
Figura 113. Esquema propuesto de base de conocimiento experto para sistemas de transporte de agua	391
Figura 114. Esquema de planeación financiera al interior de un Plan de Actuación.....	410
Figura 115. Puntos de medición, entradas y salidas características del balance hídrico propuesto por la IWA	426
Figura 116. Estructura del balance hídrico enfocado a la autorización de consumos.....	428
Figura 117. Niveles y componentes del balance hídrico de una red de abastecimiento enfocado a la medición de consumos	430
Figura 118. Formulario de datos generales	439
Figura 119. Formulario de introducción de datos básicos para realizar balance hídrico volumétrico.....	440
Figura 120. Formulario para la transferencia de datos desde bases de datos externas.....	441
Figura 121. Formulario de conformación de Lógica Difusa	443
Figura 122. Visualización de la construcción de conjuntos difusos	444
Figura 123. Formulario para la conformación de matrices de agregación por parejas de criterios.....	446
Figura 124. Formulario para la conformación de matrices de agregación donde todos los criterios se relacionan simultáneamente	447
Figura 125. Resultados sobre necesidad de intervención. Resumen de cada sector	449
Figura 126. Resultados sobre necesidad de intervención. Listado por tubería para toda la red.....	449
Figura 127. Resultados sobre necesidad de intervención. Listado por tubería para cada sector	450
Figura 128. Opciones complementarias en la hoja de informe	451
Figura 129. Formulario de introducción de datos para calcular algunos indicadores de desempeño básicos de la IWA	451
Figura 130. Formulario de introducción de datos complementarios para calcular algunos indicadores de desempeño económicos y financieros de la IWA	452
Figura 131. Formulario de introducción de datos complementarios para calcular algunos indicadores de desempeño operativos de la IWA	453
Figura 132. Resultado: árbol de balance hídrico de la red.	454

Figura 133. Algunas de las gráficas que se insertan automáticamente a la hoja informe. .	455
Figura 134. Indicadores de gestión relativos a cada nivel definido en el balance hídrico enfocado a la medición de consumos	505

Capítulo 1

Introducción

Las intervenciones en una red de transporte de agua se hacen cuando sus elementos han envejecido, se ven afectados significativamente por sus condiciones de operación, tienen defectos de fabricación o material, o no satisfacen las necesidades actuales. La combinación de algunos de estos motivos genera anomalías estructurales o hidráulicas que evidencian la necesidad de renovación, reparación, sustitución o refuerzo de una o varias tuberías del sistema.

Otros aspectos de gestión, como la mejora en los niveles de servicio, la actualización de las políticas ambientales o sociales, la actualización de los niveles admisibles de riesgo y los costos asociados a operación y mantenimiento, también constituyen razones para intervenir el sistema.

Así pues, determinar la prioridad de intervención actual de las tuberías constituye un objetivo empresarial imprescindible y complejo, que conlleva esfuerzos de diferentes tipos: reunir la información relevante para su estimación, elegir los criterios más representativos para incluir en el estudio, acondicionar un sistema de decisión adecuado al nivel de desarrollo de la organización y a la información disponible, y por supuesto, ejecutarlo. Estas son entre otras, las labores a las que se enfrenta el personal técnico que participa en este proceso.

La determinación del tipo de intervención que debe tener una tubería constituye el paso siguiente a la asignación de la prioridad de intervención del elemento. Cada conducción, en función de la naturaleza de las anomalías que la llevaron a obtener tal prioridad, deberá ser objeto, posteriormente, una intervención para:

- Mejorar su aprovechamiento funcional sin aumento de su capacidad de utilización original (renovación).
- Rectificar una anomalía puntualmente localizada (reparación).
- Desactivarla y construir o instalar un nuevo componente con capacidades similares o distintas al existente (sustitución).
- Construir un componente adicional que complementa las capacidades de la conducción existente (refuerzo).

Las anteriores definiciones son utilizadas en el ámbito de la Gestión Patrimonial de Infraestructura (Alegre, 2010) para conformar el término rehabilitación. Algunas de las más conocidas normas y manuales técnicos (WRc, 2001; AENOR, 2010; Alegre, 2010) abordan la rehabilitación desde un punto de vista mucho más amplio

que el tradicional, con la intención de incluir todos los aspectos relativos a la mejora del desempeño. Lo anterior reviste importancia, en la medida que permite considerar como intervenciones de rehabilitación a aquellas que se derivan de situaciones surgidas desde la gestión técnica, desde la gestión administrativa, y desde la integración de ambas.

La aplicación cada vez más imperativa del concepto de sostenibilidad, entendida esta como la satisfacción de las necesidades de la actual generación (específicamente, en el caso del abastecimiento de agua en el entorno urbano, la demanda del recurso para todos los usos posibles) sin poner en riesgo su disponibilidad para que las futuras generaciones satisfagan sus requerimientos básicos (Brundtland, 1987), también puede requerir implementar acciones en el sistema que constituyen intervenciones de rehabilitación.

Claramente, el concepto tradicional de intervenciones de rehabilitación, enfocado exclusivamente a la atención de anomalías estructurales, debe dar paso a éste nuevo, que abarcando un espectro mucho más abierto, refleja la realidad de los sistemas de transporte de agua urbanos de hoy, que permanentemente se encuentran bajo estrés, no solo por el cumplimiento de mínimos admisibles, sino más allá, en la búsqueda de niveles de servicio sostenibles, y que realmente satisfacen la necesidad de los abonados, y simultáneamente, las directrices sobre las cuales se fundamenta la visión y la misión de la entidad prestadora de servicios.

Como se explica con más detalle a continuación, la presente tesis pretende enmarcarse (en la medida de sus posibilidades) en este cambio de paradigma, cambio que intenta abordar la gestión del patrimonio en infraestructura de las empresas involucradas desde una visión más amplia, más estratégica, más sostenible, más lógica y coherente con las bases que fundamentan el existir de la entidad, con más equilibrio entre sus niveles de desempeño, riesgo y costo; y planeada no solo en el nivel operacional, sino también trascendiendo al táctico, e integrada incluso con la toma de decisiones a nivel estratégico.

1.1 Justificación e intención de la tesis

Las redes de distribución - y en el mismo sentido las redes de saneamiento - a día de hoy funcionan, en mejor o peor grado, en todo el mundo. En el caso de las primeras lo hacen para satisfacer la demanda de abastecimiento de una población urbana cada vez más grande, y cuya necesidad de agua se ve magnificada por

estándares de calidad de vida que van a mejorar en ciertos lugares, y que involucran mayores requerimientos.

Para el segundo grupo de redes, la urbanización de amplias zonas que antes estaban cubiertas por capa vegetal de diferentes clases, supone el problema de enfrentar la impermeabilización del suelo, que en el pasado permitía una infiltración mayor, y en consecuencia una escorrentía superficial controlada, y que ahora se traduce en altos picos de caudal con menores tiempos de concentración en el hidrograma de entrada al sistema.

Resultado de lo anterior, los alcantarillados se ven cortos, cada vez más, en su capacidad hidráulica para transportar las aguas pluviales. El tema sanitario, aunque no menos importante, preocupa más del lado de la calidad del servicio (las infiltraciones de aguas negras al terreno, y la depuración de aquellas que logran llegar a la planta de tratamiento) que del lado de la capacidad del sistema para enfrentarlo.

Sin embargo, ambos sistemas (abastecimiento y saneamiento) se enfrentan hoy, y lo harán con mayor intensidad en el futuro, a un desafío formidable: mejorar, en continuo pero al máximo, su eficiencia.

En el sentido amplio, la mejora de la eficiencia de un sistema de abastecimiento requiere, no solo trabajar en pos de la reducción en la insuficiencia hidráulica (y para ello realizar estudios de actualización de diámetros, de cambios de trazado y de niveles de presión), sino además abordar la problemática asociada a los rendimientos de las redes mediante la programación de auditorías, y en el fondo, asegurando que se mide todo tipo de caudal entregado, y en consecuencia se puede ejecutar un control activo de fugas, entre otras misiones importantes.

Para las redes de saneamiento la visión sobre la mejora de la eficiencia es similar, si bien las tareas difieren. Entre ellas, se pueden mencionar estudios de verificación de pendientes, de ampliación de diámetros, de actualización de trazados, de separación de aguas pluviales y residuales, entre otros. Los planes de inspección para la verificación de la condición estructural y operativa mediante circuito cerrado de televisión, también hacen parte de las actividades dirigidas a mejorar la eficiencia de la red.

Pero esta exigencia de mejora viene marcada, no solo por los intereses de la entidad prestadora del servicio, sino también, y en algunos casos mucho más, por:

- La normativa que cobija al accionar de la empresa. Dicha normativa puede ser de origen nacional (normas de aplicación en todo el país, o en la región, e impuestas por el estado a través de sus entes reguladores), o de origen internacional (aquellas promulgadas por organismos representantes de comunidades de países, como la Unión Europea, la Organización de Estados Americanos, la Comunidad Andina de Naciones, entre un amplio abanico). Las normas de la Organización Internacional de Normalización (normas ISO), o las normas del Comité Europeo de Normalización (normas EN) constituyen buenos ejemplos de ello.
- La escasez de recursos. Bien sea por la cada vez más notoria ausencia de fuentes económicas para hacer frente a la operación y mantenimiento del sistema, o también, y no menos importante, por la evidente disminución del recurso hídrico disponible para su uso en algunas zonas (por ejemplo, en las ciudades de la costa mediterránea europea). En este último punto, no solo el deterioro de las fuentes naturales, sino además el cambio climático (con evidencias más pronunciadas en algunos territorios que en otros), pronostican la potencial carencia del recurso hídrico a futuro.
- Aumento de las necesidades. No solo deben funcionar cuando menos, aceptablemente, para dar abastecimiento a los usos personales, sino además, para permitir una variedad de otros tipos: riego de cultivos para alimentar poblaciones cada vez mayores, riego de jardines ornamentales, lavado de calles, lavado de autos, llenado de piscinas, tan solo por citar algunos.

Por supuesto, la exigencia de mejora debe darse en todos los ámbitos de la gestión de un sistema, pero resulta innegable que uno de los principales es el referido a la intervención de las tuberías de la red, porque:

- Las inversiones en renovación, reparación, sustitución y refuerzo de elementos lineales de la red representan un alto (en muchos casos, el

mayor) porcentaje del presupuesto total destinado al mantenimiento de todo el sistema.

- Las tuberías que desde el principio han hecho parte de sistemas de mediana y avanzada edad (con funcionamiento mayor a 40 años), a día de hoy, por muchos expertos, son consideradas viejas, o inexorablemente lo serán en un corto plazo.

Además de lo anterior, actualmente la mejora de la eficiencia se ve supeditada a decidir las intervenciones más prioritarias en la red con base en los resultados entregados por modelos (algunos de ellos basados en la simple consideración individual de algunos criterios) que no son buenos o prácticos, porque:

- Necesitan datos en tal cantidad y grado de especificidad, que raramente una entidad operadora de redes de abastecimiento o saneamiento los tiene.
- Son modelos de tinte calculista-determinista, principalmente orientados a cuestiones estructurales de la tubería, ignorando en consecuencia, los efectos de otros criterios relevantes para asignar prioridades de intervención, y que no pertenecen al campo estructural.
- En el fondo conciben la sustitución (o renovación, si se quiere) como un proceso en el cual la tubería se deteriora hasta que se considera que alcanza cierto nivel inaceptable, y entonces se sustituye por otra igual. Su estructura no permite incluir criterios que valoren consideraciones sobre el objetivo de la tubería (es decir, sobre la forma en que presta el servicio), o sobre su entorno (los problemas asociados a su intervención), o sobre las consecuencias de su fallo (por ejemplo, inundar una escuela, dejar a un hospital sin agua, inhabilitar el uso de locales comerciales, entre muchos). Estos modelos se centran sólo en elemento como tal (el tubo con la grieta más grande es aquel que debe ser intervenido primero).

Expuestos los anteriores motivos, esta tesis se ha propuesto desarrollar un modelo nuevo de decisión para la intervención de tuberías que mejore los actuales en los siguientes aspectos:

- Sea consecuente con la realidad acerca de la cantidad de datos existentes. En un entorno de información escasa, como lo es el conformado por las bases de datos de sistemas de abastecimiento y saneamiento (y muy en especial, en aquellas redes nuevas, de países emergentes, donde la medición es incipiente, y en consecuencia la disponibilidad de datos corresponde con series temporales cortas y de baja calidad), contar con una estructura de decisión de este corte resulta ser una característica deseable. Tal estructura debe generar resultados sobre prioridad actual a la intervención que permitan tomar decisiones sobre inversión en la red, y debe trabajar con base en los registros con los que realmente se cuenta.
- Sea capaz de incluir información nueva: esa misma flexibilidad que le permite trabajar con información escasa, es la que le permite incorporar a futuro, dentro de la estructura de decisión local, nuevos campos (criterios) provenientes de las bases de datos que continuamente van creciendo.
- Sea fiable. Sus resultados deben corresponder, efectivamente, con las contribuciones de los criterios considerados (como fallos, edades, presiones, etc.) Esta es una característica de todos los modelos existentes, aunque ellos requieren niveles de información irreales.
- Considere la opinión experta. La información con origen en aquellos conocimientos sólo contenidos en la cabeza del gestor y basados en su experiencia, que resultan ser tan importantes como la información de las bases de datos. Esta característica, en combinación con la flexibilidad para trabajar con información escasa, hace de la presente, una propuesta única en su tipo.
- Sea flexible para incluir criterios adicionales a los relacionados exclusivamente con la tubería. Esta característica le imprime a la metodología un carácter amplio, que corresponde con la filosofía sobre la cual la empresa debe tomar las decisiones de este tipo.
- Sea capaz de gestionar la incertidumbre asociada a la combinación de criterios heterogéneos, y también a la incertidumbre que el experto posee sobre el comportamiento local de cada criterio. Al lograr incorporar la

incertidumbre desde la etapa inicial del proceso, y trasladarla hasta los resultados finales, se espera que éstos sean mucho más realistas.

- Se apoye en un procedimiento específicamente desarrollado para la misma, y además, matemáticamente sólido. Esto se logra mediante la incorporación de la lógica difusa como núcleo fundamental. Su robustez justifica además la fiabilidad de los resultados obtenidos.
- Finalmente, proporcione unos resultados concretos respecto a la decisión sobre necesidad de intervención actual de las tuberías de la red. La condición actual de los elementos de la red, teniendo en consideración su objetivo dentro del contexto de la empresa, es tan importante, que ella no solo permite decidir la inversión del presupuesto a fecha de hoy, sino que fundamenta la predicción futura sobre el comportamiento del sistema, mediante modelos que incorporan este resultado como dato de entrada, en conjunto con la tasa de deterioro característica del elemento.

Un aspecto muy importante a resaltar, radica en que ante el cambio de paradigma que suponen aportes como los consignados en esta tesis, la estructura de decisión propuesta queda alineada en la misma dirección que marcan las nuevas tendencias de Gestión Patrimonial de la Infraestructura, si bien se reconoce que mucho ha de hacerse todavía para que el trabajo mostrado en este documento logre una integración total a tal gestión.

Aunque el camino es largo, resulta que al haber escogido esta senda, el modelo de decisión desarrollado (y que ha terminado siendo aplicado a la sustitución/renovación de tuberías) es, no solo lo suficientemente flexible para adaptarse a distintas condiciones y experiencias de diversos abastecimientos, sino que es tan flexible, que podría ampliarse y subir uno o más escalones en la gestión de un sistema, de modo que su utilización pasase del nivel de tuberías hasta el nivel de estrategias de gestión.

1.2 Objetivos y ámbito de aplicación de la tesis

1.2.1 Objetivo general

En vista de la necesidad de generar herramientas cimentadas en soportes matemáticos robustos, y que consideren la experiencia del personal que conoce la red, y que activamente debe participar en la implementación de los elementos constitutivos de la Gestión Patrimonial de Infraestructura, el objetivo general no puede ser otro que:

Proponer una metodología decisional flexible, que incluya a la experiencia experta, y a su grado de incertidumbre asociado, y además permita evaluar los criterios de mayor relevancia local, dentro del proceso tendiente a establecer las necesidades de intervención (mediante renovación o sustitución) de tuberías y sectores de la red, haciendo uso de la lógica difusa como núcleo matemático fundamental que da estructura a la propuesta.

Esta propuesta utiliza la lógica difusa como argumento matemático de fondo, pues ella se caracteriza por:

- Brindar la posibilidad de recopilar el “saber cómo” del gestor, acerca del comportamiento e importancia de cada uno de los criterios elegidos para el estudio (edad de la tubería, el historial de fallos, la presión de servicio, entre muchos otros que se pueden incluir).
- Ser capaz de captar el grado de incertidumbre que puede tener el personal experto sobre cada criterio a lo largo del proceso matemático, en cada una de las tres etapas fundamentales (fuzificación, agregación y defuzificación), hasta los resultados finales, haciéndolos mucho más acordes a la realidad del sistema.

En resumen, las características principales de la lógica difusa se pueden apreciar en la Figura 1.

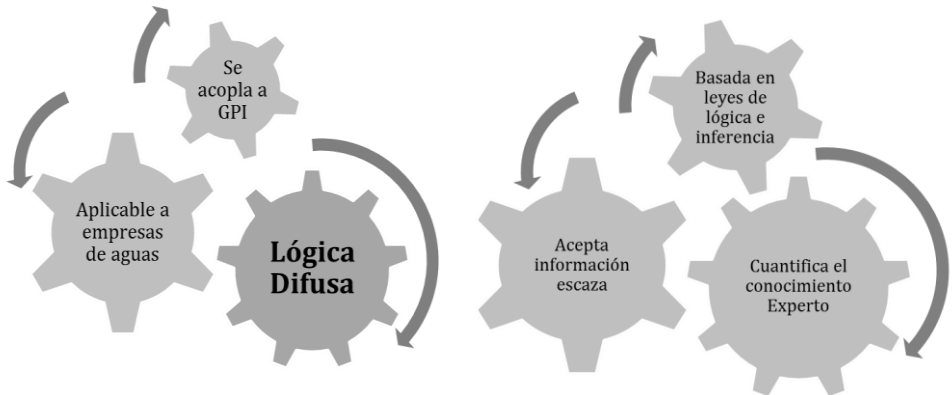


Figura 1. Características de la lógica difusa en el contexto de GPI

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar un repaso a los antecedentes en materia de factores físicos u operativos que influyen activamente en el proceso de deterioro de una tubería, y como consecuencia de éste, en la falla del elemento.
- Hacer una revisión del estado del conocimiento en lo relativo a los protocolos de inspección más usados, y así mismo a los modelos para la evaluación del deterioro más comunes. Este repaso contextualiza y ayuda a entender los aportes que se muestran en este documento.
- Plantear un conjunto de directrices que deben tenerse en consideración cuando se pretende integrar bajo un solo concepto a las diferentes bases de datos relativas a patrimonio en infraestructura, y que en consecuencia asegure una explotación más eficiente de estas bases de datos, en la fase de implementación de un sistema de ayuda a la decisión enfocado a determinar las necesidades de intervención de la red.
- Analizar en forma crítica varios desarrollos en los que el autor de esta tesis participó, o aquellos que generó íntegramente, con el objetivo establecer las prioridades de renovación en redes de abastecimiento y saneamiento. Para cada uno de ellos, presentar los casos de estudio realizados.

- Basado en el conocimiento adquirido en la fase de desarrollos previos, proponer una metodología de decisión basada en lógica difusa para la priorización de tuberías y de sectores a la renovación. Se presenta como caso de estudio su aplicación a una red del Mediterráneo español.
- Exponer una propuesta de plan integral de actuación, en el ámbito de la intervención a la renovación/sustitución de su patrimonio en infraestructura, con estructura modular (incluyendo los relativos a planeación, evaluación y mejora continua), aplicable a empresas gestoras de cualquier tamaño, que se encuentran finalizando su ciclo de crecimiento de la red y comienzan el de mantenimiento y mejora. La propuesta se presenta tanto para redes de abastecimiento como para redes de saneamiento, y en ella se implementan las herramientas que conforman la metodología de decisión basada en lógica difusa.

1.2.3 Ámbito de aplicación de la tesis

Las propuestas presentes en esta tesis pueden aplicarse a redes de abastecimiento, y con las adecuaciones respectivas, a redes de saneamiento. Estos aportes están enfocados a su implementación en empresas que comienzan a sentir las necesidades de intervención, que surgen tras cierto grado de envejecimiento de sus redes. Además, resultan especialmente adecuadas para sistemas en países emergentes, donde la adaptación a la información disponible es una característica imprescindible de las herramientas de decisión.

Considerando que la vida útil técnica más corta en países ibéricos resulta ser la del fibrocemento, con 30 años, seguida por los polietilenos, con 45 años (Alegre y otros, 2010), parece aceptable pensar, con criterio técnico, que cuando comienza a agotarse su vida útil, la tasa de fallo de estas tuberías comienza a aumentar, y con ella las necesidades de intervención. Por lo tanto los sistemas que tienen tuberías con 30 más años de funcionamiento son candidatos a adoptar el modelo decisional basado en lógica difusa, enmarcado en esta tesis.

Las herramientas aportadas pueden adaptarse a redes de países emergentes o industrializados que bien ahora comienzan a pensar en la Gestión Patrimonial de Infraestructura como el camino más expedito hacia el logro de mayores niveles de eficiencia en la inversión de los recursos destinados a intervención de la red.

Por último, los criterios y el mecanismo de diagnóstico de la gestión de las bases de datos pueden implementarse en sistemas de cualquier edad, y resulta sano hacerlo cuanto antes.

1.3 Contexto

A continuación se expone de manera brece las motivaciones generales que han animado a realizar esta tesis con el enfoque que se ha escogido, y así mismo, se describen de un modo muy general aquellos proyectos que han realizado importantes aportes en la misma dirección de esta investigación.

1.3.1 Motivaciones generales

1.3.1.1 Cambio climático

En reunión celebrada en Valencia, en noviembre de 2007, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (organismo de carácter científico conformado por la Organización Mundial Meteorológica y por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas), considerando las potenciales evidencias de los efectos de la acción humana sobre el comportamiento natural del clima a nivel global, presentó un detallado informe encaminado a proveer una visión integral de las causas y efectos de dichas variaciones.

El texto final, titulado “Reporte de Evaluación: Cambio Climático 2007” está compuesto por los productos de investigación de tres grupos de trabajo complementarios. El Capítulo 3 del informe presentado por el grupo Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad (Kundzewicz y otros, 2007) resulta suficientemente descriptivo sobre el presente y futuro de los recursos hídricos destinados al consumo humano y al riego a nivel mundial: “las áreas áridas y semiáridas están particularmente expuestas a los impactos del cambio climático en el agua dulce (alta confianza)” (Kundzewicz y otros, 2007).

Otras fuentes citadas en el mismo documento aportan afirmaciones similares: “... en regiones semiáridas el cambio climático puede extender el periodo estacional seco... lo que afecta particularmente a los usuarios que no pueden abastecerse de fuentes subterráneas o reservorios” (Giertz y otros, 2006).

Pero el abastecimiento de agua no es el único campo afectado por los cambios climáticos. Los episodios de lluvia de gran intensidad y duración, cada día más frecuentes, ponen a prueba las redes de evacuación de aguas pluviales (muchas veces compartidas con las de saneamiento básico). Éstas se ven en ocasiones incapaces de transportar volúmenes de agua que igualan o superan su capacidad máxima, rebosando en última instancia a la superficie.

Otro efecto producido por los cambios inducidos al clima mediante la acción humana es inmersión de los puntos de salida de estas redes. Según el mismo informe, esta vez en el capítulo 7 (Wilbanks y otros, 2007), el aumento progresivo en el nivel del mar, aunque lento, exigirá que los desagües de saneamiento en ciudades costeras se reubiquen a una mayor cota para evitar quedar sumergidos.

El mismo panel, esta vez en 2012 (ICCP, 2012), declara que el aumento que se viene detectando en la ocurrencia de eventos extremos (temperaturas muy altas o muy bajas, sequías o inundaciones) tendrá un efecto evidente en sectores que dependen directamente del clima, como es el caso de los recursos hídricos.

Dentro de las medidas que se sugieren para gestionar el riesgo de desastres por ocurrencia de extremos climáticos se sugiere la mejora en la vigilancia a los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento, así como el desarrollo y mejora de códigos de construcción.

En este documento, específicamente se afirma que la integración del conocimiento local con el conocimiento científico y técnico, puede mejorar la gestión del riesgo (mediante reducción de la exposición y de la vulnerabilidad) y la adaptación al cambio climático.

1.3.1.2 Flujos migratorios

Sumada a la problemática vinculada al cambio climático, se encuentra aquella ligada a los flujos migratorios del campo a la ciudad. Según el Fondo Para la Población de las Naciones Unidas, para el año 2008 más del 50% de la población mundial ya estaba concentrada en las grandes ciudades, sobre todo de aquellos países en desarrollo.

La misma fuente indica que "... el número y la proporción de habitantes urbanos seguirán aumentando aceleradamente. Hacia 2030, la población urbana habrá llegado a 4.900 millones de personas" (ONU, 2007). La misma tendencia se reafirma en el informe de 2012 (ONU, 2012).

Aunque a un menor ritmo, la misma tendencia se repite en los países industrializados. Los datos disponibles por el Instituto Nacional de Estadística de España (INE) correspondientes al año 2003, indican que los migrantes provenientes del campo y con destino a la urbe representaron el 51% del total de migrantes internos del país (INE, 2003). Para 2011 (INE, 2012), según la misma fuente, este dato ascendía ya al 59,75%.

Estas nuevas poblaciones asentadas en los grandes núcleos demográficos consumen agua que debe ser abastecida por las redes ya existentes. Las redes urbanas son pues, cada vez menos suficientes en su labor de asegurar un volumen de agua potable adecuado a una población en constante crecimiento.

Si bien es cierto que en el caso de las redes de alcantarillado sanitario, la capacidad de evacuación en tiempo seco no se ve amenazada por un aumento poblacional gradual, sí existe un riesgo de insuficiencia en épocas de lluvias, cuando la red funciona en forma combinada.

1.3.1.3 Estrés hídrico

En lo que respecta a España, predomina ya desde hace algunos años la idea generalizada de una pronunciada escasez del agua, que deja al sistema de abastecimiento nacional en un casi constante estado de tensión, también denominado "estrés hídrico".

Esta percepción se vio reforzada en el seminario internacional "Agua, Energía y Cambio Climático" realizado en Valencia a finales del año 2007, donde representantes de entes de investigación estatales y privados presentaron sus conclusiones sobre las repercusiones hídricas del cambio climático, haciendo referencia al Sistema Unificado de Gestión de los Recursos Hídricos en España.

Una de ellas fue que la gestión de la oferta basada en el aumento del volumen disponible mediante la construcción de embalses debía dar paso, ineludiblemente,

a la gestión de la demanda. Las cifras que soportan dicha afirmación no dejan lugar a dudas (Ruiz, 2007).

El término “estrés hídrico” ha sido definido como aquella situación que se presenta cuando la demanda del agua supera la cantidad disponible durante un periodo determinado de tiempo, o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad (United Nations Environment Program, 2004). Generalmente se usa esta terminología en estudios de balance de volúmenes de agua a nivel de cuenca (cantidades disponibles en embalses o reservorios, superficiales o subterráneos).

El informe “Hacia Un Uso Eficiente De Los Recursos Hídricos En Europa”, emitido por la Agencia Ambiental Europea en el 2012 (AEMA, 2012) identifica a España como el país de Europa con mayor estrés hídrico, y el tercero de la región que más ha explotado este tipo de recursos desde 1990 a 2010.

La situación de estrés hídrico se traslada en última instancia a la red de abastecimiento, y en este punto del ciclo del agua el fenómeno se ve agravado por una estructura insuficiente en su capacidad para cumplir la función de transporte y distribución final, pues sus diámetros han sido diseñados para suplir demandas inferiores.

1.3.1.4 Pequeños sistemas

Los pueblos y pequeñas poblaciones no parecen exentos de retos en la gestión de abastecimiento y saneamiento de aguas: ante la escasez de recursos destinados a la renovación o rehabilitación de infraestructuras, sus redes envejecen y se deterioran sin control.

Podría afirmarse incluso que estas redes se deterioran de forma más acelerada, pues la casi nula inversión en acciones preventivas propicia situaciones técnicas donde la posibilidad de fallo de un elemento es aún mayor.

En estos lugares es aún más complejo lograr el apoyo de la comunidad para realizar inversiones significativas en proyectos de mejora de las redes, pues estas inversiones generalmente se asocian a “dinero enterrado”. Además el costo de dichas obras es usualmente mayor pues requiere un desplazamiento adicional de recursos humanos y equipos, del que se puede necesitar en grandes redes.

El mandatario de pequeñas localidades conoce el riesgo político asociado a la toma de decisiones de este tipo, y generalmente actúa en consecuencia, traspasando esta responsabilidad a su sucesor. En las grandes ciudades, la existencia de planes de desarrollo, al igual que el seguimiento de los entes de control a las acciones de los gestores, generan ambientes más favorables a estas actuaciones.

1.3.1.5 Estado de la infraestructura de transporte de agua

Anualmente, entre los años 2001 y 2005 se perdió el 23.2% del agua distribuida por las redes españolas (INE, 2007). El concepto de “agua perdida” engloba tanto las pérdidas reales (fugas) como las aparentes (subcontaje, fraudes y volúmenes entregados a usuarios que no tienen un medidor instalado, o que no funciona).

La más reciente Encuesta Sobre El Suministro Y Saneamiento Del Agua, publicada por el INE en 2012 (INE, 2012), y que refleja lo ocurrido en 2010, establece que las pérdidas de agua en las redes públicas de abastecimiento urbano por fugas, roturas y averías, supusieron el 17.5% del total suministrado.

El volumen de agua no registrada debida a consumos estimados, errores de medida, fraudes u otras causas, para 2010, representó el 8.4% del agua suministrada a la red (INE, 2012). Así pues, en total, el agua perdida en redes de distribución sumó para ese año el 25.9%. No se nota entonces una mejora en el control de pérdidas.

En consecuencia, se presentan como actividades indispensables para el gestor de redes de abastecimiento, no solo el aseguramiento de la prestación del servicio de manera continua (24 horas al día), sino además, acciones proactivas en búsqueda de la reducción de los niveles de fugas mediante inspecciones periódicas.

En redes de saneamiento, se requiere la progresiva sustitución de los conductos de la red de aguas lluvias con otros de mayor sección transversal en aquellos puntos críticos del trazado.

También en estas últimas, se necesitan ejecutar rediseños de los puntos de entrega de aguas negras o grises, y la rehabilitación o renovación para subsanar el deterioro natural de los elementos de la red. Por supuesto, dichas actuaciones requerirán una inversión importante (muchas veces no considerada en el presupuesto de la empresa), además de una extensa planeación asociada a una eficiente utilización de los recursos.

1.3.2 Proyectos recientes de gran impacto en el ámbito de la intervención de sistemas de abastecimiento y saneamiento

El Proyecto “Rehabilitación Patrimonial Avanzada De Redes De Agua – Portugal” (Advanced Water Asset Rehabilitation Portugal - AWARE P -), iniciativa financiada mediante fondos europeos y de Portugal desde 2009, enfoca sus esfuerzos en la definición y aplicación integrada de todas las fases que componen la Gestión patrimonial de Infraestructura. Su objetivo general es desarrollar e implementar un procedimiento estructurado para la gestión de activos de infraestructura.

El proyecto considera la creación de todo un conjunto de herramientas de alto nivel y código abierto, generadas desde la experiencia previa de los investigadores participantes (diversos entes de disciplinas transversales, entre los que destacan el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal, LNEC, el Instituto Superior Técnico de Lisboa, IST, y la Organización Para La Investigación Científica E Industrial De Noruega, SINTEF). Otros productos del proyecto los constituyen los Manuales de Buenas Prácticas, así como material de aprendizaje para profesionales en formación.

Las herramientas desarrolladas por el proyecto son:

- Módulo PLAN: Planeación De La Gestión Patrimonial De Infraestructura: permite plantear alternativas de planeación, medirlas y compararlas mediante indicadores de estado, riesgo y costo.
- Módulo PI: Indicadores De Gestión: permite calcular de manera cuantitativa la eficiencia y efectividad del sistema a través de indicadores de gestión.

- CIMP: Importancia De Los Componentes Basada en Consumos Nodales: calcula la importancia de los componentes para cada tubería de la red, basada en el impacto de su falla sobre el consumo nodal.
- PX: Índices De Gestión: produce medidas del estado de forma de la red basadas en ciertas características o variables de la red. Evalúa conceptos relacionados con niveles de servicio en áreas como la capacidad hidráulica, la calidad del agua, entre otras.
- UNMET: Riesgo De Interrupción Del Servicio Expresado En Términos De Demanda Y Volumen: calcula el riesgo de interrupción del servicio en términos del volumen esperado y la demanda insatisfecha en el sistema a lo largo de un año.
- EPANET: ofrece la posibilidad de ejecutar EPANET en plataforma JAVA con una interfaz de usuario creada especialmente para este fin.
- FAIL: Análisis Y Predicción De Fallos En Tuberías De Abastecimiento Y Saneamiento: predice los fallos de tuberías de una red en términos de la estimación del riesgo y el costo asociado.
- IVI: Índice De Valor De La Infraestructura: representa el grado de envejecimiento de la infraestructura, y se calcula mediante la razón entre valor actual y valor de reemplazo de la infraestructura.

Los proyectos “Rehabilitación De Redes De Agua Asistida Por Computador” (Computer Aided Rehabilitation Of Water Networks, CARE W), y “Rehabilitación De Redes De Saneamiento Asistida Por Computador” (Computer Aided Rehabilitation Of Sewer Networks, CARE S), iniciados en 2001 mediante financiación con recursos de la Unión Europea y desarrollados por 11 entidades socias lideradas por el SINTEF, tienen como objetivo establecer una estructura racional para la toma de decisiones sobre rehabilitación de redes de abastecimiento y saneamiento.

Como producto final, los proyectos generan sendos sistemas soporte a la decisión que permiten a los ingenieros municipales establecer y mantener una gestión efectiva de los sistemas de acueducto y alcantarillado.

Estos dos proyectos se desarrollan sobre tres componentes fundamentales en los cuales enmarcan los productos generados:

- Componente científica: construcción de un panel de control de indicadores de gestión para la rehabilitación, descripción y validación de herramientas técnicas.
- Componente metodológica: elaboración de un soporte a la decisión para un programa de rehabilitación anual, elaboración de una planeación e inversión estratégica a largo plazo.
- Componente de decisión: Elaboración de un software prototipo CARE, prueba y evaluación del software, diseminación de resultados.

1.4 Estructura de la tesis

El documento se encuentra dividido en 7 capítulos y un conjunto de anexos.

La presente Introducción constituye el Capítulo 1, y sirve de cuadro general, no solo sobre el contenido de la tesis, sino además sobre el ambiente en el que se plantean las preguntas de investigación que intentan resolverse.

En el Capítulo 2 se encuentra una revisión del estado del arte que abarca todo lo relacionado con el proceso de fallo de una tubería: los factores más relevantes en este proceso, las causas de fallo más frecuentes, los diversos tipos y sus localizaciones.

Posteriormente, en el Capítulo 3, se realiza un análisis exhaustivo de las técnicas de inspección, los protocolos para la evaluación de la condición de tuberías de uso común. Esta revisión tiene especial importancia pues dota al lector (investigador o gestor técnico) de herramientas para afrontar la lectura de los capítulos siguientes. Es en este capítulo donde se realiza un primer aporte plasmado en la propuesta de integración de las diferentes bases de datos relativas a patrimonio infraestructural, a través del planteamiento de un conjunto de directrices fundamentales.

El Capítulo 4 contiene una propuesta de modelo decisional para la priorización a la intervención por renovación o sustitución, mediante lógica difusa, enmarcada en

la reciente tendencia hacia la Gestión Patrimonial de Infraestructuras (GPI). El modelo describe la aplicación de tres fases fundamentales: fuzificación, agregación y defuzificación, y entrega una lista priorizada de tuberías en función de su necesidad de intervención, y desde estos resultados, se calcula una lista priorizada de sectores. Se presenta un caso de aplicación.

El capítulo 5 es en sí un compendio de los modelos decisionales para priorizar la intervención de tuberías y sectores que fueron explorados durante el proceso que, como resultado final, ha arrojado la propuesta hecha en el capítulo asociado a la metodología mediante lógica difusa.

De cada uno de los modelos que aquí se incluyen, se hace una revisión crítica en la que se identifican sus principales ventajas y desventajas, y así mismo se muestra un ejemplo de aplicación para cada caso. Este capítulo muestra el camino que se ha recorrido para proponer, como herramienta de decisión más robusta para priorizar la intervención de partes de la red, a la metodología mediante lógica difusa.

Así pues, en este capítulo se incluyen otros productos de investigación que se generaron durante el periodo doctoral. Ellos son: la priorización de tuberías a la renovación/sustitución mediante sumas ponderadas, la priorización de tuberías mediante programación por compromiso y la priorización de sectores mediante proceso de jerarquías analíticas.

El Capítulo 6 propone un esquema de plan de actuación para empresas de abastecimiento y saneamiento. Su aplicación por módulos (incluye tres: planeación, evaluación y mejora continua) facilita el abordaje por parte de empresas de cualquier tamaño.

En el Capítulo 7 se propone la sistematización de la metodología propuesta mediante lógica difusa, a través de la realización de una aplicación informática básica y simple, que a partir de la importación de los principales campos de las bases de datos de la empresa, genera un informe donde además de un breve estudio del inventario de infraestructura que compone la red, se genera una lista priorizada de tuberías y sectores, en función de sus necesidades de renovación.

Para ilustrar la forma de operación de la herramienta se incluye un ejemplo de aplicación. El objetivo de este capítulo, más allá de mostrar cómo funciona la

herramienta informática, es demostrar que la construcción de este tipo de ayudas computacionales es viable, y que cualquier empresa gestora de aguas puede realizar una de acuerdo a sus propios requerimientos y expectativas.

La Tabla 1 resume el contenido más importante de cada capítulo de la tesis.

Tabla 1. Estructura general de la tesis

Capítulo 1. Introducción
<ul style="list-style-type: none"> • Justificación e intención • Objetivos y ámbito de aplicación • Contexto • Estructura de la tesis
Capítulo 2. Proceso de fallo de una tubería
<ul style="list-style-type: none"> • Factores que influyen en el fallo de tuberías • Causas de fallo • Tipos de fallo • Localización según el tipo de fallo
Capítulo 3. Técnicas de inspección, protocolos para la evaluación de la condición y bases de datos relacionadas
<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de inspección • Protocolos para la calificación de defectos • Directrices para la integración de bases de datos
Capítulo 4. Metodología para la determinación de prioridades de intervención mediante lógica difusa
<ul style="list-style-type: none"> • Análisis del espacio de decisión • Fuzificación, agregación, defuzificación • Ejemplo de aplicación
Capítulo 5. Modelos decisionales previos a la lógica difusa. Críticas y enseñanzas
<ul style="list-style-type: none"> • Método de las sumas ponderadas • Ejemplo de aplicación • Método de la programación por compromiso • Ejemplo de aplicación • Método de las jerarquías analíticas • Ejemplo de aplicación

Capítulo 6. Plan básico de actuación para la gestión del patrimonio en infraestructura

- Fundamentos generales
 - Módulos del plan básico de actuación
-

Capítulo 7. Sistematización de la metodología para la determinación de prioridades de intervención mediante lógica difusa

- Estructura modular del código informático
 - Procedimiento general de uso de la aplicación
 - Bondades y desarrollos futuros de la aplicación informática
-

Capítulo 8. Conclusiones, aportes y futuras investigaciones

- Conclusiones
 - Principales aportes de la tesis
 - Futuras investigaciones
-

Anexos

Capítulo 2

Proceso de fallo de una tubería

En este capítulo se realiza un análisis de los factores relevantes en el proceso de fallo de una tubería. También se abordan las causas probables de estos fallos, así como los tipos y localizaciones de los mismos. Los conceptos adquiridos mediante el estudio del proceso de fallo de tuberías permiten adoptar con suficiencia un determinado protocolo de inspección para la evaluación de la condición del elemento (dichos protocolos se exponen en el capítulo 3).

2.1 Factores relevantes en el proceso de fallo de una tubería

2.1.1 La época de instalación como marco histórico-tecnológico

Aunque la edad de la tubería es en sí misma un factor frecuentemente asociado a su historial de fallos, especialmente a los de tipo estructural, ella provee además un indicativo sobre la época en que fue puesta en funcionamiento, e implícitamente, sobre los medios tecnológicos de que se disponía en ese momento para la elaboración e instalación del elemento, así como de los avances en investigación relacionados con desarrollos de nuevos materiales e implementación de refuerzos estructurales.

Aunque en general no resulta aventurado afirmar que las técnicas de fabricación han mejorado con el paso del tiempo, sí vale la pena mencionar que no siempre los resultados finales son los deseados. La evolución de los métodos de fundición, pasando de la fundición gris donde el grafito se encuentra en forma laminar a la fundición dúctil, generó una disminución de fábrica en los espesores de las conducciones, y ello “en ciertos casos repercutió en fallos debido a procesos corrosivos que encontraron menor resistencia estructural” (Rostrum, 1999).

En la Figura 2 se observan las ampliaciones al microscopio correspondientes a muestras de fundición gris (donde el grafito, tras el proceso de fundición, se desprende de la masa metálica formando planos de rotura laminares), y de fundición dúctil (el grafito en este caso se presenta en forma de nódulos, o esferas, lo que suprime los potenciales planos de fallo ante la aplicación de esfuerzos).

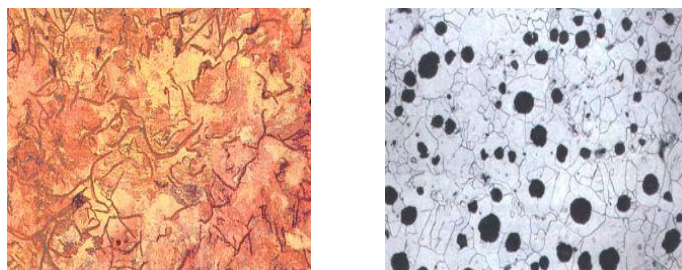


Figura 2. Micrografía de la fundición gris (izquierda) y de la fundición dúctil (derecha)

[<http://www.circulopyme.com/abad>]

El final de la segunda guerra mundial marcó un punto de inflexión caracterizado por un crecimiento urbanístico desbordado, y a causa de ello, un detrimento en la calidad en los procesos de producción. Hacia la mitad de los años 60 ya se evidenciaba otro problema asociado a la introducción de las nuevas tuberías de fundición dúctil (ocurrída a finales de los 50): este tipo de tuberías estaba siendo instalada con mínima o ninguna protección contra la corrosión, “su comportamiento ante este fenómeno estaba siendo a lo sumo igual de deficiente al de sus predecesoras de fundición gris” (Rajani, 2003).

Sólo mediante las posteriores inclusiones de métodos de protección catódica se logró un aumento en la fiabilidad de este tipo de material. Resulta claro que la aparición de una nueva tecnología o material representa sólo el comienzo de un proceso evolutivo que requiere tiempo para su perfeccionamiento.

2.1.2 Diámetro

Las tuberías con mayores diámetros cuentan también con mayores espesores, generalmente incluyen refuerzos, y en consecuencia presentan una menor tendencia a la falla. Los diseños que exigen grandes diámetros lo hacen por razones operativas (en general, para contar con una mayor capacidad hidráulica) pero traen consigo un efecto estructural positivo pues poseen una resistencia mayor. A esto habría que añadirle una ventaja en su instalación: debido a su mayor peso, el asentamiento post-instalación sobre el terreno ocurre mucho más rápidamente.

Además parece existir una frontera en el rango de diámetros bajo la cual las estructuras tienden a ser estructuralmente más débiles: “las conducciones con diámetros inferiores a 200 mm presentan un número particularmente alto de fallos” (Rostrum, 2000). Hidráulicamente también debe recordarse que las tuberías de diámetros menores suelen ser propensas a las incrustaciones calcáreas causadas en gran medida por bajos valores de velocidad.

Existe además un aspecto, ya no de tipo estructural o hidráulico, sino de gestión, que posibilita contar con una menor frecuencia de fallos en tuberías de grandes diámetros (generalmente en sistemas de saneamiento). Ellas son susceptibles de inspecciones de preventivas mediante el uso de circuito cerrado de televisión, haciendo uso de cámaras de mástil o “poste”, o directamente a través del ingreso del operario, y en consecuencia pueden alargar el tiempo teórico estimado trascurrido hasta el próximo fallo mediante intervenciones de rehabilitación o renovación.

2.1.3 Longitud

Gran cantidad de investigadores han tratado de establecer con exactitud la relación existente entre la longitud y la frecuencia de fallos debido a roturas. Se da como un hecho que a mayor longitud mayor número de éstos. En la medida en que la tubería sea más larga aumenta la probabilidad de contar con diferentes estados del mismo suelo sobre el que yace la conducción (inclusive, diferentes tipos de suelo), diferentes cargas de tráfico, mayor cantidad de empalmes o cometidas, e inclusive diferentes condiciones de operación. Todo lo anterior aumenta en consecuencia la probabilidad de fallo.

Sin embargo “aunque en algunos estudios la longitud resulta ser una covariable estadísticamente importante [en el estudio de los fallos sufridos], en otros no” (Kleiner, 2006). En aportes previos, este mismo autor ya había planteado un modelo exponencial (Ec. 1) basado en el propuesto por Shamir y Howard (Shamir, 1979), pero que explica el número de fallos en función no de una sola variable, sino de un conjunto de ellas (mediante un enfoque vectorial), todas dependientes del tiempo. Entre las variables escogidas se incluye a la edad, la temperatura y la humedad del suelo, entre otras). La Ec. 1, característica de dicha propuesta, es:

$$N(\underline{X}_t) = N(\underline{X}_{t_0}) \cdot e^{\underline{a} \cdot \underline{X}_{t_0}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde \underline{x}_t representa el vector de variables dependientes del tiempo, para un tiempo t , $N(\underline{x}_t)$ es el número de fallos resultante, \underline{a} es el vector de parámetros correspondiente al vector de variables \underline{x}_t , y por último \underline{x}_{t_0} es el vector \underline{x}_t evaluado en el año de referencia base t_0 .

En vista de esta falta de consenso, Kleiner realizó un estudio tendiente a dar mayores luces sobre la real relación entre la longitud y la frecuencia de fallos. El enfoque, de carácter estadístico, divide la población de tuberías en muestras homogéneas respecto a diámetro, material, época de instalación y protección catódica. A partir de las características propias de cada grupo se “generan tuberías” (a las que el autor llama “sintéticas”, pues no existen en la realidad) de mayor longitud y con un número de fallos asociado. Los resultados arrojados muestran una relación que tiende a ser lineal y directamente proporcional a medida que la longitud del elemento aumenta.

El estudio confirma además la existencia de una relación nunca entre longitud y número de fallos: “dada la naturaleza discreta de los datos de los fallos debido a roturas, y la naturaleza continua de la longitud, se evidencia una aleatoriedad natural en las roturas ocurridas en tuberías relativamente cortas” (Kleiner, 2006). Este tipo de “ruido” desaparece a medida que aumenta la longitud, permitiendo observar una clara relación entre ambas variables.

La Figura 3 muestra la variación del coeficiente de correlación lineal de Pearson entre longitud y número de fallos, para tuberías sintéticas de diferente longitud, basadas en parámetros de redes de tres ciudades canadienses diferentes. Se puede apreciar que medida que la longitud de la tubería aumenta, idealmente, su relación con el número de fallos por roturas asociado es mayor.

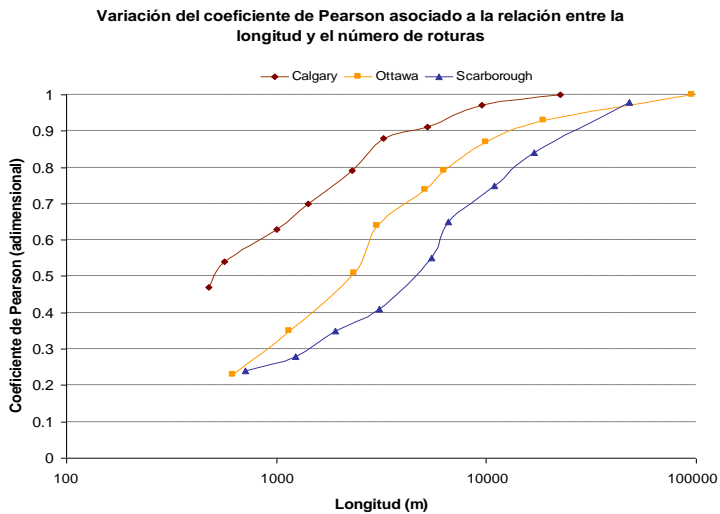


Figura 3. Variación de la correlación lineal entre la longitud y el número de roturas
(Kleiner, 2006)

En la realidad, aquellas conducciones de mayor longitud y que simultáneamente poseen grandes diámetros suelen representar un mayor grado de vulnerabilidad para todo el sistema de transporte de agua, pues su fallo representa la suspensión del servicio en gran parte de la red. Esto, claramente, genera una constante preocupación, convirtiéndose en objeto de revisiones periódicas y de intervenciones cuando lo ameritan, y que en consecuencia hacen esperar una reducción en su frecuencia de fallos.

2.1.4 Material de la tubería

El tipo de material utilizado en la fabricación de las tuberías ha sido motivo de investigación permanente. El material y el mecanismo de fallo de la tubería presentan claras correlaciones. Las tuberías de fundición gris y las de fibrocemento son, en general, objeto de constante sustitución por conducciones hechas en fundición dúctil y por tuberías plásticas. Éstas últimas, dado su bajo peso y además su facilidad de transporte e instalación, cobran cada vez más fuerza en el mercado.

Según el tipo de material de la tubería, los mecanismos que conducen al fallo del elemento son diversos. Una breve reseña de ellos se cita a continuación.

2.1.4.1 Mecanismos de fallo en tuberías metálicas (fundición frágil y dúctil)

Al interior de las tuberías metálicas se suele presentar desgaste en puntos específicos, producidos por agentes externos, que termina generando una reducción del diámetro (Figura 4), y en fase última, un colapso de la estructura por los efectos combinados de obstrucción total, más una pérdida de capacidad estructural debida al mismo proceso erosivo inicial. Dicha reducción del diámetro interno en ciertas ocasiones se ve magnificada por la ocurrencia de depósitos de otro tipo, y acompañada por la formación de un lecho de bacterias.



Figura 4. Reducción del diámetro en una tubería de fundición gris de diámetro 4 pulgadas

[<http://uwrl.usu.edu/researchareas/fluidmechanics/effectsofpipeeaging.html>]

La reducción de diámetro, la pérdida de capacidad estructural, y desde ella el colapso final de la estructura, ha sido estudiada por diferentes autores. Un estudio realizado en el Laboratorio de Investigación del Agua, de la Universidad del Estado de Utah (Tullis y otros, 2006) asocia la tasa entre el diámetro actual d y el diámetro al momento de la instalación D , con la rugosidad hidráulica (representada por el factor de fricción f de Darcy-Weisbach). Los resultados tras el análisis de una muestra de tuberías metálicas permiten establecer una tendencia clara hacia el aumento de f en la medida en que decrece la tasa d/D con el paso del tiempo.

Exteriormente, en tuberías metálicas se puede presentar corrosión electroquímica (Figura 5) debida a condiciones agresivas del suelo (contenido de humedad, contenido químico y biológico, etc.) Una descripción más detallada del proceso de corrosión se presenta más adelante.



Figura 5. Fallo por corrosión en tubería de fundición dúctil

[http://www.bushman.cc/photos/Ductile_Iron_Pipe_Failure.jpg]

Una incorrecta elección del tipo de recubrimiento exterior de la conducción puede generar un ambiente propicio para la corrosión. Los materiales comúnmente utilizados para este fin son el zinc-aluminio (también conocido como “protección galvánica”) en tuberías de pequeños diámetros (abastecimiento), y el zinc puro en tuberías de diámetros mayores (saneamiento o transmisiones en abastecimiento). La Figura 6 muestra un grupo de tuberías utilizadas para la construcción de sistemas de saneamiento con recubrimiento de zinc.



Figura 6. Tuberías de fundición dúctil con recubrimiento de zinc

[<http://www.sgcanalizacion.com>]

Un mal proceso de galvanizado aumenta la propensión al fallo (Figura 7). Un ejemplo particular de afectación de la red por fallos atribuibles al galvanizado es el descrito por los ingenieros municipales del Ayuntamiento de San Sebastián (Almandoz, 2002). El alto nivel de fugas en la red del sector de Gros se encuentra justificado por la ocurrencia de fallos en las acometidas, donde las tuberías con un galvanizado deficiente sufren los efectos del contacto con accesorios fabricados con materiales diferentes (cobre, acero, y en general otros metales).



Figura 7. Fallo en la unión entre tubería y codo debido a un deficiente galvanizado

[http://www.bushman.cc/photos/Galvanized_Pipe_Failure_at_Couplings.jpg]

El método de fabricación del elemento es también, en sí mismo, una fuente de fallos (Figura 8). El seguimiento inadecuado de los protocolos establecidos por la industria da pie a la formación de zonas débiles en la tubería.



Figura 8. Proceso de fundición para una tubería de gran diámetro

[<http://www.sgcanalizacion.com>]

2.1.4.2 Mecanismos de fallo en tuberías de hormigón reforzado

Bajos valores del pH del suelo disminuyen el pH del mortero de cemento, deteriorándolo y generando corrosión y rotura en los anillos de refuerzo metálicos. El mecanismo de fallo comienza con grietas puntuales que generan la expansión del proceso de laminación del mortero, generando exposición del refuerzo metálico y su posterior fallo. A medida que la estructura envejece, cada vez más anillos metálicos se rompen, hasta llegar al colapso de la estructura. Los ambientes agresivos, que como se dijo, generan una progresiva desaparición del recubrimiento de cemento o de hormigón, son los principales causantes de un fallo por corrosión en los anillos tensados de metal que se ven expuestos a la acción del oxígeno ambiental (Figura 9).



Figura 9. Fallo por exposición del refuerzo metálico

[http://www.bushman.cc/photos/Prestressed_Steel_Cylinder_Concrete_Pipe_Corrosion_Failure.jpg]

2.1.4.3 Mecanismos de fallo en tuberías de fibrocemento

Mediante procesos químicos que afectan la matriz de cemento del hormigón, disolviéndola: las sales del cemento se hidratan al entrar en contacto con el agua, produciendo Hidróxido de Calcio, que a su vez, en ambiente húmedo genera subproductos químicos que conducen a una reducción de la tensión resistente del material. La exposición de las fibras de amianto (

Figura 10), además de disminuir su capacidad estructural, constituyen un factor de riesgo a la salud.



Figura 10. Tubería de fibrocemento utilizada en red de alcantarillado (izquierda). Refuerzos de fibra de amianto (derecha)

[<http://townsvilleasbestos.com.au/?p=225>]

En Valencia, según un estudio hecho para determinar las necesidades de renovación futuras (Cobacho, 2006), y mediante el uso del programa CARE-W, se concluyó que el fibrocemento es el material que debe presentar una mayor tasa de sustitución en el futuro próximo. En esta misma ciudad, y atendiendo de manera exclusiva al criterio del envejecimiento como factor decisorio, las tuberías de fundición dúctil, contrario a lo esperado, no deben aparecer en la mira de los gestores en los próximos 40 años. Se concluye además que otros materiales como el acero y el hormigón con encamisado también durarán hasta el año 2050.

2.1.4.4 Mecanismos de fallo en tuberías plásticas

Aunque aún no es bien conocido su comportamiento, la degradación de las tuberías plásticas se genera a partir de procesos mecánicos y químicos de oxidación, así como por biodegradación (aunque ésta, por lo general, de manera muy lenta). Los sistemas de fabricación de tuberías plásticas basan su funcionamiento en el método de extrusión, el cual se detalla más adelante, en el apartado de causa de fallo.

2.1.4.4.1 Fallo frágil (*brittle failure*)

También llamado fallo por quiebre (Figura 11), resulta propio de las tuberías plásticas donde el material se endurece por efectos de la corrosión, hasta que falla súbitamente en un sector que se vuelve frágil.



Figura 11. Fallo frágil

[http://www.bushman.cc/corrosion_photos.html]

2.1.4.4.2 Fallo dúctil (*ductile failure*)

En el fallo dúctil, o fallo plástico, se genera una superficie de falla tridimensional, debida al estiramiento plástico que sufre la tubería, en una acción prolongada, hasta finalizar en la formación y abertura de la fisura.

2.1.5 Condiciones del suelo

El tipo de suelo circundante influye, mediante su potencial degradante asociado, de manera directa en el grado de corrosión que la tubería sufrirá, tanto si ella es totalmente metálica como si posee un núcleo de hormigón reforzado con anillos metálicos que terminan por romperse debido a este fenómeno.

Además del efecto corrosivo, el suelo puede jugar un importante papel en un fallo estructural. Materiales de reemplazo no aptos o pobremente compactados pueden dejar a la tubería sin el debido soporte, o sin un anclaje adecuado que a la

postre permite un movimiento lateral bajo ciertas condiciones operativas y que aumenta la fatiga del material de la tubería.

2.1.6 Presión

Las variaciones bruscas de presión, algunas veces asociadas a la ocurrencia de fenómenos transitorios, producen una fatiga del material que termina en la ocurrencia de un fallo. Varios autores han utilizado tanto la presión absoluta como el valor de presión diferencial en la modelación del tiempo transcurrido hasta la ocurrencia del primer fallo en una conducción. Los resultados, aunque sugieren una relación entre la variabilidad de la presión y la ocurrencia de fallos, no son concluyentes (Andreou, 1987).

Una vez ocurrido el fallo, la presión juega un papel importante, sobre todo en tuberías plásticas (como la que ilustra la Figura 12), expandiendo en mayor o menor medida el orificio de salida. En consecuencia, el caudal fugado se modela en función de la presión a la que está sometida la tubería.



Figura 12. Fuga en empalme de tubería plástica

[http://www.aguamarket.com/sql/temas_interes/tema_interes.asp?id_tema_interes=2582&temainterres=Tipo+de+Fugas+de+Aguas+1]

May plantea el uso de diferentes exponentes en un modelo potencial para estimar el caudal fugado, que depende del valor de la presión y del tipo de material

de la estructura (May, 1994) y en consecuencia, de la forma que adopta el área de descarga. Su teoría recibe el nombre de “Patrones de Áreas de Descarga Fijas y Variables” (Fixed and Variable Area Discharge Paths, FAVAD).

Para la modelación de fugas en juntas y accesorios metálicos, la Ec. 2 describe el comportamiento del caudal fugado en función de la presión:

$$Q_{fuga} = K \cdot P^\gamma \quad \text{Ec. 2}$$

Donde Q_{fuga} es el caudal fugado por el orificio de descarga, K es un coeficiente de calibración, similar al coeficiente de descarga hidráulica de un orificio C_D , P es el valor de la presión a la que se encuentra el flujo en el punto de fuga, y γ es el exponente de la presión, que varía en función del material de la tubería. Para modelar pequeñas fugas de fondo en accesorios se acepta que γ es igual a 1.5. Dicho valor puede variar entre 0.5 y 1.5, aunque normalmente es 1.

2.1.7 Historial de fallos

El historial de fallos de una tubería no constituye en sí una causa para nuevas roturas, pero al igual que el valor de la presión, proporciona una idea aceptable de lo que puede ocurrirle a la estructura. En la recopilación de datos acerca de los fallos sufridos por una conducción deben considerarse dos aspectos. En primera instancia el número de fallos que ha sufrido. Dicha cantidad en principio sólo debe estar conformada por aquellos eventos de naturaleza involuntaria, no provocados, y asociados directamente a procesos de envejecimiento natural, que sumados a los efectos de las condiciones de operación y ambientales, condicionan el grado de deterioro de la estructura. Por fuera de este monto deben quedar aquellos sucesos provocados por terceros y cuyo patrón de ocurrencia resulta altamente aleatorio.

En segunda instancia debe considerarse la distribución temporal de dichos fallos, que resulta ser un indicativo no sólo de la frecuencia de los mismos, sino además de la rapidez de variación de dicha frecuencia. Un estudio que aborda este aspecto, estableciendo los posibles patrones que pueden conducir a predicciones sobre el número de fallos futuro, es el propuesto por Kleiner (Kleiner, 2006) que hace alusión a la relación longitud-número de roturas.

Tomando en consideración valores extremos de tiempo de ocurrencia de una rotura (primero y último de la muestra poblacional elegida), y un año de referencia intermedio que sirva para establecer una “ventana de tiempo pasado” y una “ventana de tiempo futuro” sobre las que se desenvuelve el estudio, se observaron diferentes tendencias, algunas de ellas no esperadas.

Dentro de las conclusiones que se lograron establecer desde los resultados de diferentes muestras poblacionales, se encuentra “un aumento en la correlación entre el número total de fallos pasados y futuros en la medida en que aumenta la ventana de tiempo pasado, un aumento en la correlación entre el número total de fallos pasados y futuros en la medida en que aumenta la ventana de tiempo futuro, y una variación en la correlación entre el número total de fallos pasados y futuros en la medida en que varía el año de referencia” (Kleiner, 2006).

2.1.8 Ubicación geográfica de la tubería

La ubicación geográfica constituye un factor relevante en el estudio de la ocurrencia de fallos pues involucra condiciones de instalación y operación que directamente afectan el estado estructural del elemento. Puntos de la red ubicados en cotas bajas pueden sufrir los efectos de las altas presiones. En ciudades donde la red posee grandes desniveles se requieren anclajes adicionales que aseguren que la estructura permanezca inmóvil, la falla de estos anclajes trae consigo una rotura de la tubería en sus puntos de unión.

Este es el caso de ciudades de montaña. En estos sitios resulta frecuente ver un desplazamiento en planos inclinados de grandes tramos de conducción. Otros factores asociados al emplazamiento geográfico, como la carga de tráfico y el uso del suelo pueden ser causantes de un aumento en el número de fallos.

En el mismo estudio presentado por Kleiner se incluyó la ubicación geográfica como covariable del número de fallos. Mediante una metodología de constitución de grupos poblacionales homogéneos y además integrados por elementos ubicados en la misma zona, se logró establecer coeficientes de frecuencia de fallos característicos de cada grupo y con base en ellos, predecir el número futuro de fallos (Kleiner, 2006). Los resultados de este último enfoque, sin embargo, no fueron concluyentes.

2.2 Causas del fallo de una tubería

Los factores relevantes en el proceso de fallo de una tubería, anteriormente expuestos, coexisten y se relacionan entre sí, de una forma compleja. Ellos se manifiestan, en la realidad, mediante una serie de atributos (o causas) desde las cuales se intenta explicar la ocurrencia de un fallo.

2.2.1 Fallos causados por defectos de fábrica

Las imperfecciones en la fabricación de las tuberías poseen estrecha relación con la falta de adopción de protocolos de producción que aseguren la calidad del producto. Una aleación pobre puede generar zonas de la superficie de la tubería donde se presentan mayores niveles de corrosión. Dichas zonas propensas a la corrosión se pueden presentar, de igual forma, debido a una falta de uniformidad en el espesor de la tubería.

Las tuberías de acero galvanizado también pueden ser propensas a la oxidación exterior si además se presenta un alto nivel de humedad del terreno. La calidad del agua también puede jugar un papel importante en la aparición de oxidación interior en tuberías con procesos de galvanizado defectuosos. Un ejemplo de este fenómeno lo presenta Almandoz (Almandoz, 2005).

Las tuberías plásticas se fabrican mediante el proceso de extrusión. Dicho proceso se realiza mediante una máquina con un embudo en el cual se introducen los gránulos de polímero (polietileno en frío), haciéndolos compactar mediante un émbolo de inyección que opera a una presión dada y luego conduciendo la masa compactada a través una cámara de calefacción que genera un polímero maleable y en consecuencia susceptible de darle forma mediante inyección por una boquilla. Por supuesto, tanto la presión de compactación como la temperatura de calentamiento del polímero constituyen variables susceptibles de error, generando ello, en algunos casos, tuberías defectuosas.

2.2.2 Fallos causados por defectos de instalación

Al igual que en los procesos de fabricación, los procesos de instalación deben seguir protocolos. El protocolo de instalación debe incluir indicaciones acerca de la calidad del material de relleno, las especificaciones de los accesorios a utilizar, la profundidad de instalación, la compactación previa mediante capas de la cama sobre la cual posará la tubería, la forma de disposición de la tubería, la forma de unión, ya sea mecánica o por soldadura, y en este último caso, indicaciones concretas sobre el procedimiento en frío o en caliente, y así mismo la compactación del material de cobertura. Este extenso listado de actividades genera como resultado una considerable probabilidad de ocurrencia de errores (técnicos o humanos) y asociados a ella, la probabilidad final de fallo del elemento.

La instalación debe incluir además, como paso previo, una revisión exhaustiva del estado de los elementos a instalar. Durante el transporte de las tuberías suelen ocurrir averías menores que de no ser detectadas constituyen el primer paso en la formación posterior de la falla. De hecho la forma en que se transportan las tuberías plásticas, con un incorrecto enrollado o con un apilado que excede el máximo número de rollos por columna, suele ser una causante de constantes averías por aplastamiento o fractura transversal.

Conviene anotar que una inadecuada maniobra de unión puede inducir la aparición de esfuerzos localizados que inducen al fallo. En tuberías de fundición gris el efecto del pandeo de la estructura puede repercutir en una falla de carácter frágil en la unión. Las uniones de tipo rígido no permiten ninguna clase de movimiento entre la campana y la espiga, comportándose ambas partes involucradas en la unión como una viga continua sin ningún grado de movimiento.

Dado que en este tipo de unión se utiliza una junta de caucho (Figura 13) para prevenir la fuga, este elemento presenta una especial fragilidad en este tipo de situaciones, pues es el único accesorio de toda la unión que permite cierto rango de movimiento entre las caras que enfrenta.

La descripción de los fenómenos que involucran a la junta de caucho deja claro que ella representa en sí misma el grado de holgura con que cuenta todo el sistema de unión para hacer frente a un movimiento. Cuando ocurre una fuga entre una de las caras (ya sea la de la espiga o la de la campana) y la junta de caucho, el fallo en la unión se denomina fallo parcial.

Sin embargo, si además se genera un desplazamiento de la junta de caucho desde su posición y ello permite la entrada en contacto de ambas caras involucradas en la unión, el fallo se considera completo, siendo esto último estructuralmente el paso previo a un colapso total de la unión, dado que el contacto entre metales (denominado amarre de metales) genera un gran aumento del valor de la tensión en ese punto.



Figura 13. Junta de caucho en la unión campana-espiga

[<http://www.tuberiamoreno.com/productos/hidraulico/tuberia-de-hierro-ductil>]

En contraposición, las tuberías de acero generalmente se unen mediante soldadura. Un apropiado proceso de soldadura hace que ambas tuberías se comporten estructuralmente como una sola. Varios autores se han dedicado al estudio de la reducción en la resistencia de la tubería en el punto de soldadura. Generalmente el porcentaje de pérdida de resistencia es bajo. Según Finno (Finno y otros, 2003) este valor varía entre el 0 y el 25%.

El fenómeno de contaminación química ocurre también frecuentemente en el momento de la instalación. Según sea el material contaminante, este proceso puede acarrear graves consecuencias: si el material que entra en contacto con la tubería contiene metales pesados generará abrasión (proceso físico de desgaste de la superficie). Si además la tubería es metálica se iniciará un proceso corrosivo (éste, a diferencia de la abrasión, es de tipo químico) que según las características del suelo circundante avanzará más o menos rápido hacia la conformación de un hoyo de corrosión y la posterior falla del elemento mediante una fractura súbita, o

por un lento proceso de fatiga en la zona afectada por la corrosión. En tuberías plásticas la contaminación química crea superficies de debilidad, que se configuran en superficies de falla mediante la interacción con otros factores ambientales, o por la misma operación de la red.

2.2.3 Fallos causados por procesos corrosivos

En general puede entenderse la corrosión como un proceso electroquímico (en el caso de las tuberías metálicas, un proceso asociado a la oxidación) y cuya velocidad de ocurrencia depende de las condiciones ambientales, y en general de la interacción suelo-estructura (caracterizada principalmente por los valores de humedad, temperatura, salinidad, pH del suelo y materia orgánica).

2.2.3.1.1 Evaluación de la corrosión en tuberías metálicas

Aunque son muchos los modelos que intentan describir el fenómeno de la corrosión en estructuras enterradas, uno de los más completos es el planteado por Rajani (Rajani y otros, 2007). El enfoque propone dos expresiones que de manera clara constituyen estimativos acertados de la profundidad y de la tasa de progreso de la corrosión en una conducción de fundición. Según el modelo, el tamaño de la zona afectada por la corrosión disminuye la resistencia de la fundición hasta dejarla en el punto de resistencia residual. La Ec. 3 evalúa la profundidad de corrosión, p :

$$p = a \cdot t + k(1 - e^{-ct}) \quad \text{Ec. 3}$$

Y la Ec. 4 describe el comportamiento de la tasa a la que dicha profundidad avanza:

$$\frac{dp}{dt} = a + k \cdot c \cdot e^{-ct} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde t representa el tiempo, a representa la tasa de corrosión mínima, que según el planteamiento se obtiene justo al final del proceso de corrosión, c puede ser interpretado como un factor de inhibición del progreso de la corrosión, y k

constituye un parámetro de calibración. Los valores de a , c y k se determinan en función de las propiedades de corrosividad tanto del suelo como del material de fundición del cual está hecha la tubería.

Esta última expresión claramente deja ver el efecto auto-inhibitorio de la corrosión, que a título del autor del estudio, se explica mediante los efectos protectores de los mismos productos de la corrosión (óxidos de hierro), que con el tiempo se encargan de reducir la tasa de progreso de la misma.

La corrosión no es un proceso exclusivo de los metales: las tuberías de plástico también están expuestas a fenómenos corrosivos aunque los procesos químicos asociados son diferentes. En este tipo de material, la corrosión ocurre mediante adsorción de especies activas que se encuentran en el ambiente (la adsorción es un proceso por el cual una cantidad de moléculas de una sustancia externa es retenida en la superficie - en este caso - de la tubería).

Dicha adsorción, en el escenario de los plásticos, produce reacciones con las cadenas de polímeros. A diferencia de los metales, la corrosión plástica es un proceso interno, que en condiciones oxidantes genera una pérdida de la plasticidad del material, haciéndolo susceptible a una falla súbita por fragilidad adquirida.

2.2.4 Fallos causados por movimientos del suelo

Los desplazamientos de tierra, o los reajustes generados por obras vecinas (lo cual ocurre comúnmente, al aprovechar un trabajo de una red específica para ejecutar la sustitución de otras redes) suelen causar movimientos en los elementos de la red, que acaban generando fisuras en las uniones al aumentar las fuerzas debidas a la fricción (Figura 14).

Si los movimientos son mayores ocurre un fallo mecánico de las uniones (separación de las caras enfrentadas). Si el suelo está compuesto por arcillas expansivas se puede hinchar produciendo un movimiento que genera una rotura circular (Rajani, 1996). Un movimiento de la masa del suelo también puede cambiar el diagrama de fuerzas al cual se encuentra sometida la estructura de transporte de agua, generando pandeo y posteriormente agrietamiento.



Figura 14. Fallo de conducción de hormigón relacionado con movimiento en masa

[http://www.eltiempo.com/colombia/eje-cafetero/Articulo-Web-New_Nota_Interior-10736166.html]

2.2.5 Fallos causados por variaciones de temperatura

La contracción o expansión térmica de la tubería puede generar holguras en las uniones que terminan por provocar un fallo general. Cuando la conducción se encuentra además sometida a temperaturas superiores o inferiores a los valores límite especificados por el fabricante, pueden ocurrir cambios en la estructura química del material, y con ellos, en las propiedades físicas asociadas a la resistencia. Los cambios de temperatura generan, principalmente en las tuberías plásticas, esfuerzos adicionales de tensión o compresión indeseables.

2.2.6 Fallos asociados a los diversos usos del suelo

El uso del suelo reviste importancia en el estudio de la ocurrencia de fallos en la medida que tal uso dictamina el tipo de carga a la que estará sometida la tubería. El uso del suelo se asocia pues, a la condición estructural del elemento, y en general, a la condición de la red. Pero además de ello, la explotación que del mismo se hace puede dar una idea de la densidad poblacional del sitio, y en consecuencia de los valores de presión que soportan las tuberías que lo abastecen (por esto, condición hidráulica de la red se asocia frecuentemente al uso del suelo).

La densidad de acometidas también se encuentra directamente relacionada con el uso del suelo, y dicha densidad en muchos casos es sinónimo de fallos a través de un número mayor de accesorios de regulación (válvulas) y de medición (contadores), que aumentan la probabilidad de roturas en las uniones. La alta densidad de acometidas en suelos urbanos suele estar relacionada con un alto número de fallos por kilómetro en la red de alcantarillado, al presentarse un potencial mayor número de casos de conexiones mal ejecutadas.

Por último, cabe esperarse en un suelo altamente poblado, que la presencia de un mayor número de redes de otros servicios públicos involucre constantes remociones del terreno que terminan siendo las causantes de fallos por descompactación del suelo aledaño a la tubería (sin mencionar los daños directos en la red, causados involuntariamente por terceros).

2.2.7 Fallos asociados a la variación climática estacional

Los efectos más evidentes de la variación estacional parecen presentarse durante el invierno en aquellas zonas donde esta temporada conlleva la formación de capas superficiales de hielo. Dichas capas representan una carga más que la estructura debe soportar. El hielo afecta especialmente a las tuberías de diámetros pequeños. Andreou (Andreou, 1986) cita el ejemplo de la ciudad de Filadelfia, Estados Unidos. Durante el periodo de 1961 a 1982 el acumulado de fallos durante los meses de invierno más fuerte (diciembre, enero y febrero) representó más de la mitad del acumulado total. Otros estudios similares muestran la misma tendencia.

En Trondheim (Noruega), debido al control activo de fugas realizado en el verano, es en ese periodo de tiempo donde se registra la mayor cantidad de fugas localizadas (Rostrum, 2000). Existen otros casos en los cuales los meses de verano conllevan una alta tasa de fallos.

Dicha tasa sin embargo no es atribuible a factores climáticos asociados a la época del año, sino a factores operativos. En la ciudad de Buffalo, Estados Unidos, durante los meses de verano del año 1981 la tasa de fallos fue representativamente alta, pero ella estuvo correlacionada a la alta demanda hídrica durante ese periodo (Andreou, 1986). Cabe mencionar que en el verano la pérdida de agua en los suelos - especialmente en las arcillas - conlleva una reacomodación de la estructura y en consecuencia, un ambiente propicio para la ocurrencia de fallos.

Otros factores, como la congelación del suelo (ya a nivel sub-superficial), afectan la condición estructural de las redes. En Ottawa, Canadá, los inviernos de ciertos años fueron tan duros que la congelación del suelo rompió las tuberías de distribución ubicadas bajo patios interiores de las residencias, donde la carga de tráfico es prácticamente inexistente.

2.2.8 Fallos causados por excavaciones adyacentes

El proceso que requiere la apertura de una zanja genera, según Rumsey (Rumsey, 1982) cuatro posibles escenarios que en su conjunto pueden producir una falla en una tubería vecina.

- En primera instancia, el retiro del material, con la consecuente pérdida de soporte lateral del suelo circundante hasta que la zanja se apuntala.
- En segundo término, en el lapso de tiempo que transcurre hasta que el suelo circundante entra en total contacto con el sistema de apuntalamiento y mientras que dicho sistema sufre las deflexiones propias de las cargas que comienza a soportar.
- En tercer lugar, y una vez hecha la obra para la cual la zanja fue hecha, en el momento en que el sistema de apuntalamiento es retirado.
- Por último y como cuarto escenario, después de puesto el material de relleno y mientras este entra a trabajar en forma solidaria con el suelo nativo.

2.2.9 Fallos causados por factores hidráulicos

2.2.9.1 Efectos de la presión interna

Un aumento repentino en la presión interna genera un empuje brusco de tipo estructural, y no equilibrado por otra fuerza igual y en diferente dirección, y en consecuencia un desplazamiento de la conducción. Dichos aumentos en la presión

pueden ser producto de la apertura y cierre de válvulas. Los cambios de dirección en la corriente también pueden producir este tipo de empuje sobre la estructura.

2.2.9.2 Golpe de Ariete

Los arranques súbitos de sistemas de bombeo, las aperturas y cierres de recorrido completo e instantáneo de válvulas y los vaciados repentinos (por un fallo en la red) o el llenado no abrupto pueden generar un cambio muy brusco en la dirección del flujo (denominado golpe de ariete). Este fenómeno transitorio involucra la producción de grandes fuerzas de tensión adicionales que en algunos casos conducen a la ocurrencia de fallos en la tubería.

2.2.9.3 Cavitación

La cavitación es la formación - localizada cerca de las paredes de la tubería - de burbujas de vapor al interior del fluido, y que ocurre cuando la presión cae por debajo del valor de la presión de vapor del agua (aquel valor de la presión para el cual, a una determinada temperatura, la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico).

El efecto principal asociado a la ocurrencia del fenómeno de cavitación es el de la erosión de la pared interna de la tubería, y ello trae consigo un aumento en la probabilidad de fallo estructural en dicho sitio de la red. Otro efecto molesto aunque menos representativo lo constituye la ocurrencia de ruidos al interior de la red, causados por las explosiones de las burbujas de vapor.

2.3 Descripción de los tipos de fallo

Una vez introducidas las posibles causas de un fallo en una tubería, conviene revisar los rasgos fundamentales a cerca de los tipos de fallos que pueden presentarse.

2.3.1 Rotura circular y longitudinal (circumferential crack – longitudinal crack)

El tipo de fallo circular es de tipo lineal, que se caracteriza por la presencia de la fisura alrededor de la circunferencia de la tubería (Figura 15).

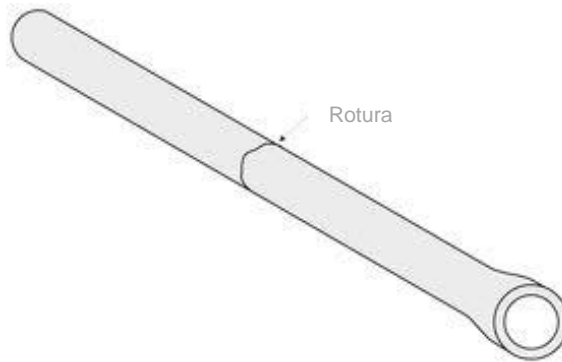


Figura 15. Esquema de rotura circular

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ci/volume-4-n3-13.html>. Modificado]

Suele presentarse en tuberías de diámetros menores y usualmente es causada por un pandeo (Figura 16).



Figura 16. Rotura circular

(New Zealand Water And Wastes Association, 2006)

A diferencia de las roturas transversales, las roturas longitudinales ocurren generalmente en conducciones de grandes diámetros (Figura 17).



Figura 17. Esquema de rotura longitudinal

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/projects/irc/gray-cast/distribution-pipes.html>]

Ante un aumento de la presión o bien por un fenómeno transitorio, la presencia de una rotura longitudinal puede terminar (aunque de manera infrecuente) en el desprendimiento de la cara superior de la tubería (Figura 18).



Figura 18. Rotura longitudinal

(New Zealand Water and Wastes Association, 2006)

2.3.2 Rotura puntual y longitudinal debida a la corrosión (corrosion pit - longitudinal corrosion pit)

Para el primer caso, se presenta un fallo que involucra la existencia de un hoyo (Figura 19) formado por el proceso corrosivo (en tuberías metálicas será evidenciable por la oxidación superficial, bajo la cual se encuentra la excavación, y

en tuberías plásticas por un desgaste erosivo superficial en una zona que pierde su grado de plasticidad y se vuelve frágil).

Dicho orificio (Figura 20) reduce paulatinamente el espesor de la pared de la tubería hasta que la presión interna del agua termina por crear una vía de escape al exterior.

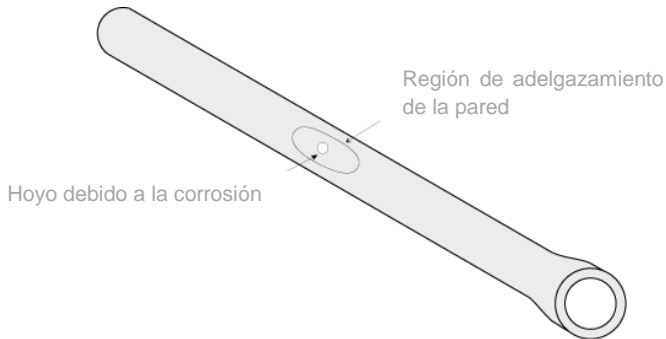


Figura 19. Esquema de rotura puntual por corrosión

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ci/volume-4-n3-13.html>. Modificado]

El tamaño del orificio varía con el tiempo y puede extenderse significativamente. Dicho tamaño depende de la debilidad del material circundante, causada por la corrosión, y de la presión interna del agua.



Figura 20. Hoyo producido por corrosión

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/projects/irc/gray-cast/distribution-pipes.html>]

El segundo caso (Figura 21) se evidencia mediante una grieta que demarca la región donde la pared de la tubería ha sufrido un adelgazamiento por efecto de la corrosión. En las excavaciones longitudinales por corrosión, generalmente el proceso corrosivo no llega a traspasar la totalidad del espesor de la conducción

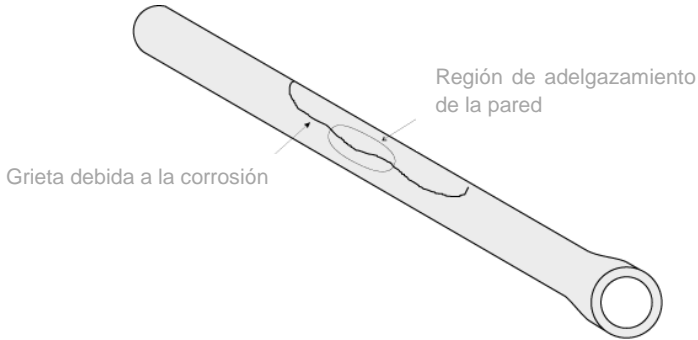


Figura 21. Esquema de rotura longitudinal por corrosión

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ci/volume-4-n3-13.html>. Modificado]

2.3.3 Corte en la campana (bell split)

Este tipo de fallo, usualmente causado por una expansión térmica de la junta de caucho (elemento intermedio de la misma) que intenta desplazar la campana (extremo exterior de la unión), se caracteriza por la aparición de una pequeña grieta (Figura 22).

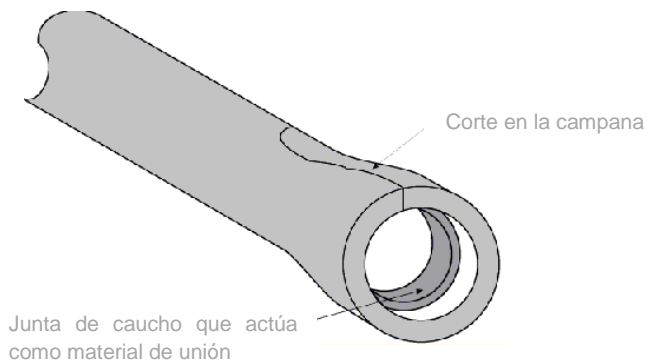


Figura 22. Esquema de corte en la campana

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ci/volume-4-n3-13.html>. Modificado]

La grieta inicia en el extremo de la campana, extendiéndose longitudinalmente a través de la misma hasta terminar entrando en el cuerpo liso de la tubería, girando hasta tomar un curso transversal (Figura 23).



Figura 23. Corte en la campana

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/projects/irc/gray-cast/distribution-pipes.html>]

2.3.4 Rotura en espiral (spiral crack)

El fallo en espiral (Figura 24) puede deberse a:

- La continuación de un colapso de la campana, que crea un hilillo que se propaga en forma de espiral y que solo se detiene ante un cambio de dirección de la red, ya sea por la presencia de un accesorio acoplado a la tubería, o por una irregularidad en la composición del material.
- La continuación de una rotura circular, una vez se rompe totalmente una sección de la tubería, propagándose la rotura a lo largo del cuerpo de la tubería en forma de espiral.



Figura 24. Rotura en espiral

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/projects/irc/gray-cast/distribution-pipes.html>]

2.3.5 Corte en forma de cuña (wedge splitting)

El corte en cuña es un método de fallo propio de las tuberías con un espesor grande, generalmente de fundición (Figura 25). Dicho fallo obedece a esfuerzo de curvado o pandeo.



Figura 25. Esquema de corte en forma de cuña

[<http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/eng/projects/irc/gray-cast/distribution-pipes.html>]

En contraposición con el corte en la campana, que suele ser producido por una diferencia de temperatura entre el sello y el ensanchamiento, causando una

expansión térmica, la causa del corte en forma de cuña se asocia a esfuerzos de pandeo en la campana, o bien a zonas de corrosión en la misma.

2.4 Tipos de fallos esperados según su localización

2.4.1 Fallos localizados en el tramo central de la tubería

En esta parte de la tubería, y por causa de una mala cimentación, de aumentos bruscos de presión, de un ambiente corrosivo, de movimientos de tierra (generados por otras obras, por asentamientos naturales o bien por el aumento o disminución de la cantidad de agua en el suelo), o por afectaciones externas (trabajos en otras redes que pueden causar el fallo de la red de transporte de agua), se pueden presentar:

- Roturas longitudinales en tuberías de grandes diámetros.
- Roturas circulares en tuberías de grandes diámetros.
- Excavaciones debidas a la corrosión (que en estados avanzados, y con la ayuda de la presión interna, crean una fuga).
- Fallos plásticos (de tipo dúctil) y fallos en espiral.
- En menor medida que los anteriores, pueden presentarse fallos por quiebre (de tipo frágil).

2.4.2 Fallos localizados en las uniones con otras tuberías

Los puntos débiles de las uniones están constituidos, básicamente, por las juntas de caucho y por la parte exterior de la unión (es decir, la campana). En estos elementos, y debido principalmente a la ocurrencia de movimientos inesperados de la estructura (frecuentemente por fenómenos hidráulicos transitorios), y también en importante medida por errores en el seguimiento de los protocolos de instalación, suelen identificarse los siguientes tipos de fallo:

- Rajaduras en las campanas, que suelen extenderse un poco en el cuerpo de las tuberías.
- Rajaduras en forma de cuña.
- Fallos por quiebre (de tipo frágil).

2.4.3 Fallos localizados en las uniones mecánicas de tuberías con accesorios

La actividad de acople de estas uniones de tipo mecánico (al igual que las uniones soldadas entre tuberías) requieren cierto grado de experiencia por parte del instalador. En ellas, típicamente se presentan:

- Cristalización de las juntas de caucho.
- Excavaciones debidas a la corrosión generada justo en la superficie de contacto entre materiales.

2.4.4 Fallos localizados en uniones soldadas entre dos tuberías

La calidad de la soldadura, como ya se dijo, depende en gran medida del debido cumplimiento de las condiciones establecidas para ello: tipo de material de soldadura, temperatura de soldadura, limpieza previa de las superficies, idoneidad del soldador, entre otros factores. Los fallos recurrentes en esta clase de unión son:

- Desintegración de la superficie de soldadura, que implica el daño permanente de las superficies transversales enfrentadas.
- En tuberías plásticas, después de una soldadura en caliente, fallos por quiebre (de tipo frágil) justo en el comienzo de alguna de las superficies transversales enfrentadas.

CAPÍTULO 3

Técnicas de inspección, protocolos para la evaluación de la condición y bases de datos para la estimación del deterioro de tuberías

Este capítulo contiene un resumen de los principios básicos de las principales técnicas de inspección para tuberías de transporte de agua (directas e indirectas) y de algunos de los más relevantes protocolos para la calificación del estado de condición de tuberías de saneamiento. Se realiza un aporte importante en este capítulo, representado en la propuesta de integración de las diferentes bases de datos relacionados con el patrimonio en infraestructura, a través del planteamiento de un conjunto de directrices que deben tenerse en consideración, y que en consecuencia permiten una adecuada explotación de estas bases de datos en la fase de implementación de un sistema de ayuda a la decisión enfocado a la eficiente intervención de la red.

3.1 Técnicas de inspección

Las técnicas de inspección han avanzado en su desarrollo en la medida en que lo han hecho los sistemas de gestión técnica de redes, pues son estos últimos quienes han dictaminado que la evaluación de la condición de una tubería (de manera directa, mediante resultados de inspecciones, y de manera indirecta, mediante la información que reposa en las diferentes bases de datos) es un proceso necesario dentro de la cadena de acciones requeridas para lograr una renovación eficiente de la red. Además, ante el advenimiento de nuevas tecnologías de rehabilitación o renovación, los gestores requieren un diagnóstico preciso sobre las características del fallo para establecer el tipo de intervención necesaria.

Pero la premisa que en el fondo impone la necesidad de este tipo de evaluación es simple: todos los elementos de la red se deterioran con el paso del tiempo, y algunos de ellos fallarán. Si se tiene una idea precisa de cuál, cuándo y cómo; se puede gestionar la red eficientemente.

En general, las redes de saneamiento (alcantarillado, aguas pluviales, o combinadas) permiten una evaluación más detallada y rápida de los fallos que poseen. Ellas, a diferencia de las redes de abastecimiento, en gran medida manifiestan sus fallos en el interior de la sección. En los acueductos la mayoría de los problemas se ubican en la pared exterior o en el espesor de la misma (una excepción de ello son los depósitos calcáreos y la erosión interior por cavitación), y a veces no llegan a establecerse en el interior hasta que es demasiado tarde, cuando la conducción avisa del problema mediante un fallo mayor, o incluso por el colapso de la estructura.

Otra ventaja a favor de las conducciones de saneamiento, en lo que a inspecciones respecta, radica en el tamaño de la tubería. Aún cuando existen grandes tuberías de abastecimiento que permiten el ingreso de elementos de inspección (últimamente, medios robotizados dotados de varias herramientas de diagnóstico estructural) e incluso de operarios, ello implicaría el vaciado y posterior llenado para realizar la actividad. En los sistemas de saneamiento no existe inconveniente operativo de este tipo, aunque sí se debe programar la inspección y los medios de seguridad adicionales para conducirla.

Se vislumbra pues que un aspecto importante en la evaluación del fallo resulta ser el lugar en que éste se manifiesta, pues dependiendo de su localización se podrá emplear una técnica más o menos rápida y que generará una mayor o menor afectación en el estado de operación del sistema. Por supuesto, además de la ubicación, la naturaleza del problema resulta crucial para su apropiada solución.

3.1.1 Técnicas de inspección en tuberías metálicas

3.1.1.1 Ultrasonido

La técnica no destructiva basada en ultrasonido es usada principalmente en oleoductos, y en menor medida en tuberías de fundición gris. Su aplicación requiere la instalación de un emisor de ondas de alta frecuencia que viajan a través de la pared de la tubería y que, ante una variación en la densidad del material (provocada por una fisura o por la corrosión) se reflectan. Dicho cambio, manifestado en forma de una perturbación en la energía de la onda, será detectado por un receptor el cual interpreta el cambio como una medida del espesor de la conducción.

Los resultados de las técnicas de ultrasonido son altamente sensibles al encuentro de la onda con productos de la corrosión en forma de protuberancias (llamadas tubérculos), adheridas éstas al interior de la tubería (Makar y otros, 1999). Este tipo de fenómeno suele presentarse en tuberías de fundición, lo que constituye una limitante en su uso.

3.1.1.2 Fugas en el Flujo de Campo Magnético (Magnetic Flux Leakage, MFL)

Esta técnica no destructiva tiene como principio el uso de sensores ubicados en el interior de la tubería, que captan las variaciones en la intensidad de un campo magnético producido por imanes instalados en la misma. Dicho campo magnético viaja a través de la pared y en la dirección axial de la conducción, hasta encontrar una variación estructural en ella (en forma de fisura o zona de corrosión) que le permita “fugarse” y en consecuencia ser detectada por los sensores (Makar y otros, 1999).

El método debe ser utilizado en tuberías metálicas que no posean revestimiento. La causa de esta restricción radica en que el equipo que produce el campo magnético debe encontrarse perfectamente adherido a la tubería, y para ello cuenta con un juego de potentes imanes. En el caso de las tuberías con revestimiento (situación que engloba a la gran mayoría de las tuberías de fundición) dicha capa finalmente se desprende por acción de los imanes, generando una superficie débil y propensa a la corrosión. Esta razón impide que la técnica de fugas en el flujo de campo magnético sea de uso común en la evaluación de la condición de conducciones metálicas en abastecimientos.

3.1.1.3 Campo Remoto de Corrientes de Remolino (Remote Field Eddy Current)

Esta técnica permite encontrar zonas de la pared de la tubería que han sufrido una pérdida de parte de su espesor. Ello usualmente corresponde a la ocurrencia de un proceso de corrosión, aunque en ocasiones el hallazgo corresponde a un defecto de construcción que se ha agravado con el paso del tiempo, o a una fisura.

La prueba consiste en la inducción de corrientes de remolino mediante el uso de un espiral insertado en el interior de la tubería y que interactúa con un receptor ubicado también en el interior de la tubería. La separación entre ambos usualmente es de 2 o 3 veces el diámetro interior de la conducción. Mediante inducción de una corriente eléctrica el excitador genera un campo magnético (denominado Campo Primario), que a su vez genera corrientes de remolino en la pared de la tubería.

Elas son las responsables de la creación de un segundo campo magnético (llamado Campo Secundario), con dirección de avance radial, y externo a la tubería

(el primer campo magnético viaja en la dirección axial de la tubería y por el interior). El campo primario decae más rápidamente que el campo secundario, puesto que el secundario sólo sufre disminuciones importantes al salir y al volver a entrar a la conducción, mientras que el campo primario decae exponencialmente a lo largo de la dirección del flujo. La zona de la tubería donde el flujo de campo magnético en la pared vuelve a entrar se denomina Región de Campo Remoto. El flujo de campo magnético entrante induce un voltaje cuya amplitud y fase permite deducir información acerca de la condición de la tubería.

3.1.2 Técnicas de inspección en tuberías de concreto reforzado

3.1.2.1 Inspección visual presencial e inspección mediante Circuito Cerrado de Televisión (CCTV)

La primera de ellas requiere el vaciado de la conducción hasta un nivel tal que una persona pueda encontrarse en condición óptima para la ejecución de la visita. En este caso, la formación técnica que debe tener el personal que realiza la inspección presencial es la misma de aquel que analiza las imágenes provenientes CCTV logradas mediante inspecciones robotizadas. En ambos casos, el personal debe ser capaz de reconocer con rapidez un defecto, identificando su tipo, magnitud y localización tanto en el sentido axial de la tubería, como en la parte específica de la sección transversal. Hasta hace poco, la diferencia principal entre métodos radicaba en que la inspección visual presencial permitía mayor movilidad y además la toma de medidas relativas a las dimensiones de las grietas encontradas.

Esto, sin embargo ha cambiado. Las nuevas tecnologías en este aspecto cuentan con robots adaptados para trabajar en condiciones físico-químicas extremas, aseguran movimientos en 360° en el plano horizontal y captura de imágenes con acercamiento y grabación de videos mediante cámara dirigida a distancia, mediciones del largo y ancho de una grieta con la ayuda de rayos láser cuyo error en la medida es de décimas de milímetro, mediciones de longitudes de intrusión de acometidas en la tubería principal, medición del cambio de alineamiento de un tramo respecto a otro y posibilidad de toma de muestras del agua para posteriores análisis de calidad.

Por supuesto, todas estas actividades también pueden ser realizadas por un ser humano, aunque con un importante limitante en el tamaño mínimo que debe tener

la conducción y en las condiciones de seguridad industrial y salud pública que deben observarse como requisito al ingreso del personal.

3.1.2.2 Eco-Impacto

Utilizada en tuberías de hormigón, esta técnica tiene como principio la localización de defectos en la pared de la tubería mediante la monitorización de los movimientos superficiales generados tras un impacto mecánico de corta duración. “El impacto genera diferentes modos de vibración (ondas-P, ondas-S y ondas-R). Dichas frecuencias pueden posteriormente ser relacionadas con la geometría de la pared y en consecuencia, con la presencia de fallos” (Carino, 2001).

Específicamente, la técnica basa su funcionamiento en la captación de pulsos reflejados (mediante eco) tras incidir en un defecto emplazado en la pared de la tubería, previa ocurrencia de un golpe mecánico seco y corto. La velocidad de dichos pulsos, además de su tiempo de viaje desde el transductor que los genera, sirve para determinar la distancia a la que se encuentra la interfaz que los ha reflejado. El método localiza fallos, mas no determina la naturaleza de los mismos.

El tamaño de los defectos que el método es capaz de localizar depende varios factores: la profundidad del defecto (en el caso de una tubería, en la pared de ella), su tipo y orientación, y el tiempo de contacto del impacto (Carino, 2001).

3.1.2.3 Georadar

Esta técnica se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos que luego de viajar a través de la pared de la tubería se miden, para cuantificar el tiempo de tránsito y el grado de atenuación de la señal, y desde ellos estimar el espesor de cada subcapa de la pared que cruzaron (ya sea de material original, o bien de productos de procesos corrosivos), en función de la variación en la longitud de onda. Esta técnica requiere la instalación de una antena justo sobre la parte externa de la tubería, en el segmento a evaluar, lo que hace que sea necesario ejecutar una inspección externa mediante apertura de zanja (Rajani, 2004).

3.2 Protocolos para la evaluación de la condición de tuberías de transporte de agua

Una planeación de inversiones ajustada a la realidad pasa, inobjetablemente, por una adecuada predicción de la condición estructural y operativa futura de la red. La calidad de dicha predicción, a su vez, depende de una acertada valoración de la condición actual.

El término “acertada” hace referencia tanto a la técnica elegida para la identificación de los defectos de las tuberías, como a la transformación que se haga de sus resultados (cada técnica ofrece una descripción en ciertas ocasiones subjetiva del tipo de daño encontrado) hacia verdaderas calificaciones de la condición (cuantificaciones numéricas del tipo y magnitud de los daños en un tramo), que se encuentren referidas a una escala previamente fijada, la cual indica el máximo puntaje de afectación que puede ser asignado a una tubería.

Un protocolo de evaluación es pues un conjunto de pasos necesarios para estandarizar los resultados provenientes de la evaluación de diferentes defectos (posiblemente hallados mediante distintas técnicas), y para cada defecto, de la magnitud de éste.

De la misma manera que existe una frecuencia de ejecución de inspecciones en sistemas de saneamiento mucho mayor que en sistemas de abastecimiento, también existe un mayor número de protocolos de evaluación para el primer tipo de redes. De nuevo hay que incidir en los factores limitantes que impiden contar con una valoración de la condición de una tubería de abastecimiento mediante un método no destructivo:

- Solamente las aducciones de grandes diámetros permiten alojar en su interior elementos mecanizados de inspección (es decir, realizar una inspección interior).
- Estas tuberías constituyen puntos críticos para la operación diaria de la red. Su salida de funcionamiento usualmente afecta gran parte del sistema. Considerando lo anterior, operativamente resulta inviable despresurizar el sistema y detener su operación, y además vaciar la conducción, para realizar un trabajo de inspección interior.

- El posterior llenado y presurización representan en sí, causas de fallos adicionales a aquellas que en principio constituyen el motivo de la inspección. Podría interpretarse entonces que programar este tipo de inspecciones constituye en cierta medida, más un inconveniente que un beneficio.
- Las inspecciones exteriores tampoco suelen realizarse “ad-hoc” pues involucran la abertura de una zanja (con la consecuente afectación de la movilidad peatonal y vehicular), y la pérdida de la compactación natural del terreno (que acarrea condiciones propicias para la generación de nuevos fallos). Estas inspecciones exteriores solamente se presentan como eventos indirectos, aprovechando las obras llevadas a cabo para fines diferentes (como por ejemplo, ampliaciones de la red, o instalaciones de redes de otros servicios), o bien por causas correctivas (por ejemplo, para la reparación de una fuga vecina).

Las auditorías hídricas, aunque no constituyen un método de inspección, sí permiten hacer una evaluación general del estado de la red. Este tipo de actividades representa una forma práctica de saber el grado de afectación de un determinado sector pues posibilitan conocer el volumen fugado del sistema.

3.2.1 Propuesta del NRC

El protocolo para la evaluación de la condición de tuberías de saneamiento que propuso en 2001 (Zhao, 2001) el Instituto para la Investigación en la Construcción del Consejo Nacional de Investigaciones de Canadá, NRC por sus siglas en inglés, posee una estructura enfocada a su aplicación en tuberías de grandes diámetros (mayores a 900 mm), susceptibles de inspecciones interiores mediante CCTV.

El protocolo del NRC define una serie de defectos de tipo estructural y operativo, y para ellos, diferentes niveles de severidad. Cada defecto se encuentra debidamente definido y codificado. Dicho protocolo propone una clasificación de los posibles defectos y sus respectivos pesos (Tabla 2).

Tabla 2. Pesos para defectos estructurales y operativos. Protocolo NRC (Modificada de: NRC, 2004)

Defecto	Peso
Estructurales	
Grieta longitudinal ligera (hasta 3 grietas, sin fuga)	3
Grieta longitudinal moderada (más de 3 grietas, con fuga)	5
Grieta circular ligera (hasta 3 grietas, sin fuga)	3
Grieta circular ligera (más de 3 grietas, con fuga)	5
Grieta diagonal moderada (hasta 3 grietas, sin fuga)	3
Grieta diagonal severa (más de 3 grietas, con fugas)	5
Grieta diagonal severa (múltiples grietas, con fugas)	10
Deformación ligera (menos de 5% de cambio en el diámetro)	5
Deformación moderada (5 a 10% de cambio en el diámetro)	10
Deformación severa (11 a 25% de cambio en el diámetro)	15
Desplazamiento de la junta ligero (menos de 0.25 del espesor de la pared de la tubería)	3
Desplazamiento de la junta moderado (0.25 a 0.50 del espesor de la pared de la tubería)	10
Desplazamiento de la junta severo (más del 0.50 del espesor de la pared de la tubería)	15
Tubería rota	15
Tubería colapsada	20
Operativos	
Raíces ligeras: reducción en diámetro menor al 10%	2
Raíces moderadas: reducción del diámetro del 10 al 25%	8
Raíces severas: reducción del diámetro mayor a 25%	10
Desechos ligeros: reducción del diámetro menor al 10%	5
Desechos moderados: reducción del diámetro del 10 al 25%	8
Desechos severos: reducción del diámetro mayor al 25%	10
Incrustaciones ligeras: reducción del diámetro menor al 10%	2
Incrustaciones moderadas: reducción del diámetro entre 10% y 25%	8
Incrustaciones severas: reducción del diámetro mayor a 25%	10
Protuberancias ligeras: reducción del diámetro menor a 10%	2
Protuberancias moderadas: reducción del diámetro entre el 10% y el 25%	8
Protuberancias severas: reducción del diámetro mayor al 25%	10
Infiltración ligera: goteo	2
Infiltración moderada: escurrimiento	5
Infiltración severa: chorro	10

Para cada segmento de tubería analizado, comprendido entre dos cámaras de inspección (MH), se calcula una calificación de la condición comprendida entre 0 (tubería en excelente condición) y 5 (tubería a punto de colapso). La calificación de la condición se genera tras analizar los defectos encontrados en la inspección. Se plantean tres opciones para obtener la calificación final:

3.2.1.1 Calificación de la condición basada en la suma de los pesos de defectos encontrados en el tramo entre MH y MH

Esta opción permite calcular la calificación de la condición en función de la sumatoria de pesos asociados a los n defectos encontrados en el tramo (Ec. 5).

$$\text{Calificación} = \sum_{i=1}^n W_{\text{defecto } i} \quad \text{Ec. 5}$$

3.2.1.2 Calificación de la condición basada en el valor medio por unidad de longitud de los pesos de defectos encontrados en el tramo entre MH y MH

Mediante esta opción, la calificación de la condición en función de la sumatoria de pesos asociados a los n defectos encontrados en el tramo, se expresa por unidad de longitud (Ec. 6).

$$\text{Calificación} = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{defecto } i}}{\text{Longitud segmento}} \quad \text{Ec. 6}$$

3.2.1.3 Calificación de la condición basada en el peso máximo de defecto encontrado en el tramo entre MH y MH

Se basa en penalizar todo el tramo en función del peor de los defectos encontrados (Ec. 7).

$$\text{Calificación} = W_{\text{máximo defecto}} \quad \text{Ec. 7}$$

Para las opciones de calificación por suma de pesos y por unidad de longitud, no se plantea una continuación del método, tendiente a asignar prioridades de rehabilitación. Cuando se decide utilizar la calificación de la condición basada en el peso máximo de defecto encontrado en el tramo, y con la intención de pasar los

resultados de calificación estructural u operativa a una escala de clasificación universal de 0 a 5, se plantean 5 rangos que varían entre 0 y 20 para condición estructural, y entre 0 y 10 para condición operativa (Tabla 3). Si no se encuentran defectos, la clasificación es la mejor posible, con un valor de clasificación igual a 0

Tabla 3. Clasificación de la condición desde rangos de calificación estructural o calificación operativa según método de máximo peso. Protocolo del NRC (Zhao, 2001)

Calificación estructural	0	1-4	5-9	10-14	15-19	20
Calificación operativa	0	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10
Clasificación según calificación de condición NRC	0	1	2	3	4	5

En lo que se refiere a la clasificación estructural, la propuesta del NRC incluye además, una tabla que relaciona dicha clasificación con su posible implicación, y desde ésta, una expresión semántica (no es un valor numérico) de prioridad a la rehabilitación (Tabla 4).

Tabla 4. Prioridad a la rehabilitación según el protocolo del NRC (Zhao, 2001)

Clasificación de la condición estructural	Implicación	Prioridad a la rehabilitación
5	Fallo inminente	Inmediata
4	Condición muy pobre	Inmediata
	Alto riesgo estructural	Alta
3	Pobre condición	Media
	Moderado riesgo estructural	Baja
2	Condición regular	Baja
	Mínimo riesgo estructural	Baja
0 ó 1	Condición buena o excelente	No requerida

3.2.2 Propuesta de WRc

El protocolo para la evaluación de la condición de tuberías del Water Research Centre del Reino Unido (WRc, por sus siglas en inglés) incluye una propuesta para

caracterizar la localización del defecto en inspecciones de CCTV mediante el método de referencia según las agujas del reloj (Figura 26).

Las 12 horas indican la parte superior de la tubería, las 6 horas la parte inferior, las 3 horas el costado derecho en sentido aguas abajo, y las 9 horas el costado izquierdo. Así pues un defecto con código de localización 0309 (3 horas a 9 horas) indica que toda la mitad inferior de la sección transversal tiene problemas estructurales u operativos (NRC, 2004).

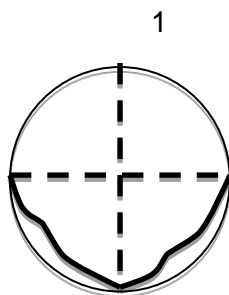


Figura 26. Propuesta de localización del defecto mediante sistema de agujas del reloj (WRc, 2001).

El protocolo del WRc propone una clasificación de defectos y pesos de importancia (Tabla 5).

Tabla 5. Pesos para defectos estructurales y operativos. Protocolo WRc (Modificada de: NRC, 2004)

Defecto	Peso
Estructurales	
Grieta longitudinal ligera (hasta 3 grietas, sin fuga)	10
Grieta longitudinal moderada (más de 3 grietas, con fuga)	40
Grieta circular moderada (más de 3 grietas, con fuga)	10
Grieta diagonal severa (múltiples grietas, con fugas)	40
Deformación ligera (menos de 5% de cambio en el diámetro)	20
Deformación moderada (5 a 10% de cambio en el diámetro)	80
Deformación severa (11 a 25% de cambio en el diámetro)	165
Desplazamiento de la junta moderado (0.25 a 0.50 del espesor de la pared de la tubería)	1
Desplazamiento de la junta severo (más del 0.50 del espesor de la pared de la tubería)	2
Tubería rota	60
Tubería colapsada	165

Defecto	Peso
Operativos	
Raíces sutiles	1
Raíces masivas: reducción del diámetro menor al 5%	2
Raíces masivas: reducción del diámetro entre 5% y 20%	4
Raíces alargadas y rectas	5
Raíces severas: reducción del diámetro mayor a 25%	5
Raíces masivas: reducción del diámetro entre 20% y 50%	10
Raíces masivas: reducción del diámetro entre 50% y 75%	15
Raíces masivas: reducción del diámetro mayor a 75%	20
Desechos compuestos por limos o grasas: reducción del diámetro en 5%	1
Desechos moderados: reducción del diámetro del 10 al 25%	2
Desechos compuestos por limos o grasas: reducción del diámetro del 5% al 20%	2
Desechos compuestos por limos o grasas: reducción del diámetro del 20% al 50%	5
Desechos compuestos por limos o grasas: reducción del diámetro del 50% al 75%	8
Desechos compuestos por limos o grasas: reducción del diámetro mayor al 75%	10
Incrustaciones ligeras: reducción del diámetro menor al 10%	1
Incrustaciones moderadas: reducción del diámetro entre 10% y 25%	2
Incrustaciones severas: reducción del diámetro mayor a 25%	5
Protuberancias laterales: reducción del diámetro del 5%	1
Protuberancias laterales: reducción del diámetro entre el 5% y el 20%	2
Protuberancias laterales: reducción del diámetro entre el 20% y el 50%	5
Protuberancias laterales: reducción del diámetro entre el 50% y el 75%	8
Protuberancias laterales: reducción del diámetro mayor a 75%	10

Al igual que en el protocolo del NRC, la calificación de la condición de la tubería se determina en el protocolo del WRc mediante la elección de una de las tres ecuaciones anteriores.

Al utilizar la calificación de la condición basada en el peso máximo de defecto encontrado, también se plantean 5 rangos que varían entre 0 y 165 para condición estructural, y entre 0 y 20 para condición operativa (Tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de la condición desde rangos de calificación estructural o calificación operativa según método de máximo peso. Protocolo del WRc (WRc, 2001)

Calificación estructural	Menor a 10	10-39	40-79	80-164	Mayor a 164
Calificación operativa	Menor a 1	1 a 1.9	2 a 4.9	5 a 9.9	Mayor a 9.9
Calificación de la condición WRc	1	2	3	4	5

Para completar el protocolo, el WRc plantea 3 categorías de criticidad (A, B y C) en las cuales deben quedar clasificadas todas las tuberías. En la categoría A se clasifican los activos que tienen asociados los mayores costos directos e indirectos de fallo. Esta categoría también resulta asignada a los elementos cuya pérdida resulta crítica para la empresa prestadora del servicio. En el extremo opuesto, las conducciones consideradas como menos críticas para la empresa, o cuyos costos directos o indirectos son menores, se clasifican en la categoría C (NRC, 2004).

3.2.3 Propuesta del CERIU

EL centro de Expertos E Investigación Sobre Infraestructuras En Áreas Urbanas (CERIU, por sus siglas en inglés) plantea un protocolo para la evaluación de la condición de tuberías mediante su disgregación en cuatro escenarios (Chughtai y otros, 2011):

- Defectos estructurales
- Defectos hidráulicos
- Infiltración
- Condición de las juntas

La Tabla 7 incluye la relación entre 5 grados de condición que el CERIU define para un defecto operativo o estructural específico que se presente en un elemento, y la descripción del tipo de acción que se recomienda para cada grado de condición.

Tabla 7. Clasificación de la condición según defectos operativos o estructurales. Protocolo CERIU (Chughtai y otros, 2011)

Grado de condición CERIU	Descripción
1	No se requiere acción alguna
2	Se requiere acción , pero no de tipo mayor
3	Se requiere acción, pero no de manera urgente
4	Se requiere acción de manera urgente
5	Se requiere acción inmediata

No existe pues, en esta propuesta, un valor único de calificación que refleje los efectos de la degradación estructural y operativa de la tubería.

3.2.4 Propuesta de integración de los protocolos WRc y CERIU

EL CERIU y el WRc plantean el desarrollo de un Índice de Condición Combinado (abreviado CCI), que considera los efectos de la condición estructural y operativa de la tubería mediante la implementación de un modelo basado en Redes Neuronales.

Aunque la aplicación de este tipo de técnicas de optimización en computación denominadas “suaves” (además de las redes neuronales, en este grupo se clasifican las diferentes clases de algoritmos genéticos y la lógica difusa) no es nueva, se destaca que la propuesta integra la visión de ambas entidades, acarreando con ello un modelo de estructura robusta basado en la experiencia de los empleados de todas las empresas de saneamiento que se relacionan con ambas partes. La propuesta comprende dos partes: en primera instancia, el desarrollo de un protocolo propio de CERIU para la clasificación de la condición general de tuberías de la red de saneamiento. Para este punto, CERIU toma como referencia un resumen planteado sobre la clasificación de defectos y pesos asociados del protocolo WRc (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de defectos y pesos de importancia (Chughtai y otros, 2011)

Defectos estructurales	Peso WRc	Peso (%) CERIU
Abertura en la unión	2	1.21
Desplazamiento de la unión	2	1.21
Grieta circular	8	4.85
Grieta longitudinal	15	9.09
Gritas múltiples	40	24.24
Deformación	165	100
Hoyos	165	100
Operativos		
Raíces	10	100
Incrustaciones	5	50
Desechos	10	100
Obstrucciones	10	100

Mediante la técnica de Redes Neuronales No Supervisadas, y tomando como valores de referencia los citados en la tabla anterior, se generan 5 clasificaciones de la condición de la tubería para el protocolo CERIU, compatibles con las clasificaciones planteadas en el protocolo WRc.

La segunda parte de la propuesta consiste en generar un índice de condición combinado (Tabla 9). El enfoque en este punto ha sido tomado del campo de la gestión de infraestructuras de transporte, específicamente en los estudios de deterioro de pavimentos. La combinación del estado estructural y operativo se realiza mediante una matriz de condición combinada que agrupa sus elementos integrantes en 5 posibles clases.

Las agrupaciones son planteadas y examinadas mediante retroalimentación de expertos e información recolectada de diferentes empresas. Como resultado final, se genera un índice que se obtiene desde la asignación de un número de 1 a 5, que corresponde a las 5 clasificaciones mencionadas, donde “1” representa una condición aceptable de la combinación de su estado estructural y operativo, y “5” representa una condición crítica para dicha combinación (Chughtai y otros, 2011).

Tabla 9. Índice de Condición Combinado. Propuesta de integración de protocolos de WRc y CERIU

Escala num.	Cal. Estructural	Cal. Operativa	Descripción	Acción requerida
1	1 a 2	1 a 3	Condición general aceptable	Monitoreo de rutina
2	1 a 2	1 a 3	Problemas de desbordamiento	Limpieza y vaciado
3	3 a 4	2 a 3	Riesgo de colapso sin desbordamiento	Prioridad baja a la rehabilitación
4	3 a 5	2 a 4	Riesgo de colapso mayor con mínimo desbordamiento	Prioridad media a la rehabilitación
5	3 a 5	4 a 5	Riesgo de colapso extremo con problemas de desbordamiento	Prioridad alta a la rehabilitación

La propuesta, si bien representa un avance de integración de modelos separados, depende en gran medida de la asignación que el WRc hace a cada defecto estructural y operativo, involucrando con ello un nivel de incertidumbre importante en los resultados.

3.3 Algunas directrices para la integración de bases de datos y su enfoque hacia la estimación del deterioro de activos enterrados

Aunque en el Capítulo 6 (plan de actuación) se ahonda en la concepción de la base de datos en el entorno de la gestión de inventarios, se propone aquí una serie

de criterios que ayudan a conformar una necesaria estructura de integración de los datos generados a partir de los resultados de la aplicación de técnicas de inspección, con aquellos surgidos tras la evaluación de la condición, y por supuesto, con la información propia del inventario de la red.

Los criterios que a continuación se exponen son el fruto del análisis a grupos de tuberías pertenecientes a cuatro bases de datos de diferentes empresas de abastecimiento y saneamiento (dos empresas del Mediterráneo Español, una del centro de Canadá y una de los Andes Colombianos). Los nombres de las empresas se mantienen en reserva.

A pesar de que la cantidad de registros en cada caso es diferente, no lo es así la casuística encontrada cuando se pretendía explotar los datos. Los problemas identificados constituyen en sí mismos factores de incertidumbre en el proceso de toma de decisiones relacionadas con las intervenciones futuras en la red.

Junto con la cualificación del personal y la fiabilidad del modelo de cálculo utilizado, la calidad de los datos que se utilizan en el estudio del deterioro de la red es considerada por los gestores de las redes como aspecto crítico para la evaluar la incertidumbre asociada a las decisiones que de tal estudio se desprendan (Dirksen y otros, 2009).

A partir pues, de los problemas identificados, se proponen las siguientes directrices más relevantes. Finalmente, se presenta una metodología sencilla pero eficaz para diagnosticar el grado de gestión respecto al debido manejo de las bases de datos de las empresas. Las bases de datos propiedad de la empresa (internas), que no deben faltar pues intervienen ineludiblemente en la estimación del grado de deterioro de la red, y desde ahí, en la toma de decisiones en el ámbito de la renovación o rehabilitación de la misma son:

- Base de datos de inventario de activos
- Base de datos de intervenciones en la red
- Base de datos de inspecciones

Estas bases de datos son actualizadas de manera periódica por otras que también pertenecen a la empresa:

- Base de datos del sistema de información geográfica
- Base de datos del modelo hidráulico de la red

- Base de datos de órdenes de trabajo asignadas a los contratistas
- Base de datos de opinión experta

Adicionalmente a las anteriores, existen bases de datos que no son de la empresa (es decir, son externas) pero que son consultadas de manera ocasional para satisfacer necesidades de información de los diferentes modelos. Entre ellas cabe mencionar:

- Base de datos de usos del suelo
- Base de datos de formas geológicas
- Base de datos de pendientes
- Base de datos de distribución demográfica estratificada
- Base de datos de vías y caminos (callejeros)
- Base de datos de equipamiento urbano
- Base de datos de entidades especiales y sitios críticos

La Figura 27 esquematiza los niveles de interacción de cada una de ellas en relación con la modelación del deterioro.

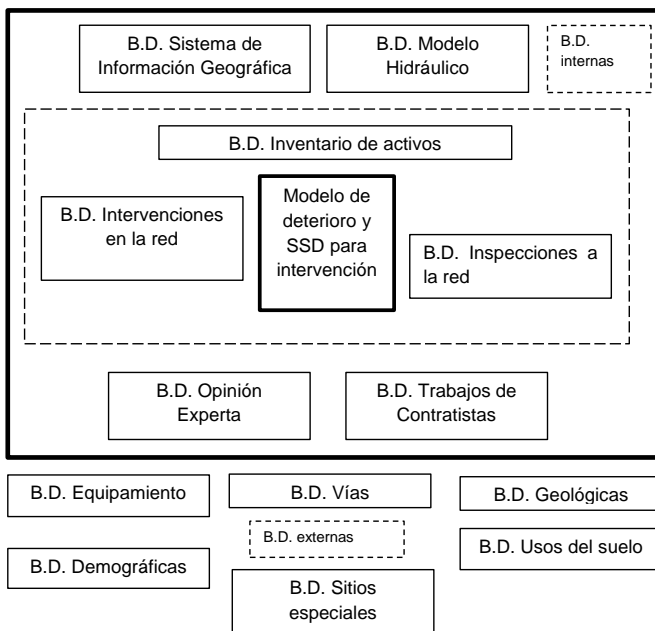


Figura 27. Niveles de interacción de las bases de datos del modelo de deterioro y de los sistemas de indicadores de gestión y de apoyo a la decisión para la renovación o rehabilitación de la red

3.3.1 Campo ID. Identidad Única de la tubería

Cada empresa debe establecer una única interpretación de lo que se considera que es una tubería. Se recomienda definir la tubería como el tramo comprendido entre dos cámaras de inspección. En cualquier caso, y sin importar la definición que la empresa adopte para este término, cada tubería debe tener un único identificador (ID).

Este identificador, de formato alfanumérico, debe existir en todas las bases de datos, tanto propias de la empresa, como en las bases de datos de los contratistas. Por ningún motivo se deben asignar actividades relacionadas con el plan de gestión de activos a los domicilios o a los abonados, sin que se haga directa referencia al ID de la tubería involucrada.

3.3.2 Campo Edad. Datos reales y datos estimados

La edad de la tubería es única y debe registrarse en una columna explícitamente para ello. Su cálculo corresponde a la diferencia entre la fecha de la consulta en la base de datos y la fecha de instalación.

En caso de hacer un estimado de la edad de la tubería para aquellos elementos de los que no se conozca el dato exacto de fecha de instalación, dicho valor estimado debe consignarse en otra columna cuyo encabezado refleje claramente que los datos son estimados. Desde estas dos columnas se puede generar una tercera que contenga datos reales y datos estimados para los registros que así lo requieran.

Resulta importante conocer la proporción de datos estimados respecto a datos reales para una red o un sector de ella, pues esta proporción constituye un indicativo del grado de incertidumbre que tendrán los resultados que se desprendan de la utilización de dichos datos.

La forma de estimación de los datos faltantes de edad debe quedar debidamente registrada, para efectos de poder reproducir el procedimiento en el futuro (es decir, ejecutar la buena práctica empresarial de preservar el “saber cómo”). Siempre se debe tener pleno control sobre los registros que deben ir a una

u otra columna, en función del origen de ellos, evitando en todo momento la duplicidad de ellos.

3.3.3 Campo fecha. Compatibilidad de formatos

Para todas las bases de datos, y para todos los datos que pretendan ser ingresados a ellas desde fuentes externas (en especial, los datos provenientes de contratistas), el formato de fecha (ya sea que se refiera a fecha de instalación, de inspección o de intervención) debe ser uno solo. La empresa debe elegir el formato que le resulte más conveniente y actualizar todas las bases de datos a dicho formato (por ejemplo: DDMMAAAA, o bien DD-MM-AAAA)

3.3.4 Campo Observaciones. Compatibilidad entre bases de datos

En cada base de datos, el encabezado del campo observaciones debe acompañarse con una leyenda que identifique la base de datos a la que pertenece (por ejemplo: Observaciones_inventario, que debe resultar diferente de Observaciones_CCTV).

A diferencia del campo Identificador de tubería (ID), cuyo contenido para cada tubería debe ser el mismo sin importar la base de datos que se consulte, los campos de Observaciones contienen informaciones diferentes, que en cada caso resultan particulares según la base de datos de la cual hacen parte.

3.3.5 Base de datos del inventario de activos enterrados. Control de su estructura

Los campos de la base de datos del inventario de activos enterrados deben dar adecuada respuesta a las necesidades impuestas por la modelación hidráulica de la red, por las diferentes consultas desde el sistema de indicadores de gestión, por aquellas que provienen del sistema de ayuda a la decisión, e inclusive por consultas desde entidades externas a la empresa. Esta base de datos se encuentra sin duda bajo permanente explotación.

Tal situación requiere la implementación de un control permanente sobre su estructura mediante revisiones periódicas a su estado de funcionamiento y a sus conexiones con otras bases de datos, a la calidad de los registros ingresados en ella, a su tamaño y al personal que a ella puede acceder. Este control debe ser periódico y quedar debidamente documentado.

El control también debe incluir que se verifique que solo se están creando los campos que resultan estrictamente justificados, y que para cada campo efectivamente se esté recolectando la información a que éste hace referencia, y que existe un responsable para dicho fin.

El no contar a la fecha con información respecto a un campo en particular suele ser motivo para que los encargados de recopilarla no lo hagan en el futuro. Esto desde luego entorpece la labor en algún punto del sistema de gestión de activos, y de no hacerlo, evidencia que la inclusión del campo citado no resulta necesaria y en consecuencia éste se debe eliminar de la base de datos.

3.3.6 Base de datos del inventario de activos enterrados. Validación y actualización de su información

Se debe realizar una validación de los datos contenidos en el inventario de activos, con la intención de corroborar la coherencia y veracidad de los mismos. Dicha validación puede consistir en comparar fechas de instalación por material respecto a las épocas de inicio de producción y entrada al mercado de estos materiales, cotejar fechas de instalación de alcantarillados con fechas de instalación de acueductos, realizar paralelos entre fechas de entrada en funcionamiento de la red e información no sistemática de otras dependencias que intervienen el ambiente, analizar los diámetros que figuran en el inventario y compararlos con los que efectivamente se utilizan para la modelación, etc.

De la misma manera, la base de datos del inventario de activos físicos debe mantenerse permanentemente actualizada. Se debe verificar dicha actualización cotejando que los proyectos de expansión en la red ejecutados en el año actual se vean reflejados en el inventario con carácter inmediato.

3.3.7 Base de datos de intervenciones. Naturaleza de sus registros

La base datos de intervenciones en la red debe permitir identificar si cada requerimiento de visita o de orden de trabajo ha sido generado por solicitud del abonado o por solicitud interna, y en caso de ser esta última, si la intervención es de tipo correctivo o preventivo.

3.3.8 Base de datos de intervenciones. Seguimiento de los procesos.

La base de datos de intervenciones en la red debe contener, para cada intervención programada, la fecha de reporte de la necesidad de intervención, la fecha programada para el inicio de la intervención, el tiempo estimado de duración de la intervención (este transcurre desde que la intervención comienza, hasta que el servicio queda restablecido con normalidad y de igual manera se restablecen todas las condiciones ambientales y sociales perturbadas por la intervención), la fecha real de terminación de la intervención, y si el objetivo de la intervención se ha cumplido totalmente, parcialmente o no se ha cumplido. En los dos últimos casos, se debe llenar obligatoriamente el campo observaciones, con las anotaciones que expliquen el cumplimiento parcial o el no cumplimiento del objetivo.

3.3.9 Base de datos del modelo hidráulico de la red

El modelo hidráulico de la red debe incluir todos los elementos que aseguren que el sistema modelado corresponde a la realidad. En este sentido, el identificador de cada elemento del modelo debe ser el mismo identificador del elemento en las bases de datos.

Esto implica en ciertas ocasiones un reto, pues ciertos paquetes informáticos de modelación hidráulica establecen restricciones de longitud y de tipos autorizados de caracteres para ser utilizados como atributos de los elementos. En caso de ser necesario, se deberá crear un programa informático que se encargue de relacionar el identificador del modelo con el identificador de las bases de datos. Sin embargo, la aplicación de este tipo de procesos intermedios aumenta la probabilidad de ocurrencia de errores en la asignación de propiedades a elementos individuales.

Siempre se debe llevar registro sistemático de las actualizaciones hechas al modelo hidráulico (fecha de modificación, tipo de modificación, nombre de la nueva versión). Para ello se debe crear una base de datos que contenga esta información. También allí se debe llevar registro de las ejecuciones formales del modelo (fecha de ejecución, motivo de la ejecución y usuario final que requiere el producto), así como registro de los parámetros hidráulicos que se utilizan en cada ejecución del mismo.

La recopilación de estos datos y su ingreso en la base de datos específicamente creada para tal fin, permitirá establecer con mayor exactitud el grado de incertidumbre de los resultados del modelo de deterioro y del sistema de ayuda a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red. Además, lo anterior le asegura a la empresa la conservación del “saber cómo” en lo referente al montaje y ejecución del modelo de la red.

3.3.10 Base de datos de opinión experta

Si el modelo decisional para la renovación o rehabilitación involucra la recopilación de opinión experta (como es el caso de aquellos modelos que requieren la asignación de pesos de importancia para asignar a determinados criterios), se debe registrar en una base de datos creada para este fin el personal clasificado en el estatus de experto, y así mismo las fechas en que se consultó y/o se deberá consultar su opinión. De igual manera se deben registrar los resultados de su opinión (por ejemplo, los pesos asignados).

No debe olvidarse que de la misma manera en que el proceso de deterioro es dinámico (depende en cierto grado del funcionamiento de la red, del crecimiento poblacional, de la incorporación de nuevos materiales, etc.), la opinión experta también lo es (esta se actualiza en función de la información que el decisor adquiere día a día).

3.3.11 Base de datos de inspecciones mediante CCTV

La base de datos de inspecciones mediante CCTV debe contener, además de los resultados de las inspecciones y sus fechas de realización, el nombre del contratista que realizó la inspección (o bien, si fue ejecutada por personal propio de

la empresa, el nombre y cargo del encargado del grupo de trabajo que ha llevado a cabo la inspección), el protocolo utilizado para la calificación de los defectos (protocolo que por política de la empresa, siempre debe ser el mismo, ya sea el ejecutor de la inspección un contratista externo o personal propio de la empresa).

La base de datos de inspecciones mediante CCTV debe permitir identificar, para cada elemento, las fechas de próximas inspecciones, y en consecuencia poder emitir avisos preventivos que sirvan de ayuda para la programación de esta actividad. De igual manera, la base de datos debe permitir identificar y dar aviso sobre las inspecciones que debieron ser programadas y de las cuales no se tiene información que verifique su ejecución.

3.3.12 Datos de entrada para el sistema de indicadores de gestión y para el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red

Los sistemas de indicadores de gestión y de soporte a la decisión deben ser alimentados, en cada caso, siempre desde las mismas fuentes de datos. Los cambios en las fuentes y en la forma en que se adquieren los datos de entrada al sistema deben quedar claramente documentados y ser evidentes de manera tal que al momento explotar alguno de los sistemas se tenga plena certeza de que las diferencias respecto a los resultados esperados obedecen a razones distintas a las variaciones no reportadas en el manejo de la información.

Esta documentación de cambios debe contener como mínimo el tipo de cambio en la adquisición de datos (ya sea en fuente o forma), la fecha del cambio, la justificación del cambio, el responsable del mismo y la persona que lo autoriza a hacerlo.

3.3.13 Datos de entrada para el sistema de información geográfica

Los datos de entrada al sistema de información geográfica deben quedar debidamente registrados para su trazabilidad. Dicho registro debe contener el nombre del archivo, el tipo de archivo (Excel, Autocad, archivos tipo shape provenientes de otras bases de datos internas o externas, Access, entre otros),

fecha de la ejecución del SIG, ejecutor de la consulta y usuario final que requiere el producto.

3.3.14 Resultados generados por el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red

Dado que la aplicación del sistema de soporte a la decisión es una actividad que encamina la destinación de recursos del presupuesto de inversión de la empresa, los resultados que se generen desde este sistema deben estar respaldados por el grupo de trabajo que lo implementa y ejecuta, y específicamente, mediante un responsable de este equipo.

Por tal motivo, se debe llevar un registro que genere trazabilidad a la producción de resultados del sistema, y que incluya el nombre del responsable, la fecha de generación del informe, el motivo por el cual se generó y el usuario final que requiere el producto.

3.3.15 Resultados generados por el sistema de indicadores de gestión

Puesto que las bases de datos proveen la información de entrada del sistema de indicadores de gestión técnicos, y desde los resultados de éste se refleja el nivel de gestión alcanzado, estos resultados deben estar soportados por el grupo de trabajo que lo implementa y ejecuta, y específicamente mediante un responsable de este equipo.

En consecuencia, y al igual que en el numeral anterior, se debe llevar registros que incluyan el nombre del responsable, la fecha de generación del informe, el motivo por el cual se generó y el usuario final que requiere el producto.

3.3.16 Protocolos de gestión de bases de datos internas

Para cada base de datos debe existir un documento que contenga el protocolo de su gestión. Dicho protocolo debe contener como mínimo las funciones de cada uno de los integrantes del equipo que se encarga de mantener el buen estado de la

base de datos. Esos integrantes pueden ser relacionados en el protocolo mediante el cargo y el área al que pertenecen.

El protocolo debe especificar además las fechas del año en las cuales se deben realizar obligatoriamente copias de respaldo de la base de datos (Back-Up) y la ubicación digital en el cual deben alojarse estas copias. De igual forma, el protocolo debe establecer el procedimiento para aprobar cambios en el diseño de la base de datos, el procedimiento de actualización de la información, y el procedimiento de consulta.

3.3.17 Programación de revisiones periódicas a las bases de datos internas

La debida gestión de las bases de datos de la empresa debe incluir una programación de revisiones periódicas a cada una de ellas. En una revisión de una base de datos se debe verificar el estado respecto a su contenido y funcionamiento, así como el estado respecto a su conexión con otras bases de datos. La programación de revisiones debe incluir el nombre de la base de datos a revisar, la fecha de cada revisión, el encargado de la revisión y el resultado).

3.3.18 Cambios en las bases de datos internas

Las bases de datos, por su misma naturaleza dinámica, se encuentran expuestas a constantes cambios, constituyéndose los más frecuentes, en adiciones o sustracciones de campos. Los cambios pueden justificarse en la medida en que la red crece, o también por la necesidad de contar con datos de otra naturaleza a los ya existentes (tal es el caso de los requerimientos que surgen para la posterior implementación de nuevos modelos o sistemas).

Por tal motivo se debe llevar un adecuado registro de los cambios efectuados. Este registro debe incluir para cada cambio, como mínimo, el responsable de la modificación, la justificación de la modificación y la persona que la autoriza.

3.3.19 Disponibilidad de nueva información en bases de datos internas

En caso de adicionarse uno o varios campos nuevos a una base de datos existente, se debe indicar la fecha futura a partir de la cual se alcanzará la cantidad mínima de información para poder ser utilizada y obtener desde ella resultados con un grado mínimo de confiabilidad. Esto ocurre a menudo cuando se planea evaluar un indicador de gestión en el futuro y para dicha evaluación se requiere empezar a recolectar información con la cual no se cuenta todavía.

La definición y expresión matemática propia del indicador determinan tal cantidad mínima de información, y en consecuencia, la fecha futura a partir de la cual se podrá hacer un uso adecuado de la información. En el encabezado del campo puede aparecer la leyenda que explique esta situación, o bien una referencia a la misma. De esta manera, el usuario podrá decidir si hace uso o no de la información que aparece disponible en el momento de la consulta.

3.3.20 Control de usuarios de las bases de datos internas

Se debe implementar un control de usuarios con permisos de modificación del diseño de las bases de datos (principalmente adición o sustracción de campos), de usuarios con permisos para agregación o sustracción de registros (empleados de la empresa o en algunos casos contratistas), así como de usuarios con permisos de consulta.

3.3.21 Información general sobre bases de datos externas

Se debe realizar una lista con las bases de datos externas que resulten de interés para la empresa y sobre las cuales se cuente con acceso, en el entorno de la gestión de activos físicos. Para cada base de datos externa identificada, resulta deseable conocer los campos que la componen, y de ellos, definir los que revisten especial interés para la empresa. La lista debe completarse además con los datos de contacto de la persona responsable de la base de datos en la entidad externa.

3.3.22 Consultas a bases de datos externas

Se debe llevar registro de las consultas a bases de datos externas a la empresa para poder ejecutar una adecuada trazabilidad de los datos que alimentan los diferentes modelos. Este registro debe incluir como mínimo la fecha de consulta, origen de datos consultado, la persona que realiza la consulta y el usuario final que requiere el producto).

Cada vez que se requiera hacer una consulta a una base de datos externa se debe validar la calidad de la información antes de integrarla como parte activa de alguna de las bases de datos de la empresa. El método más efectivo para tal fin consiste en verificar que la fuente externa sigue un protocolo propio para gestionar sus bases de datos. Las entidades oficiales (confederaciones, oficinas de catastro, transportes y tránsito, Área Metropolitana) así como las empresas prestadoras de otros servicios públicos suelen seguir protocolos para el manejo de la información y en consecuencia su verificación por parte de la empresa de aguas no debe constituirse en impedimento.

3.3.23 Control a la información aportada por contratistas

Se debe realizar un control a la información de los activos de la red aportada por los contratistas. Dicho control debe realizarse con apego al diseño de las bases de datos de la empresa, y no al de las bases de datos de los contratistas. Una parte de la obligación contractual en la que incurre la empresa contratista debe consistir en lograr la adaptación de sus sistemas de información a los formatos y bases de datos existentes en la empresa contratante.

Los formatos de asignación de contratos, así como los formatos de recepción y aprobación de obras ejecutadas por contratistas deben corresponder en sus campos con aquellos de las bases de datos de la empresa (esto es, con el sistema de información geográfica, con el sistema de control de intervenciones a la red, con el sistema de control de inspecciones a la red mediante CCTV y con el inventario de activos físicos).

3.3.24 Diagnóstico del grado de gestión de las bases de datos

Se propone implementar la siguiente metodología, la cual permite evaluar la gestión actual de las bases de datos involucradas en la cuantificación del deterioro y que soportan la toma de decisiones enfocadas a determinar las intervenciones prioritarias en la red.

3.3.24.1 Pasos a seguir

Paso 1. Inicialmente el equipo encargado de la gestión de la información relativa al deterioro de la red debe evaluar a la fecha actual, el estado de cumplimiento de cada uno de los 23 criterios aportados anteriormente, asignando una calificación comprendida entre 0 puntos (nulo cumplimiento del criterio) y 10 puntos (total cumplimiento del criterio).

Paso 2. El equipo debe asignar un peso de importancia en el ámbito global de la gestión de bases de datos de la empresa a cada uno de los 23 criterios.

Paso 3. Calcular la calificación ponderada de cada criterio, como resultado de la multiplicación de la calificación de cada criterio por el peso de importancia asignado a éste.

Paso 4. Calcular la calificación final a la gestión de las bases de datos, que corresponde con la sumatoria de las calificaciones ponderadas de cada criterio, y que dará cuenta del estado actual en esta labor.

Paso 5. El resultado final se debe clasificar en uno de tres rangos de gestión, y en consecuencia, tomar las medidas a que haya lugar tras dicha clasificación. Estas medidas pueden ser de carácter general (si el resultado global es muy bajo) o de carácter específico (incidiendo solo en los criterios que resulten peor calificados).

La metodología propuesta, basada en la ponderación de criterios, resulta bastante sencilla en su estructura, pero requiere un análisis a conciencia del estado actual respecto a cada criterio. También resulta adaptable a las singularidades de cada empresa, en la medida que permite incorporar más criterios (la lista de 23 que se propone, es a juicio del autor del texto, la más básica de todas y no debería

disminuirse), y además flexible, al permitir darle importancia relativa a unos factores respecto a otros (mediante la asignación de pesos).

La Tabla 10 sirve de ayuda para la implementación de la metodología. Los pesos de importancia pueden ser ajustados mediante un método para tal fin. Si las calificaciones de cada criterio según la gestión actual se realizan en una escala de 0 a 10, y la sumatoria de pesos de importancia totaliza la unidad, el valor final de calificación (sumatoria de las calificaciones ponderadas de cada criterio) deberá estar también en el rango entre 0 y 10.

Los rangos de gestión se definen de la siguiente manera:

Valor final de calificación entre 0 y 6: el estado actual de la gestión de las bases de datos involucradas en la estimación del grado de deterioro de los elementos de la red es deficiente, y en consecuencia se requiere la implementación de un plan general de choque que asegure mejoras en la mayoría tendientes a lograr valores aceptables en la mayoría de los criterios.

Valor final de calificación entre 6 y 8: la gestión es a nivel general calificada como regular. Se requiere identificar el conjunto de criterios que no se están cumpliendo, y generar un plan de mejora de la gestión de bases de datos enfocado específicamente en este grupo de criterios.

Valor final de calificación entre 8 y 10: la gestión se encuentra en un nivel general adecuado. Las políticas de gestión de bases de datos de este tipo deben mantenerse.

Tabla 10. Ayuda para el diagnóstico del estado actual de la gestión de bases de datos relacionadas con el deterioro de la red

Criterio	Calificación según gestión actual (0-10)x Peso de importancia (0-1)
1. Campo ID. Identidad Única de la tubería	
2. Campo Edad. Datos reales y datos estimados	
3. Campo fecha. Compatibilidad de formatos	

Criterio	Calificación según gestión actual (0-10)x Peso de importancia (0-1)
4. Campo Observaciones. Compatibilidad entre bases de datos	
5. Base de datos del inventario de activos enterrados. Control de su estructura	
6. Base de datos del inventario de activos enterrados. Validación y actualización de su información	
7. Base de datos de intervenciones. Naturaleza de sus registros	
8. Base de datos de intervenciones. Seguimiento de los procesos.	
9. Base de datos del modelo hidráulico de la red	
10. Base de datos de opinión experta	
11. Base de datos de inspecciones mediante CCTV	
12. Datos de entrada para el sistema de indicadores de gestión y para el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o	
13. Datos de entrada para el sistema de información geográfica	
14. Resultados generados por el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red	
15. Resultados generados por el sistema de indicadores de gestión	
16. Protocolos de gestión de bases de datos internas	
17. Programación de revisiones periódicas a las bases de datos internas	
18. Cambios en las bases de datos internas	
19. Disponibilidad de nueva información en bases de datos internas	
20. Control de usuarios de las bases de datos internas	
21. Información general sobre bases de datos externas	
22. Consultas a bases de datos externas	
23. Control a la información aportada por contratistas	
	Calificación final (Σ)

3.3.24.2 Ejemplo de aplicación

A continuación se muestra una tabla correspondiente a un ejemplo real, ejecutada por un experto técnico de una empresa operadora de una red de saneamiento colombiana. Desde sus resultados se pueden emprender acciones de mejora inmediatas. El llenado de la tabla se realizó con la ayuda (mediante entrevistas personales) con personal técnico de nivel operativo y de nivel táctico. Para facilitar el llenado de la tabla principal, se generó una tabla intermedia donde los pesos de importancia no se complementan entre sí hasta integrar la unidad. En esta tabla, cada criterio puede tomar un valor entre 0 y 100 (Tabla 11).

Tabla 11. Ejemplo de pesos asignados a criterios, con variación entre 0 y 100

Criterio	W en escala de 0 a 100
1. Campo ID. Identidad Única de la tubería	10
2. Campo Edad. Datos reales y datos estimados	10
3. Campo fecha. Compatibilidad de formatos	20
4. Campo Observaciones. Compatibilidad entre bases de datos	10
5. Base de datos del inventario de activos enterrados. Control de su estructura	30
6. Base de datos del inventario de activos enterrados. Validación y actualización de su información	15
7. Base de datos de intervenciones. Naturaleza de sus registros	50
8. Base de datos de intervenciones. Seguimiento de los procesos.	100
9. Base de datos del modelo hidráulico de la red	25
10. Base de datos de opinión experta	25
11. Base de datos de inspecciones mediante CCTV	25
12. Datos de entrada para el sistema de indicadores de gestión y para el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación	25
13. Datos de entrada para el sistema de información geográfica	25
14. Resultados generados por el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red	25
15. Resultados generados por el sistema de indicadores de gestión	25
16. Protocolos de gestión de bases de datos internas	25
17. Programación de revisiones periódicas a las bases de datos internas	35
18. Cambios en las bases de datos internas	35

19. Disponibilidad de nueva información en bases de datos internas	40
20. Control de usuarios de las bases de datos internas	5
21. Información general sobre bases de datos externas	5
22. Consultas a bases de datos externas	5
23. Control a la información aportada por contratistas	5

Una vez se tenga el peso entre 0 y 100 para cada criterio, el siguiente paso consiste en volver calcular el valor de dicho peso, pero esta vez, relativo a la suma total de los pesos. En este ejemplo, todos los pesos suman 575, con lo cual, por ejemplo, el primer peso (10) queda convertido en $10/575=0.0174$. Una vez hecha la conversión de cada peso, la suma de estos debe ser igual a la unidad.

Tabla 12. Resultados finales de diagnóstico del grado de gestión actual de las bases de datos

Criterio	Calificación según gestión actual (0-10)	Peso de importancia (0-1)	Calificación ponderada
1. Campo ID. Identidad Única de la tubería	10	0.0174	0.1739
2. Campo Edad. Datos reales y datos estimados	5	0.0174	0.0870
3. Campo fecha. Compatibilidad de formatos	7	0.0348	0.2435
4. Campo Observaciones. Compatibilidad entre bases de datos	0	0.0174	0.0000
5. Base de datos del inventario de activos enterrados. Control de su estructura	0	0.0522	0.0000
6. Base de datos del inventario de activos enterrados. Validación y actualización de su información	0	0.0261	0.0000
7. Base de datos de intervenciones. Naturaleza de sus registros	5	0.0870	0.4348
8. Base de datos de intervenciones. Seguimiento de los procesos	0	0.1739	0.0000
9. Base de datos del modelo hidráulico de la red	0	0.0435	0.0000
10. Base de datos de opinión experta	0	0.0435	0.0000
11. Base de datos de inspecciones mediante CCTV	5	0.0435	0.2174
12. Datos de entrada para el sistema de indicadores de gestión y para el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red	0	0.0435	0.0000
13. Datos de entrada para el sistema de información geográfica	6	0.0435	0.2609

Criterio	Calificación según gestión actual (0-10)	Peso de importancia (0-1)	Calificación ponderada
14. Resultados generados por el sistema de soporte a la decisión enfocado a la renovación o rehabilitación de la red	0	0.0435	0.0000
15. Resultados generados por el sistema de indicadores de gestión	0	0.0435	0.0000
16. Protocolos de gestión de bases de datos internas	5	0.0435	0.2174
17. Programación de revisiones periódicas a las bases de datos internas	5	0.0609	0.3043
18. Cambios en las bases de datos internas	5	0.0609	0.3043
19. Disponibilidad de nueva información en bases de datos internas	0	0.0696	0.0000
20. Control de usuarios de las bases de datos internas	8	0.0087	0.0696
21. Información general sobre bases de datos externas	0	0.0087	0.0000
22. Consultas a bases de datos externas	0	0.0087	0.0000
23. Control a la información aportada por contratistas	0	0.0087	0.0000
		Cal. final	2.3130

Se genera entonces la Tabla 12, que contiene: la calificación entre 0 y 10, asignada a cada criterio según su gestión actual, el peso de importancia de cada criterio, que varía entre 0 y 1, la calificación ponderada para criterio, y por último, desde estas calificaciones parciales, la sumatoria, que constituye calificación final de la gestión actual de las bases de datos de la empresa que poseen directa relación con la gestión de su patrimonio en infraestructura (entre 0 y 10).

Los criterios con calificación ponderada igual a 0 denotan aquellos campos donde se deben centrar los esfuerzos de mejora. Pero cuando la calificación final es inferior a 6 (lo que implica un deficiente estado actual de la gestión de las bases de datos) se sugiere la implementación de un plan general de choque, que implique una re-estructuración a nivel general de todo el sistema de información relacionado con la gestión de la infraestructura. Una vez implementados los nuevos cambios, y el sistema puesto en funcionamiento por un tiempo prudencial, se debe realizar la misma evaluación, con el objeto de percibir si la nueva estructura de gestión de bases de datos es adecuada, o si por el contrario, se requieren modificaciones de otro tipo.

Capítulo 4

***Metodología para la determinación
de prioridades de intervención
mediante lógica difusa***

4.1 Objetivos

En ausencia de información de entrada completa y de mayor calidad, que permita utilizar modelos más complejos, los sistemas más simples de ayuda al establecimiento de necesidades de intervención de redes siguen teniendo gran auge. Un caso puntual de este tipo de sistemas lo constituye la calificación de factores mediante sumas ponderadas.

Ejemplos de su aplicación son la evaluación de criterios fundamentales, hidráulicos y especiales mediante sumas ponderadas en un sector de la red de abastecimiento de san Sebastián, España (Almandoz y otros, 2005), y la evaluación del grado de criticidad estructural y operativo de redes de saneamiento mediante el modelo decisional para la reposición y rehabilitación de redes de alcantarillado del Valle de Aburrá, Colombia (Hernández, 2011).

Estos modelos, sin embargo, no llegan a captar adecuadamente el conocimiento experto con que cuenta el grupo de gestores de la red (lo hacen de manera incipiente mediante la asignación de pesos de importancia), y en consecuencia se limitan a ejecutar una evaluación cuantitativa de criterios, sin reflejar la realidad sobre la cual funciona el sistema.

El objetivo fundamental de este capítulo se centra entonces en generar una herramienta de soporte que determine las prioridades de renovación, con base en el conocimiento de la red con que cuentan los integrantes del equipo técnico de gestión, y además aprovechando la información contenida en las bases de datos del sistema. Para ello se propone un modelo decisional para la evaluación del estado de una tubería mediante la inclusión de criterios estructurales y de servicio, utilizando para ello la lógica difusa como estructura matemática de fondo.

La propuesta entrega como resultado final la lista de tuberías y de sectores de la red que con mayor prioridad requieren intervención, no solo por su estado estructural actual (asociado a la dimensión “riesgo”, y considerado mediante la inclusión de los criterios relativos a la edad de la tubería y a su número de fallos por unidad de longitud y año), sino además con apego a su condición de servicio (asociada a la dimensión “desempeño”, y representada mediante la presión media de servicio). Otros criterios asociados a la dimensión “costo”, pueden ser incluidos en el esquema de trabajo con igual facilidad, así como otros criterios que también representen a las primeras dos dimensiones.

La flexibilidad de la estructura matemática basada en lógica difusa, es la característica que permite, en función de la cantidad y calidad de la información disponible por cada entidad, adicionar más o menos criterios al esquema de decisión.

4.2 Fundamentos matemáticos generales de la lógica difusa

4.2.1 Definición matemática de número difuso

Un número difuso (técnicamente llamado “función de número difuso”) es una función matemática, monótonamente creciente a la izquierda de un valor modal o rango superior, y monótonamente decreciente a la derecha del mismo valor o rango, y describe una relación entre una variable y un valor de pertenencia, μ , que varía entre 0 y 1.

En la teoría tradicional de conjuntos, la evaluación del valor x en una función de pertenencia solo permitiría valores de 1 (representando que x está enteramente contenido en la función) o 0 (representando que x no se encuentra contenido en la función).

Dubois (1985) provee una definición matemática de número difuso: para un elemento v , perteneciente al rango de una función M , y considerando una función de pertenencia denominada $\mu_F(v)$, tal que:

$$M = [v, \mu_M(v)] \quad \text{Ec. 8}$$

Entonces M se define como función de número difuso si además de que v tiene asociado un grado de pertenencia a M , y v pertenece al conjunto de números reales, se tiene que:

$$\mu_M(v) \in [0, 1] \quad \text{Ec. 9}$$

A diferencia de los números puntuales, los números difusos permiten establecer funciones de pertenencia mediante rangos. Un rango perteneciente a un número difuso se denomina universo de discurso.

4.2.2 Fuzificación y funciones de pertenencia difusas

Dos o más números difusos pueden conformar un conjunto difuso que define el comportamiento de cierta variable. De la misma manera en que usualmente se evalúa un valor x en una función $Y=f(x)$, la evaluación de un valor x en un conjunto difuso (lo que corresponde con fuzificar el valor x) puede representarse entonces como un vector de valores de pertenencia a los diferentes números difusos que representan la variable Y . El uso de conjuntos difusos permite que no existan fronteras definidas entre números difusos (Berthold, 2003).

Aunque pueden definirse infinitas formas geométricas asociadas a funciones de pertenencia, usualmente se utilizan aquellas con pocos parámetros asociados. La función triangular, definida mediante sus tres esquinas, constituye un caso especial de la función trapezoidal, de cuatro esquinas a , b , c y d . La función de pertenencia gaussiana (definida mediante los parámetros a y e) y la función unitaria (definida con el parámetro a) constituyen otros casos comunes de funciones de este tipo (Berthold, 2003).

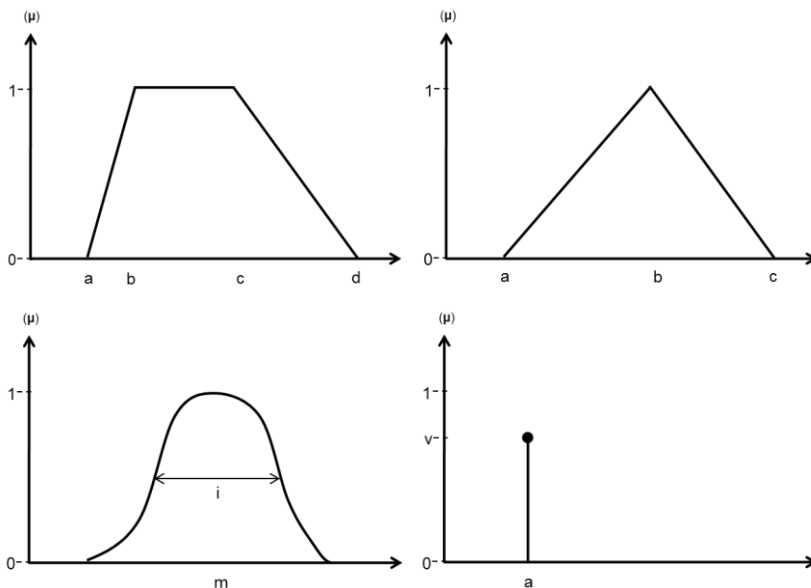


Figura 28. Formas geométricas de funciones de pertenencia más comunes: trapezoidal, triangular, gaussiana y unitaria (adaptada de Berthold, 2003)

Los siguientes parámetros sirven para caracterizar matemáticamente a una función difusa de pertenencia (Berthold, 2003):

- (i) Soporte, S_A : es el rango del universo de discurso, asociado al área bajo la curva para la cual la función de pertenencia es mayor a 0.

$$(i) S_A = \{x : \mu_A(x) > 0\} \quad \text{Ec. 10}$$

- (ii) Núcleo, C_A : es el rango asociado al área para la cual los elementos tienen el máximo grado de pertenencia relativa al conjunto difuso.

$$(ii) C_A = \{x : \mu_A(x) = 1\} \quad \text{Ec. 11}$$

- (iii) Altura, h_A : es el máximo valor de pertenencia que alcanza la evaluación de un valor x en una función de número difuso.

$$(iii) h_A = \max_x \{\mu_A(x)\} \quad \text{Ec. 12}$$

- (iv) Valor de corte α : es el valor resultante cuando se realiza un corte en la función de pertenencia a una altura α .

$$(iv) A_\alpha = \{x : \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad \text{Ec. 13}$$

Una característica adicional que hace parte de la definición de una función difusa de pertenencia es la presencia de fronteras. En este contexto, las fronteras se entienden (Ross, 2004) como aquellas regiones del universo de discurso compuestas por elementos v cuya pertenencia M es no nula, pero no alcanza a ser completa pertenencia. Matemáticamente, esto se expresa como:

$$0 < \mu_M(V) < 1 \quad \text{Ec. 14}$$

Las anteriores características pueden identificarse gráficamente:

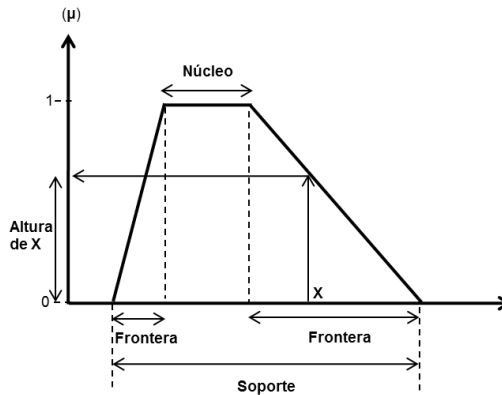


Figura 29. Características de un número difuso (adaptada de Ross, 2004)

Se puede definir una forma general de operación con funciones de pertenencia que relaciona dos números difusos, M y N, y sus respectivas funciones de pertenencia individuales, y que asigna un valor de pertenencia resultante μ a un valor p en el universo de discurso, desde la satisfacción de la condición:

$$p = q * r \quad \text{Ec. 15}$$

Donde q y r representan todas las combinaciones posibles de valores en el universo de discurso que aseguran tal igualdad, y donde el operador * representa todas las posibles operaciones (adición, resta, producto, etc.). En este caso, la definición matemática de función de pertenencia para el operador * es:

$$\mu_{M*N}(p) = \max \{ \min [\mu_M(q), \mu_N(r)] / p = q * r \} \quad \text{Ec. 16}$$

Dicha expresión asegura que el valor de pertenencia resultante para el operador * ha sido generado desde la elección del valor máximo de aquellos valores provenientes de las posibles parejas de valores de pertenencia individuales a las que se les aplicó previamente el operador de conjunción "min".

La anterior ecuación constituye una aplicación puntual del proceso de inferencia de Mamdani, también denominado enfoque de inferencia mín-max. Esta propuesta se basa en aceptar que las relaciones de causa y efecto se encuentran definidas

mediante variables lingüísticas, donde las palabras son las que asignan el grado de fortaleza a cada relación específica que se pueda establecer (Ross, 2004). Así pues, el mínimo valor de las conexiones existentes en una ruta entre la causa y el efecto se asume como el valor fortaleza de la ruta. Si existen varias rutas entre la variable causa y la variable efecto, el máximo valor de todas las rutas se asume como el efecto general.

Al aplicar dicha ecuación para la operación adición, el operador genérico * se convierte en +. Para dos números difusos triangulares A y B, la función de pertenencia resultado (la función suma A + B) será la mejor combinación de los parámetros de ambas funciones sobre el dominio de los números reales. Gráficamente, la aplicación del principio de extensión permite representar la suma anterior como:

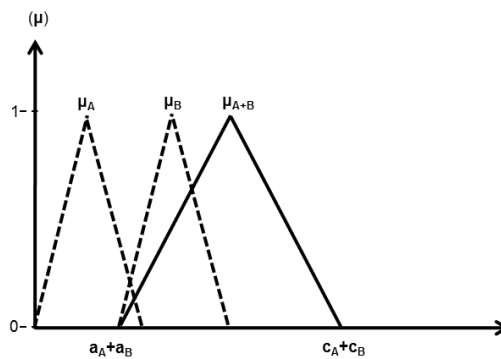


Figura 30. Adición de números difusos (adaptada de Berthold, 2003)

A diferencia del caso de la función suma, si se aplica una función no lineal $f(x)$ a dos números difusos triangulares, resulta evidente que la función resultado no continuará siendo triangular. En este caso, la función resultante en la cual será evaluado cualquier valor x , será (Berthold, 2003):

$$\mu_{f(M)}(y) = \max \{ \mu_M(x) / \forall x : f(x) = y \} \quad \text{Ec. 17}$$

4.2.3 Adaptación de la lógica a los conjuntos difusos

Algunos de los operadores booleanos más comúnmente utilizados, fueron adaptados por Zadeh (1965, 2002) para expresar relaciones resultantes entre números difusos. Las áreas de intersección, expresadas matemáticamente mediante conjunciones lógicas son usadas para representar resultados verdaderos del consecuente cuando los antecedentes son todos verdaderos.

Algunos de los operadores más comunes (Berthold, 2003) para expresar la proyección en una función F (que en el caso de conjuntos difusos equivale a la función de pertenencia) del resultado de una operación de intersección, son:

4.2.3.1 Conjunción tipo I

Es la más común de las conjunciones, y se expresa matemáticamente mediante:

$$F_{M \wedge N} = \min \{F_M(x), F_N(x)\} \quad \text{Ec. 18}$$

Y gráficamente como:

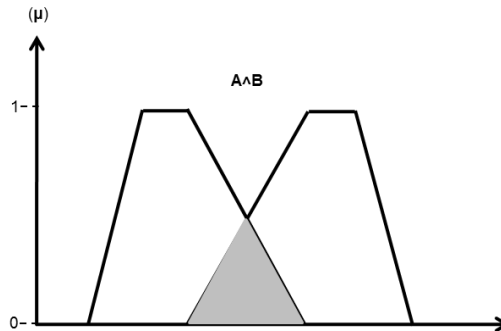


Figura 31. Conjunción tipo I (adaptada de Berthold, 2003)

4.2.3.2 Conjunción tipo II

Esta conjunción resulta menos incluyente que la anterior. Matemáticamente queda determinada por:

$$F_{M \wedge N} = F_M(x) \cdot F_N(x) \quad \text{Ec. 19}$$

Con una gráfica que corresponde a:

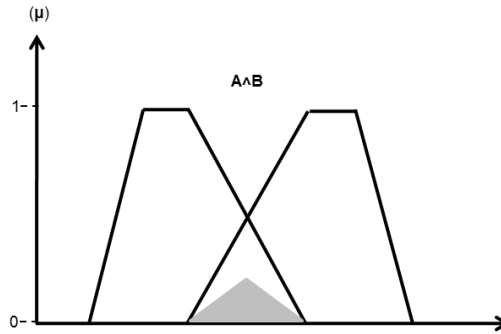


Figura 32. Conjunción tipo II (adaptada de Berthold, 2003)

4.2.3.3 Conjunción tipo III

Esta conjunción incluye al 0 como posible valor para la función de pertenencia:

$$F_{M \wedge N} = \max\{0, F_M(x) + F_N(x) - 1\} \quad \text{Ec. 20}$$

Las áreas de unión, representadas en el lenguaje matemático mediante disyunciones lógicas se utilizan para representar resultados verdaderos del consecuente cuando alguno de los antecedentes es verdadero.

Dentro de este grupo (Berthold, 2003), se destacan algunos de los operadores de disyunción.

4.2.3.4 Disyunción tipo I

Es la más comúnmente utilizada de todas las disyunciones. Matemáticamente se define como:

$$F_{M \vee N} = \max \{F_M(x), F_N(x)\} \quad \text{Ec. 21}$$

La disyunción tipo I queda representada gráficamente a través de:

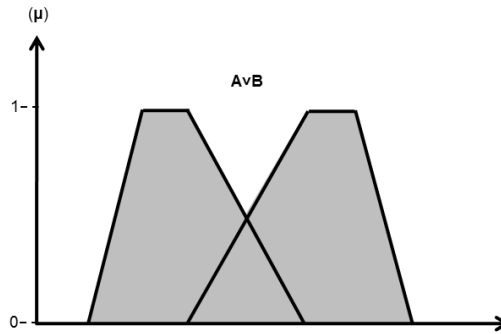


Figura 33. Disyunción tipo I (adaptada de Berthold, 2003)

4.2.3.5 Disyunción tipo II

Esta conjunción incluye al 1 como posible valor para la función de pertenencia:

$$F_{M \vee N} = \min \{1, F_M(x) + F_N(x)\} \quad \text{Ec. 22}$$

Que se representa con la siguiente gráfica:

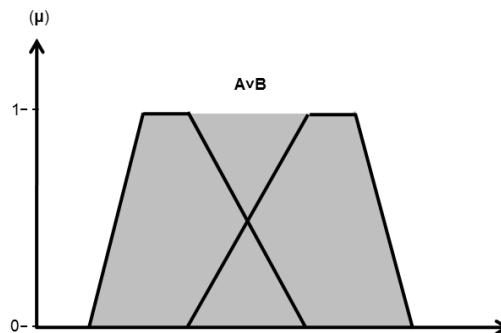


Figura 34. Disyunción tipo II (adaptada de Berthold, 2003)

El complemento lógico se emplea para considerar verdadera una negación de una proposición, cuando dicha proposición resulta ser falsa.

Matemáticamente, el complemento lógico (Berthold, 2003) se expresa como:

$$F_{\neg M} = 1 - F_M(x) \quad \text{Ec. 23}$$

Zadeh utiliza los conceptos de Lógica anteriormente citados para definir el concepto de implicación, comúnmente presentado mediante el operador entonces (\rightarrow), en el entorno de los conjuntos difusos.

La definición de implicación difusa, basada en la relación de operadores min/max, parte de la definición tradicional de implicación:

$$A \rightarrow B = \neg A \vee (A \wedge B) \quad \text{Ec. 24}$$

Así, para conjuntos difusos con función de pertenencia F , se tiene desde lo anterior, que:

$$F_{A \rightarrow B}(x) = \max\{1 - F_A(x), \min\{F_A(x), F_B(x)\}\} \quad \text{Ec. 25}$$

Otra definición alternativa para la implicación difusa viene dada por la norma de Lukasiewicz (Berthold, 2003):

$$F_{A \rightarrow B}(x) = \min\{1 - F_A(x), F_A(x) + F_B(x)\} \quad \text{Ec. 26}$$

Desde la norma de Lukasiewicz se deriva una disyunción y una conjunción adicional. La disyunción tipo III parte desde:

$$A \vee B = \neg A \rightarrow B \quad \text{Ec. 27}$$

Y entonces se tiene que:

$$F_{A \vee B}(x) = \min\{1, F_A(x) + F_B(x)\} \quad \text{Ec. 28}$$

Similarmente, la conjunción tipo III se deduce desde:

$$A \wedge B = \neg(\neg A \vee \neg B) \quad \text{Ec. 29}$$

Obteniendo:

$$F_{A \wedge B}(x) = 1 - \min\{1, 1 - F_A(x) + 1 - F_B(x)\} \quad \text{Ec. 30}$$

Lo anterior, finalmente resulta en:

$$F_{A \wedge B}(x) = \max\{0, F_A(x) + F_B(x) - 1\} \quad \text{Ec. 31}$$

4.2.4 Agregación mediante proposiciones con reglas difusas

La mayoría de las interpretaciones de hechos en la naturaleza contienen cierto nivel de vaguedad e imprecisión. Desde este hecho, se tiene que las afirmaciones lingüísticas que intentan expresar conceptos subjetivos, y que por su misma concepción pueden tener diferentes interpretaciones por diferentes personas, se construyen mediante proposiciones con reglas difusas.

Cualquier verdadero asignado a una proposición lógica M se encuentra en el intervalo entre 0 y 1. La condición de asignación (denominada T) de un valor verdadero a una proposición M, es en realidad una selección de aquellos valores del intervalo [0,1] que son verdaderos y en consecuencia conforman el universo de valores verdaderos U (Ross, 2004).

Matemáticamente esto queda expresado como:

$$T : u \in U \rightarrow [0,1] \quad \text{Ec. 32}$$

Las proposiciones difusas se asignan a conjuntos difusos, y consecuentemente el valor de verdad de la proposición queda asignado a la función de pertenencia de dicho conjunto difuso. Para una proposición M (M , puede ser, por ejemplo, $x \in A$) asignada a un conjunto difuso E , el valor de verdad T se define como:

$$T(M) = \mu_E(X) \quad \text{Ec. 33}$$

Los operadores lógicos explicados anteriormente se utilizan al interior de proposiciones o reglas difusas, para agregar los efectos de dos o más conjuntos difusos.

En las siguientes expresiones se utilizan los conjuntos difusos A y B , y así mismo las proposiciones M y N . La negación del valor de verdad T para la proposición M viene descrito por:

$$T(\overline{M}) = 1 - T(M) \quad \text{Ec. 34}$$

Las expresiones matemáticas que describen la utilización de los operadores disyunción, conjunción e implicación (Zadeh, 1965) son:

4.2.4.1 Valor de verdad de la disyunción

La estructura de la proposición es:

$$M \vee N : x \text{ es } A \text{ o } B \quad \text{Ec. 35}$$

Y su valor de verdad en lógica difusa es:

$$T(M \vee N) = \max[T(M), T(N)] \quad \text{Ec. 36}$$

4.2.4.2 Valor de verdad de la conjunción

La estructura de la proposición es:

$$M \wedge N : x \text{ es } A \text{ y } B \quad \text{Ec. 37}$$

Y su valor de verdad en lógica difusa es:

$$T(M \wedge N) = \min[T(M), T(N)] \quad \text{Ec. 38}$$

4.2.4.3 Valor de verdad de la implicación

La estructura de la proposición es:

$$M \rightarrow N : \text{si } x \text{ es } A \text{ entonces } y \text{ es } B \quad \text{Ec. 39}$$

Y su valor de verdad en lógica difusa es:

$$T(M \rightarrow N) = T(\overline{M} \vee N) = \max[T(\overline{M}), T(N)] \quad \text{Ec. 40}$$

Esta última ecuación, expresada en términos de las funciones de pertenencia de cada una de las proposiciones, resulta en:

$$\mu_R(x, y) = \max[(\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)), (1 - \mu_A(x))] \quad \text{Ec. 41}$$

4.2.4.4 Otras formas de implicación

Existen otras formas para establecer reglas basadas en proposiciones del tipo SI x es A entonces y es B , que matemáticamente puede resumirse mediante:

$$R = M \rightarrow N \quad \text{Ec. 42}$$

- Implicación de Mamdani (también llamada correlación-mínimo):

$$\mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad \text{Ec. 43}$$

- Implicación de Lukasiewicz:

$$\mu_R(x, y) = \min[1, (1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))] \quad \text{Ec. 44}$$

- Implicación correlación-producto:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad \text{Ec. 45}$$

- Implicación de Brouwer:

$$\mu_R(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{para } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ \mu_B(y), & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad \text{Ec. 46}$$

4.2.5 Técnicas gráficas de inferencia

Se presentan aquí los tres métodos para agregar conjuntos difusos mediante inferencia deductiva basada en reglas lingüísticas: inferencia de Mamdani, modelo de Sugeno, y modelo de Tsukamoto (Ross, 2004).

4.2.5.1 Inferencia gráfica de Mamdani

Se basa en la implicación:

$$\mu_R(x, y) = \max \left[\min \left[\mu_{A_1^k}(\text{entrada}(i)), \mu_{A_2^k}(\text{entrada}(j)) \right] \right] \quad K = 1, 2, \dots, r \quad \text{Ec. 47}$$

Donde r es el número de reglas con soporte. Gráficamente lo anterior se expresa como:

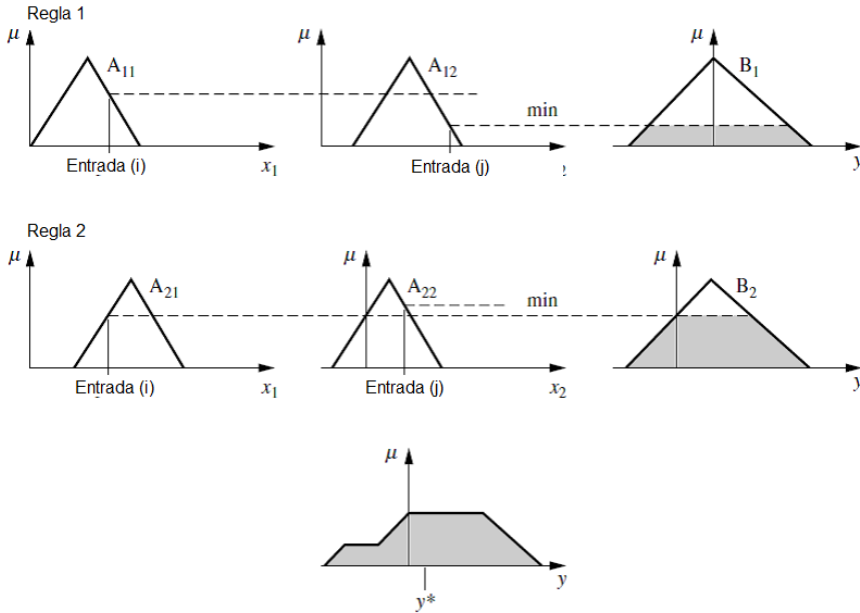


Figura 35. Inferencia de Mamdani (adaptada de Ross, 2004)

4.2.5.2 Modelo de Sugeno

Este modelo (denominado también método TSK), se basa en una regla típica con dos entradas, X y Y , y una salida, Z , y tiene la estructura:

$$\text{si } X \text{ es } A \text{ y } Y \text{ es } B \text{ entonces } Z \text{ es } Z = f(x, y) \quad \text{Ec. 48}$$

Donde la función $f(x,y)$ una función convencional, no difusa (usualmente se representa mediante una función polinomial). La operación gráfica queda representada como:

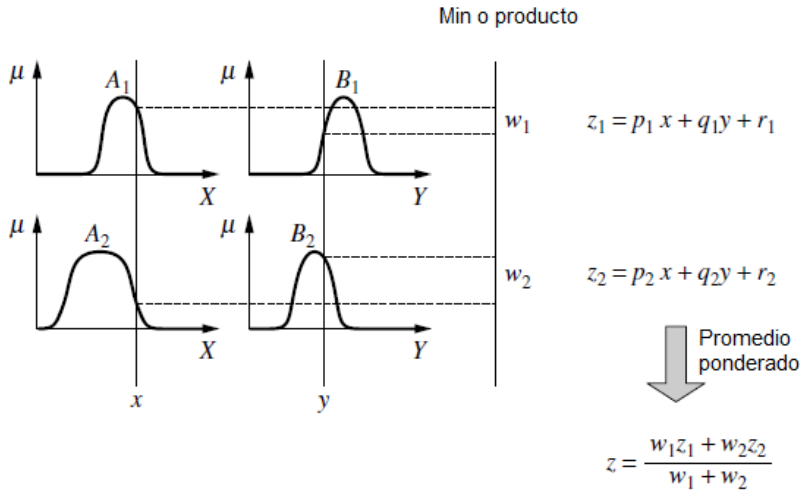


Figura 36. Modelo de Sugeno (adaptada de Ross, 2004)

4.2.5.3 Modelo de Tsukamoto

A diferencia del modelo de Sugeno, la salida del modelo de Tsukamoto se representa, no mediante una función convencional, sino mediante un conjunto difuso con una función de pertenencia monótona, usualmente denominada función de hombro (Ross, 2004).

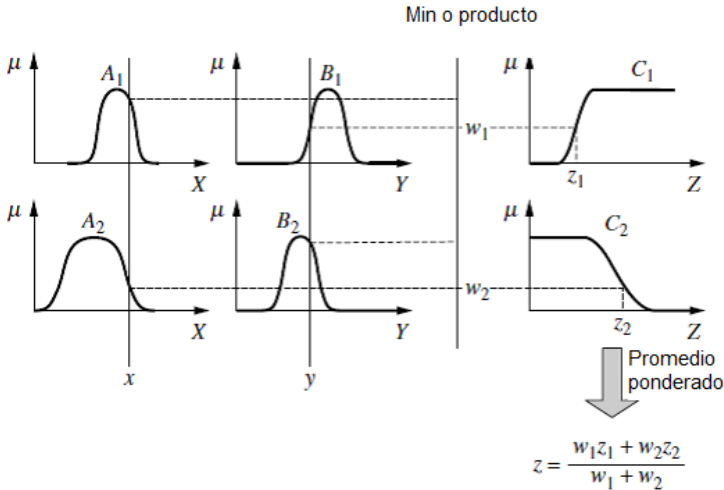


Figura 37. Modelo de Tsukamoto (adaptada de Ross, 2004)

4.2.6 Defuzificación a valores escalares

La defuzificación es la conversión de una cantidad difusa a una cantidad precisa representada mediante un escalar. Así pues, el resultado de un proceso de fuzificación puede estar constituido por la unión lógica de dos o más funciones difusas de pertenencia R_i , definidas en el universo de discurso de la variable de salida.

Entonces, el área a defuzificar, R_k , queda definida matemáticamente por:

$$R_k = \bigcup_{i=1}^k R_i \quad \text{Ec. 49}$$

Algunos de los métodos existentes para defuzificar estas áreas se introducen a continuación.

4.2.6.1 Método del centro de área

Este método, también llamado método del centro de gravedad, o método del centroide, se encuentra definido mediante la expresión (Kleiner, 2005):

$$x_A^* = \frac{\int_{V_a}^{V_z} x \cdot A \cdot dx}{\int_{V_a}^{V_z} A \cdot dx} \quad \text{Ec. 50}$$

Donde x_A^* es el valor defuzificado del área A , x es la distancia centroidal medida desde el origen, v_a y v_z son los vértices extremos del área difusa. El signo \int denota una proceso de integración algebraico.

Gráficamente se representa como:

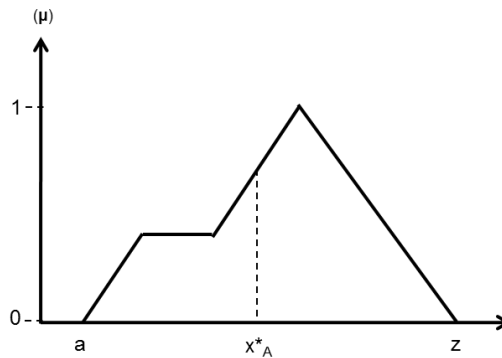


Figura 38. Valor defuzificado X^*_A mediante el método de centro de área (adaptada de Ross, 2004)

4.2.6.2 Método del principio de máximas pertenencias

Este método (denominado también método de la altura; Ross, 2004) está restringido en su aplicación a funciones difusas resultado con un valor pico máximo. Así pues, si x^* es de nuevo, el valor defuzificado del área A , se debe cumplir que:

$$\mu_A(x^*) > \mu_A(x) \text{ para todo } x \in X \quad \text{Ec. 51}$$

La representación gráfica corresponde con:

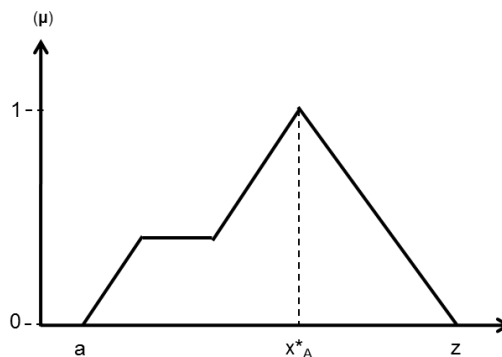


Figura 39. Valor defuzificado X^*_A mediante el método del principio de máximas pertenencias (adaptada de Ross, 2004)

4.2.6.3 Método de promedio de pertenencias máximas

Para funciones de pertenencia con varios valores máximos, se define el valor defuzificado x^*_A mediante la Ec. 52:

$$x^*_A = \frac{m+n}{2} \quad \text{Ec. 52}$$

Gráficamente, esto corresponde con:

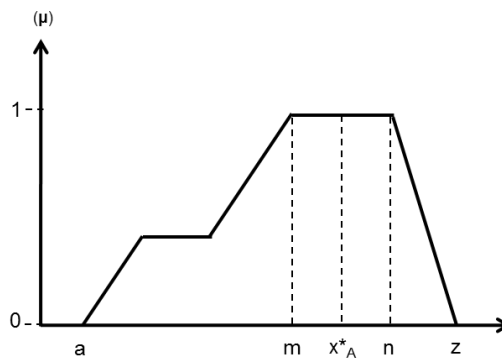


Figura 40. Valor defuzificado X^*_A mediante el método de promedio de pertenencias máximas (adaptada de Ross, 2004)

Donde m y n representan máximas alturas no únicas de la función de pertenencia final A .

4.3 Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la intervención de tuberías de abastecimiento basado en criterios estructurales y de servicio mediante lógica difusa

4.3.1 La Lógica Difusa en el contexto de la intervención de redes

Las redes de abastecimiento y saneamiento se ven sometidas por parte de sus gestores a una vigilancia constante sobre su estado estructural y sobre su funcionamiento, debido principalmente a la creciente tendencia por mantener

estándares de servicio y calidad altos, con costos de operación y mantenimiento, y niveles de riesgo de fallo, admisibles. A ello se suma la normativa a la que cada sistema se ve sometido, y que le exige al acueducto o al alcantarillado un mantenimiento cada vez mejor. Esta supervisión genera necesidades de intervención (ya sea para renovar, sustituir o reforzar) que implican un esfuerzo de inversión muy importante en el presupuesto de la empresa. De aquí la relevancia que tiene el contar con un modelo decisional adecuado. Su pertinencia debe evaluarse en términos de la posibilidad de utilizarlo en sistemas de diferentes tamaños, con bases de datos en formación y consecuentemente, con información limitada para alimentar el modelo. La pertinencia del modelo debe ser también considerada en función de la posibilidad de valorar el conocimiento local. Esto es, la experiencia que los expertos han adquirido tras años gestionando las redes.

La revisión de la literatura acerca de los modelos decisionales demuestra, sin embargo, que las estructuras de estos modelos requieren gran cantidad y tipos de datos de entrada, que en la mayoría de las veces no existen, o apenas comienzan a recopilarse. La inspección sobre lo existente también deja entrever que muchos de los modelos ignoran el conocimiento experto, confiando los resultados en registros históricos a los cuales muchas veces no se les hace un filtrado previo para eliminar inconsistencias. No se cuenta a día de hoy, con métodos que vinculen eficientemente la experiencia propia con los registros de las bases de datos con que se cuentan. Se justifica entonces aplicar teorías matemáticas que sin perder su robustez, permiten esta relación. La lógica difusa, por su exitosa adaptación a la práctica en otros campos de la ciencia, y por su flexibilidad en todo sentido, se ha escogido como base para la metodología de esta propuesta.

4.3.2 Características lógica difusa que la hacen adecuada para sustentar un modelo de priorización de redes a la intervención

La lógica difusa permite integrar el “saber cómo” del personal técnico con la historia del sistema, mediante la construcción que este personal hace, de funciones que describen el comportamiento de una variable (o criterio), mediante estados de condición para dicho criterio: estas funciones se denominan “números difusos”. Los registros históricos de las bases de datos, se evalúan posteriormente sobre las funciones construidas por los gestores.

Así pues, la contundencia de la lógica proposicional se acopla a la utilización de funciones difusas, haciendo de esta suma una combinación adecuada para subsanar la necesidad de modelos que establezcan las prioridades de intervención en redes, bajo la consideración de la realidad de la mayoría de los sistemas, y no solo de unos pocos que van muy adelante en la gestión de la información. El término “difuso”, en la estructura del modelo decisional, hace alusión al hecho de que el modelo planteado no obliga al decisor a escoger un valor exclusivo y aceptarlo como único válido, y en consecuencia ignorar la cercanía a este valor, alcanzada por elementos de la red. Por ejemplo, en un modelo estadístico tradicional, una tubería puede ser considerada “nueva” si han transcurrido menos de 5 años desde su instalación. Esto implica que una tubería de 6 años ya no clasifica en tal definición. En la lógica difusa, la misma tubería pertenece al estado “nueva”, en cierto grado. La misma tubería pertenece simultáneamente al siguiente estado (por ejemplo “reciente”) en un grado de pertenencia que complementa al primero. Lo anterior implica que, **en lógica difusa, se eliminan los umbrales que generan saltos abruptos en la calificación de la condición de un elemento.** Esto resulta deseable para hacer una evaluación mucho más realista de la condición de las tuberías de la red.

Además, la estructura matemática escogida es flexible: la lógica difusa permite incorporar todos los criterios sobre los cuales se tengan datos, y relacionarlos según decisiones internas (mediante matrices que “agregan” los efectos de los criterios que se relacionan). Ella permite también definir tantos estados de condición para cada criterio como el decisor juzgue oportuno. El gestor puede establecer que el criterio Edad será descrito mediante dos funciones (a saber: “nueva” y “muy antigua”). Para otra red diferente, el gestor local puede incluir a este conjunto de funciones, otras tres adicionales (“reciente”, “media” y “antigua”, por ejemplo), reflejando esto que tal gestor posee la capacidad para discernir entre todos los estados mencionados.

La lógica difusa es de carácter universal en su aplicación: resulta adaptable a cualquier empresa de abastecimiento o saneamiento. Cada una se pone su listón en función del grado de avance en la gestión técnica que posea, y con correspondencia al tamaño y calidad de los registros históricos de sus bases de datos

Aunque el desarrollo que se muestra en este documento hace referencia a la condición de la red, **la lógica difusa permite generar modelos a diferentes**

escalas. Esto es, desde el nivel operativo (la tubería) hasta el más alto nivel estratégico gerencial (el sistema, considerando factores internos y externos a la empresa, y enmarcados en la misión y visión de la empresa).

La estructura decisional que se propone por cuenta de la lógica difusa, es capaz de transferir la incertidumbre del gestor en la fase inicial (construcción de funciones matemáticas difusas para cada criterio) hasta los resultados finales. La última fase de su aplicación consiste, precisamente, en generar un valor único de pertenencia a la función resultado, valor representativo de la inclusión de las variables seleccionadas con su incertidumbre asociada, y de su agregación mediante reglas de inferencia. En consecuencia, este valor incluye los efectos de la incertidumbre en el establecimiento de las funciones iniciales.

No menos importante que lo anterior, resulta el hecho de que **los modelos basados en lógica difusa resultan ideales para acoplarse a estructuras modulares multi-propósito de gestión integral del patrimonio de la empresa.** Esto es así, pues el decisor puede diseñar el modelo pensando en que sus resultados constituyan los requerimientos de entrada de módulos superiores en la pirámide de gestión.

Por ejemplo, los resultados de necesidad de intervención generados por un gestor del nivel táctico, pueden ser sujetos de evaluación posterior en un conjunto difuso que exprese la incertidumbre sobre lo que es “poco prioritario” en relación con lo que es “prioritario” y lo que es “muy prioritario” para un gestor de nivel estratégico. Este nuevo conjunto difuso puede ser relacionado mediante una matriz de agregación, con otro que le permita a este último decisor expresar lo que es un nivel de servicio “deficiente”, lo que es un nivel de servicio “aceptable”, y lo que es un nivel de servicio “excelente”. En la misma matriz, se puede agregar los efectos difusos de otro conjunto en el cual el decisor expresa lo que para la entidad es un costo de intervención “viable” y lo que es un costo de intervención “no viable”.

4.3.3 Enfoque basado en el estudio del espacio decisional mediante lógica difusa

4.3.3.1 Estructura del modelo decisional

El planteamiento que se expone como base fundamental de este capítulo parte de la idea de conformar un espacio decisional, desde el cual el gestor experto debe plasmar sus preferencias respecto a las relaciones que según las características e

historia de su red, existen entre las variables que se han considerado representativas. En este estudio, el término “variable” se utiliza indistintamente junto con el término “criterio”, aceptando que este último se emplea en otros contextos con connotaciones más específicas. Una vez conformado el espacio decisional, los registros de una tubería contenidos en las bases de datos son evaluados en tres fases:

- Creación de conjuntos de números difusos para cada criterio (cada número difuso representa un estado de condición), y posteriormente, generación de vectores característicos de cada tubería respecto a cada conjunto difuso. Lo anterior se denomina “fuzificación” (término adaptado por el autor ante la carencia de una palabra castellana que defina el término anglosajón “fuzzification”). Por ejemplo, un conjunto difuso que represente a un criterio dado m , y que puede estar conformado por 4 números difusos, desde A hasta D (Figura 41).

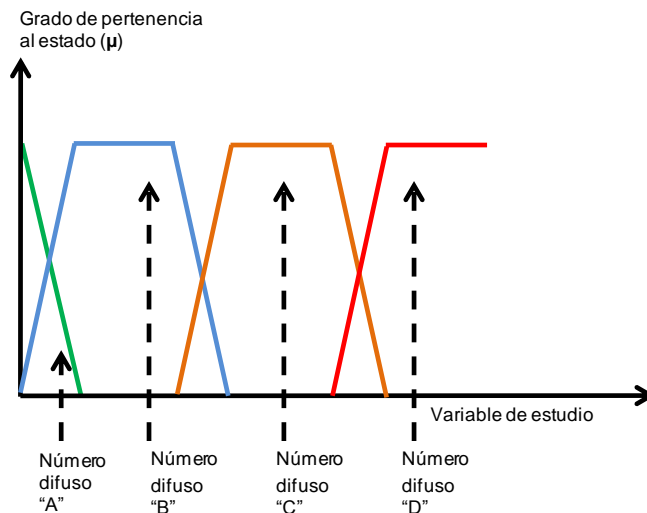


Figura 41. Esquema general de un conjunto difuso compuesto por cuatro números difusos representativos de un criterio de análisis

- Agregación a través de relaciones entre criterios mediante operadores de lógica proposicional, y reglas de inferencia de Mamdani (Mamdani y otros, 1981). Siguiendo con el ejemplo, el criterio m se relaciona con el criterio n , representado por otros cuatro números difusos, desde E hasta H (Tabla 13).

Tabla 13. Matriz de relaciones causales entre las variables m y n

Contenido de la matriz: número difuso resultante al agregar m y n		Criterio de estudio n			
		Número difuso "E"	Número difuso "F"	Número difuso "G"	Número difuso "H"
Criterio de estudio m	Número difuso "A"	SI [A] Y [E] ENTONCES [P]	SI [A] Y [F] ENTONCES [P]	SI [A] Y [G] ENTONCES [P]	SI [A] Y [H] ENTONCES [Q]
	Número difuso "B"	SI [B] Y [E] ENTONCES [Q]	SI [B] Y [F] ENTONCES [Q]	SI [B] Y [G] ENTONCES [R]	SI [B] Y [H] ENTONCES [R]
	Número difuso "C"	SI [C] Y [E] ENTONCES [S]	SI [C] Y [F] ENTONCES [S]	SI [C] Y [G] ENTONCES [T]	SI [C] Y [H] ENTONCES [T]
	Número difuso "D"	SI [D] Y [E] ENTONCES [U]	SI [D] Y [F] ENTONCES [U]	SI [D] Y [G] ENTONCES [U]	SI [D] Y [H] ENTONCES [U]

- Generación de valores puntuales resultantes, a partir del vector difuso de salida, tras la aplicación del método del centro de área (defuzificación). Los resultados de las relaciones entre las variables m y n se transfieren al conjunto resultado, compuesto por los números difusos desde P hasta U (Figura 42).

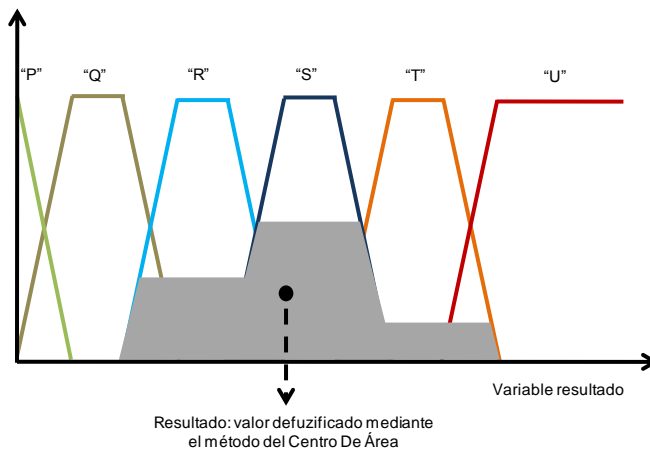


Figura 42. Esquema de un conjunto difuso de salida, compuesto por seis números difusos. Su área difusa se convierte a un valor puntual representativo de los efectos de los criterios involucrados

El primer aspecto relevante resulta ser entonces, qué criterios deben ser incluidos en el estudio que genera como resultado la lista priorizada de elementos a intervenir. Los criterios a considerar serán relacionados mediante la lógica proposicional, utilizando conectores lógicos, por lo que su relación se hace de forma simultánea, evitando de esta forma la asignación de pesos de importancia en una etapa posterior del proceso. En el caso de estudio se han elegido como criterios representativos de una red de abastecimiento, la presión de servicio a la que la conducción trabaja, y que se obtiene desde la modelación hidráulica de la red en EPANET, el historial de fallos por unidad de longitud y año, sacado desde el estudio de la base de datos de incidencias de la empresa, y la edad de la tubería, obtenida tras analizar la base de datos del inventario de activos del sistema. La cantidad de criterios forma entonces un espacio de decisión tridimensional.

Después de un análisis objetivo sobre el número máximo de criterios que pueden considerarse simultáneamente en un proceso de decisión (análisis basado en consultas a gestores de redes y a personal investigador involucrado en el tema) se concluye que un experto puede emitir un juicio razonable sobre la relación existente entre tres criterios como máximo. Más allá de este valor, la toma de decisiones resulta bastante compleja.

Preguntas que incluyen tres criterios, del tipo: “¿cómo se comporta la tendencia a la falla de una tubería si su edad es antigua y su presión de servicio es alta y su historial de fallos es elevado?” resultan abordables desde la experiencia experta. La inclusión de otro criterio más comienza a generar una pérdida del horizonte de respuesta del decisor, al tener que considerar simultáneamente los efectos de tantas variables. Lo anterior sin embargo, no constituye una camisa de fuerza. Un equipo experto puede optar por la inclusión de más criterios en la medida de sus posibilidades y conocimientos.

Como camino alternativo a la relación simultánea de tres o más criterios, se puede plantear el estudio por parejas de criterios, y la posterior relación de resultados parciales de cada pareja mediante pesos de importancia. Una prueba piloto de esta alternativa se realizó en la red de san Sebastián, España. El caso de estudio abordaba una muestra de ocho tuberías elegidas desde el modelo hidráulico de la red. En dicho caso de estudio las parejas de criterios propuestas fueron: (1) presiones en horas de máxima y mínima demanda, (2) edad de la tubería e historial de fallos, y (3) caudal fugado y densidad de tráfico.

Los resultados del análisis de cada pareja de variables se ponderaron obteniendo un resultado final. Este resultado final queda por supuesto, supeditado

al peso de importancia que el decisor asigne a los resultados parciales de cada pareja. Desde lo anterior se identificó la importancia de eliminar en la medida de lo posible la tarea de asignación de estos pesos. La propuesta más firme se considera entonces aquella que relaciona los criterios de manera simultánea (en el caso presentado, se relacionan tres criterios), con base en la lógica proposicional y la inferencia. Cualquiera de las dos alternativas resulta de fácil aplicación (más la primera que la segunda, por el esfuerzo de programación computacional que requiere), aunque se prefiere esta última, pues no obliga al decisor asignar pesos de importancia en la fase final del estudio.

4.3.3.2 División del espacio decisional

Aunque en este estudio se ha abordado un solo espacio de decisión tridimensional (donde las decisiones se analizan respecto a los tres criterios anteriormente mencionados), el modelo permite crear tantos espacios de decisión (y de tantas dimensiones) como información se posea y en tanto el experto lo considere adecuado (Figura 43). Graficar el espacio decisional no es necesario para construir las matrices de agregación, y las unidades de decisión que lo describen.

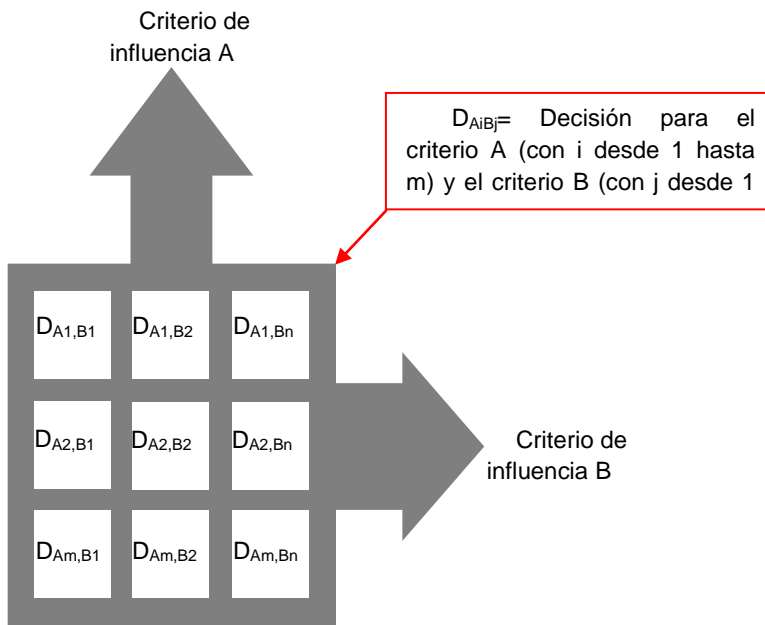
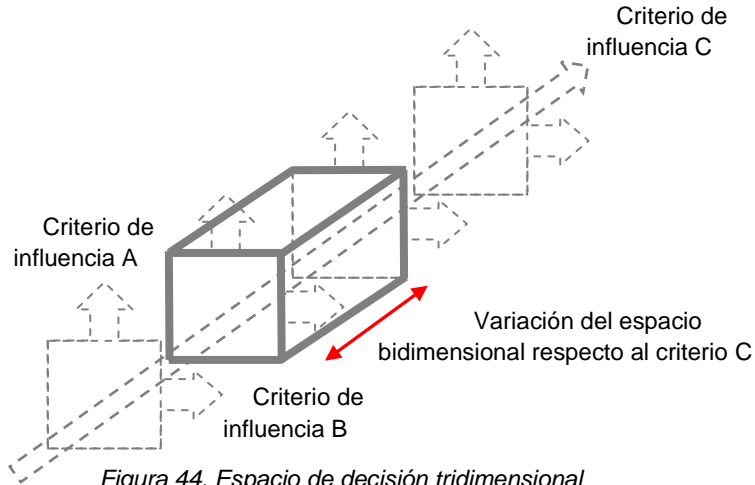


Figura 43. Espacio de decisión bidimensional conformado por todas las posibles decisiones D_{AiBj} tras el cruce de los i números que representan al criterio A, y los j números que representan al criterio B

La ampliación de un espacio bidimensional mediante la inclusión de un tercer criterio, genera un espacio decisional tridimensional, cuyo análisis de las posibles relaciones causales resulta más extenso (Figura 44).



La integración de los efectos de múltiples espacios decisionales se puede realizar en la fase final del proceso, mediante una nueva iteración de la metodología, en la cual los valores de entrada a fuzificar son los resultados de cada uno de los espacios de decisión definidos (Figura 45). El operador lógico debe ser escogido por el decisor en función de la relación que desea que tengan los espacios de decisión. En este aspecto, los operadores de conjunción (“Y”) resultan especialmente adecuados cuando se pretende calcular la necesidad de intervención final desde la condición más desfavorable surgida a partir de varios espacios de decisión.

El tratamiento entre varios espacios decisionales es exactamente el mismo que se aplica entre varios criterios. Esta propuesta metodológica permite agregar tantos espacios de decisión como se requieran, y en consecuencia, considerar en el estudio tantos criterios como sean necesarios, en virtud de la información disponible y de la opinión experta.

La secuencia de pasos a seguir es la misma:

- Fuzificación: en este caso, construcción de números difusos que caractericen cada espacio decisional, y desde ellos, conformación de vectores difusos para cada tubería.
- Agregación: conformación de matrices que expresan la tendencia a la falla final para cada combinación posible de números difusos característicos de cada uno de los espacios decisionales.
- Defuzificación: cálculo del valor final desde las áreas obtenidas tras agregar los vectores difusos de cada tubería.

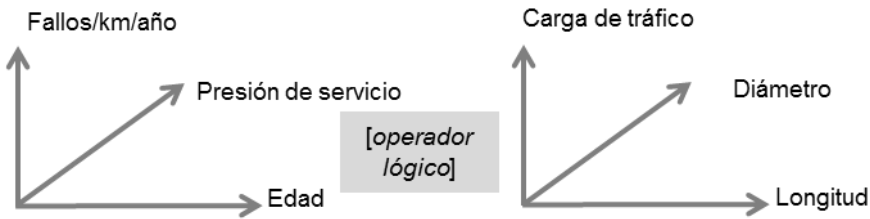


Figura 45. Relación entre dos espacios decisionales

Para el análisis de cada espacio de decisión, se propone su división en sub-espacios, o unidades de decisión (que en el caso de un espacio tridimensional, constituyen cubos de decisión). Cada una de estas unidades de decisión resulta de más fácil estudio que el abordaje único del espacio decisional entero. Como resultado, a cada unidad de decisión le es asignada un valor característico de posibilidad de falla (o necesidad de intervención), en función de su ubicación en el espacio decisional (Figura 46).

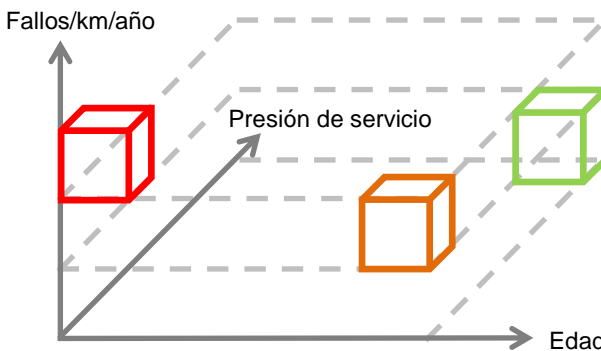


Figura 46. Unidades de decisión (cubos) para el análisis de un espacio decisional tridimensional

En el caso de estudio presentado, el espacio decisional tridimensional se ha dividido en 8 unidades de decisión. Esta cifra corresponde con el número total que puede obtenerse al dividir cada una de las tres dimensiones (o tres variables) del espacio en 2. Así pues, para tres criterios, si decide dividirse cada uno de sus rangos en dos, se tiene que el número de unidades de decisión resultantes es: $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$.

Cada conjunto difuso propuesto para cada criterio, que describe el comportamiento específico de éste, han sido conformado por 4 números difusos: Por ejemplo, el criterio edad se representa por el conjunto difuso conformado por los números difusos “nueva”, “media”, “antigua” y “muy antigua”. Un procedimiento similar se sigue para los restantes dos criterios.

Puesto que cada dimensión (es decir, cada rango de cada criterio) se encuentra dividida en dos, y que en cada dimensión deben quedar contenidos cuatro números difusos que la caractericen, se concluye que cada lado de cada unidad de decisión contiene 2 números difusos. Más adelante se muestra gráficamente la división del espacio decisional.

4.3.3.3 Flexibilidad de la propuesta

El modelo basado en lógica difusa permite plantear un espacio decisional con tantas dimensiones (criterios involucrados) como el equipo técnico encargado de la toma de decisiones considere pertinente. Para ello, se deben incluir tantos antecedentes proposicionales como dimensiones tenga el espacio, mediante la adición de más conectores lógicos “Y”.

De la misma manera, el modelo avala la creación de tantas unidades de decisión (o cubos, en el caso de un espacio de decisión tridimensional) como el grupo encargado de toma de decisiones considere suficiente. Esto debe hacerse considerando el mayor o menor aporte que un número elevado de unidades de decisión puede hacer al proceso de toma de decisión.

Similarmente, existe libertad para proponer tantos números difusos por criterio como se considere conveniente. Aparte de la pertinencia de un monto específico de números difusos por criterio, y de un número de criterios a involucrar, debe tenerse

siempre en mente que más criterios y más números difusos significan un proceso de cálculo mayor.

El modelo permite ser adaptado a otros niveles, no solo al operativo. La propuesta podría implementarse a nivel de gestión estratégica en empresas que operan y gestionan simultáneamente redes de abastecimiento y saneamiento, y que requieren tomar decisiones de inversión en crecimiento de las redes (nuevos proyectos) o en intervención de las existentes (mantenimiento o mejora) teniendo en cuenta ambos sistemas.

Al poder crear tantos espacios decisionales como se desee, queda claro que la metodología permite explotar al máximo las bases de datos de la empresa, convirtiendo estos datos en información valiosa. Esta misma flexibilidad permite actualizar la estructura de cálculo mediante la incorporación periódica de más criterios que se identifican como influyentes con el paso del tiempo. Lo anterior es fundamental, pues refleja la naturaleza dinámica de los sistemas de transporte de agua.

4.3.4 Proceso de elección de criterios para definir el espacio de decisión

El grupo de decisores debe seleccionar los criterios a incluir en el estudio. Esta selección debe hacerse con base en la relevancia de cada uno de ellos dentro del entorno local.

En el contexto de la Gestión Patrimonial de Infraestructuras, los criterios seleccionados deben ser aquellos que mayor importancia posean, no solo en el estudio de la condición de la tubería, sino también en el estudio de los niveles ideales de prestación de servicio, el estudio de costos, el estudio de factores ambientales que influyen la operación del sistema, y en general, sobre todo aquello que pueda intervenir en el cumplimiento de la misión y visión de la empresa.

Basado en el conocimiento que el autor de esta investigación posee en el campo de la renovación de redes, y apelando a la información disponible en las bases de datos que sirven para ilustrar la metodología, a continuación se propone un procedimiento de muy fácil aplicación para definir los criterios a incluir en el estudio. Otros procedimientos con el mismo objetivo son igualmente válidos, siempre y cuando puedan aplicarse de manera sistemática.

4.3.4.1 Paso 1

En primera instancia, se debe delimitar el alcance local para la aplicación del sistema de decisión. Esto se puede lograr mediante el planteamiento de una serie de preguntas de contexto. La condición fundamental de estas preguntas, es que sean relevantes en el ámbito local. Una continua disciplina de planteamiento y respuesta a preguntas de contexto, asegura que, cada vez que se requiera seguir un proceso de decisión para la intervención del sistema, los criterios que se incluyen son los adecuados. Algunas de las preguntas de contexto que pueden plantearse (no todas) son:

- ¿El proceso de intervención está enfocado a tuberías individuales o a sectores enteros del sistema?
- ¿El proceso de intervención permite incluir alternativas de sustitución?, ¿de renovación?, ¿de rehabilitación?, ¿todas?, ¿o existe preferencia justificada por alguna?
- ¿La decisión final debe ser completamente técnica?, ¿completamente financiera?, ¿o la combinación de ambas?
- ¿La misión y la visión de la compañía admiten cualquier resultado del proceso de decisión?
- ¿Los resultados del proceso de decisión deben estar influenciados por políticas locales?, ¿por políticas estatales?, ¿o tan sólo por las políticas de la empresa?
- ¿A qué nivel de gestión (operacional, táctico o estratégico) está tomando lugar el actual proceso de toma de decisión enfocado a la intervención de la red?
- ¿Qué clase de información se requiere para respaldar el proceso de toma de decisión sobre intervención?
- ¿De dónde proviene la información?

Las preguntas deben ser planteadas por el equipo de expertos, pero aunque las respuestas pueden provenir de este mismo equipo, se debe incluir en el personal que responde, a aquel de tipo técnico (personal de operación, de mantenimiento, personal del área de presupuestos, etc.). El producto que entrega la aplicación de este primer paso (el alcance local del proceso de decisión) resulta útil para enfrentar la siguiente etapa.

4.3.4.2 Paso 2

A continuación se debe abordar la definición de las posibles clases de criterios que resultan relevantes según el alcance local. El grupo experto debe definir las posibles clases en función de una revisión de literatura técnica profunda, y elegir las más relevantes de ellas según el alcance local. Existen diferentes clases según la fuente técnica que se consulte. Algunas de estas clases de variables o criterios según la IWA (Matos y otros; 2003; Alegre, 2006) y que coinciden tanto para sistemas de abastecimiento, como para sistemas de saneamiento son:

- Físicos.
- Operacionales.
- De personal.
- Económicos.
- Financieros.
- De calidad del servicio.
- Ambientales.
- Demográficos y de abonados.

Otros autores presentan clasificaciones diferentes. La clasificación según su localización tomando como referencia a la tubería, y que se traduce en la división entre factores internos y factores externos (Davies y otros, 2001) constituye otra manera de abordar este paso. Kleiner (Kleiner, 2006) separa los criterios en dinámicos, si su evolución depende del tiempo, o estáticos en el caso opuesto.

Una clasificación importante atiende a agrupar criterios en función del predominio de cada uno en determinado nivel de los definidos en la gestión patrimonial de Infraestructura. Así pues, se contaría con tres clases de criterios: criterios operacionales, criterios tácticos y criterios estratégicos. Dentro de cada clase se pueden generar subgrupos de criterios, según si la naturaleza de cada criterio se enfoca en mayor medida a la evaluación del riesgo, a la evaluación del desempeño, o a la evaluación del costo.

4.3.4.3 Paso 3

Esta última etapa está dirigida a identificar, en cada una de las clases de criterios más relevantes definidas en el paso 2, los criterios finalmente más importantes y que harán parte del proceso de toma de decisión. La decisión sobre cuáles criterios son los más representativos de cada clase, debe ser tomada por el grupo de decisores finales, con base en su conocimiento experto. Este grupo de decisores finales puede o no ser el mismo grupo experto que está implementando el proceso de toma de decisión.

En cualquier caso, el grupo que elige finalmente los criterios debe estar conformado por personal de los niveles de gestión estratégico y táctico. Finalmente, resulta muy conveniente que la lista de criterios generada en este paso sea comunicada, con fines de retroalimentación, a todos los participantes del proceso de elección, con el fin de crear una discusión (en un periodo limitado de tiempo) sobre sus bondades. La Tabla 14 resume los pasos descritos.

Tabla 14. Procedimiento sistemático para definir los criterios locales relevantes que conforman el espacio de decisión

Paso 1	1.1 Definición de preguntas de contexto relevantes por el grupo experto
	1.2 Proceso de respuesta por grupo experto y personal técnico
Producto del paso 1: alcance local del proceso de decisión sobre intervención	
Paso 2	2.1 Definición de las posibles clases de criterios por el grupo experto
	2.2 Elección de las clases más relevantes por el grupo experto
Producto del paso 2: clases de criterios más relevantes a nivel local	
Paso 3	2.1 Identificación de criterios más importantes de cada clase relevante por personal de niveles estratégico y táctico
	2.2 Comunicación de criterios elegidos a todos los participantes del proceso
Producto del paso 3: criterios locales relevantes	

Para el caso de estudio, la forma en que se decidió el grupo de criterios que delimita el espacio de decisión fue muy académica, y como consecuencia de ella, se definieron estos tres sencillos pasos que se pueden aplicar en todas las empresas gestoras de redes. Se han elegido como criterios importantes para el ejemplo, la edad de la tubería, el historial de fallos por unidad de longitud y año, y la presión de servicio.

4.3.4.4 Edad de la tubería

El envejecimiento de la red es un proceso natural, pero que se puede ver acelerado por factores del entorno tales como agresividad de los suelos, humedad del terreno, condiciones climáticas extremas, etc.

El estado de condición de una red cambia en la medida en que varían sus parámetros, tanto físicos (los más relevantes usualmente suelen ser el diámetro interno y rugosidad) como hidráulicos (siendo uno de los más relevantes la velocidad), tanto para adaptarse a nuevas condiciones impuestas por uno u otro tipo de agua, condiciones del terreno, o como consecuencia de variaciones en cambios de las demandas que satisface, ocurridos por el crecimiento de la población servida. Todo esto se desarrolla en el tiempo.

En consecuencia, puede afirmarse que la edad de la tubería abarca los efectos, no solo naturales inherentes a la estructura, sino también aquellos externos, ocurridos en el lapso de tiempo que la conducción lleva en operación.

La presente metodología incluye a la edad de la tubería dentro del grupo de criterios de análisis. No debe perderse de vista que el resultado esperado de la aplicación de la metodología, es una lista priorizada a la sustitución. En consecuencia, la metodología debe considerar en su estructura, siempre, aunque no únicamente, a aquellos factores que influyen activamente en el deterioro del elemento, que como proceso latente de fondo, aumenta con el tiempo.

La edad, junto con el diámetro, material, tipo de cobertura y profundidad de instalación, son considerados factores importantes en la explicación del grado de deterioro de una tubería, y en la consecuente necesidad de inspección y posterior intervención (Ariaratnam y otros, 2001).

Estadísticamente, se ha comprobado la existencia de una relación entre el aumento de la probabilidad de colapso de una tubería y su edad (Chughtai y otros, 2008). Sin embargo, el grado de contribución de la edad al deterioro de la tubería, respecto a las contribuciones de otros criterios, varía de una red a otra (Khan y otros, 2010).

4.3.4.5 Historial de fallos por unidad de longitud y año

El registro de fallos que la empresa lleva de cada una de las tuberías de la red constituye una fuente de información importante pues permite saber si una conducción ha entrado en el ciclo fallo-reparación-fallo, que termina con la sustitución temprana o tardía del elemento.

Cuando una tubería se encuentra en esta fase, la prioridad de intervención debe ser elevada. Este es el motivo principal por el cual se incluye el historial de fallos por unidad de longitud y año, como criterio de análisis en el estudio.

Sobre esto se ha escrito bastante. Merece la pena resaltar el concepto de la curva tipo bañera que abordan diversos autores (Feingold, 1984; Kleiner, 2001). Esta curva indica que suelen presentarse un número de fallos importante en el tiempo inicial desde la instalación del elemento (periodo de mortalidad temprana, donde la tasa de fallos es alta pero con tendencia a disminuir), debidos principalmente a procesos de instalación defectuosos.

Luego de que la tubería se asienta debidamente en el terreno y asume las condiciones de operación habituales en la red, transcurre un período de fallos nulos o de número reducido (periodo de tasa de fallos constante o aleatoria).

Inexorablemente, la tubería sufre los efectos del envejecimiento (que en algunas se manifiestan de manera más evidente que en otras). Se espera que con el paso del tiempo, el número de fallos aumente, a la vez que el tiempo entre uno y otro fallo disminuya cada vez más (periodo de tasa de fallos en incremento).

En cualquier caso, para la asignación de un valor que caracterice la condición actual de la tubería, la información relacionada con registros de fallos resulta bastante útil, si bien su uso conlleva cierto grado de incertidumbre asociado al rigor con que estos datos hayan sido recolectados, y si lo fueron para todas las tuberías o solo para algunas.

4.3.4.6 Presión de servicio

El estudio de la presión en una red puede abordarse desde el cumplimiento de los estándares de servicio mínimos y máximos, dentro de los cuales el sistema suele trabajar durante su vida útil. Al incluir a la presión dentro del grupo de criterios

estudiados, esta metodología adquiere un enfoque no solo de tipo estructural, sino además hacia la consideración de los niveles de satisfacción del usuario.

En el primer caso, el estándar mínimo es aquel por debajo del cual se puede generar una insatisfacción en el usuario (frecuentemente, un valor cercano a 15 m.c.a. + 3N, donde N se refiere al número de plantas de la edificación), pero que opuestamente mantiene en un mejor estado estructural al sistema.

La solución a una deficiencia de presión se encuentra aumentando la energía en el punto donde la presión se encuentra por debajo del mínimo admisible, bien sea mecánicamente mediante bombas, o bien elevando la cota de los tanques alimentadores.

El estándar de presión máxima, que corresponde al segundo caso, no debe exceder cierto valor (típicamente los 80 m.c.a.), por encima del cual se producen fugas con consecuencias de interrupción del servicio y costos elevados.

El usuario también puede quejarse por la incomodidad para el uso diario de grifos con chorros a altas presiones. Como solución en este tipo de casos, usualmente se propone una mejor operación del sistema mediante la inclusión de equipos de regulación de la presión, y en casos extremos el rediseño de la red para abastecerse desde puntos de menor cota.

La lógica difusa permite evaluar los efectos de las bajas y altas presiones en la red, efectos a los que se ve sometida la tubería y que influyen en su condición. Esto se realiza mediante el establecimiento de conjuntos difusos adecuados a estas situaciones. También permite evaluar la presión promedio de servicio, como forma general para calificar el cumplimiento de este estándar en una forma más global. Los valores de presión promedio de servicio reflejan las condiciones habituales de operación.

La presión interna de la red es considerada por algunos autores como uno de los criterios más relevantes dentro del grupo de factores operacionales que intervienen en el deterioro de la red (Al-Barqawi y otros, 2008; Wang y otros, 2009; Clark y otros 1982). Texeira propone la penalización del estado de condición de una tubería mediante dos curvas. La primera relaciona la altura de presión nodal con el índice de forma, y la segunda relaciona la variación de dicha altura con el mismo índice (Texeira, 2004)

4.3.5 Fase de construcción de conjuntos difusos y fuzificación de valores característicos de las tuberías para cada criterio

4.3.5.1 Definición de número difuso en el entorno de la sustitución de redes

Como ya se dijo en la fundamentación matemática de la lógica difusa, un número difuso es una función creciente a la izquierda de un valor modal, y decreciente a la derecha del mismo valor modal, y que describe la relación existente entre un criterio X (que puede ser la presión de servicio, el caudal fugado, la edad de la tubería, el número de fallos en un periodo, etc.) y un rango característico de pertenencia μ , que abarca valores desde 0 hasta 1.

Un valor de 1 en tal rango, representa la afirmación de que el valor evaluado (por ejemplo, la edad de cierta tubería igual a 10 años) pertenece completamente a la función (por ejemplo, al número difuso “nueva”), y opuestamente, un valor de 0 representa la afirmación de que el valor evaluado no pertenece a dicha función (siguiendo con el ejemplo de la misma tubería, la pertenencia al número difuso “antigua”).

A diferencia de los números puntuales con los que usualmente son caracterizadas estos criterios (por ejemplo: la edad de la tubería es “nueva” si es igual 10 años, la presión de servicio promedio de la tubería es “normal” si es igual a 25 m.c.a.), los números difusos permiten caracterizar al criterio mediante rangos.

Por ejemplo, una tubería puede considerarse de edad “media” si su edad está comprendida entre 0 y 20 años. La forma del número difuso “media” condicionará la mayor o menor pertenencia de la edad de la tubería a este número difuso.

Esta forma geométrica permite que el gestor exprese matemáticamente que, en el rango entre 0 y 20 años, la mayor posibilidad de que una tubería sea considerada de edad “media” es que ésta tenga 10 años desde su instalación. Lo anterior corresponde a un número difuso triangular (Figura 47).

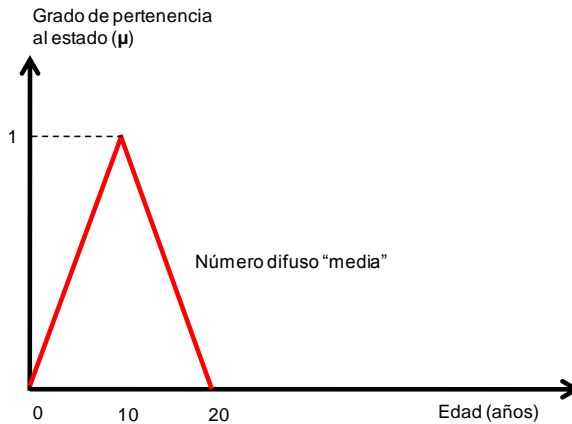


Figura 47. Número difuso triangular "media", descriptivo del criterio Edad

De manera similar, el decisor puede determinar que una tubería se considera edad "media" si ésta se halla en el rango entre 0 y 20 años, pero que no existirá un único valor más probable para este número difuso, y que en cambio, existirá un rango de valores más probables (por ejemplo, entre 5 y 15 años). En este caso se estaría definiendo un número difuso trapezoidal (Figura 48).

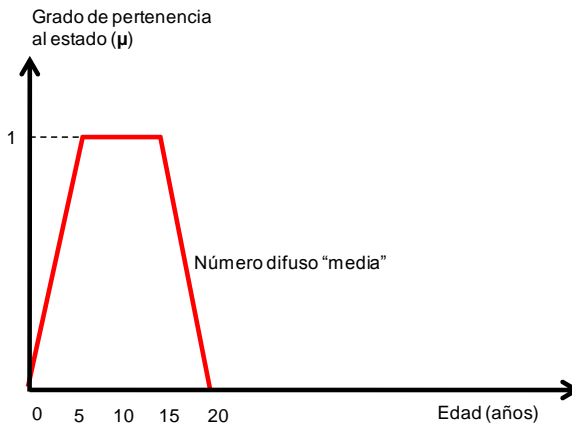


Figura 48. Número difuso trapezoidal "media", descriptivo del criterio Edad

Dado que la forma de la función difusa determinará el grado de pertenencia que un determinado valor pueda tomar, se desprende que dicha forma reviste especial importancia, definiéndola con base en la información disponible, y primordialmente,

en la opinión experta. Las funciones con forma triangular y trapezoidal suelen ser las que se utilizan con mayor frecuencia para representar criterios mediante expresiones lingüísticas, en gran parte por la facilidad de interpretación de sus posibles efectos sobre los resultados.

La función trapezoidal, a diferencia de la función triangular, incluye un rango de valores del universo de discurso que generarán un mismo valor en el rango de pertenencia. Entonces se puede afirmar que una función triangular queda definida por tres vértices (dos inferiores y uno superior), y una trapezoidal por cuatro (dos inferiores y dos superiores). El término “difuso” hace alusión a la incertidumbre propia de la definición de los criterios estudiados, y resulta inherente al conocimiento del gestor. La definición no cuantitativa, y en contraposición, lingüística, de criterios como la edad (desde “nueva” hasta “antigua”), la Presión (desde “baja” hasta “muy alta”), el número de fallos por unidad de longitud y año (desde “reducido” hasta “muy elevado”) constituyen ejemplos de ello. La lógica difusa pretende trasladar esta incertidumbre en cada uno de sus pasos, generando finalmente resultados más realistas, respecto a aquellos que se obtendrían trabajando con números puntuales.

Para el ejemplo de número difuso triangular descriptivo del criterio edad, una tubería con un valor $V=12.5$ años, evaluada en la función triangular F denominada “media” posee un grado de pertenencia a dicha función, $\mu_F(V)$, igual a 0.75, que se obtiene tras efectuar una regresión lineal (Figura 49).

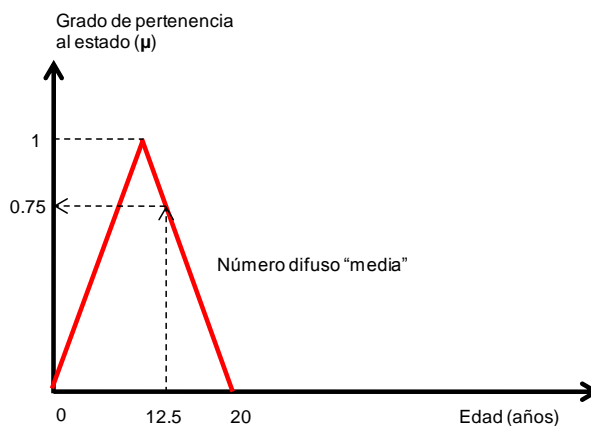


Figura 49. Evaluación de una tubería de 12.5 años de edad en un número difuso representativo del criterio edad, correspondiente al estado “media”

Dicha función F puede definirse como número difuso, pues todos los valores reales V que se encuentren entre 0 y 20 años poseerán un grado de pertenencia entre 0 y 1.

4.3.5.2 Construcción de conjuntos difusos enfocados a la intervención de redes

Repitiendo el anterior proceso de construcción de números difusos, el gestor puede definir lo que, según las características propias de la red que conoce y maneja, significa “nueva”, “antigua” y “muy antigua”. Las definiciones de estos números difusos, junto con la definición de “media”, pueden constituir el conjunto difuso descriptivo de la edad que mejor reflejan la realidad de la red estudiada, y que pueden variar de un abastecimiento a otro, según las preferencias del equipo gestor.

Dado que cada número difuso triangular puede ser definido mediante un vértice inferior izquierdo, uno superior y otro inferior derecho, el número difuso correspondiente al estado “nueva” del criterio edad, queda matemáticamente definido mediante $(0, 0, 10)$, de igual manera, el número difuso “media” se define mediante $(0, 10, 20)$, “antigua” por $(10, 20, 30)$ y “muy antigua” por $(20, 30, 120)$.

El conjunto difuso que define entonces el comportamiento del criterio edad se representa mediante la agrupación de varios números difusos triangulares (denominados: nueva, media, antigua, muy antigua) construidos según una opinión experta.

Un mismo valor del criterio analizado (por ejemplo, edad=15 años) puede pertenecer a varios números difusos al tiempo. Este aspecto hace que la incertidumbre del decisor sobre los diferentes estados de un criterio quede incluida en el proceso matemático.

La pertenencia simultánea a más de tres números difusos es matemáticamente posible, pero su significado físico no corresponde con la realidad: una tubería difícilmente puede pertenecer al estado de edad “nueva”, al estado de edad “reciente”, al estado de edad “media” y al estado de edad “antigua”. Desde lo anterior se concluye que lo usual en la conformación de un conjunto difuso, consista en superponer dos números difusos, y en ciertas ocasiones, hasta tres.

El conjunto difuso toma valores en un rango establecido desde el inicio del primer número difuso hasta el final del último. Este rango resulta particular a aquel criterio que describe, y se denomina universo de discurso. Para el ejemplo del conjunto difuso edad, si el primer número (“nueva”) comienza en cero años, y el último (“muy antigua”) termina en 120 años, el universo de discurso, sobre el cual deben quedar definidas las edades de todas las tuberías de la red, es de 120 años (Figura 50).

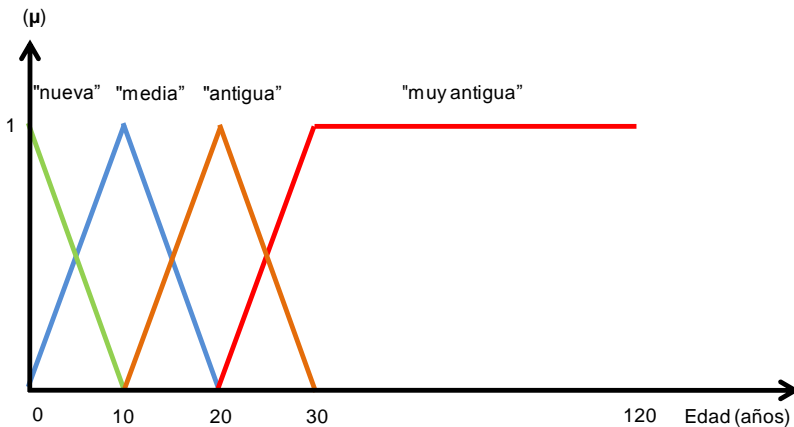


Figura 50. Ejemplo de universo de discurso de un conjunto difuso que representa el criterio edad

4.3.5.3 Fuzificación de los valores descriptivos de la edad, la presión de servicio y el número de fallos por unidad de longitud y año de cada tubería

La fuzificación de los datos de la red según los criterios incluidos en la metodología, consiste en evaluar para cada tubería, su valor respecto al criterio analizado y al conjunto difuso definido por el gestor, y en consecuencia generar un vector de valores de pertenencia a cada uno de los números difusos que conforman el conjunto. Este vector de valores de pertenencia tiene la forma [estado 1, estado 2, ... , estado n], para n estados o números integrantes del conjunto difuso.

Así pues, para una tubería que tiene 12.5 años en funcionamiento desde su instalación, se genera el vector de valores de pertenencia [0, 0.75, 0.25, 0, 0] según el conjunto difuso edad. Dicho conjunto ha sido generado en función de la opinión experta y refleja el envejecimiento propio de la red local.

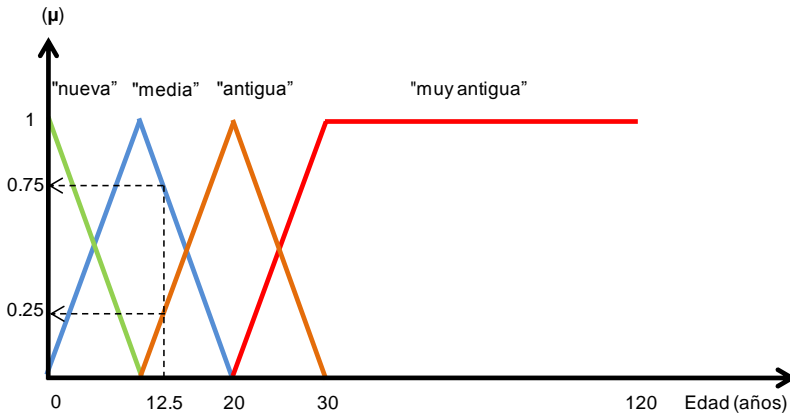


Figura 51. Evaluación de una tubería de 12.5 años de edad en un conjunto difuso representativo del criterio edad

De esta manera, el gestor de la red considera que una tubería de 12.5 años de edad, según la forma particular de envejecimiento de su red, tiene un 75% de posibilidad de pertenencia al estado “media” y un 25% de posibilidad de pertenencia al estado “antigua”. Los gestores de otra red de abastecimiento con una tasa de deterioro menos acelerada, plantearían un conjunto difuso para el criterio edad diferente al anterior (Figura 52), y consecuentemente una tubería de 12.5 años generaría un vector de valores de pertenencia diferente [0.375, 0.625, 0, 0, 0].

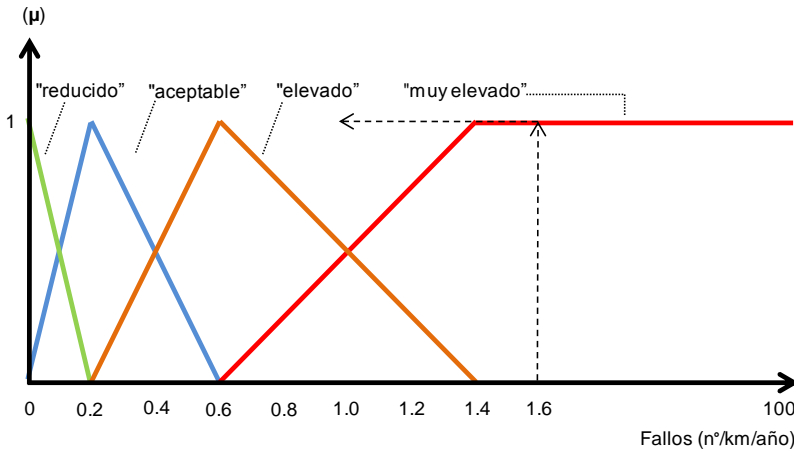


Figura 52. Evaluación de una tubería de 12.5 años de edad tras variaciones en el conjunto difuso representativo del criterio edad

Considerando que la tubería de 12.5 años tiene una longitud igual a 100 m, 2 fallos registrados en la base de datos de incidencias (es decir: 1.6 fallos/km/año), y que el decisor según su conocimiento de la red define el conjunto difuso para el criterio fallos/km/año (Figura 53) como: “reducido” (0, 0, 0.2), “aceptable” (0, 0.2, 0.6), “elevado” (0.2, 0.6, 1.4) y “muy elevado” (0.6, 1.4, 100), se obtiene el vector de valores de pertenencia [0, 0, 0, 1.0].

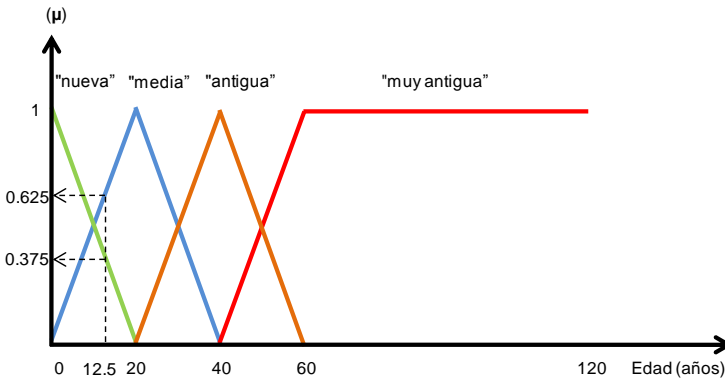


Figura 53. Evaluación de una tubería de 1.6 fallos/km/año en un conjunto difuso representativo del criterio fallos

Si además, en el modelo hidráulico de la red, la tubería presenta una presión media de servicio de 35 m.c.a., y el decisor define el conjunto difuso para el criterio presión mediante números trapezoidales (Figura 54), donde “baja” es (0, 0, 10, 20), “normal” (10, 20, 30, 40), “alta” (30, 40, 50, 60) y “muy alta” (50, 60, 80, 100), se obtiene el vector de valores de pertenencia [0, 0.5, 0.5, 0].

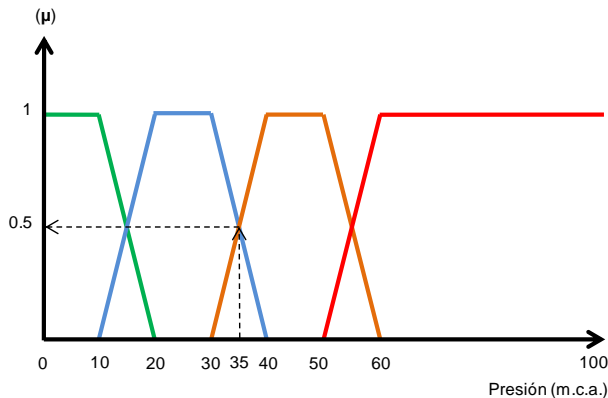


Figura 54. Evaluación de una tubería con una presión de servicio de 35 m.c.a. en un conjunto difuso representativo del criterio presión

4.3.6 Fase de agregación difusa de criterios mediante análisis de espacio de decisión

El paso siguiente a la fase en la cual se fuzifican los datos de la red respecto a cada criterio analizado, consiste en establecer reglas lógicas para todas las posibles combinaciones de números difusos.

Para ello se propone analizar como punto de partida el espacio de decisión conformado por los tres criterios ya mencionados (edad, presión y fallos por unidad de longitud y año) mediante su división en unidades de decisión que estarán caracterizadas según la opinión experta del equipo técnico, asignándoles a cada una de ellos un determinado valor semántico de la posibilidad o tendencia al fallo. Esto requiere una definición previa de la Tendencia al fallo como conjunto difuso solución.

El proceso de toma de decisión se ve simplificado entonces al definir unidades de decisión (en el caso de un espacio de decisión tridimensional, cubos) donde en su interior, los cambios ocurridos en cualquiera de los criterios que los componen, son tan pequeños, que cualquier combinación posible entre ellos no resultará en un cambio global significativo, y en consecuencia, en cualquier caso, la decisión sobre intervención sigue siendo la misma.

El conjunto difuso tendencia al fallo puede quedar conformado por los números difusos trapezoidales “poco significativa”, “moderada”, “significativa” y “muy significativa”. Estos números, así como los vértices que los definen geoméricamente, también constituyen una decisión que hace parte de la opinión experta de los gestores de la red.

La regla lógica que se plantea en este modelo se encuentra conformada por tres antecedentes (cada uno correspondiente a cada criterio involucrado) y un consecuente (tendencia al fallo, y en consecuencia, necesidad de intervención). Los antecedentes se relacionan entre sí mediante el conector lógico “Y”. Estos a su vez se relacionan con el consecuente mediante el conector “ENTONCES”.

La modelación difusa se puede definir entonces mediante reglas del tipo:

“SI [antecedente de edad] Y [antecedente de presión] Y [antecedente de fallos] se obtiene ENTONCES que [consecuente tendencia al fallo]”. Por ejemplo:

SI [la edad de la tubería es NUEVA] Y [la presión de servicio es NORMAL] Y [el número de fallos/km/año es ELEVADO], ENTONCES [la tendencia al fallo es MUY SIGNIFICATIVA]

La tendencia al fallo implica pues, no solo el efecto del histórico de fallos de la tubería (que refleja su estado estructural) sino también el efecto de la condición de servicio predominante (considerada mediante la inclusión la presión media de servicio) y el efecto de la edad de la tubería (la cual refleja el envejecimiento de la estructura en los resultados del modelo). Asumiendo que el gestor define 4 estados (o números) para cada conjunto difuso representativo de cada uno de los 3 antecedentes, se obtienen 64 posibles combinaciones que deben ser expresadas mediante igual número de reglas lógicas. Para abordar de una manera sistemática la construcción de estas reglas de lógicas, el gestor puede dividir el espacio decisional sobre el cual debe declarar sus preferencias, mediante unidades de decisión conformadas así:

Las unidades 1, 2, 3 y 4 ocupan el espacio decisional que debe reflejar la tendencia a la falla que se genere en redes cuyas tuberías son de reciente instalación (Figura 55).

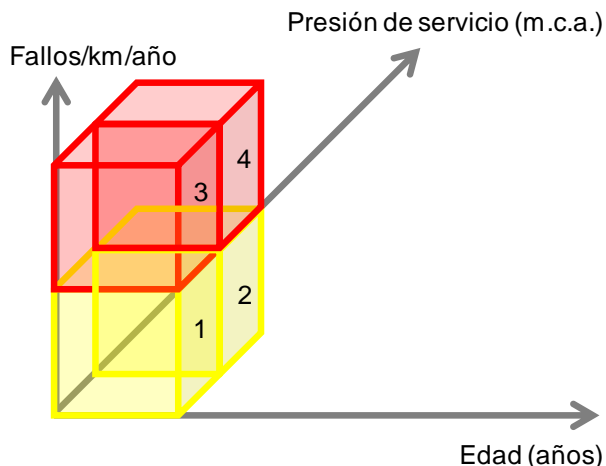


Figura 55. Unidades de decisión 1, 2, 3 y 4

A las unidades 1 y 2 se les debe asociar las tendencias a la falla que pueden presentar tuberías de instalación reciente y que en la base de datos de incidencias presentan un número de fallos admisible, en comparación con el resto de tuberías de la red.

- A la unidad 1 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación nueva o media, que trabajan a una presión de servicio baja o normal, y que cuentan con un número de fallos reducido o aceptable.
- A la unidad 2 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación nueva o media, que trabajan a una presión de servicio alta o muy alta, y que cuentan con un número de fallos reducido o aceptable.

De manera análoga, a los cubos 3 y 4 se les debe asociar las tendencias a la falla que pueden presentar tuberías de instalación reciente y que en la base de datos de incidencias presentan un número de fallos no admisible, en comparación con el resto de tuberías de la red.

- A la unidad 3 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación nueva o media, que trabajan a una presión de servicio baja o normal, y que cuentan con un número de fallos elevado o muy elevado.
- A la unidad 4 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación nueva o media, que trabajan a una presión de servicio alta o muy alta, y que cuentan con un número de fallos elevado o muy elevado.

Las unidades de decisión 5, 6, 7 y 8 se ubican en el espacio decisional que considera la tendencia a la falla de redes cuyas tuberías son de avanzada edad (Figura 56).

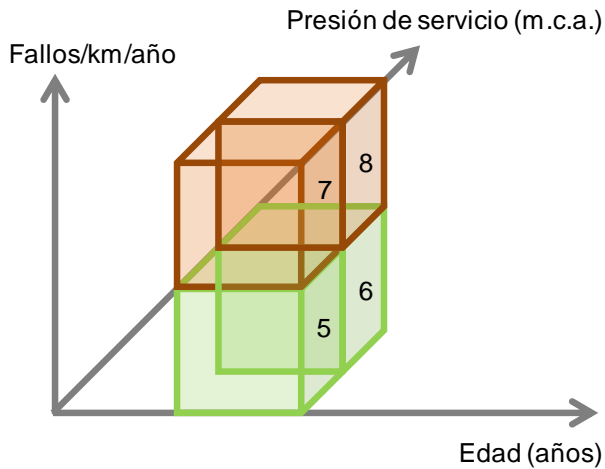


Figura 56. Cubos decisionales 5, 6, 7 y 8

A las unidades de decisión 5 y 6 se les debe asociar las tendencias a la falla que pueden presentar tuberías de edad avanzada y que en la base de datos de incidencias presentan un número de fallos admisible, en comparación con el resto de tuberías de la red.

- A la unidad 5 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación antigua o muy antigua, que trabajan a una presión de servicio baja o normal, y que cuentan con un número de fallos reducido o aceptable.
- A la unidad 6 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación antigua o muy antigua, que trabajan a una presión de servicio alta o muy alta, y que cuentan con un número de fallos reducido o aceptable.

De la misma forma, a las unidades de decisión 7 y 8 se les debe asociar las tendencias a la falla que pueden presentar tuberías de edad avanzada y que en la base de datos de incidencias presentan un número de fallos no admisible, en comparación con el resto de tuberías de la red.

- A la unidad 7 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación antigua o muy antigua, que trabajan a una presión de servicio baja o normal, y que cuentan con un número de fallos elevado o muy elevado.
- A la unidad 8 se le debe atribuir una tendencia de falla característica de tuberías de instalación antigua o muy antigua, que trabajan a una presión de servicio alta o muy alta, y que cuentan con un número de fallos elevado o muy elevado.

Por cada unidad de decisión se generan 8 reglas de decisión, a partir de las posibles combinaciones generadas desde tres criterios que la componen, y donde cada criterio se ve representado en dicha unidad por dos números difusos.

Desde lo anterior se puede percibir que la capacidad de decisión de un gestor puede verse limitada a un número máximo de tres antecedentes. Un número mayor de antecedentes exigiría un razonamiento lógico muy elevado que conlleve a una toma de decisión certera en función de tantos criterios. Mayores cantidades de criterios involucrados simultáneamente (es decir, en un solo espacio decisional) también conducen a procesos de decisión extenuantes: 4 criterios, cada uno interpretado mediante 4 números difusos, requeriría el planteamiento de $4^4 = 256$ reglas de decisión.

Una mejor alternativa a aumentar el número de criterios simultáneamente evaluados para un mismo nivel de gestión, y que permite continuar el uso de la experiencia experta, consiste en plantear otros espacios de decisión similares al descrito, en el mismo nivel. Por ejemplo, la tendencia de falla que puede establecerse a partir del tipo de tráfico, el material de la tubería y la frecuencia histórica de fallos. Evidentemente, su desarrollo queda supeditado a la disponibilidad de registros de otras variables.

La decisión sobre la posibilidad de falla que ha de asociarse a una unidad de decisión debe ser tomada mediante un estudio previo de los datos del sistema (inventario de patrimonio, registro histórico de intervenciones, etc.) que reflejen la evolución temporal de los criterios incluidos, de manera tal que brinden un indicativo del comportamiento local del deterioro de la red, y de si ésta tiene una tasa asociada de deterioro normal, lenta, acelerada, etc.

Como valores ilustrativos de posibilidad de falla para una red de abastecimiento que haya sufrido un proceso de deterioro normal, se presenta la Tabla 15. Sin embargo, como ya se dijo, estas decisiones deben basarse en las condiciones propias de cada red, y en el conocimiento que de la misma tenga el equipo técnico encargado del proceso de intervención.

A continuación se deben seleccionar los valores de pertenencia contenidos en los vectores difusos, generados en la primera fase y que harán parte del resultado final. Este paso se realiza mediante el proceso de inferencia de Mamdani, y con la ayuda de las reglas lógicas planteadas.

El proceso de selección por inferencia consiste en comparar valores, en este caso mediante tripletas, escogiendo en cada comparación el menor de ellos, y proyectándolo en el número difuso de llegada indicado por la decisión del gestor para dicha regla.

El primer paso del proceso de inferencia consiste en descartar aquellas reglas en las cuales alguno de los valores de pertenencia de los antecedentes son cero. Las restantes reglas entran a formar parte del proceso, y se afirma que dichas reglas poseen Soporte (es decir, sus valores de pertenencia son diferentes de cero).

Tabla 15. Ejemplo de valores de posibilidad de falla en función de la edad, la presión de servicio y el número de fallos. Tasa de deterioro normal.

Un. de decisión	Edad	Presión	Historial de fallos	Posibilidad de falla
1	Nueva o media	Baja o normal	Reducido o aceptable	Moderada
2	Nueva o media	Alta o muy alta	Reducido o aceptable	Moderada
3	Nueva o media	Baja o normal	Elevado o muy elevado	Muy significativa
4	Nueva o media	Alta o muy alta	Elevado o muy elevado	Muy significativa
5	Antigua o muy antigua	Baja o normal	Reducido o aceptable	Poco significativa
6	Antigua o muy antigua	Alta o muy alta	Reducido o aceptable	Poco significativa
7	Antigua o muy antigua	Baja o normal	Elevado o muy elevado	Significativa
8	Antigua o muy antigua	Alta o muy alta	Elevado o muy elevado	Significativa

Siguiendo con el ejemplo de la tubería que se viene citando, de las 64 reglas posibles, solo tendrán soporte aquellas que involucren específicamente los números difusos de edad “media” ($\mu_{\text{MEDIA}}=0.75$) y “antigua” ($\mu_{\text{ANTIGUA}}=0.25$), que además involucre los números difusos de presión “normal” ($\mu_{\text{NORMAL}}=0.50$) y “alta” ($\mu_{\text{ALTA}}=0.50$), y que simultáneamente involucre el número difuso de fallos “muy elevado” ($\mu_{\text{MUY ELEVADO}}=1$).

De las 64 reglas, aquellas “supervivientes” son:

Regla 1: SI [edad = MEDIA] Y [presión = NORMAL] Y [fallos = MUY ELEVADO]
ENTONCES [tendencia a la falla=MUY SIGNIFICATIVA]

Regla 2: SI [edad = MEDIA] Y [presión = ALTA] Y [fallos = MUY ELEVADO]
ENTONCES [tendencia a la falla=MUY SIGNIFICATIVA]

Regla 3: SI [edad = ANTIGUA] Y [presión = NORMAL] Y [fallos = MUY ELEVADO]
ENTONCES [tendencia a la falla=SIGNIFICATIVA]

Regla 4: SI [edad = ANTIGUA] Y [presión = ALTA] Y [fallos = MUY ELEVADO]
ENTONCES [tendencia a la falla=SIGNIFICATIVA]

Desde la deducción del algoritmo de inferencia de Mamdani (AWWA, 2005), y como segundo paso de dicho proceso, para el caso de múltiples antecedentes y un solo consecuente se obtiene que el valor de pertenencia seleccionado μ desde los antecedentes e , p y f (edad, presión y fallos) de la tubería X , y que se asignará al número difuso del consecuente t (posibilidad de falla), es:

$$\mu_{(e,p,f,t)} = \max[\mu_e(X) \wedge \mu_p(X) \wedge \mu_f(X)] \quad \text{Ec. 53}$$

La anterior ecuación constituye la regla de inferencia de Mamdani, donde el operador lógico “ \wedge ”, en su funcionamiento, se asume como la función matemática “Mínimo de”.

Aplicando la regla de inferencia de Mamdani se obtienen los valores de pertenencia al conjunto difuso resultado (tendencia a la falla) para cada una de las reglas activas (Tabla 16).

Tabla 16. Resultados de la regla de inferencia de Mamdani

Regla	μ_e	μ_p	μ_f	μ_t	μ_t (final)
1	0.75 (media)	0.50 (normal)	1 (muy elevado)	Mín=0.50 (asignar a muy significativa)	Máx=0.50 (asignar a muy significativa)
2	0.75 (media)	0.50 (alta)	1 (muy elevado)	Mín=0.50 (asignar a muy significativa)	Máx=0.50 (asignar a muy significativa)
3	0.25 (antigua)	0.50 (normal)	1 (muy elevado)	Máx=0.25 (asignar a significativa)	Máx=0.25 (asignar a significativa)
4	0.25 (antigua)	0.50 (alta)	1 (muy elevado)	Máx=0.25 (asignar a significativa)	Máx=0.25 (asignar a significativa)

Los anteriores valores de pertenencia μ_t (final) constituyen las alturas de los números difusos que se proyectan en el conjunto solución que propone el decisor. Un ejemplo de este tipo de conjunto es (Figura 57):

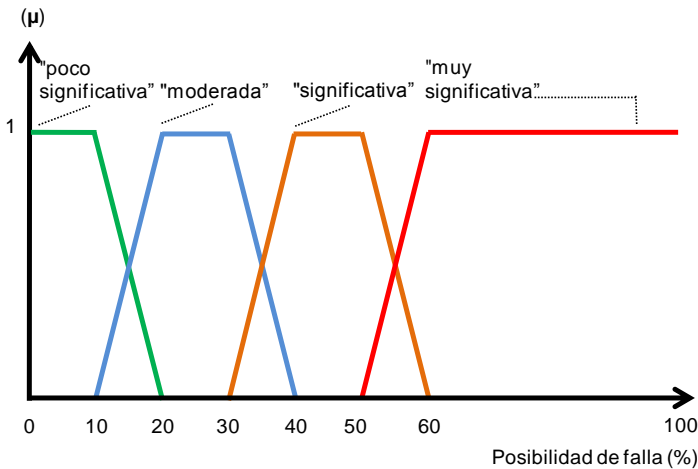


Figura 57. Conjunto difuso representativo de la posibilidad de falla

Las alturas resultantes, proyectadas en el conjunto difuso solución, generan la siguiente área resultante (Figura 58):

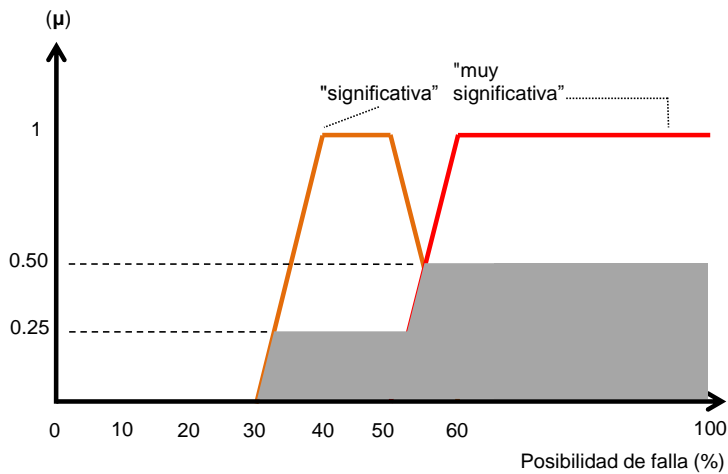


Figura 58. Área resultante tras aplicar el proceso de agregación

4.3.7 Fase de defuzificación mediante método de centro de áreas

El conjunto difuso resultante, representado en el gráfico anterior, debe “defuzificarse” para obtener un valor puntual representativo de la tendencia a la falla de cada tubería. “Defuzificar” consiste en realizar la operación opuesta a “fuzificar”. Si lo primero consiste en extender un dato puntual en el espacio conformado por los valores de pertenencia y el universo de discurso, lo segundo significa aglutinar en un solo punto el área resultante que se encuentra en el mismo espacio.

Así pues, ese único punto resulta ser un valor representativo acerca de la opinión experta y de la incertidumbre del decisor sobre las relaciones existentes entre los conjuntos difusos de entrada (representantes de los criterios edad, presión y fallos) y el conjunto difuso de salida (que representa la tendencia a la falla). Ambas características (opinión e incertidumbre) han sido transferidas a lo largo de todas las fases del proceso.

Para el proceso de defuzificación se establecen varios métodos en la literatura. En el presente estudio se ha utilizado el método del centro de área, basado en el cálculo del área bajo la curva final (que a su vez puede descomponerse en sub-áreas), y afectada por su distancia centroidal.

Considerando una sub-área inicial con vértice izquierdo v_a , y una sub-área final con vértice derecho v_z , se conforma un universo de discurso que se extiende desde v_a hasta v_z . Se tiene entonces que:

$$\text{Valor defuzificado de la tubería } x = X_f = \frac{\sum_{i=v_a}^{i=v_z-1} [d_{i,i+1} \cdot A_{i,i+1}]}{\sum_{i=v_a}^{i=v_z-1} A_{i,i+1}} \quad \text{Ec. 54}$$

Donde d es la distancia centroidal medida desde el origen de coordenadas. El valor defuzificado de la tubería x corresponde con el resultado final del proceso y se considera un valor estimado de la tendencia a la falla del elemento, teniendo en consideración las variables edad, presión y fallos.

Descomponiendo el área del ejemplo en 5 sub-áreas (3 rectángulos y dos triángulos) y aplicando la Ec. correspondiente al Método Del Centro De Área, se obtiene:

$$X_f (\%) = 70,14 \quad \text{Ec. 55}$$

En el contexto de la aplicación de la lógica difusa a la intervención de redes, este valor significa que la tubería estudiada presenta una tendencia a la falla alta, y en consecuencia una necesidad de intervención alta.

Aunque matemáticamente no debe asumirse tal resultado como una probabilidad de falla, pues el enfoque no hace uso de un método probabilístico, sí puede considerarse este resultado como un valor estimado de la posibilidad de que se presente un fallo, dados los registros de fallos y de presión, y así mismo, considerando el envejecimiento de la estructura.

4.3.8 Priorización de tuberías a la intervención

El proceso anterior puede aplicarse a todas las tuberías de la red que cuenten con registros de los criterios estudiados. Esto no significa que un criterio relevante,

pero sin información sobre él, debe desecharse. Si se determina que un criterio reviste importancia en el contexto local, y no se cuenta con suficiente información sobre éste, la flexibilidad de la metodología permite planear su incorporación futura al estudio, estableciendo una fecha de incorporación, decidiendo el espacio decisional que integrará, y comenzando la recopilación de datos sobre el mismo de manera prioritaria.

En vista que el resultado generado tras la aplicación de la metodología para el espacio decisional planteado, constituye un estimativo de la posibilidad de falla, se concluye que la mayor prioridad a la renovación (considerando únicamente los efectos de la presión, la edad y el historial de fallos) debe tenerla aquella tubería que presente un mayor resultado tras la fase de defuzificación.

La lista de prioridad a la intervención resulta inmediata, construyéndose mediante el ordenamiento descendiente de los valores defuzificados.

4.3.9 Método simplificado de priorización de sectores a la renovación

Un enfoque rápido para obtener valores por sectores que permitan pensar en intervenciones masivas de la red en lugares específicos, optimizando el uso de los recursos físicos necesarios para las tareas de intervención, consiste en agrupar los resultados defuzificados de las tuberías de cada sector, y promediarlos.

La lista priorizada de sectores a la intervención se genera de manera similar a la lista de tuberías, esto es, conformando los resultados en orden descendente.

Una ampliación de este estudio puede realizarse, como ya se ha dicho, si además de llevar a cabo la propuesta actual (basada en el espacio de decisión integrado por la edad, la presión media y el historial de fallos), se configuran espacios de decisión diferentes.

Estos espacios pueden incluir otros estándares de servicio, como caudales entregados en horas punta, número de interrupciones del servicio, número de usuarios impactados por una interrupción en el sector, etc.

4.4 Resultados: ejemplo de aplicación de la metodología propuesta a una red de abastecimiento del Mediterráneo Español

4.4.1 Descripción de la red

La red analizada está conformada por 10485 tuberías que sirven a una población que en año 2006 (fecha de corte de la base de datos que se dispone para este estudio) ascendía a 322431 habitantes, y en el 2011 ya llegaba a 334329 personas.

La longitud total instalada, registrada en la base de datos, corresponde a casi 350 km. De las 10485 tuberías, el 76.1% se encuentran ubicadas bajo aceras, el 22.4% bajo calles con tráfico normal y el 1.5% bajo vías de tráfico pesado.

El consumo promedio de agua en la Comunidad Valenciana (comunidad a la cual pertenece la ciudad estudiada), para el año 2006, se estimó en 192 l/habitante/día (INE, 2012). Para el año 2010 (último año del cual se publican estadísticas a la fecha de la redacción de este documento, noviembre de 2012), la misma fuente registra una reducción del consumo, situándose en 157 l/habitante/día.

También para 2010, el INE declara un volumen por habitante y día de agua no registrada de 79 l/habitante/día, con unas pérdidas reales de 62 l/habitante/día. Este dato no se encuentra disponible para el año 2006, pero para el año 2007 el agua no registrada alcanzaba los 95 l/habitante/día. Las pérdidas reales para 2007 alcanzan los 76 l/habitante/día (INE, 2012).

La tendencia a la reducción del agua no registrada y de las pérdidas reales, junto con el descenso en la dotación diaria, son indicadores que conducen a pensar que la gestión de la demanda en este territorio se ha enfocado en el camino adecuado.

Antes de comenzar a hacer uso de la base de datos, conviene efectuar una revisión de su información, con el objetivo de eliminar los registros que presenten incoherencias de cualquier tipo, o bien falta de información en aquellos campos que se requieren para realizar el estudio planteado, bien sea para tuberías que presenten algún histórico de fallos, como para aquellas que no han sufrido ninguno.

La Tabla 17 contiene los resultados de la aplicación de diferentes filtros, tendientes a depurar la base de datos del ejemplo.

Tabla 17. Resumen de la limpieza hecha a la base de datos del ejemplo de aplicación

Total registros en la base de datos inicial (tuberías) 31059 (que corresponden a 989.9 km de red)		
N° de registros	Registros eliminados	Registros sobrevivientes
31059	11119	19940
Filtro: Registros sin ID		
19940	6962	12978
Filtro: Registros con longitudes menores a 0.5 m		
12978	11515	1463
Filtro: de los registros con ID y mayores a 0.5 m, sobreviven aquellos "con fallos" (fallos: roturas o de otro tipo registrados en la base de datos)		
1463	699	764
Filtro: de los registros con ID, mayores a 0.5 m y con fallos, sobreviven solo aquellos "naturales" se eliminan los provocados		
764	186	578
Filtro: de los registros con ID, mayores a 0.5 m y con fallos "naturales", sobreviven aquellos con año de instalación diferente a 1900		
578	171	407
Filtro: de los registros con ID, mayores a 0.5 m, con fallos "naturales", con año de instalación diferente a 1900 y con dato de presión asociado, sobreviven aquellos con dato de tipo de red		
407	2	405
Total registros válidos, con fallos: 405 (1.3% del número de registros de la base de datos inicial)		
Filtro: de los registros con ID y mayores a 0.5 m, sobreviven aquellos "sin fallos"		
12978	1463	11515
Filtro: de los registros con ID, mayores a 0.5 m y "sin fallos", sobreviven aquellos con año de instalación diferente a 1900		
11515	682	10833
Filtro: de los registros con ID, mayores a 0.5 m, "sin fallos" y con año de instalación diferente a 1900, sobreviven aquellos con dato de presión asociado		
10833	753	10080
Total registros válidos, sin fallos: 10080 (32.45% del número de registros de la base de datos inicial)		
Total registros válidos, con y sin fallos: 405+10080= 10845 (33.75% del número de registros de la base de datos inicial). Registros eliminados tras la limpieza: 20574 (66.25% del número de registros de la base de datos inicial). Los registros válidos suman 350.4 km (35.4% de la longitud contenida en la base de datos inicial)		

La serie de datos de fechas de instalación comienza de manera sistemática a partir de 1946. Existen tuberías con año de instalación 1900. Éstos no fueron incluidos en el estudio.

De igual forma, a juicio del autor, las tuberías con longitudes menores a 0.5 m pueden presentar comportamientos estructurales y operativos diferentes a tuberías de mayores longitudes, al verse altamente influenciadas por la cercana presencia de uniones y cambios de dirección. Por este motivo tampoco fueron incluidas en el estudio.

Por supuesto, las tuberías que no tienen un identificador asociado, quedan por fuera del análisis, al no contar con un vínculo para diferenciarlas de las demás, ni tampoco para poderlas vincular a sectores específicos de la red. Las tuberías sin un dato de presión de servicio asociado, aunque pueden servir para estudios diferentes, no se incluyen en el presente, pues la presión es uno de los criterios escogidos para el análisis.

Después de aplicar los filtros, se identifica inmediatamente una reducción significativa de las tuberías de la muestra de estudio (más del 60% de las conducciones queda por fuera), lo que sugiere una falta de gestión o una estrategia inadecuada en el manejo de la información.

Al analizar los datos entregados, también se nota que no existe ninguna tubería con más de un fallo, lo cual, para una muestra de más de 10.000 elementos, resulta muy particular. Una corroboración a esto último se podría lograr si se tuviera la oportunidad de hacer un mayor escrutinio, y una posterior comparación, mediante el acceso a otras bases de datos de diferentes dependencias al interior de la empresa (como por ejemplo, las bases de datos administrativas que registran las órdenes de trabajo).

La Figura 59 describe los porcentajes que cada uno de los materiales aportan al total de la red, en el año de referencia para el cual se fijó el límite superior de la información de la base de datos (2006). Los materiales instalados en ese momento eran: FD: fundición dúctil, UR: fibrocemento, PE: polietileno, FG: fundición gris.

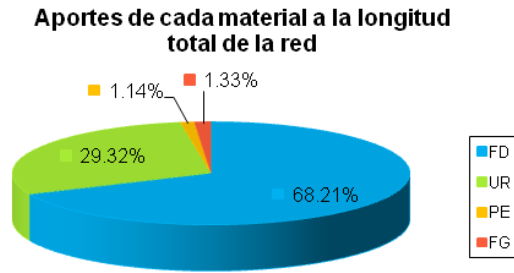


Figura 59. Longitud instalada en cada década por material

El material predominante (FD), lo es en un porcentaje más del doble de su principal seguidor (UR) lo que indica una clara tendencia a la instalación de elementos de este tipo en la red. La Fundición Dúctil ha predominado en la tendencia de instalación histórica (Figura 60) que se analiza desde los años 60's, seguida en segunda instancia por el fibrocemento, y en mucha menor medida por la fundición gris y el polietileno.

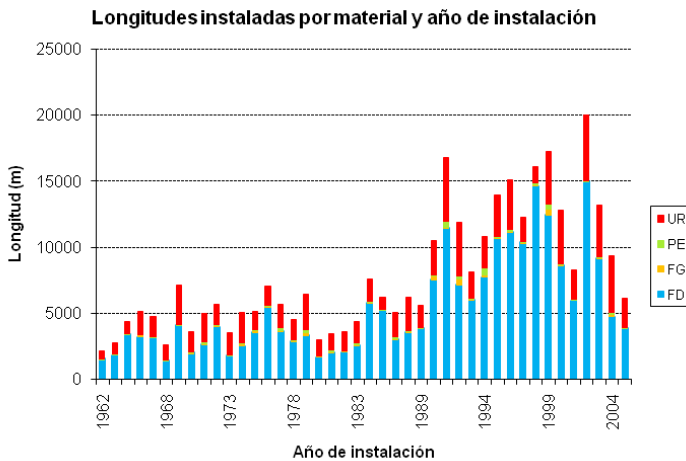


Figura 60. Distribución de tuberías por material (FD: fundición dúctil, UR: fibrocemento, PE: polietileno, FG: fundición gris)

La década de los años 90's registra la mayor actividad de instalación de tuberías de la red, siendo esta actividad más notoria para el fibrocemento, y principalmente para la fundición dúctil (Figura 61). La información contenida en la base de datos, no permite determinar el tipo de instalación realizado. Esto es, cuales tuberías han sido totalmente sustituidas o rehabilitadas.

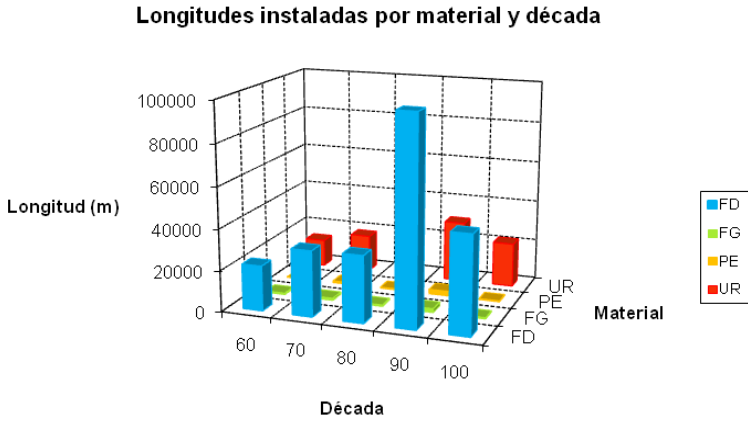


Figura 61. Longitud instalada acumulada en cada año por material

La Figura 62 permite apreciar el ritmo de instalación de cada material en la red. Se identifica, para todos los materiales, un ascenso en el porcentaje de instalación a partir de la segunda mitad de la década de los 80's. El polietileno tuvo un gran auge al final de la misma, mientras que la fundición dúctil prosperó en mayor medida en la segunda parte de la década de los 90's, presentando una tendencia a la disminución de las instalaciones en este material desde el año 2000.

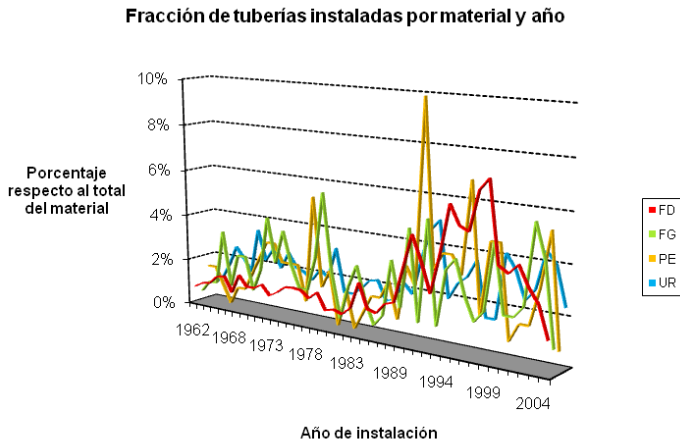


Figura 62. Porcentaje instalado cada año respecto al total del material hasta 2004

Las tuberías de fundición gris y de uralita presentaron descensos pronunciados en sus tasas de fallos por km y año en el período comprendido entre 1962 (año de referencia para el inicio del estudio) y 1985, luego de lo cual dichas tuberías parece que estabilizan su tasa de fallos. La fundición gris presenta la misma tendencia, aunque con más irregularidades. El polietileno presenta un periodo de ascenso en su tasa de fallos, entre 1972 y 1972, y luego asume un comportamiento similar al de los otros tres materiales (Figura 63).

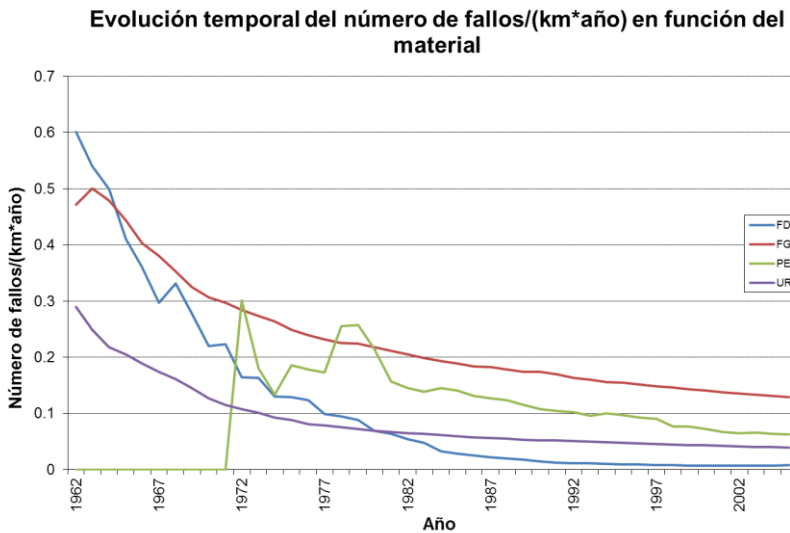


Figura 63. Ocurrencia de fallos por km y año en función del material

La definición de sectores se hizo con la intención de probar la metodología propuesta para la priorización de tuberías en ámbitos más pequeños que aquel que abarca la red entera, ámbitos donde las conducciones coinciden en cierta medida en sus características fundamentales, y en consecuencia, donde se espera la obtención de resultados más homogéneos al interior de cada uno de ellos.

No se pretendía aplicar la definición técnica de sector hidráulico en este ejemplo, si bien podría hacerse mediante el conocimiento de la ubicación de las válvulas de corte que pueden generar aislamiento del flujo, y así mismo de los macromedidores instalados.

En este estudio se realizó la división por sectores tomando como referencia cortes en la serie organizada de identificadores de tuberías de mayor a menor. Esta

forma de agrupación generó que en el sector 1 se agruparan todas las tuberías que registraban fallos en sus registros históricos (405 en total, de las 1000 tuberías del sector 1, y en general, de las 10485 tuberías de la muestra de la red), junto con algunas sin registro de fallos (595 tuberías). Los restantes sectores quedaron conformados por tuberías que no registran fallos.

Se muestran aquí los resultados de 4 de 10 sectores definidos. Todos los sectores cuentan con una población de tuberías de igual tamaño (1000 unidades), excepto el sector 10, que posee 1485 unidades.

Dado que los identificadores usualmente se asignan en la herramienta SIG utilizada en la empresa, siguiendo un orden geográfico, se espera que los sectores aquí definidos también lo sean a nivel espacial.

También debe considerarse que otra forma de asignar identificadores a las tuberías es, usualmente, como consecuencia de su fecha de instalación. A medida que la red crece, a cada nueva tubería que se vaya a instalar, sin importar el sitio geográfico donde sea puesta en funcionamiento, le es asignado el identificador que sigue en la lista de la base de datos

El ejemplo de aplicación abarca los 10 sectores, y en consecuencia se generaron resultados para cada uno de ellos, y se consignaron en el anexo respectivo. Sin embargo, en el cuerpo principal de este texto se muestran sólo los resultados de los sectores 1, 5, 7 y 10 (se han escogido aleatoriamente, desde el grupo de 10).

Para los cuatro sectores seleccionados, se muestra un predominio en la instalación de tuberías de fundición dúctil de diámetro 100 y 150 mm. Este material no se ha instalado tan notoriamente en el sector 5, como sí en los restantes sectores (Figura 64).

Para el diámetro 80 mm el material predominante en la red es el fibrocemento. Solamente en el sector 5 (y en alguna medida, en el sector 7) se identifica una longitud significativa de tuberías de fundición gris (en diámetros de 225 y 250 mm)

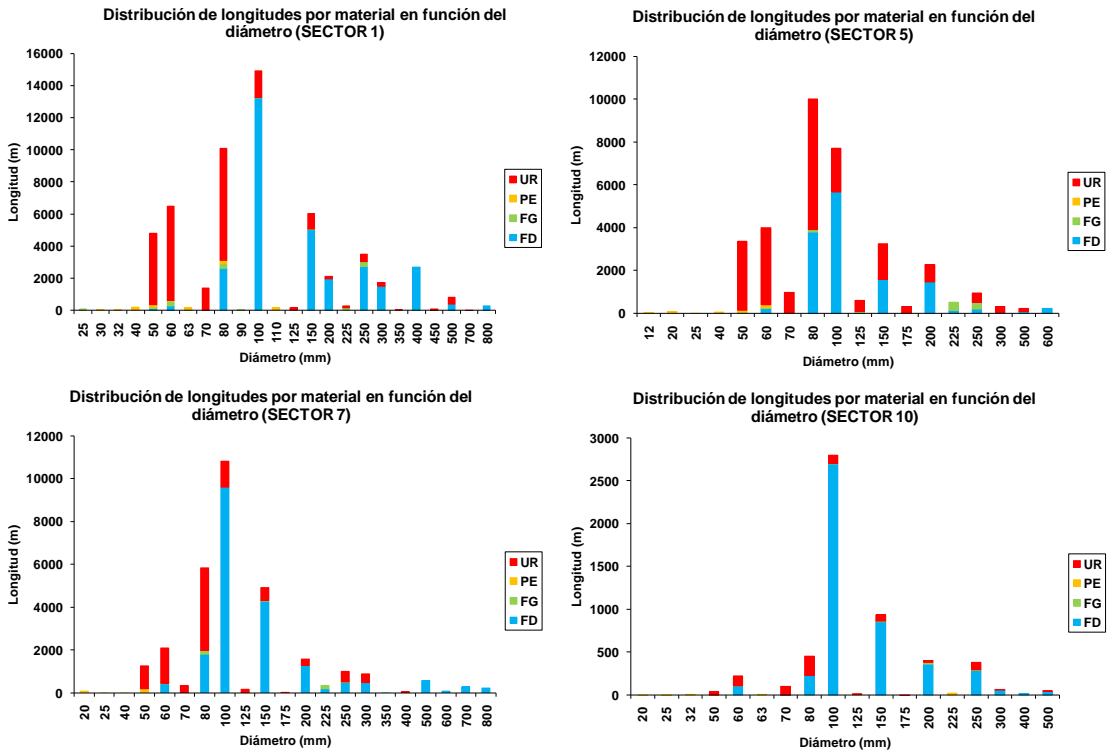


Figura 64. Longitud instalada por material y diámetro en cada sector

4.4.2 Criterios utilizados para conformar un primer espacio decisional

4.4.2.1 Edad de la tubería

De los 4 sectores analizados en el texto, el promedio de edad más alto se encuentra en el sector 5, para las tuberías de polietileno, con una edad media de 35.2 años (Figura 65). En contraposición, las tuberías de fundición gris del sector 10 tienen una edad promedio un poco superior a los 10 años.

En términos generales, de los cuatro sectores incluidos aquí, el sector 5 es el que presenta tuberías más antiguas, sobre todo con los aporte de los elementos de polietileno y de fundición gris. Opuesto a lo anterior está el sector 10, donde además de las tuberías de fundición gris, aparecen como recientemente instaladas (menos de 15 años) las tuberías de fundición dúctil y fibrocemento.

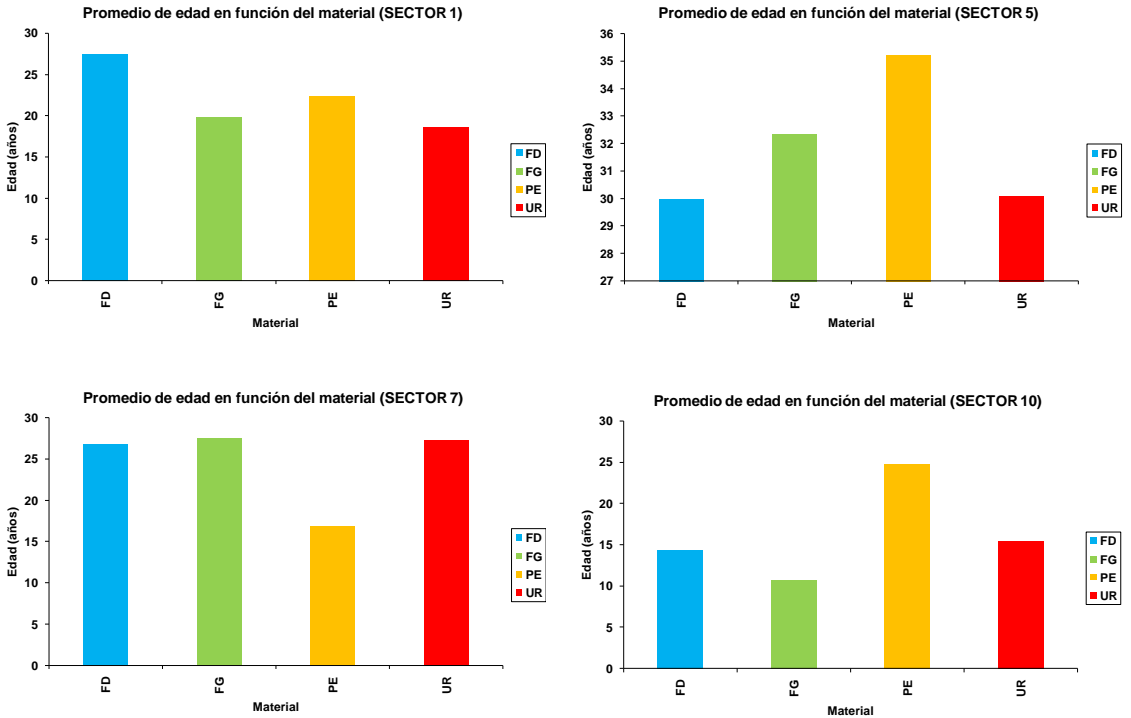


Figura 65. Edad promedio de las tuberías de la red por material y sector

4.4.2.2 Presión de servicio

Las tuberías de fundición ductil en el sector 1, y de fundición gris en el sector 10 alcanzan una presión promedio de 39 m.c.a., mientras que el sector 5 registra presiones de menos de 27 m.c.a. en sus tuberías de fundición gris (Figura 66).

Las presiones promedio en tuberías de este material también son bajas en el sector 1, a diferencia de lo que se registra para los sectores 7 y 10. El sector 5 presenta, en un análisis muy general (sin hacer diferencia de materiales), las menores presiones promedio de los 4 sectores (28 m.c.a. aproximadamente), y el sector 10 las mayores (un poco menos de 38 m.c.a.)

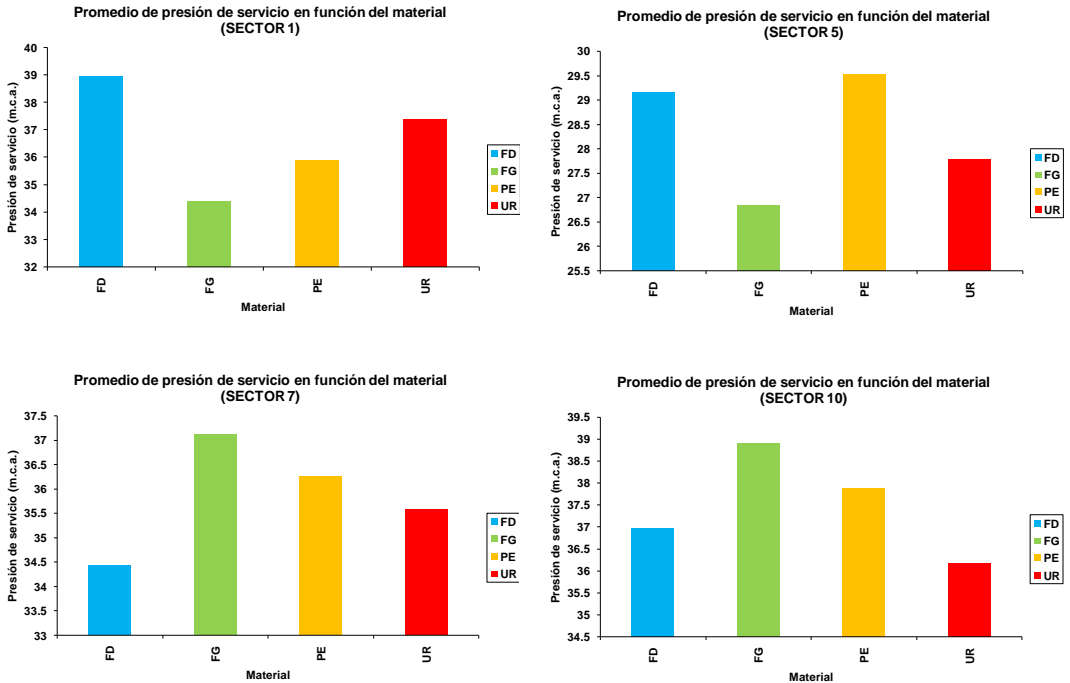


Figura 66. Presión de servicio promedio de las tuberías de la red por material y sector

4.4.2.3 Número de fallos / (km*año)

Los fallos considerados en este estudio son de origen natural (no se han considerado los daños provocados por trabajos en otras redes, por construcciones adyacentes a la red, etc.)

De los diez sectores definidos para este estudio, el único con dinámica de fallos es el sector 1. Al considerar sólo las longitudes de este sector, el análisis de la tasa de fallos cambia drásticamente respecto al mostrado para toda la red.

Así, la mayor cantidad de fallos se encuentran asociados a tuberías de fundición gris (1.78 fallos anuales en cada kilómetro), seguido por las tuberías de fundición dúctil, las cuales registran una tasa correspondiente a casi la mitad de la primera (0.93 fallos/km/año). Posteriormente se encuentran las conducciones de polietileno (0.82 fallos/km/año), y por último las tuberías de fibrocemento (0.66 fallos/km/año).

4.4.3 Resultados de la fase de fuzificación

4.4.3.1 Números difusos para el criterio Edad

Para evaluar cada dato de edad de las tuberías de la red elegida para este ejemplo de aplicación, se plantearon los siguientes números difusos triangulares que según la opinión experta, caracterizan adecuadamente a este criterio:

$$\text{Núm. difuso edad nueva} = [0,0,15] \quad \text{Ec. 56}$$

$$\text{Núm. difuso edad media} = [0,15,30] \quad \text{Ec. 57}$$

$$\text{Núm. difuso edad antigua} = [15,30,45] \quad \text{Ec. 58}$$

$$\text{Núm. difuso edad muy antigua} = [30,45,110] \quad \text{Ec. 59}$$

Lo anterior se presenta gráficamente en la Figura 67. En ella se muestra además, la evaluación de 4 tuberías pertenecientes a cada uno de los cuatro sectores del estudio que se mencionan en el texto. La tubería con identificador 81771 pertenece al sector 1, y tiene una edad contada desde su fecha de instalación de 5 años. La tubería con identificador 46466 pertenece al sector 5, y tiene una edad de 10 años. La tubería con identificador 50189 pertenece al sector 7 y tiene 40 años en funcionamiento, y la tubería 58331 del sector 10 lleva 50 en operación. La evaluación de las cuatro tuberías según el conjunto difuso representativo de la edad, generan los siguientes cuatro vectores.

$$\text{Vector edad S1 - 81771} = [0.666,0.333,0,0] \quad \text{Ec. 60}$$

$$\text{Vector edad S5 - 46466} = [0,0.3333,0.6666,0] \quad \text{Ec. 61}$$

$$\text{Vector edad S7 - 50819} = [0,0,0,1] \quad \text{Ec. 62}$$

$$\text{Vector edad S10 - 58331} = [0,0,0,1] \quad \text{Ec. 63}$$

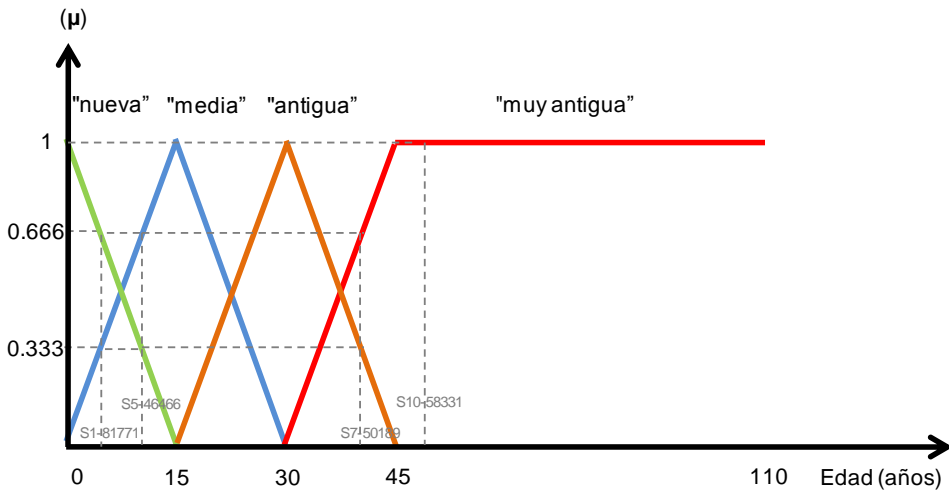


Figura 67. Evaluación de tuberías de los sectores 1, 5, 7 y 10 según el conjunto difuso edad definido para la red de estudio

4.4.3.2 Números difusos para el criterio Presión media de servicio

Para evaluar cada dato de presión de las tuberías de la red, se generaron los siguientes números difusos triangulares según la opinión experta:

$$\text{Núm. difuso presión baja} = [0,0,20] \quad \text{Ec. 64}$$

$$\text{Núm. difuso presión normal} = [0,20,40] \quad \text{Ec. 65}$$

$$\text{Núm. difuso presión alta} = [20,40,50] \quad \text{Ec. 66}$$

$$\text{Núm. difuso presión muy alta} = [40,50,100] \quad \text{Ec. 67}$$

La Figura 68 muestra gráficamente los anteriores cuatro vectores. Además, la figura incluye la evaluación de las 4 tuberías pertenecientes a cada uno de los cuatro sectores incluidos en el texto. La tubería con identificador S1-81771 registra una presión media de servicio de 50.19 m.c.a. La tubería con identificador S5-46466 presenta un registro de 37.33 m.c.a. La tubería con identificador S7-50189 tiene asociada una presión de 75.4 mc.a., y la tubería S10-58331 una presión de

41.2 m.c.a. La evaluación de las cuatro tuberías según el conjunto difuso representativo de la presión, generan los siguientes cuatro vectores.

$$\text{Vector presión S1 - 81771} = [0,0,0,1] \quad \text{Ec. 68}$$

$$\text{Vector presión S5 - 46466} = [0,0.1334,0.8665,0] \quad \text{Ec. 69}$$

$$\text{Vector presión S7 - 50819} = [0,0,0,1] \quad \text{Ec. 70}$$

$$\text{Vector presión S10 - 58331} = [0,0,0.8799,0.1200] \quad \text{Ec. 71}$$

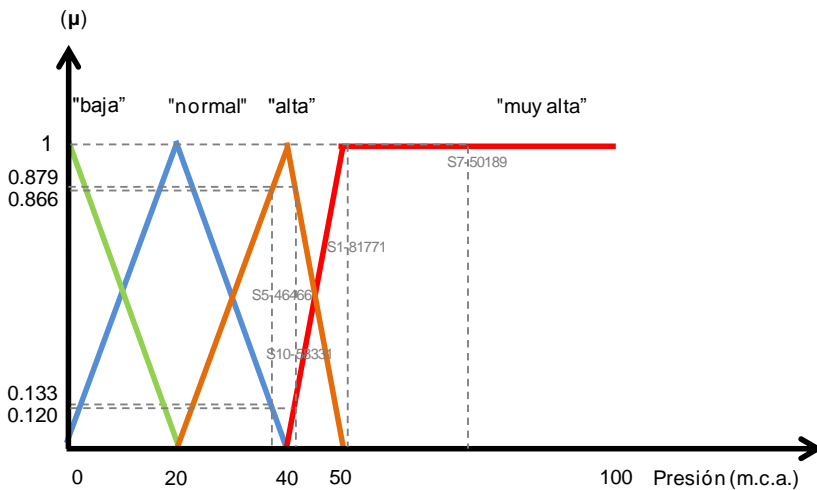


Figura 68. Evaluación de tuberías de los sectores 1, 5, 7 y 10 según el conjunto difuso presión definido para la red de estudio

4.4.3.3 Números difusos para el criterio Número de fallos anuales por unidad de longitud

Los datos relativos a fallos anuales por km de red, de las tuberías de este ejemplo de aplicación, se evaluaron tras definir los números difusos triangulares que la opinión experta aporta. Estos, si se grafican en una escala que cubra todo el universo de discurso de la muestra de tuberías, no resultan visibles. Por este motivo, se ha ajustado la escala del eje horizontal de la gráfica que se presenta.

$$\text{Núm. difuso fallos reducido} = [0,0,0.1] \quad \text{Ec. 72}$$

$$\text{Núm. difuso fallos aceptable} = [0,0.1,0.2] \quad \text{Ec. 73}$$

$$\text{Núm. difuso fallos elevado} = [0.1,0.2,0.3] \quad \text{Ec. 74}$$

$$\text{Núm. difuso fallos muy elevado} = [0.2,0.3,50] \quad \text{Ec. 75}$$

La Figura 69 contiene los cuatro vectores citados arriba. La tubería con identificador S1-81771 registra una tasa de fallos de 5.79 fallos/km/año. Las restantes tres tuberías incluidas en la descripción de este texto tienen una tasa de fallos nula. La evaluación de las cuatro tuberías según el conjunto difuso representativo de los fallos, generan los siguientes cuatro vectores.

$$\text{Vector fallos S1 - 81771} = [0,0,0,1] \quad \text{Ec. 76}$$

$$\text{Vector fallos S5 - 46466} = [1,0,0,0] \quad \text{Ec. 77}$$

$$\text{Vector fallos S5 - 46466} = [1,0,0,0] \quad \text{Ec. 78}$$

$$\text{Vector fallos S10 - 58331} = [1,0,0,0] \quad \text{Ec. 79}$$

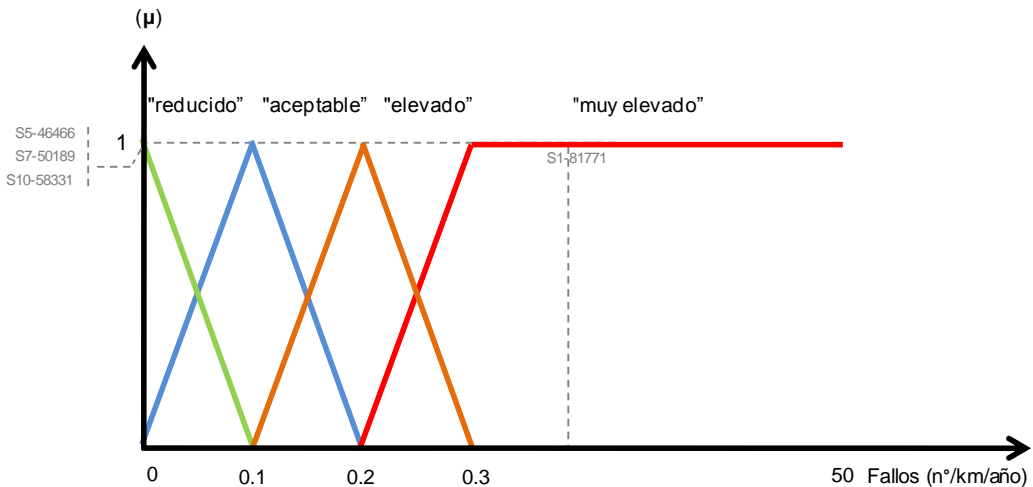


Figura 69. Evaluación de tuberías de los sectores 1, 5, 7 y 10 según el conjunto difuso fallos definido para la red de estudio

4.4.4 Unidades de decisión generadas para la fase de agregación

4.4.4.1 Espacio decisional

El espacio decisional que se expone a continuación ha sido dividido en ocho unidades de decisión (Figura 70), cada una de las cuales tendrá una matriz de decisión asociada. El número de unidades en las cuales se divide el espacio decisional debe ser determinado por el grupo experto en función del conocimiento que se tenga de la relación entre los tres criterios involucrados, y del grado de detalle con que se desee desarrollar el estudio. En presente ejemplo, el autor de esta tesis ha decidido dividir el espacio en esta forma pues considera que con ocho unidades de decisión se logra una construcción de matrices de agregación comprensible.

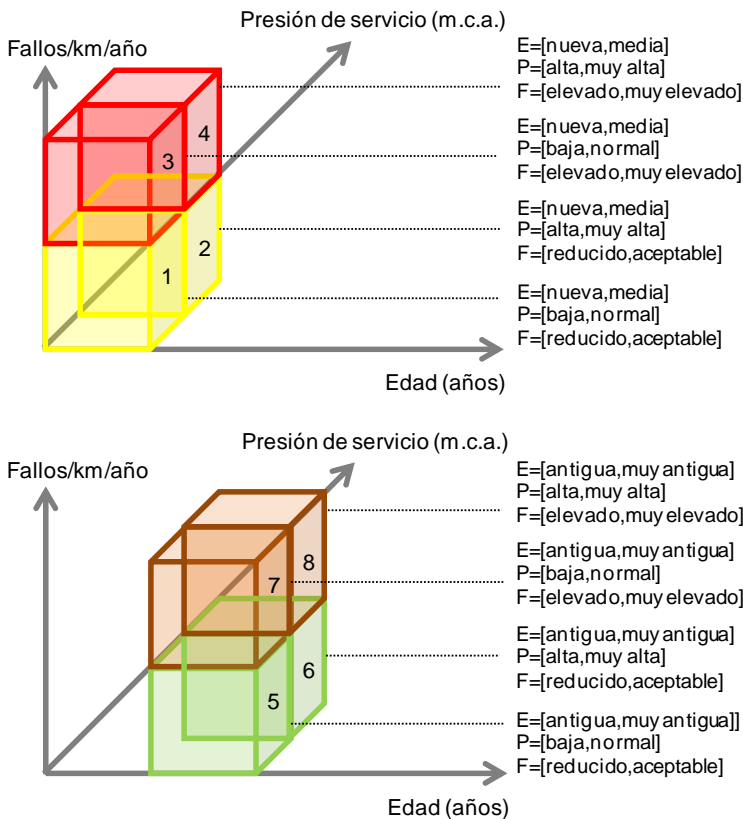


Figura 70. División del espacio decisional en ocho unidades de decisión

4.4.4.2 Matrices para cada unidad de decisión

Después de realizar un estudio minucioso de las bases de datos relacionadas con el inventario de tuberías, el grupo de expertos debe definir la posibilidad de falla asociada a cada una de las posibles combinaciones que se pueden generar entre los estados definidos para los criterios edad, presión y tasa de fallos. Esto se hace mediante el análisis de cada unidad decisional definida.

En este ejemplo se presentan ocho matrices definidas por el autor de este estudio, cada una de ellas correspondiente a una unidad decisional.

Tabla 18. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 1

Unidad decisional 1							
	nueva		baja		reducido		moderada
	nueva		baja		aceptable		moderada
	nueva		normal		reducido		moderada
Si	nueva	Y	normal	Y	aceptable	Entonces	moderada
Edad	media	Presión	baja	Fallos	reducido	Posibilidad	moderada
	media		baja		aceptable	falla	moderada
	media		normal		reducido		moderada
	media		normal		aceptable		moderada

Tabla 19. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 2

Unidad decisional 2							
	nueva		alta		reducido		moderada
	nueva		alta		aceptable		moderada
	nueva		muy alta		reducido		moderada
Si	nueva	Y	muy alta	Y	aceptable	Entonces	moderada
Edad	media	Presión	alta	Fallos	reducido	Posibilidad	moderada
	media		alta		aceptable	falla	moderada
	media		muy alta		reducido		moderada
	media		muy alta		aceptable		moderada

Las unidades decisionales 1 y 2 presentan una posibilidad de falla moderada, pues ellos difieren solamente en los estados de presión involucrados, y para una edad nueva o media presentan una tasa de fallos reducida o aceptable, en combinación con una presión de trabajo que puede ser baja, normal, alta o muy alta.

Tabla 20. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 3

Unidad decisional 3							
	nueva		baja		elevado		muysignif.
	nueva		baja		muy elevado		muysignif.
	nueva		normal		elevado		muysignif.
Si	nueva	Y	normal	Y	muy elevado	Entonces Posibilidad falla	muysignif.
Edad	media	Presión	baja	Fallos	elevado		muysignif.
	media		baja		muy elevado		muysignif.
	media		normal		elevado		muysignif.
	media		normal		muy elevado		muysignif.

Tabla 21. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 4

Unidad decisional 4							
	nueva		alta		elevado		muysignif.
	nueva		alta		muy elevado		muysignif.
	nueva		muy alta		elevado		muysignif.
Si	nueva	Y	muy alta	Y	muy elevado	Entonces Posibilidad falla	muysignif.
Edad	media	Presión	alta	Fallos	elevado		muysignif.
	media		alta		muy elevado		muysignif.
	media		muy alta		elevado		muysignif.
	media		muy alta		muy elevado		muysignif.

A las unidades decisionales 3 y 4 se les han asignado una posibilidad de falla muy significativa. Al igual que en los casos de las unidades 1 y 2, las unidades 3 y 4 solo son diferentes entre sí en los estados de presión involucrados.

Dado que las unidades 3 y 4 presentan tasas de fallo elevadas y muy elevadas, su posibilidad de falla es mayor a la de las unidades 1 y 2 (estas últimos presentan tasas de fallo reducidas o aceptables).

Tabla 22. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 5

Unidad decisional 5							
	antigua		baja		reducido		Poco signif.
	antigua		baja		aceptable		Poco signif.
	antigua		normal		reducido		Poco signif.
Si	antigua	Y	normal	Y	aceptable	Entonces Posibilidad falla	Poco signif.
Edad	muy antigua	Presión	baja	Fallos	reducido		Poco signif.
	muy antigua		baja		aceptable		Poco signif.
	muy antigua		normal		reducido		Poco signif.
	muy antigua		normal		aceptable		Poco signif.

Tabla 23. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 6

Unidad decisional 6							
Si Edad	antigua	Y Presión	alta	Y Fallos	reducido	Entonces Posibilidad falla	Poco signif.
	antigua		alta		aceptable		Poco signif.
	antigua		muy alta		reducido		Poco signif.
	antigua		muy alta		aceptable		Poco signif.
	muy antigua		alta		reducido		Poco signif.
	muy antigua		alta		aceptable		Poco signif.
	muy antigua		muy alta		reducido		Poco signif.
	muy antigua		muy alta		aceptable		Poco signif.

Las unidades decisionales 5 y 6 presentan una posibilidad de falla asociada poco significativa. Entre ellos difieren exclusivamente en los estados de presión, y a diferencia de las anteriores unidades decisionales, en estas dos últimas la edad se describe como antigua o muy antigua.

Estos dos estados de edad, relacionados con tasas de fallo establecidas tras el estudio de los registros de inventarios, y que sean clasificadas como reducidas o aceptables, conducen a pensar objetivamente que la posibilidad de fallo de las tuberías que se encuentren descritas en el entorno de estas dos unidades sean poco significativas

Por ejemplo, de una tubería de 100 de edad, con una tasa de fallos calculada tras el análisis de sus registros de intervenciones, de 0.005 fallos/km/año, y que trabaje a cualquier presión, se espera que no falle frecuentemente en el futuro. Lo anterior, sin embargo, puede ser controvertido por otro experto que exponga que la edad resulta ser un criterio fundamental para el establecimiento de la posibilidad de fallo.

Tabla 24. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 7

Unidad decisional 7							
Si Edad	antigua	Y Presión	baja	Y Fallos	elevado	Entonces Posibilidad falla	significativa
	antigua		baja		muy elevado		significativa
	antigua		normal		elevado		significativa
	antigua		normal		muy elevado		significativa
	muy antigua		baja		elevado		significativa
	muy antigua		baja		muy elevado		significativa
	muy antigua		normal		elevado		significativa
	muy antigua		normal		muy elevado		significativa

Tabla 25. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 8

Unidad decisional 8							
	antigua		alta		elevado		significativa
	antigua		alta		muy elevado		significativa
	antigua		muy alta		elevado		significativa
Si	antigua	Y	muy alta	Y	muy elevado	Entonces	significativa
Edad	muy antigua	Presión	alta	Fallos	elevado	Posibilidad	significativa
	muy antigua		alta		muy elevado	falla	significativa
	muy antigua		muy alta		elevado		significativa
	muy antigua		muy alta		muy elevado		significativa

Las unidades decisionales 7 y 8 difieren de las unidades 5 y 6 en la tasa de fallos definida tras la explotación de los registros de inventario. Las unidades 7 y 8 albergarán a las tuberías que presenten tasas de fallos elevadas o muy elevadas, y en consecuencia la posibilidad de falla futura será significativa.

4.4.5 Resultados de la fase de defuzificación

4.4.5.1 Conjunto difuso de posibilidad de falla

El conjunto difuso de posibilidad de falla se encuentra compuesto por cuatro números difusos, correspondientes a los estados posibles de falla incluidos en las matrices: poco significativa, moderada, significativa y muy significativa. El universo de discurso para la posibilidad de falla se da en porcentaje.

Se definió que los cuatro números difusos anteriores tuvieran forma trapezoidal, pues esta forma resulta adecuada al deseo del decisor, al poseer la característica de aportar una base superior que avala que tuberías con valores de posibilidad de falla en un rango (y no en un único valor puntual) tengan asociado el máximo valor de pertenencia al estado tratado. Por ejemplo, 3 tuberías con posibilidades de falla de 30, 35 y 40% pertenecerán totalmente al estado "moderada", es decir, su vector difuso asociado será, para las tres, igual a (0, 1, 0, 0).

Sin embargo, como se verá adelante, más que la definición del estado final de posibilidad de falla al que pertenezca la tubería, importa en mayor medida el valor defuzificado resultante, que se halla al calcular el centroide del área definida luego de finalizar el proceso de defuzificación (mediante la aplicación del método del centro de área). Este valor defuzificado es el que permite priorizar la tubería en vista de su necesidad de intervención.

Los valores en el universo de discurso (abscisas) de los cuatro vértices de cada trapecio descriptivo de los cuatro números difusos que conforman el conjunto resultado de posibilidad de falla, se definen a continuación.

$$\text{N. difuso posibilidad falla Poco Signif.} = [0,0,20,30] \quad \text{Ec. 80}$$

$$\text{N. difuso posibilidad falla Moderada} = [20,30,40,50] \quad \text{Ec. 81}$$

$$\text{N. difuso posibilidad falla Signif.} = [40,50,60,70] \quad \text{Ec. 82}$$

$$\text{N. difuso posibilidad falla MuySignif.} = [60,70,100,100] \quad \text{Ec. 83}$$

Lo anterior queda expresado en la Figura 71.

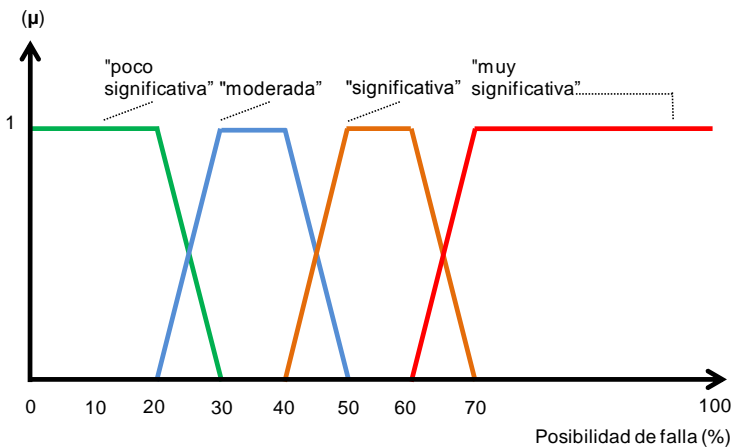


Figura 71. Conjunto difuso resultado de la posibilidad de falla

4.4.5.2 Gráficas resultantes del conjunto difuso posibilidad de falla

Con la intención de ilustrar gráficamente los resultados obtenidos, se presenta una selección de una gráfica por cada sector, desde la cual se obtiene el valor defuzificado perteneciente a la tubería asociada, y que posteriormente sirve para priorizar la tubería dentro del grupo.

Así, en total se presentan las gráficas de 4 tuberías con los siguientes identificadores: para el sector 1, S1-81771; para el sector 5, S5-46466; para el sector 7, S7-50189 y para el sector 10, S10-58331 (Figura 72 a Figura 75).

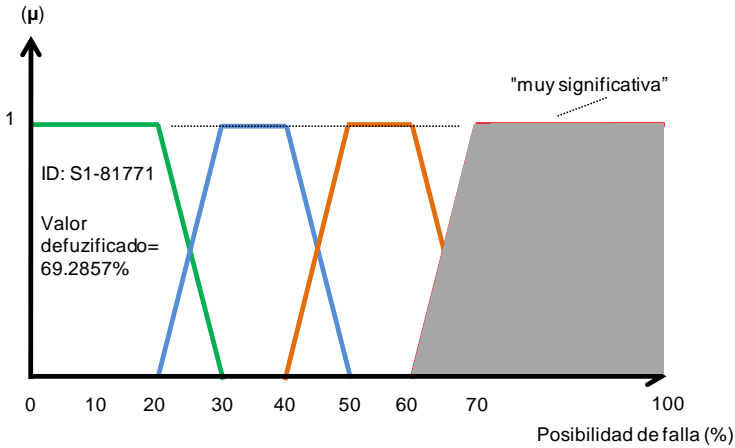


Figura 72. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S1-81771

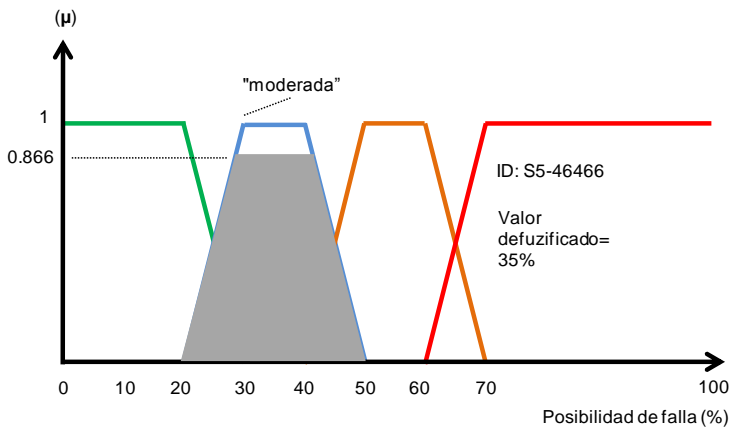


Figura 73. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S5-46466

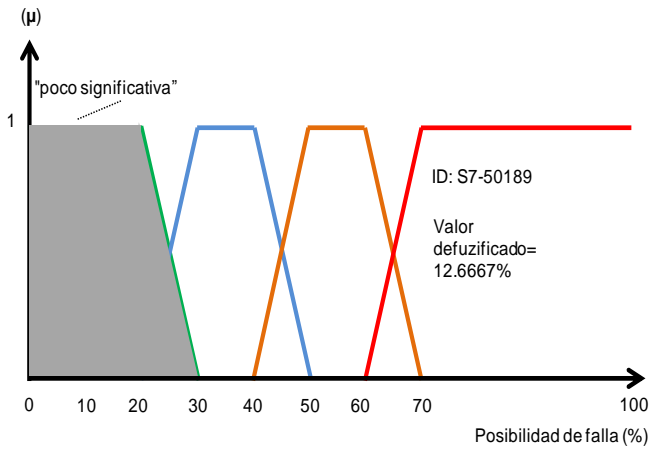


Figura 74. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S7-50189

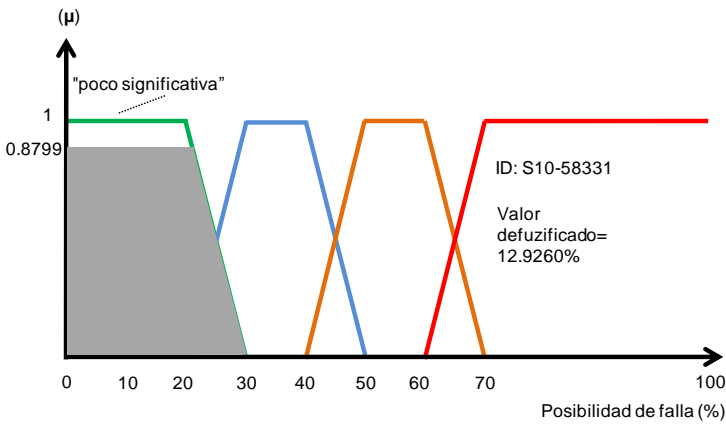


Figura 75. Área resultante del proceso de agregación y valor defuzificado para la tubería S10-58331

4.4.6 Lista priorizada de tuberías a la renovación

A continuación se presenta la lista de las 20 tuberías de la red que requieren intervención con mayor prioridad (Pr) en función de la edad, presión de servicio y tasa de fallos generada desde su historial de incidencias (Tabla 26).

Todas pertenecen al sector 1, pues es éste sector el que agrupa a las tuberías con algún tipo de fallo (se debe recordar que la definición de sectores se realizó mediante agrupaciones de tuberías con identificadores similares, y que se corresponden con sectores geográficos).

Estas tuberías llevan poco tiempo en operación (no más de 15 años, valor que constituye el vértice final del número difuso triangular "edad nueva", y la cresta del número difuso triangular "edad media") y sin embargo presentan ya un número de fallos por km y año importante (mayor a 0.3, que es el valor de la cresta del número difuso triangular "número de fallos elevado").

Lo anterior, combinado con presiones en su mayoría clasificadas como "altas" o "muy altas" (esto según los números difusos definidos para esta variable), ubican el estado actual de estas primeras tuberías, que urgen intervención, en la unidad de decisión 3. A esta unidad, según la opinión experta del decisor, se le debe asociar una posibilidad de falla "muy significativa". El valor numérico de la posibilidad de falla asociada a cada elemento, así lo demuestra.

De hecho, las primeras cinco tuberías obtienen una posibilidad de falla igual (69.29%), y coinciden en que teniendo una edad menor a 10 años, una presión de servicio promedio mayor a 50 m.c.a. y un número de fallos por km y año muy elevado.

La tubería con la mayor tasa de fallos (ID S1-66573), no es la que mayor urgencia a ser intervenida posee, pues el efecto del criterio presión de servicio (su presión de servicio, según la opinión experta es considerada como "normal") hace que se posicione en el puesto 13. Otras tuberías, como las de identificadores S1-66394 y S1-81679 no se encuentran priorizadas en los primeros 5 puestos, aun presentando tasas de fallos elevadas.

Sobre esta lista, debe notarse sin embargo, que los resultados obtenidos son bastante similares (entre la primera tubería y la clasificada en el puesto 20, solo hay una diferencia en valor porcentual de 2.0655). Esto viene dado por la definición misma de los números difusos característicos de cada criterio, y refleja la opinión de los expertos y la incertidumbre que ellos poseen sobre cómo definir cada estado constitutivo de cada criterio.

Una construcción diferente de estos números (que en definitiva representa la condición particular de cada red respecto a cada variable de estudio, y que la diferencia de otras) arrojará sin ninguna duda resultados distintos.

Esto debe ser así, pues no todas las tuberías deben ser consideradas antiguas si superan un mismo valor de edad, o su presión debe ser tenida en cuenta como muy alta si sobrepasa un valor típico obtenido en la literatura técnica, o su tasa de fallos clasificada como muy elevada si alcanza cierto umbral generalizado.

Tabla 26. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio

Pr.	Sector	ID tub.	Presión de servicio (m.c.a.)	Nº fallos / km / año	Edad (años)	Posibilidad falla (%)
1	1	59159	57.66	4.1174	9	69.2857
2	1	59768	54.88	20.0490	8	69.2857
3	1	59803	54.64	9.9620	8	69.2857
4	1	81771	50.19	5.7905	5	69.2857
5	1	82045	51.16	9.8691	5	69.2857
6	1	80222	39.17	12.5414	6	68.8950
7	1	81007	49.33	3.5412	7	68.6551
8	1	78799	38.4	10.5695	10	68.5330
9	1	66394	17.91	36.3524	4	68.3028
10	1	87197	41.06	26.7054	5	68.2887
11	1	77356	37.33	4.7778	13	68.0306
12	1	73804	17.18	6.9619	7	67.9603
13	1	66573	22.91	40.4571	4	67.9181
14	1	56922	23.71	0.8352	14	67.5432
15	1	89976	48.08	9.2100	13	67.4823
16	1	66452	16.11	9.4904	5	67.4589
17	1	62048	35.82	3.5056	7	67.3232
18	1	81679	42.13	34.1446	5	67.2857
19	1	81699	42.13	3.5542	5	67.2857
20	1	76871	47.8	0.7384	14	67.2202

Así, las particularidades del sistema deben verse reflejadas en la opinión experta que genera los conjuntos difusos, y además, en las matrices que los relacionan y que hacen parte del proceso que finalmente estima un valor de posibilidad de falla, valor sobre el cual se priorizan las acciones de renovación o rehabilitación, y en última instancia, la inversión del presupuesto destinado a este fin.

En contraposición, las tuberías con menor prioridad a la renovación (se muestran aquí las 20 últimas del total de tuberías) presentan edades avanzadas ("antiguas" o "muy antiguas" según el conjunto difuso descriptivo de la edad) y no registran ningún fallo en su historial. Esto hace que, aun cuando presión a la cual trabajan sea alta o muy alta, se les asocie una posibilidad de falla "poco significativa".

De las 10485 tuberías incluidas en el estudio, las últimas 2528 en la lista de prioridad presentan un valor de posibilidad de falla menor al 20%. Ninguna de ellas tiene registro de haber presentado algún fallo en su tiempo de operación, y sus edades siempre superan los 30 años. Son en general, conducciones que ya han estabilizado su grado de deterioro y de las cuales se espera que conserven una tasa de fallos muy baja en lo que resta de su vida útil.

Las últimas 255 tuberías de la lista tienen un estimado de posibilidad de fallo de 12.6667%, valor igual al de las 20 tuberías incluidas en la Tabla 27. Este valor comienza a aumentar variando las posiciones decimales de manera gradual, a medida que se inspecciona la lista alejándose del final de la misma.

Tabla 27. Lista de las 20 últimas tuberías de toda la red con menor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio

Pr.	Sector	ID tub.	Presión de servicio (m.c.a.)	Nº fallos / km / año	Edad (años)	Posibilidad falla (%)
20	7	50831	51.69	0.0000	47	12.6667
19	7	50850	54.26	0.0000	37	12.6667
18	8	51785	62.23	0.0000	45	12.6667
17	8	51786	60.42	0.0000	34	12.6667
16	8	52261	51.44	0.0000	43	12.6667
15	8	52265	51.41	0.0000	32	12.6667
14	8	52792	59.07	0.0000	55	12.6667
13	8	53118	52.7	0.0000	57	12.6667
12	8	53119	53.86	0.0000	57	12.6667
11	8	53120	53.21	0.0000	57	12.6667
10	8	53400	51.47	0.0000	44	12.6667
9	9	55837	52.49	0.0000	38	12.6667
8	10	59838	54.31	0.0000	49	12.6667
7	10	71786	58.19	0.0000	33	12.6667
6	10	71799	55.35	0.0000	33	12.6667
5	10	77194	65.38	0.0000	52	12.6667
4	10	88608	50.58	0.0000	36	12.6667
3	10	88628	50.19	0.0000	36	12.6667
2	10	88630	50.19	0.0000	36	12.6667
1	10	88682	50.01	0.0000	49	12.6667

Dado que la variación en la posibilidad de falla ocurre de manera paulatina y constante en las últimas 2528 tuberías, y que ellas pertenecen a diferentes sectores (incluso existen en este grupo de tuberías algunas del sector 1 que no registran fallos), podría pensarse que la no prioridad a la renovación es heterogénea en relación con los sectores definidos, lo cual difiere de la prioridad a la renovación, que se presenta particularmente en el sector 1.

Se incluye en la Tabla 28 las 20 tuberías de mayor prioridad a la renovación para cada uno de los 4 sectores definidos (S1, S5, S7 y S10), y que de forma ilustrativa se muestran en el cuerpo de este texto (en total se hizo este mismo estudio para 10 sectores).

Tabla 28. Lista de las 20 primeras tuberías de cada sector con mayor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio

Pr.	ID tub. (S1)	Pos. falla (%)	ID tub. (S5)	Pos. falla (%)	ID tub. (S7)	Pos. falla (%)	ID tub. (S10)	Pos. falla (%)
1	59159	69.2857	46302	35.0000	49957	35.0000	56818	35.0000
2	59768	69.2857	45631	35.0000	50005	35.0000	56819	35.0000
3	59803	69.2857	45645	35.0000	50006	35.0000	56821	35.0000
4	81771	69.2857	45651	35.0000	50118	35.0000	56824	35.0000
5	82045	69.2857	45691	35.0000	50134	35.0000	56826	35.0000
6	80222	68.8950	45700	35.0000	50137	35.0000	56828	35.0000
7	81007	68.6551	45701	35.0000	50140	35.0000	56829	35.0000
8	78799	68.5330	45702	35.0000	50151	35.0000	56831	35.0000
9	66394	68.3028	45713	35.0000	50223	35.0000	56836	35.0000
10	87197	68.2887	45880	35.0000	50240	35.0000	56837	35.0000
11	77356	68.0306	46038	35.0000	50319	35.0000	56839	35.0000
12	73804	67.9603	46096	35.0000	50329	35.0000	56842	35.0000
13	66573	67.9181	46103	35.0000	50337	35.0000	56843	35.0000
14	56922	67.5432	46105	35.0000	50359	35.0000	56846	35.0000
15	89976	67.4823	46110	35.0000	50361	35.0000	56847	35.0000
16	66452	67.4589	46131	35.0000	50469	35.0000	56848	35.0000
17	62048	67.3232	46135	35.0000	50471	35.0000	56849	35.0000
18	81679	67.2857	46136	35.0000	50473	35.0000	56857	35.0000
19	81699	67.2857	46138	35.0000	50475	35.0000	56862	35.0000
20	76871	67.2202	46140	35.0000	50476	35.0000	56876	35.0000

Las 20 tuberías que encabezan la lista del sector 1 son - como es de esperarse - las primeras de la lista que incluyen todas las tuberías de la red, pues es el sector 1 el que incluye, aunque no exclusivamente, a todas las tuberías con historial de fallos diferente de cero.

Los resultados de las tuberías del sector 5 muestran que las primeras 76 conducciones priorizadas presentan una posibilidad de falla del 35%, y en consecuencia tienen la misma urgencia a ser intervenidas si solo se consideran los tres criterios ya mencionados.

Para el sector 7 son 182 tuberías las que quedan bajo la misma condición, y para el sector 10 son 1049 elementos. Esto ocurre debido al planteamiento inicial de los números difusos que describen la edad, la presión y la tasa de fallos.

Como ya se dijo, una obtención de resultados diferentes puede generarse si se plantean más números difusos por cada variable, pues al abarcar el mismo universo de discurso, una mayor cantidad de números difusos (cada uno de ellos con un rango propio menor) generará una diferente clasificación para tuberías de edades, presiones y fallos similares y que quedaron bajo la misma condición en este ejemplo. De manera similar a la tabla anterior, la Tabla 29 contiene las 20 últimas tuberías con prioridad a la renovación para cada uno de los 4 sectores que se muestran en el texto.

Tabla 29. Lista de las 20 últimas tuberías de cada sector con menor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el estudio

Pr.	ID tub. (S1)	Pos. falla (%)	ID tub. (S5)	Pos. falla (%)	ID tub. (S7)	Pos. falla (%)	ID tub. (S10)	Pos. falla (%)
20	20700	12.7234	46914	12.6667	50176	12.6667	77959	12.8107
19	21024	12.7201	46918	12.6667	50177	12.6667	94062	12.7588
18	21142	12.7159	47123	12.6667	50183	12.6667	94361	12.7567
17	20631	12.7159	47140	12.6667	50185	12.6667	88343	12.7535
16	22591	12.7073	47144	12.6667	50188	12.6667	78270	12.7524
15	20996	12.6977	47147	12.6667	50189	12.6667	78242	12.7395
14	21196	12.6944	47413	12.6667	50197	12.6667	74674	12.7223
13	20754	12.6912	47989	12.6667	50358	12.6667	90125	12.7030
12	21007	12.6891	47990	12.6667	50368	12.6667	90127	12.6880
11	21004	12.6848	48081	12.6667	50523	12.6667	74772	12.6827
10	11398	12.6784	48083	12.6667	50524	12.6667	75509	12.6773
9	21016	12.6709	48085	12.6667	50688	12.6667	74804	12.6731
8	21018	12.6699	48087	12.6667	50747	12.6667	59838	12.6667
7	20500	12.6667	48091	12.6667	50748	12.6667	71786	12.6667
6	20543	12.6667	48094	12.6667	50749	12.6667	71799	12.6667
5	20765	12.6667	48095	12.6667	50752	12.6667	77194	12.6667
4	20771	12.6667	48108	12.6667	50756	12.6667	88608	12.6667
3	20794	12.6667	48109	12.6667	50758	12.6667	88628	12.6667
2	20800	12.6667	48110	12.6667	50831	12.6667	88630	12.6667
1	20890	12.6667	48113	12.6667	50850	12.6667	88682	12.6667

Los valores estimados de posibilidad de falla tras la aplicación de la metodología basada en cubos decisionales y Lógica Difusa arrojan resultados casi iguales para

todas las tuberías con poca prioridad a la renovación, sin importar el sector al que están asociadas.

Por supuesto, todas ellas tienen como condición común, una tasa de fallos nula, combinada con una edad considerada media, antigua o muy antigua. Debe notarse que aunque el sector 1 es el que aporta la mayoría de las tuberías con mayor prioridad de renovación, también tiene elementos que se encuentran en igualdad de condición con otros sectores, pues no ellos urgen intervención al considerar exclusivamente los criterios ya dichos.

4.4.7 Lista priorizada de sectores a la renovación

En consecuencia con lo observado en el análisis a nivel de tuberías individuales, se observa en la Tabla 30 que el sector 1 es el que presenta el promedio estimado de posibilidad de falla más alto. Este sector, como ya se ha dicho, incluye todos los elementos de la red que han sufrido algún fallo, en conjunto con otras tuberías que no tienen fallos asociados.

Los valores porcentuales de posibilidad de falla de los sectores 1 y 9 difieren en un valor importante (casi 8 puntos porcentuales) indicando la importancia que para la metodología, y en especial, para la opinión experta (que generó los conjuntos difusos) posee la tasa de fallos. Los sectores 5, y 6 presentan posibilidades de falla 50% menores a la del sector 1, esto en consecuencia con valores nulos de fallos para todas sus tuberías, en combinación con edades avanzadas que hacen esperar que la tasa de fallos sea estable.

Tabla 30. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación

Pr.	Sector	Posibilidad falla (%)
1	1	40.3547
2	9	32.4227
3	10	30.6625
4	8	29.0376
5	2	27.5837
6	3	25.4085
7	4	23.3874
8	7	22.2138
9	5	18.3471
10	6	17.6212

Debe notarse además, que entre el puesto de prioridad 2 (ocupado por el sector 9) y el puesto de prioridad 8 (ocupado por el sector 7) no existen diferencias importantes entre sectores contiguos. Esto debe contrastarse con la aplicación de esta misma metodología, pero considerando criterios diferentes a los incluidos en este ejemplo de aplicación. Por supuesto, para poder hacer tal valoración, resulta necesario disponer de una base de datos más extensa, que incluya valores representativos de los nuevos criterios a considerar.

4.4.8 Sensibilidad de los resultados entre espacio decisional tridimensional (Edad, Presión y Fallos considerados simultáneamente) y ponderación de dos espacios decisionales bidimensionales (50%: Edad y Fallos, 50%: Presión y Fallos)

Para concluir mejor a cerca de las fortalezas y debilidades de la metodología que aquí se plantea, basada en la definición de cubos decisionales que involucran tres criterios de manera simultánea, y la posterior utilización de la Lógica Difusa, se decidió contrastar sus resultados mediante la aplicación de una metodología alterna.

Dicha metodología consiste en la aplicación de la Lógica Difusa a dos parejas de criterios, y posteriormente, mediante la asignación de pesos de importancia iguales a cada pareja, el cálculo de un resultado final de posibilidad de falla. En vista de la importancia que cobra la tasa de fallos en los resultados finales del ejemplo de aplicación de la metodología mediante cubos decisionales, esta variable se determinó que estuviera presente en las dos parejas de criterios de la metodología alterna.

Así pues, las parejas de criterios incluidas en la metodología alterna son: edad - tasa de fallos (su resultado tiene un peso de importancia de 50% en el resultado final), y presión de servicio - tasa de fallos (su resultado tiene un peso de importancia de 50% en el resultado final). Nótese que los tres criterios o variables incluidos en la metodología por cubos decisionales, son los mismos elegidos para hacer parte de la metodología alterna (edad, presión de servicio y número de fallos/km/año). Se quiere que sea así, para eliminar los efectos adversos que puede

tener el comparar diferentes metodologías que incluyan en su estructura a criterios diferentes.

La comparación de ambas metodologías para las primeras 20 posiciones de prioridad se encuentra en la Tabla 31. Para ambas metodologías, todas las tuberías en estas primeras 20 posiciones corresponden al sector 1. Se espera que al dejar de considerar la tasa de fallos como criterio de estudio, los resultados incluyan tuberías de otros sectores. En cualquier caso, el grupo experto es el encargado de definir el listado de criterios a considerar.

Para las primeras 20 posiciones de prioridad (posiciones de alta prioridad a la renovación), el análisis de sensibilidad arroja que existen 5 tuberías que se encuentran en ambas listas (25% de coincidencias de alta prioridad). Aún más importante resulta el hecho, que las 5 tuberías que constituyen casos de coincidencia de alta prioridad, resultan menos prioritarias en la aplicación de la metodología por cubos decisionales, respecto a la metodología alterna mediante parejas y pesos de importancia.

Tabla 31. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, según la metodología de cubos decisionales y Lógica Difusa, y lista de prioridad según la metodología alterna de pesos de importancia para parejas de criterios y Lógica Difusa

Pr.	E, P y F simultáneamente			E y F (50%), P y F (50%)		
	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
1	1	59159	69.2857	1	66394	76.9182
2	1	59768	69.2857	1	50290	76.5618
3	1	59803	69.2857	1	66452	75.7109
4	1	81771	69.2857	1	73804	75.6217
5	1	82045	69.2857	1	40954	75.2792
6	1	80222	68.8950	1	48408	74.6926
7	1	81007	68.6551	1	50209	74.0088
8	1	78799	68.5330	1	41002	73.8437
9	1	66394	68.3028	1	56922	73.7229
10	1	87197	68.2887	1	66573	73.6202
11	1	77356	68.0306	1	37021	73.3885
12	1	73804	67.9603	1	46036	72.6979
13	1	66573	67.9181	1	47068	72.6109
14	1	56922	67.5432	1	45531	71.9304
15	1	89976	67.4823	1	47567	71.8694
16	1	66452	67.4589	1	73213	71.8694
17	1	62048	67.3232	1	48039	71.7881
18	1	81679	67.2857	1	48050	71.7424
19	1	81699	67.2857	1	66681	71.7231
20	1	76871	67.2202	1	56611	71.5095

Sin embargo, la importancia dada a cada pareja de criterios de la metodología alterna mediante la asignación de su peso genera variaciones en sus resultados finales. La relación simultánea de las tres variables mediante cubos decisionales que involucran matrices de decisión con dos conectores lógicos elimina la necesidad de asignar pesos de importancia, y en consecuencia, elimina la incertidumbre asociada a los mismos pesos.

A partir de los resultados para tuberías individuales mediante las dos metodologías, se genera la Tabla 32, la cual muestra la variación en la prioridad de los sectores. Para cada sector, su posibilidad de falla resultante es el promedio de las posibilidades de falla de los elementos que lo componen.

Como era de esperarse, el sector 1, por la característica diferenciadora de sus elementos, ocupa la primera posición de prioridad a la renovación para ambas metodologías. Puede notarse además que las dos primeras posiciones de prioridad resultan casos de coincidencia (sectores 1 y 9). La posición 4 también constituye un caso positivo (sector 8).

En total, el análisis de sensibilidad por sectores arroja un 33% de coincidencias. Este porcentaje hace alusión enteramente a casos de alta prioridad (posiciones 1, 2 y 4).

Tabla 32. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación mediante la metodología de cubos decisionales y Lógica Difusa, y lista de prioridad de sectores según la metodología alterna de pesos de importancia para parejas de criterios y Lógica Difusa

Pr.	E, P y F simultáneamente		E y F (50%), P y F (50%)	
	Sector	Posibilidad falla (%)	Sector	Posibilidad falla (%)
1	1	40.3547	1	40.9823
2	9	32.4227	9	32.8739
3	10	30.6625	5	32.2155
4	8	29.0376	8	30.3953
5	2	27.5837	4	29.5421
6	3	25.4085	10	28.9920
7	4	23.3874	7	27.7622
8	7	22.2138	6	26.8749
9	5	18.3471	2	24.2339
10	6	17.6212	3	24.0396

4.4.9 Sensibilidad de los resultados ante la variación de los números difusos iniciales de la variable Edad

Para este análisis de sensibilidad en las tuberías que mayor intervención urge, se afectaron los números difusos iniciales para el criterio edad, de la siguiente manera:

$$\text{Núm. difuso edad nueva} = [0,0,30] \quad \text{Ec. 84}$$

$$\text{Núm. difuso edad media} = [0,30,60] \quad \text{Ec. 85}$$

$$\text{Núm. difuso edad antigua} = [30,60,90] \quad \text{Ec. 86}$$

$$\text{Núm. difuso edad muy antigua} = [60,90,110] \quad \text{Ec. 87}$$

En consecuencia, de las 20 tuberías que conformaban la lista inicial más prioritaria de conducciones a ser intervenidas, solo permanece el 50%. De ese 50% sobreviviente (10 tuberías), las 5 primeras permanecen en los 5 primeros puestos, y las restantes 5 decaen en prioridad a la renovación.

Las tuberías más antiguas del grupo inicial de 20 conservan o mejoran su prioridad: la tubería 81771 con 14 años de edad, conserva su puesto 4, y la tubería 56922, también con 14 años, asciende 4 puestos (del puesto 14 al 10). Esto pasa, pues los nuevos números difusos para esta variable hacen que una tubería de una edad dada sea considerada más nueva que en el estudio inicial.

Esta condición, combinada con los mismos números difusos de presión y fallos, genera consecuentemente una mayor prioridad a la renovación según la opinión experta aquí utilizada (Tabla 33).

La variación propuesta en los números difusos descriptivos de la variable edad, no aporta grandes cambios en los resultados por sectores, relativos al orden de priorización. Solamente se permutan los puestos 7 y 8 (correspondientes a los sectores 7 y 4). Los demás sectores permanecen en su misma posición de prioridad.

Tabla 33. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Edad.

Pr.	Variación en Difusos Edad			Resultados sin variación		
	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
1	1	59159	69.2857	1	59159	69.2857
2	1	59768	69.2857	1	59768	69.2857
3	1	59803	69.2857	1	59803	69.2857
4	1	81771	69.2857	1	81771	69.2857
5	1	82045	69.2857	1	82045	69.2857
6	1	47068	69.2480	1	80222	68.8950
7	1	50290	69.1115	1	81007	68.6551
8	1	37991	69.0785	1	78799	68.5330
9	1	22613	69.0597	1	66394	68.3028
10	1	80222	68.8950	1	87197	68.2887
11	1	48408	68.8197	1	77356	68.0306
12	1	50128	68.7962	1	73804	67.9603
13	1	52735	68.6645	1	66573	67.9181
14	1	81007	68.6551	1	56922	67.5432
15	1	78799	68.5330	1	89976	67.4823
16	1	45074	68.4860	1	66452	67.4589
17	1	66394	68.3028	1	62048	67.3232
18	1	76314	68.2887	1	81679	67.2857
19	1	87197	68.2887	1	81699	67.2857
20	1	46036	68.0588	1	76871	67.2202

Sí se nota, un aumento generalizado de la posibilidad de falla de cada sector, explicado por el aumento de las posibilidades de falla de los elementos individuales que los conforman.

Tabla 34. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Edad.

Pr.	Resultados con variación en difusos Edad		Resultados sin variación	
	Sector	Posibilidad falla (%)	Sector	Posibilidad falla (%)
1	1	45.0498	1	40.3547
2	9	34.0505	9	32.4227
3	10	33.8826	10	30.6625
4	8	33.4062	8	29.0376
5	2	33.2341	2	27.5837
6	3	33.0848	3	25.4085
7	7	31.1586	4	23.3874
8	4	30.1096	7	22.2138
9	5	27.8272	5	18.3471
10	6	27.7210	6	17.6212

Esto, justificado como ya se dijo por un aumento de los casos en que una tubería es considerada nueva, y que en conjunto con los mismos números difusos iniciales para presión y tasa de fallos, genera prioridades individuales mayores, y como consecuencia, promedios por sector también mayores.

4.4.10 Sensibilidad de los resultados ante la variación de los números difusos iniciales de la variable Presión

En este análisis de sensibilidad enfocado a detectar variaciones en las tuberías de mayor urgencia a la renovación, se plantearon los siguientes cambios en los números difusos iniciales para el criterio presión:

Núm. difuso triangular presión baja = [0,0,30] *Ec. 88*

Núm. difuso triangular presión normal = [0,30,50] *Ec. 89*

Núm. difuso triangular presión alta = [30,50,70] *Ec. 90*

Núm. difuso triangular edad muy alta = [50,70,100] *Ec. 91*

Estos nuevos números difusos implican que la presión de una tubería será considerada baja o normal aún con valores de este criterio crecamos a 30 m.c.a. (en el estudio inicial, este valor umbral era 20 m.c.a.)

Como consecuencia de lo anterior, de las 20 tuberías que conformaban la lista inicial más prioritaria de conducciones a ser intervenidas, tan solo permanecen en el nuevo listado 3 de ellas (15%). De esas 3 tuberías, 2 aumentaron su prioridad a la renovación (Tabla 35).

Así pues, en la parte alta del listado de las más de 10000 tuberías, si se toma como muestra representativa lo que ocurre en los 20 primeros puestos, se nota que la metodología resulta especialmente sensible a priorizar tuberías cuya presión de servicio es considerada baja o normal (los porcentajes de esta muestra permiten concluir que la metodología es más sensible a variaciones en el criterio presión que en el criterio edad).

Por supuesto, la anterior afirmación es válida solo cuando se adoptan las matrices de decisión actualmente utilizadas en el proceso de agregación.

Tabla 35. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Presión.

Pr.	Variación en Difusos Presión			Resultados sin variación		
	Sector	ID tub.	Pos. falla(%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
1	1	81771	69.1962	1	59159	69.2857
2	1	38580	69.1852	1	59768	69.2857
3	1	93109	69.0973	1	59803	69.2857
4	1	66392	69.0158	1	81771	69.2857
5	1	81007	68.9703	1	82045	69.2857
6	1	75008	68.8526	1	80222	68.8950
7	1	82045	68.7398	1	81007	68.6551
8	1	93077	68.7257	1	78799	68.5330
9	1	66453	68.6395	1	66394	68.3028
10	1	40530	68.5048	1	87197	68.2887
11	1	89976	68.3826	1	77356	68.0306
12	1	51840	68.3200	1	73804	67.9603
13	1	76871	68.2512	1	66573	67.9181
14	1	87199	68.2136	1	56922	67.5432
15	1	75206	68.1260	1	89976	67.4823
16	1	38799	68.0447	1	66452	67.4589
17	1	44355	67.7962	1	62048	67.3232
18	1	64393	67.7634	1	81679	67.2857
19	1	62745	67.7540	1	81699	67.2857
20	1	38302	67.7353	1	76871	67.2202

Al igual que en el análisis de sensibilidad para la variable edad, en este análisis no se notan mayores cambios en los resultados por sectores referidos al orden de priorización. Tan sólo se permutan los puestos 6 y 7 (correspondientes a los sectores 4 y 3). Los demás sectores permanecen en su misma posición de prioridad.

El sector 3 varía su prioridad a la renovación, tanto para el estudio de sensibilidad debido a variaciones en los conjuntos difusos de la variable edad (epígrafe anterior), como para el presente estudio de sensibilidad. Ello sugiere la necesidad de un posterior estudio de los elementos que lo conforman.

Tabla 36. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Presión.

Pr.	Resultados con variación en difusos Presión		Resultados sin variación	
	Sector	Posibilidad falla (%)	Sector	Posibilidad falla (%)
1	1	41.1749	1	40.3547
2	9	33.2662	9	32.4227
3	10	31.5235	10	30.6625
4	8	30.4974	8	29.0376
5	2	28.3648	2	27.5837
6	4	26.5037	3	25.4085
7	3	26.3190	4	23.3874
8	7	25.5054	7	22.2138
9	5	24.1726	5	18.3471
10	6	23.2152	6	17.6212

Al igual que en el estudio de sensibilidad para la variable edad, en el presente estudio (Tabla 36) se identifica un aumento generalizado de la posibilidad de falla de cada sector (justificado por el aumento de las posibilidades de falla de los elementos individuales que los conforman).

4.4.11 Sensibilidad de los resultados ante la variación de los números difusos iniciales de la variable Número de fallos/(km*año)

En el análisis de sensibilidad tras incluir variaciones en el conjunto difuso descriptivo de la variable tasa de fallos, se hicieron los siguientes cambios:

$$\text{Núm. difuso triangular fallos reducido} = [0,0,0.2] \quad \text{Ec. 92}$$

$$\text{Núm. difuso triangular fallos aceptable} = [0,0.2,0.4] \quad \text{Ec. 93}$$

$$\text{Núm. difuso triangular fallos elevado} = [0.2,0.4,0.6] \quad \text{Ec. 94}$$

$$\text{Núm. difuso triangular fallos muy elevado} = [0.4,0.6,50] \quad \text{Ec. 95}$$

Después de aplicar la metodología propuesta con estos cambios, no se genera ninguna variación ni en la posición ni en la posibilidad de falla de las tuberías que inicialmente ocupaban las 20 primeras posiciones de la tabla.

Ello obedece a que es en el sector 1 donde se encuentran todas las tuberías de la red con algún fallo registrado, y que dentro de dicho sector, de las 20 tuberías que ocupan la lista inicial de priorización, la que registra una menor tasa de fallos es la S1-76871, y su tasa es de 0.7384 fallos/km/año.

Esta tasa no se ve afectada por los cambios introducidos a los números difusos del criterio, y en consecuencia ninguna otra de la lista se verá afectada, pues todas las demás registran tasas superiores.

Ello implica, que tanto en el estudio inicial, como en este análisis de sensibilidad, las 20 tuberías resultan con un número de fallos/km/año considerado muy alto, con un valor de pertenencia para este estado siempre igual a 1.

No se detecta entonces sensibilidad alguna a variaciones en este criterio para las 20 primeras tuberías de la lista, si bien se tiene claro que se pueden generar cambios si se plantean números difusos diferentes, de menor amplitud en su universo de discurso (Tabla 37).

Tabla 37. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Número de fallos/km/año.

Pr.	Variación en Difusos N° fallos/km/año			Resultados sin variación		
	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
1	1	59159	69.2857	1	59159	69.2857
2	1	59768	69.2857	1	59768	69.2857
3	1	59803	69.2857	1	59803	69.2857
4	1	81771	69.2857	1	81771	69.2857
5	1	82045	69.2857	1	82045	69.2857
6	1	80222	68.8950	1	80222	68.8950
7	1	81007	68.6551	1	81007	68.6551
8	1	78799	68.5330	1	78799	68.5330
9	1	66394	68.3028	1	66394	68.3028
10	1	87197	68.2887	1	87197	68.2887
11	1	77356	68.0306	1	77356	68.0306
12	1	73804	67.9603	1	73804	67.9603
13	1	66573	67.9181	1	66573	67.9181
14	1	56922	67.5432	1	56922	67.5432

Pr.	Variación en Difusos N° fallos/km/año			Resultados sin variación		
	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
15	1	89976	67.4823	1	89976	67.4823
16	1	66452	67.4589	1	66452	67.4589
17	1	62048	67.3232	1	62048	67.3232
18	1	81679	67.2857	1	81679	67.2857
19	1	81699	67.2857	1	81699	67.2857
20	1	76871	67.2202	1	76871	67.2202

Las variaciones impuestas al conjunto difuso descriptivo de la tasa de fallos involucra disminuciones en la posibilidad de falla de elementos del sector 1 no incluidos dentro de los 20 primeros puestos de la lista, y en consecuencia, una disminución de su posibilidad de falla promedio.

Los restantes sectores, que no contabilizan tuberías con fallos, permanecen igual después de la variación en el conjunto difuso correspondiente (Tabla 38).

Tabla 38. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en los números difusos del criterio Número de fallos/km/año

Pr.	Resultados con variación en difusos N° fallos/km/año		Resultados sin variación	
	Sector	Posibilidad falla (%)	Sector	Posibilidad falla (%)
1	1	38.0188	1	40.3547
2	9	32.4227	9	32.4227
3	10	30.6625	10	30.6625
4	8	29.0376	8	29.0376
5	2	27.5837	2	27.5837
6	3	25.4085	3	25.4085
7	4	23.3874	4	23.3874
8	7	22.2138	7	22.2138
9	5	18.3471	5	18.3471
10	6	17.6212	6	17.6212

Aquí se evidencia además la particularidad de la base de datos que sirve para construir este ejemplo. En ella, todas las tuberías con registros de fallos se encuentran organizadas con identificadores contiguos, y en consecuencia con los parámetros utilizados en este ejemplo, se ubican en un sólo sector (S1).

Esto conduce, como se mencionó en apartes anteriores de este documento, a una futura revisión de esta base de datos, y a contrastar la misma con imágenes del sistema de información geográfica con la finalidad de establecer si estas tuberías,

en efecto (y como se espera), se encuentran en un mismo sitio geográfico, o si bien, la actual base de datos omite información de fallos de otras tuberías.

4.4.12 Sensibilidad de los resultados ante la variación de las matrices de agregación

Para este análisis de sensibilidad se efectuaron los cambios plasmados en la Tabla 39. Estos cambios corresponden, en general, con una opinión experta diferente, que le asigna una mayor posibilidad de falla a las tuberías que se clasifican en los cubos decisionales 5, 6, 7 y 8, y que implica que las tuberías más antiguas (para mayor ilustración, ver Figura 70) se encuentran más propensas a la ocurrencia de una rotura, un colapso o una pérdida de sus capacidades operativas.

Simultáneamente, esta nueva opinión experta considera que las conducciones clasificadas en los cubos decisionales 1, 2, 3 y 4 (esto es, las tuberías más jóvenes de la red) poseen una menor posibilidad de falla cuando se consideren bajo la metodología propuesta, los criterios edad, presión, y tasa de fallos.

Al aplicar la metodología propuesta, las tuberías del sector 1 (y entre las de este sector, aquellas que presentan registro de fallos) conservan la mayor prioridad de intervención. Sin embargo, ninguna tubería del sector 1, de las que anteriormente conformaban la lista de las 20 primeras con prioridad a la renovación, aparece en el nuevo listado (Tabla 40).

Tabla 39. Variaciones en las matrices decisionales que hacen parte del proceso de agregación

	1		Moderada		Poco significativa
	2		Moderada		Poco significativa
	3		Muy significativa		Significativa
	4		Muy significativa		Significativa
Cubo decisional	5	Posibilidad falla inicial	Poco significativa	Posibilidad falla nueva	Moderada
	6		Poco significativa		Moderada
	7		Significativa		Muy significativa
	8		Significativa		Muy significativa

La metodología resulta entonces, altamente sensible a cambios en las matrices de decisión. Esto es lo esperado de acuerdo a la naturaleza de la Lógica Difusa, que consiste en recoger y dar importancia a los deseos del decisor, permitiendo plasmarlos de forma matemática, y transfiriendo la incertidumbre de los mismos al resultado final.

Las nuevas tuberías integrantes de la lista poseen valores de posibilidades de falla similares a los de las tuberías inicialmente priorizadas. Estas nuevas tuberías se encuentran en los puestos superiores, pues sus edades son altas, tienen registro de fallos no nulos, y en consecuencia se afectan en mayor medida por las nuevas directrices de la decisión experta que conforman las matrices.

En el presente análisis de sensibilidad, la tasa de fallos, que en el estudio inicial resultaba determinante, pasa a ser un criterio complementario de la edad: las primeras 5 tuberías de la lista poseen edades entre los 33 y los 45 años (las primeras 5 tuberías del estudio inicial poseen edades entre los 5 y 9 años), y estas primeras 5 tuberías tienen asociadas tasas de fallos bajas, entre 0.20 y 1.26 fallos/(km*año) (las primeras 5 tuberías del estudio inicial poseen tasas entre 4 y 10 fallos/[km*año]).

La presión de servicio no resulta ser en este análisis de sensibilidad, un criterio diferenciador: en las primeras 5 tuberías de la lista de este análisis, la presión oscila entre 52.18 y 58.39 m.c.a. (las primeras 5 tuberías del estudio inicial presentan presiones entre 50.19 y 59.66 m.c.a.)

El orden de prioridad en este último análisis coincide con un orden ascendente en los identificadores de las conducciones. Dado que la edad resulta fundamental en este análisis, la coincidencia de orden de prioridad para el mismo, con el orden del identificador, denota que en la base de datos utilizada para el ejemplo la fecha de instalación tiene relación con la forma de asignación de identificadores, esto además de la ubicación geográfica de los elementos.

El análisis de sectores deja ver que los efectos de las tuberías que presentan historial de fallos siguen siendo importantes, pues el sector 1 continúa en la primera posición, aunque con una menor posibilidad de falla que la que se le asocia en el estudio inicial.

Tabla 40. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.

Pr.	Variación en matriz de agregación			Resultados sin variación		
	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
1	1	20342	69.2857	1	59159	69.2857
2	1	37009	69.2857	1	59768	69.2857
3	1	37042	69.2857	1	59803	69.2857
4	1	37509	69.2857	1	81771	69.2857
5	1	44697	69.2857	1	82045	69.2857
6	1	44718	69.2857	1	80222	68.8950
7	1	44761	69.2857	1	81007	68.6551
8	1	45421	69.2857	1	78799	68.5330
9	1	45632	69.2857	1	66394	68.3028
10	1	48090	69.2857	1	87197	68.2887
11	1	48093	69.2857	1	77356	68.0306
12	1	48368	69.2857	1	73804	67.9603
13	1	48373	69.2857	1	66573	67.9181
14	1	48375	69.2857	1	56922	67.5432
15	1	48585	69.2857	1	89976	67.4823
16	1	50175	69.2857	1	66452	67.4589
17	1	50181	69.2857	1	62048	67.3232
18	1	50184	69.2857	1	81679	67.2857
19	1	77288	69.2857	1	81699	67.2857
20	1	87658	69.2857	1	76871	67.2202

El orden de los restantes sectores sufre cambios drásticos, que vienen dados por las edades de las tuberías que los conforman: el sector 6, que agrupa tuberías antiguas, pasa del décimo lugar al segundo.

Tabla 41. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.

Pr.	Resultados con variación en matriz de agregación		Resultados sin variación	
	Sector	Posibilidad falla (%)	Sector	Posibilidad falla (%)
1	1	36.6168	1	40.3547
2	6	29.6359	9	32.4227
3	5	29.2057	10	30.6625
4	7	24.8950	8	29.0376
5	4	24.1470	2	27.5837
6	3	21.8447	3	25.4085
7	2	19.6494	4	23.3874
8	8	18.6500	7	22.2138
9	10	17.1689	5	18.3471
10	9	15.7010	6	17.6212

Un efecto similar sucede con los sectores 5, 7 y 4, que se encontraban en los puestos 7, 8 y 9, y ahora pasan a los puestos 3, 4 y 5. No solo las posiciones en la lista, sino además las tasas de fallos de estos últimos tres sectores, aumentaron considerablemente.

4.4.13 Criterios utilizados para conformar un segundo espacio decisional

Con la intención de ilustrar la forma en que se pueden agregar en una segunda iteración varios espacios de decisión, y de esta manera incluir tantos criterios como se requiera, a continuación se muestran los resultados de prioridad a la intervención mediante renovación/sustitución (tanto de tuberías como de sectores) desde la definición de un segundo espacio decisional.

Para este caso, los apartados seguidos en la descripción de la metodología son similares a los utilizados en el primer espacio, aunque su abordaje se hace de una forma más general. La red de abastecimiento, y específicamente, la muestra de tuberías sobre la cual se aplica la metodología es la misma que aquella usada para el trabajo con el primer espacio decisional (10485 conducciones de la red de abastecimiento de Alicante).

Este espacio decisional se encuentra conformado por los criterios diámetro, longitud y condiciones habituales de tráfico. Los dos primeros criterios constituyen características propias del elemento que se definen desde la etapa de diseño de la red, y que no cambian bajo condiciones normales de funcionamiento, hasta que se determina que se debe realizar una ampliación o corrección en el diseño.

Las condiciones habituales de tráfico tampoco deben cambiar sustancialmente en el corto o mediano plazo, si bien este criterio resulta más dinámico que los dos primeros, pues el crecimiento propio de las ciudades puede generar algunos cambios en las cargas de tráfico durante la vida útil de la tubería. Estos cambios son sin embargo aleatorios, difíciles de estimar y pueden no producirse.

Así pues, el espacio decisional caracterizado por el diámetro, la longitud y las condiciones habituales de tráfico de la tubería, puede considerarse mucho menos dependiente del tiempo que el primer espacio decisional (conformado por los criterios edad, presión media de servicio y frecuencia de fallos). Los tres criterios se incluyen, pues en el análisis del riesgo, todos ellos pueden quedar involucrados a diferentes niveles.

Además, es importante mencionar que estos tres criterios aparecen en la mayoría de las bases de datos de gestión del patrimonio infraestructural, con lo cual

la información requerida para definir este espacio decisional, está generalmente disponible.

4.4.14 Resultados de la fase de fuzificación del segundo espacio decisional

4.4.14.1 Números difusos para el criterio diámetro

Para el caso de la muestra poblacional de estudio (tuberías de hormigón) se ha definido el siguiente conjunto de números difusos triangulares, característico del criterio diámetro. El universo de discurso se encuentra en unidades de milímetros (mm). En caso de incluir este criterio para otros estudios, el presente conjunto debe actualizarse en función del material que se desee evaluar.

Núm. difuso triangular diámetro reducido = $[0,0,150]$ *Ec. 96*

Núm. difuso triangular diámetro medio = $[0,150,300]$ *Ec. 97*

Núm. difuso triangular diámetro grande = $[150,300,450]$ *Ec. 98*

Núm. difuso triangular diámetro muy grande = $[300,450,1000]$ *Ec. 99*

4.4.14.2 Números difusos para el criterio longitud

El conjunto de números difusos triangulares que definen el comportamiento del criterio longitud posee un universo de discurso cuyas unidades se encuentran en metros (m).

Núm. difuso triangular longitud corta = $[0,0,5]$ *Ec. 100*

Núm. difuso triangular longitud media = $[0,5,10]$ *Ec. 101*

Núm. difuso triangular longitud larga = $[5,10,15]$ *Ec. 102*

Núm. difuso triangular longitud muy larga = $[10,15,1000]$ *Ec. 103*

4.4.14.3 Números difusos para el criterio condición habitual de tráfico

Los registros sobre condición habitual de tráfico a la que se ven expuestas las tuberías, suelen presentarse en las bases de datos en una forma semántica, más que en datos numéricos. En el ejemplo de aplicación, la base de datos incluye cuatro clasificaciones: tráfico en acera, tráfico normal, tráfico pesado y tráfico muy pesado. Específicamente para el caso de la muestra de tuberías estudiadas (elementos de hormigón), solamente se encontraron los tres primeros tipos.

Para poder aplicar la metodología, se hizo necesario implementar un paso inicial, en el cual a cada clasificación de tráfico semántica se le asigna un valor numérico porcentual: al tráfico en acera se le asigna un valor de 10 (sobre un 100% que representa el tráfico muy pesado, y que se considera el más desfavorable de todos los que puede soportar la tubería), al tráfico normal se le asigna un valor de 40, al tráfico pesado se le asigna un valor de 70, y al tráfico muy pesado, un valor de 100.

Esta asignación deja abierta la posibilidad de incluir a futuro nuevas clasificaciones semánticas (y consecuentemente, nuevos valores numéricos) que puedan aparecer en la base de datos; por ejemplo, tráfico sobre zona verde, tráfico sobre aparcamientos, entre otros.

Hecho lo anterior, se puede seguir el procedimiento regular, consistente en definir un conjunto de números difusos (en este caso, triangulares) que describan el comportamiento del criterio. Este conjunto difuso tiene asociado un universo de discurso entre 0 y 100%.

Núm. difuso triangular tráfico liviano = $[0,0,30]$ Ec. 104

Núm. difuso triangular tráfico normal = $[0,30,60]$ Ec. 105

Núm. difuso triangular tráfico pesado = $[30,60,90]$ Ec. 106

Núm. difuso triangular tráfico muy pesado = $[60,90,100]$ Ec. 107

4.4.15 Unidades de decisión generadas para la fase de agregación del segundo espacio decisional

4.4.15.1 Espacio decisional

Al igual que en la aplicación de la metodología para el primer espacio de decisión, este espacio ha sido dividido en ocho unidades de decisión (Figura 76), cada una de los cuales tendrá una matriz de decisión asociada.

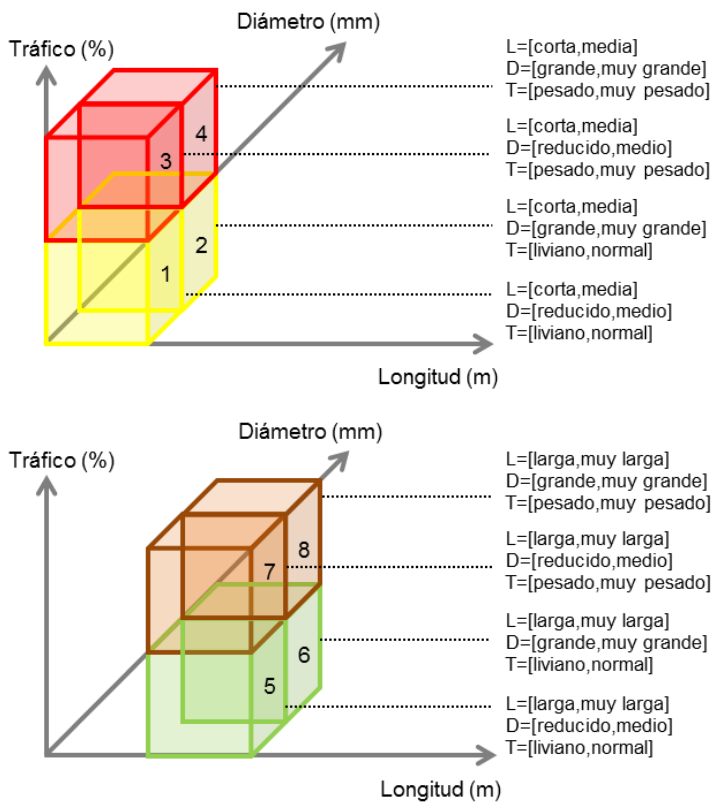


Figura 76. División del espacio segundo decisional en ocho unidades de decisión

4.4.15.2 Matrices de agregación para cada unidad de decisión

Aquí se define la posibilidad de falla asociada a cada una de las posibles combinaciones que se pueden generar entre los números difusos (representativos

de los posibles estados) para los criterios longitud, diámetro y tráfico. Esto se hace, al igual que en el primer espacio de decisión, mediante el análisis de cada unidad de decisión presente.

Se generan ocho matrices de agregación, cada una de ellas correspondiente a una unidad decisional.

La unidad decisional 1 abarca tuberías pequeñas en diámetro y en longitud, que soportan cargas de tráfico normales o bajas (Tabla 42). Las tuberías que se clasifican en esta unidad de decisión tienen asignada una probabilidad de fallo poco significativa.

Tabla 42. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 1 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 1							
Si Longitud	corta	Y Diámetro	reducido	Y Tráfico	liviano	Entonces Posibilidad falla	poco signif.
	corta		reducido		normal		poco signif.
	corta		medio		liviano		poco signif.
	corta		medio		normal		poco signif.
	media		reducido		liviano		poco signif.
	media		reducido		normal		poco signif.
	media		medio		liviano		poco signif.
	media		medio		normal		poco signif.

La unidad decisional 2, aunque incluye tuberías de grandes diámetros (pero pequeñas en longitud), al soportar cargas de tráfico normales o bajas, tiene asignada para sus elementos, una posibilidad de fallo poco significativa (Tabla 43).

Tabla 43. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 2 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 2							
Si Longitud	corta	Y Diámetro	grande	Y Tráfico	liviano	Entonces Posibilidad falla	poco signif.
	corta		grande		normal		poco signif.
	corta		muy grande		liviano		poco signif.
	corta		muy grande		normal		poco signif.
	media		grande		liviano		poco signif.
	media		grande		normal		poco signif.
	media		muy grande		liviano		poco signif.
	media		muy grande		normal		poco signif.

La unidad decisional 3 difiere de la unidad decisional 1, pues aunque abarca tuberías pequeñas en diámetro y en longitud, ellas soportan cargas de tráfico importantes (Tabla 44). En consecuencia, las tuberías que se clasifican en esta unidad de decisión tienen asignada una probabilidad de fallo significativa.

Tabla 44. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 3 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 3							
	corta		reducido		pesado		signif.
	corta		reducido		muy pesado		signif.
	corta		medio		pesado		signif.
Si	corta	Y	medio	Y	muy pesado	Entonces Posibilidad falla	signif.
Longitud	media	Diámetro	reducido	Tráfico	pesado		signif.
	media		reducido		muy pesado		signif.
	media		medio		pesado		signif.
	media		medio		muy pesado		signif.
	media		medio		muy pesado		signif.

La unidad decisional 4, a su vez, difiere de la unidad 2, pues aunque incluye tuberías de grandes diámetros y pequeñas longitudes, soporta cargas de tráfico significativas, y en consecuencia, los elementos clasificados allí tienen asignada una posibilidad de fallo significativa (Tabla 45).

Tabla 45. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 4 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 4							
	corta		grande		pesado		signif.
	corta		grande		muy pesado		signif.
	corta	Y	muy grande	Y	pesado	Entonces Posibilidad falla	signif.
Si	corta	Diámetro	muy grande	Y	muy pesado		signif.
Longitud	media		grande	Tráfico	pesado		signif.
	media		grande		muy pesado		signif.
	media		muy grande		pesado		signif.
	media		muy grande		muy pesado		signif.

La unidad decisional 5 resulta similar a la unidad decisional 1 en lo relativo a tráfico y diámetro (en general tuberías de diámetro pequeño, que soportan cargas bajas), pero en el caso de la presente unidad, se clasifican en ella conducciones de gran longitud (Tabla 46). Las tuberías que se clasifican en esta unidad de decisión tienen asignada una probabilidad de fallo moderada.

Tabla 46. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 5 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 5							
	larga		reducido		liviano		moderada
	larga		reducido		normal		moderada
	larga		medio		liviano		moderada
Si	larga	Y	medio	Y	normal	Entonces Posibilidad falla	moderada
Longitud	muy larga	Diámetro	reducido	Tráfico	liviano		moderada
	muy larga		reducido		normal		moderada
	muy larga		medio		liviano		moderada
	muy larga		medio		normal		moderada
	muy larga		medio		normal		moderada

La unidad decisional 6 resulta similar a la unidad 2 (incluye tuberías de grandes diámetros, con cargas de tráfico normales) pero con la diferencia de que sus elementos son largos, y por esta diferencia se le asigna una posibilidad de fallo moderada (Tabla 47).

Tabla 47. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 6 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 6							
Si Longitud	larga	Y Diámetro	grande	Y Tráfico	liviano	Entonces Posibilidad falla	moderada
	larga		grande		normal		moderada
	larga		muy grande		liviano		moderada
	larga		muy grande		normal		moderada
	muy larga		grande		liviano		moderada
	muy larga		grande		normal		moderada
	muy larga		muy grande		liviano		moderada
muy larga	muy grande	normal	moderada				

La unidad decisional 7 difiere de la unidad decisional 5 en los estados de condición asociados al tráfico, pues para esta última unidad las cargas que soportan las tuberías son importantes. Son conducciones largas y de pequeños diámetros (Tabla 48). Las tuberías que se clasifican en esta unidad de decisión tienen asignada una probabilidad de fallo muy significativa, condicionada por la característica del tráfico.

Tabla 48. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 7 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 7							
Si Longitud	larga	Y Diámetro	reducido	Y Tráfico	pesado	Entonces Posibilidad falla	muy sig.
	larga		reducido		muy pesado		muy sig.
	larga		medio		pesado		muy sig.
	larga		medio		muy pesado		muy sig.
	muy larga		reducido		pesado		muy sig.
	muy larga		reducido		muy pesado		muy sig.
	muy larga		medio		pesado		muy sig.
muy larga	medio	muy pesado	muy sig.				

La unidad decisional 8 es diferente a la unidad de decisión 6 tan sólo en las cargas de tráfico que soportan las tuberías aquí clasificadas (Tabla 49). En este caso, las cargas de tráfico son altas, y esto combinado con elementos largos y de grandes diámetros, genera una probabilidad de fallo asignada muy significativa.

Tabla 49. Matriz de posibilidad de falla para la unidad decisional 8 del segundo espacio decisional

Unidad decisional 8							
	larga		grande		pesado		muy sig.
	larga		grande		muy pesado		muy sig.
	larga		muy grande		pesado		muy sig.
Si	larga	Y	muy grande	Y	muy pesado	Entonces	muy sig.
Longitud	muy larga	Diámetro	grande	Tráfico	pesado	Posibilidad	muy sig.
	muy larga		grande		muy pesado	falla	muy sig.
	muy larga		muy grande		pesado		muy sig.
	muy larga		muy grande		muy pesado		muy sig.

4.4.16 Resultados de la fase de defuzificación del segundo espacio decisional

4.4.16.1 Conjunto difuso de posibilidad de falla

El conjunto difuso de posibilidad de falla utilizado para generar los valores defuzificados de este segundo espacio decisional es el mismo del primer espacio: está compuesto por cuatro números difusos trapezoidales de posibilidad de falla, y en consecuencia, de necesidad de intervención: poco significativa, moderada, significativa y muy significativa.

El universo de discurso para la posibilidad de falla se da en porcentaje. Los valores en el universo de discurso de los cuatro vértices de cada trapecio, son también idénticos a los utilizados para el análisis del primer espacio.

4.4.17 Lista priorizada de tuberías a la renovación para el segundo espacio decisional

A continuación se muestra la lista de las 20 tuberías con mayor necesidad de intervención en función de los criterios que definen este segundo espacio decisional. Las conducciones que conforman la lista son heterogéneas en la composición de criterios: no existe una carga de tráfico totalmente dominante (en su mayoría son de tipo acera).

Las longitudes son variadas, aunque con cierto predominio de los elementos cortos y medios. Los diámetros de las primeras cuatro tuberías son grandes (225 mm), pero en lo que resta de la tabla el diámetro igual a 80 mm se presenta con mayor frecuencia (Tabla 50).

Tabla 50. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el segundo espacio decisional

Pr.	Sector	ID tub.	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tráfico	Posibilidad de falla (%)
1	6	49002	2.1	225	Acera (10)	51.1026
2	6	49003	30.5	225	Acera (10)	51.1026
3	6	49004	25.6	225	Acera (10)	51.1026
4	6	49316	30.9	225	Acera (10)	50.9737
5	6	49317	13.5	60	Pesado (70)	50.9737
6	6	49318	12.9	60	Pesado (70)	50.9737
7	6	49319	74.3	80	Normal (40)	50.9737
8	6	49342	13.4	60	Acera (10)	50.7346
9	6	49343	15.7	80	Acera (10)	50.7346
10	6	49345	10.7	80	Normal (40)	50.7346
11	6	49030	7.2	80	Normal (40)	50.5879
12	6	49322	0.5	80	Acera (10)	50.5879
13	6	49535	0.5	80	Acera (10)	50.5879
14	6	49543	10.6	80	Acera (10)	50.5879
15	6	49546	6.9	80	Normal (40)	50.5879
16	6	49549	7.8	80	Normal (40)	50.5879
17	6	49550	7.6	80	Normal (40)	50.5879
18	6	49551	98.2	80	Acera (10)	50.5879
19	6	49558	32.5	80	Acera (10)	50.5879
20	6	49563	82.5	80	Normal (40)	50.5879

Opuesta a la lista anterior se encuentra la referida a las tuberías con menor prioridad a la renovación (se muestra aquí el listado de 20 últimas tuberías). De las 20 tuberías, 15 soportan una carga de tráfico muy baja (se localizan bajo aceras). Los criterios longitud y diámetro parecen no ser tan determinantes como sí lo es la carga de tráfico (Tabla 51).

Tabla 51. Lista de las 20 últimas tuberías de toda la red con menor prioridad a la renovación, según los criterios considerados en el segundo espacio decisional

Pr.	Sector	ID tub.	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tráfico	Posibilidad de falla (%)
20	1	7099	58.6	150	Acera (10)	34.4511
19	1	7075	26.0	80	Acera (10)	34.4210
18	1	7068	99.7	80	Acera (10)	34.4210
17	1	7069	373.4	80	Normal (40)	34.4210
16	1	7076	3.0	250	Acera (10)	34.4210
15	1	7101	13.1	150	Acera (10)	31.5438
14	1	7102	23.4	150	Acera (10)	31.5438

Pr.	Sector	ID tub.	Longitud (m)	Diámetro (mm)	Tráfico	Posibilidad de falla (%)
13	1	7104	165.7	250	Acera (10)	31.5438
12	1	7111	176.1	250	Acera (10)	31.5438
11	1	7113	141.6	150	Acera (10)	31.5438
10	1	7121	174.2	150	Normal (40)	31.5438
9	1	7025	3.0	150	Acera (10)	31.2558
8	1	7027	46.5	100	Acera (10)	31.2558
7	1	7030	60.7	100	Normal (40)	31.2558
6	1	7037	236.5	100	Normal (40)	31.2558
5	1	7046	40.4	100	Acera (10)	31.2558
4	1	7048	20.8	100	Acera (10)	31.2558
3	1	7049	364.2	80	Normal (40)	31.2558
2	1	7100	0.6	150	Acera (10)	31.2558
1	1	105	1.2	80	Acera (10)	13.7100

4.4.18 Lista priorizada de sectores a la renovación para el segundo espacio decisional

El sector 8 es el que presenta el valor de posibilidad de falla más alto. Muy de cerca, se encuentran los sectores 6, 7 y 10 (todos con un poco más del 47% de posibilidad de falla). El sector 1, que en análisis del primer espacio de decisión presenta la mayor urgencia de intervención, aquí aparece con la menor posibilidad de fallo. Ello se debe a que en el primer espacio de decisión, uno de los criterios incluidos es la frecuencia de fallos, y es este sector el que mayor registro de incidencias posee. En este segundo espacio decisional, no existe un criterio que condicione tan claramente los resultados.

En general, el rango en el que varían los resultados por sectores es corto (algo menos de 6 puntos porcentuales, según la Tabla 52). Esto puede ser interpretado como un indicativo de la poca diferencia que en el plano global poseen las tuberías de la muestra de estudio, cuando se considera su comportamiento respecto a la necesidad de intervención con base en el diámetro, la longitud y la carga de tráfico.

Tabla 52. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación para el segundo espacio decisional

Pr.	Sector	Posibilidad falla (%)
1	8	47.5368
2	6	47.3895
3	7	47.1445

Pr.	Sector	Posibilidad falla (%)
4	10	47.1067
5	5	46.5511
6	9	46.1283
7	3	46.0707
8	2	45.5454
9	4	45.4936
10	1	41.6896

4.4.19 Sensibilidad de los resultados ante la variación de las matrices de agregación para el segundo espacio decisional

Para este análisis de sensibilidad se efectuaron los cambios plasmados en la Tabla 53. Estos cambios obedecen a una nueva opinión experta que indica que la urgencia de intervención de las unidades decisionales 3 y 4 no es tanta, y en consecuencia pasa de ser “significativa” a “moderada”. Esta misma opinión experta afirma que las unidades de decisión 5 y 6 urgen más intervención, pasando de una posibilidad de falla “moderada” a una “significativa”.

Tabla 53. Variaciones en las matrices decisionales que hacen parte del proceso de agregación

	1		poco significativa		poco significativa
	2		poco significativa		poco significativa
	3		significativa		moderada
Cubo decisional	4	Posibilidad falla inicial	significativa	Posibilidad falla nueva	moderada
	5		moderada		significativa
	6		moderada		significativa
	7		muy significativa		muy significativa
	8		muy significativa		muy significativa

Al aplicar los cambios propuestos en las matrices de agregación, el orden de prioridad de la lista cambia totalmente (Tabla 54). Las tuberías del sector 6 dejan de ser las de mayor urgencia de intervención, y su puesto lo ocupan conducciones de los sectores 5, 4 y 10.

Como ya se había notado en el estudio del primer espacio decisional, las variaciones en las matrices de agregación representan grandes cambios en los resultados finales. Esto es lo esperado de acuerdo a los principios de la lógica difusa: los resultados deben reflejar con claridad los deseos del decisor.

Tabla 54. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red, con mayor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.

Pr.	Variación en matriz de agregación			Resultados sin variación		
	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
1	5	48223	50.3374	6	49002	51.1026
2	5	48222	50.2676	6	49003	51.1026
3	10	74470	50.1485	6	49004	51.1026
4	5	47855	50.1485	6	49316	50.9737
5	5	47856	50.1485	6	49317	50.9737
6	4	46051	50.1485	6	49318	50.9737
7	4	46052	50.1485	6	49319	50.9737
8	4	46053	50.1485	6	49342	50.7346
9	4	46061	50.1485	6	49343	50.7346
10	4	46062	50.1485	6	49345	50.7346
11	4	46063	50.1485	6	49030	50.5879
12	4	46064	50.1485	6	49322	50.5879
13	4	46067	50.1485	6	49535	50.5879
14	4	46073	50.1485	6	49543	50.5879
15	5	47495	50.1485	6	49546	50.5879
16	5	47910	50.1485	6	49549	50.5879
17	10	66510	50.1485	6	49550	50.5879
18	10	71193	50.1485	6	49551	50.5879
19	10	71194	50.1485	6	49558	50.5879
20	10	71205	50.1485	6	49563	50.5879

En el caso de las tuberías con menor urgencia de intervención, 9 de las 20 tuberías que hacían parte de esta tabla aparecen en el nuevo listado. De estas 9 conducciones, solo una conserva su posición original, y corresponde con la tubería con menor necesidad de intervención de toda la muestra. Esta tubería (con identificador 105), de sólo 1.16 m de longitud, tiene un diámetro de 80 mm y se encuentra instalada bajo una acera.

Las restantes conducciones que hacen parte de ambas listas de “no prioridad” experimentaron todas un desplazamiento de 7 puestos en el orden final (Tabla 55).

Tabla 55. Lista de las 20 últimas tuberías de toda la red, con menor prioridad a la renovación, tras aplicar cambios en las matrices de decisión del proceso de agregación.

Pr.	Variación en matriz de agregación			Resultados sin variación		
	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)	Sector	ID tub.	Pos. falla (%)
20	1	7135	37.5754	1	7099	34.4511
19	1	7136	37.5754	1	7075	34.4210
18	1	7137	37.5754	1	7068	34.4210
17	1	7138	37.5754	1	7069	34.4210
16	1	7025	37.0891	1	7076	34.4210
15	1	7027	37.0891	1	7101	31.5438
14	1	7030	37.0891	1	7102	31.5438
13	1	7037	37.0891	1	7104	31.5438
12	1	7046	37.0891	1	7111	31.5438
11	1	7048	37.0891	1	7113	31.5438
10	1	7049	37.0891	1	7121	31.5438
9	1	7100	37.0891	1	7025	31.2558
8	1	16516	36.6174	1	7027	31.2558
7	1	16519	36.6174	1	7030	31.2558
6	1	7203	36.6174	1	7037	31.2558
5	1	7205	36.6174	1	7046	31.2558
4	1	7141	36.5194	1	7048	31.2558
3	1	7173	36.5194	1	7049	31.2558
2	1	7181	36.5194	1	7100	31.2558
1	1	105	13.7100	1	105	13.7100

4.4.20 Iteración adicional para agregar los espacios de decisión 1 y 2

Para agregar los efectos de los dos espacios de decisión sobre los cuales se tienen resultados de necesidad de intervención individuales, se plantea realizar una segunda iteración en la cual se fuzificarán los resultados obtenidos en cada espacio de decisión, mediante dos conjuntos difusos.

El primero de los conjuntos difusos (Figura 77) expresa qué tan prioritario (en el ámbito de la renovación/sustitución) resulta para el decisor determinado valor porcentual de posibilidad de falla alcanzado por una tubería en el primer espacio decisional (que a su vez está definido por los criterios edad, presión media de servicio, y frecuencia de fallos).

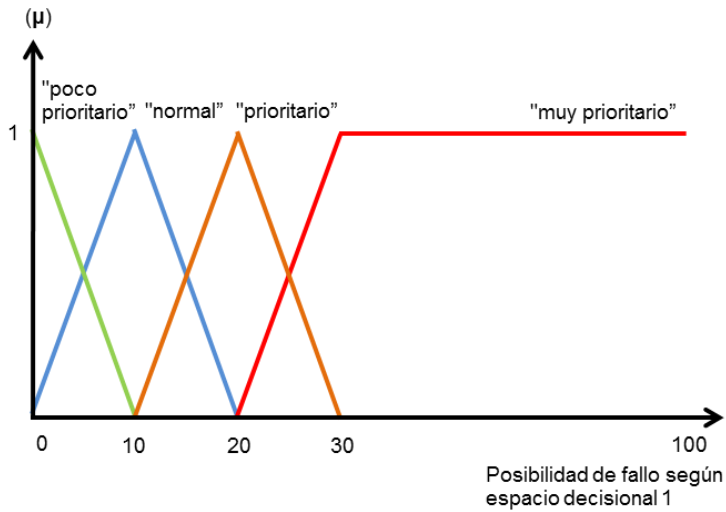


Figura 77. Números difusos descriptivos del primer espacio decisonal

El segundo de los conjuntos difusos (Figura 78) expresa qué tan prioritario resulta para el decisor cierto valor porcentual de posibilidad de falla alcanzado por una tubería en el segundo espacio decisonal (que está definido por los criterios longitud, diámetro y carga habitual de tráfico).

Debe notarse que existen diferencias entre ambos conjuntos: si bien la forma geométrica y la cantidad de funciones difusas es la misma, no así el rango de cada una de ellas. En el conjunto difuso descriptivo del primer espacio decisonal, los rangos de los tres primeros números difusos son menores que sus similares para el segundo espacio decisonal (el número difuso “prioritario” llega hasta un máximo de 30% para el primer espacio decisonal, y hasta 60% para el segundo).

Esto hace que, a la hora de construir los vectores difusos, un resultado porcentual obtenido en el primer espacio decisonal tenga mayor “pertenencia” al estado muy prioritario, en comparación con ese mismo resultado porcentual, pero esta vez obtenido en el segundo espacio decisonal. Por ejemplo, una tubería con una posibilidad de fallo del 30%, obtenida en el primer espacio decisonal, y evaluada en el conjunto difuso de dicho espacio, generará un vector de valores difusos $[0,0,0,1]$. Esa misma posibilidad de fallo (30%), pero esta vez obtenida en el segundo espacio decisonal, y evaluada en su correspondiente conjunto difuso, generará un vector difuso $[0,0,0.5,0.5]$.

Se concluye entonces que la forma en que se construye cada conjunto difuso descriptivo de cada espacio decisional, refleja la prioridad que para el decisor poseen los resultados de cada espacio en la urgencia a la intervención final.

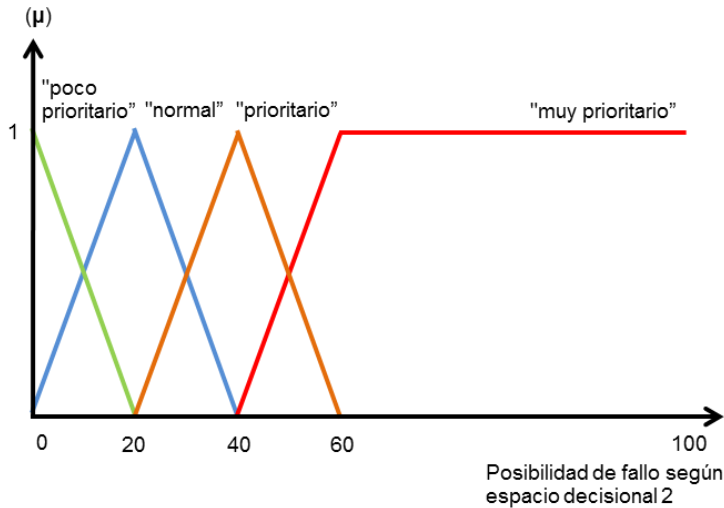


Figura 78. Números difusos descriptivos del segundo espacio decisional

4.4.20.1 Matriz de agregación de espacios de decisión

Se definen cuatro estados finales de prioridad a la intervención: necesidad de intervención poco significativa, moderada, significativa, y muy significativa. A partir de todas las posibles combinaciones entre los números difusos descriptivos de cada uno de los espacios decisionales, el decisor ha establecido, para este caso de estudio, las relaciones que se muestran en la Tabla 56

Tabla 56. Matriz de posibilidad de posibilidad de falla para agregación de espacios decisionales 1 y 2

Matriz de agregación de espacios decisionales					
Si Posibilidad de fallo en espacio decisional 1	poco prioritaria	Y Posibilidad de fallo en espacio decisional 2	poco prioritaria	Entonces Posibilidad final de fallo	poco significativa
	poco prioritaria		normal		poco significativa
	poco prioritaria		prioritaria		moderada
	poco prioritaria		muy prioritaria		moderada
	normal		poco prioritaria		poco significativa
normal	normal	normal	moderada	significativa	
normal	prioritaria	prioritaria	significativa	significativa	
normal	muy prioritaria	muy prioritaria	muy prioritaria	significativa	

Matriz de agregación de espacios decisionales		
prioritaria	poco prioritaria	moderada
prioritaria	normal	significativa
prioritaria	prioritaria	significativa
prioritaria	muy prioritaria	muy significativa
muy prioritaria	poco prioritaria	moderada
muy prioritaria	normal	significativa
muy prioritaria	prioritaria	muy significativa
muy prioritaria	muy prioritaria	muy significativa

4.4.21 Resultados de la fase de defuzificación de los espacios de decisión 1 y 2

Tras aplicar el proceso de inferencia de Mamdani, se generan alturas que luego se proyectan en el conjunto difuso final de posibilidad de falla. Este conjunto está compuesto por números difusos trapezoidales (Figura 79).

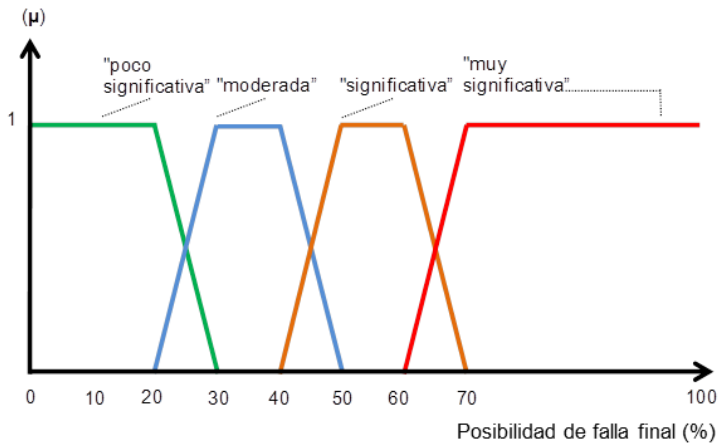


Figura 79. Conjunto difuso de la posibilidad de falla final, para proyectar los resultados de la agregación de los espacios decisionales 1 y 2

Al defuzificar las áreas finales resultantes para cada tubería, mediante el método de centro de áreas, se genera la lista final de prioridad a la intervención en renovación/sustitución (Tabla 57). Aunque las tuberías del sector 1 resultaron altamente priorizadas en el análisis del primer espacio decisional, la confección de la matriz de agregación en esta última iteración hace que las tuberías del sector 2 resulten con mayor necesidad global de intervención.

Tabla 57. Lista de las 20 primeras tuberías de toda la red con mayor prioridad final a la renovación, después de agregar los espacios decisionales 1 y 2.

Pr.	Sector	ID tub.	Posibilidad final de falla (%)
1	2	36623	79.3209
2	2	36624	79.3209
3	2	36625	79.3209
4	2	36626	79.3209
5	2	36628	79.3209
6	2	36629	79.3209
7	2	36630	79.3209
8	2	36631	79.3209
9	2	36632	79.3209
10	2	36633	79.3209
11	2	36635	79.3209
12	2	36637	79.3209
13	2	36638	79.3209
14	2	36639	79.3209
15	2	36640	79.3209
16	1	36207	79.2354
17	1	36208	79.2354
18	1	36210	79.2354
19	1	36217	79.2354
20	1	36222	79.2354

El promedio de valores individuales para cada sector, deja ver que los pocos aportes a la prioridad alcanzados por las tuberías del sector 1 en el segundo espacio de decisión, hacen que esta zona quede como aquella de menor prioridad final a la intervención, aun cuando es la de mayor prioridad en el análisis individual del espacio decisional 1.

La combinación de resultados que genera mayor prioridad a la intervención, la alcanza el sector 4, aunque los restantes sectores presentan resultados finales muy parecidos (solamente el sector 1 logra diferenciarse al presentar una posibilidad de falla menor al 70%).

Tabla 58. Lista de los sectores de la red según prioridad a la renovación para el segundo espacio decisional

Prioridad	Sector	Posibilidad final de falla (%)
1	4	76.7345
2	3	76.4646
3	9	76.4342
4	2	76.3789
5	5	76.2359
6	10	75.9759
7	7	75.9621
8	6	75.8718
9	8	75.7774
10	1	69.0015

Capítulo 5

Desarrollos previos a la lógica difusa

5.1 Objetivos y estructura de las propuestas

5.1.1 Objetivos

La intención principal de este capítulo consiste en ilustrar el proceso que se ha seguido y que, como resultado final, ha llevado al planteamiento del modelo decisional para la priorización de tuberías mediante Lógica Difusa. En este capítulo se exponen cuatro propuestas de modelos decisionales desarrollados. En principio se expone la aplicación del metodología de las Sumas Ponderadas, cuya aplicación se hace a un grupo de tuberías de la red de abastecimiento de una ciudad del norte de España (Almandoz y otros, 2005). Este fue el inicio de todo este extenso estudio, que se concreta en la presente tesis.

Posteriormente se ha desarrollado un sistema decisional, también para tuberías de abastecimiento (con aplicación a la misma red anterior), esta vez basado en la metodología de la Programación Por Compromiso.

También se incluye en este capítulo la propuesta decisional para la renovación de sectores de la red mediante Jerarquías Analíticas. El caso de aplicación también corresponde a la misma red del norte de España.

Por último se exponen una propuesta de modelo decisional para redes de saneamiento mediante Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio. Su aplicación corresponde a una red de alcantarillado de una ciudad de Los Andes Colombianos. Todas las propuestas son aportes originales del autor de esta tesis, a excepción de la primera (Sumas Ponderadas), de la que se aporta a título propio - además de su revisión exhaustiva mediante trabajo mancomunado con su primer autor - el análisis de sensibilidad que se expone.

5.1.2 Estructura de las propuestas

En la exposición de cada uno de las cuatro propuestas se sigue una misma estructura:

Inicialmente se muestra la base metodológica que fundamenta la propuesta (conformada por su estructura matemática, y así mismo por la forma en que se

establece el grado de prioridad de las alternativas - tuberías o sectores - a la renovación).

Seguidamente se expone un caso de aplicación descrito mediante tres apartados: tuberías de estudio, criterios incluidos en el análisis y calificación para cada criterio.

A continuación, se presentan los resultados finales de prioridad a la renovación mediante la aplicación de la propuesta estudiada, y que incluye la lista de priorización de tuberías o sectores, y un análisis de sensibilidad para cada caso.

En última instancia se presenta un apartado de enseñanza y crítica, que abarca las principales bondades y limitaciones de la propuesta, y que fueron consideradas posteriormente, cuando se decidió abordar la Lógica Difusa como estructura matemática de fondo para el modelo decisional expuesto en detalle el capítulo anterior.

5.2 Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de tuberías de abastecimiento mediante Sumas Ponderadas

5.2.1 Base metodológica de las Sumas Ponderadas

5.2.1.1 Estructura matemática de las Sumas Ponderadas

El método de las sumas ponderadas fue publicado por primera vez en 1964 (Fishburn, 1964). Su estructura es la más básica de todas, consistente en darle mayor importancia en el resultado final a determinados criterios, mediante la asignación de pesos mayores que los establecidos para otros.

El autor continuó su trabajo en el campo de los sistemas decisionales, y lo expuso en libros como el titulado "Utility Theory For Decision Making" (Fishburn, 1970).

Si se tienen M alternativas y N criterios, entonces en el caso de maximización, la mejor alternativa es la que satisface la Ec. 108 (Fishburn, 1964):

$$A_{msp} = \max_i \sum_{j=1}^N a_{ij} w_j \text{ para } i = 1 \rightarrow M \quad \text{Ec. 108}$$

Donde A_{msp} es la calificación de la mejor alternativa mediante el método de las sumas ponderadas, N es el número de criterios de decisión, a_{ij} es el valor real de la i -ésima alternativa en términos del j -ésimo criterio, y w_j es el peso de importancia del j -ésimo criterio (Fishburn, 1964).

5.2.1.2 Establecimiento del grado de prioridad a la renovación de tuberías

Cada alternativa j (desde 1 hasta n alternativas), en función del criterio evaluado i (desde 1 hasta m criterios), alcanza una valoración $V_{j,i}$, la cual se afecta por el peso asignado a dicho criterio, $Peso_{criterio(m)}$.

La alternativa J contará con la agregación de m productos de la forma $Peso_i * Valoración_{j,i}$, representados en una sumatoria.

La matriz que incluye las n sumatorias correspondientes a n alternativas se muestra en la Figura 80.

$$\begin{bmatrix} Valoración_{alternativa_1} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ Valoración_{alternativa_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m Peso_{criterio_m} \times Valoración_{alternativa_{1,m}} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m Peso_{criterio_m} \times Valoración_{alternativa_{n,m}} \end{bmatrix}$$

Figura 80. Estructura típica de la matriz de ponderación de alternativas

En el caso específico de la obtención de una lista priorizada de tuberías prestas a renovar con mayor urgencia, y dado que la evaluación de cada criterio implica una mayor necesidad de renovar cuando mayor es la puntuación obtenida en cada caso, resulta inmediato concluir que una mayor sumatoria de estos productos implica una mayor necesidad, ya en el ámbito global, de renovar la tubería a la cual se asocia el producto.

Como consecuencia de lo anterior, el último paso del proceso consiste en organizar, de mayor a menor, cada uno de los resultados finales alcanzado por las alternativas (ver Figura 81), con el objeto de conocer el orden final de prioridad a la renovación.

$$\begin{bmatrix} \text{Prioridad}_1 \\ \dots \\ \dots \\ \text{Prioridad}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Alternativa } a_j & \dots \text{ pues : } Val_{\text{alternativa}_j} > Val_{\text{alternativa}_n} > \dots > Val_{\text{alternativa}_i} \\ \text{Alternativa } a_n & \dots \text{ pues : } Val_{\text{alternativa}_j} > \dots > Val_{\text{alternativa}_i} \\ \dots \\ \dots \\ \text{Alternativa } a_i \end{bmatrix}$$

Figura 81. Orden de prioridad de alternativas en función del valor de la agregación final

Una vez evaluadas cada una de las tuberías respecto a cada criterio, de manera que todas recibieran un valor calificador entre 0 y 10 para cada criterio, se afectan estos valores ponderados por el peso de cada criterio, tal y como se describe en la matriz anteriormente expuesta.

Se obtiene así un resultado final para cada alternativa, que permita establecer, como paso último, el orden de prioridad para la renovación.

5.2.2 Ejemplo de aplicación de la metodología de Sumas Ponderadas a una red de abastecimiento del norte de España

La información que a continuación se expone hace referencia a la introducción que Almandoz y otros (2005) proveen sobre distrito de Gros, ubicado en la ciudad de San Sebastián, y de donde se extraen los elementos que se utilizaron en el estudio de priorización de tuberías y de priorización de sectores.

La red de distribución de agua potable de dicha ciudad se abastece desde la ETAP de Añarbe. Las acometidas del sistema son aproximadamente 8500, controladas mediante un número cercano a 60.000 contadores. La red cuenta con 400 km de tuberías principales.

Para la realización de esta investigación se ha elegido el distrito de Gros, ubicado en las laderas del barrio Intxaurreondo, y alimentado mediante gravedad por el depósito de Mons (ubicado a una cota de 54 m).

Los tipos consumos predominantes de agua potable en este sector son en su gran mayoría domésticos y comerciales. La red es casi en su totalidad mallada. La cota promedio del sector es 7 m.

El inventario de tuberías del sector elegido está compuesto en un 50 % por conducciones de fundición gris y 50 % por conducciones de fundición dúctil. Las acometidas son de acero galvanizado. La distribución por diámetros se encuentra entre 80 mm y 900 mm, siendo el valor predominante 150mm.

Resulta tan o aún más importante que la elección del Sistema Soporte a la Decisión Multicriterio, el incluir los criterios (o variables) que realmente tienen la capacidad de evaluar el estado de la red particular.

Con ello se pretende hacer especial énfasis en no incurrir en la errónea práctica de utilizar, sin más, criterios que usualmente aparecen citados en la literatura, sin una previa valoración a conciencia sobre su real trascendencia para el objeto real que atañe.

Así pues, el cambio del estado operativo al estado inoperativo de un tramo de red puede ser inducido por diversos motivos, entre los cuales se pueden citar materiales inadecuados o defectuosos, asentamientos de las tuberías generados por instalaciones incorrectas, estados de corrosión avanzados, aperturas y cierres espontáneos o indebidos de válvulas que generan sobrepresiones o fenómenos transitorios, etc.

Dicho esto, la escogencia de los criterios que realmente pueden tomar parte activa en la decisión de sustituir una tubería no resulta inmediata. Aunque la literatura especializada puede dar matices sobre el camino a seguir, la elección de los criterios que mejor pueden dar cuenta del deterioro de la infraestructura es sin duda una decisión particular de los gestores de cada red.

Son ellos quienes deben elegir los criterios más representativos en su abastecimiento y realizar una valoración apegada a su propia realidad, en función de su experiencia en el manejo diario de la red.

5.2.2.1 Tuberías del estudio

A efectos académicos se elige un grupo reducido de tuberías, haciendo la salvedad sobre la importancia de incluir en un estudio técnico completo la totalidad de las tuberías de la red analizada. Cada una de las tuberías aquí consideradas resulta estadísticamente representativa de un grupo homogéneo con similares características físicas.

En la Tabla 59 se incluyen las tuberías incluidas en el estudio y sus principales características físicas e hidráulicas, obtenidas del modelo en funcionamiento de la red.

Tabla 59. Características físicas de las tuberías incluidas en el estudio (Almandoz y otros, 2005)

ID	Longitud (m)	Diámetro Original (mm)	Rugosidad Actual (mm)	Caudal (l/s)	Pérdida de carga (m.c.a./km)
Principal (P900)	280	900	0,60	222,1	0,93
Principal (P600)	585	600	0,75	101,4	1,25
Gros Ambulatorio (GA)	305	150	0,90	1,76	0,58
Gros centro (GC)	60	250	0,90	24,5	9,90
Eguía Colegio (EC)	205	150	1,50	4,9	5,1
Ulía Polideportivo (UP)	101	100	1,3	4,3	32,5
Intxaurreondo Centro (IC)	116	100	1,2	2,3	9,36
Intxaurreondo 110 años (IH)	467	250	1,5	11,4	1,89

5.2.2.2 Criterios incluidos en el estudio

5.2.2.2.1 Edad de la tubería

El método propone un valor máximo de 10 puntos para la tubería más antigua, que en el caso del grupo de estudio, corresponde al elemento de 110 años (considerando 2003 como año de corte para el análisis) y un mínimo de 0 para el caso de una tubería nueva (0 años).

La puntuación del criterio sigue una relación parabólica con la edad del elemento (Ec. 109). Resulta lógico penalizar en una proporción cada vez más importante la antigüedad de la tubería.

$$C_{edad} = 10 \cdot \left(\frac{t}{110} \right)^2 \quad \text{Ec. 109}$$

Donde C_{edad} es la calificación asignada a la tubería según su edad, y t es la edad de la tubería, en años.

5.2.2.2.2 Historial de fallos

Aquí se evalúan el número y frecuencia de las fallos ocurridos a lo largo de un periodo de tiempo establecido de 30 años (periodo para el cual se tienen registros de fallos en la red de Gros), y que surgen a consecuencia no sólo de la edad de la tubería, sino además de otros factores que hacen que dos tuberías con igual antigüedad tengan tasas de ocurrencia de fugas diferentes.

En este punto del estudio resulta indispensable contar con una base de datos fiable y extensa, que permita calcular parámetros estadísticos para cada grupo homogéneo de tuberías, discriminados por diámetro y edad.

Cuando se requiere estudiar el historial de fugas de una red, se evidencia de manera inmediata el problema asociado al manejo de las bases de datos en las empresas prestadoras del servicio de abastecimiento (y también en aquellas dedicadas al saneamiento): al intentar consultar este historial, que relaciona no solo el número de órdenes de trabajo asociadas a roturas, sino además, el identificador de la tubería, su edad y su material, generalmente se debe acudir a varias bases de datos (dispersión).

Otro problema que se identifica una vez hechas las consultas, es que en casos específicos, la información de una misma variable se encuentra varias veces (multiplicidad), y los valores no coinciden (inconsistencia).

Esto ocurre, no solo para el caso que aquí se menciona (historial de fugas) sino también cuando el interés se centra en observar el estado operativo de la red mediante el historial de obstrucciones en redes de saneamiento.

Se espera que el número de roturas sea directamente proporcional a la longitud de la tubería; motivo por el cual se calcula el número de roturas por km y año para eliminar el efecto de la longitud en dicha magnitud.

Mediante una interpolación lineal en donde al máximo número de roturas se le asigna la calificación de 10 y a una tubería de 0,1 roturas por km y año se le asigna la calificación de 0, se calculan todas las calificaciones del grupo.

5.2.2.2.3 Capacidad de transporte

Basándose en los caudales teóricos de la tubería, tanto en su estado de “tubería nueva”, como en el estado actual (con cierta reducción de diámetro) se calcula la pérdida de capacidad hidráulica (la diferencia entre la capacidad de transporte “nueva” y la capacidad de transporte “actual”) en relación con la capacidad nueva (Ec. 110).

De esta manera, la pérdida de capacidad hidráulica de la tubería permite conocer el comportamiento hidráulico que se espera a futuro, a pesar de su envejecimiento, lo cual resulta en extremo relevante cuando se considera una potencial renovación de la misma.

$$C_{cc} = 10 \cdot \frac{h'_f - h_f}{h'_f} \quad \text{Ec. 110}$$

Donde C_{cc} es la calificación por pérdida de la capacidad de transporte, h'_f es la capacidad de transporte de la tubería nueva y h_f es la capacidad de transporte de la tubería en su estado actual.

5.2.2.2.4 Variaciones en la red ante la ocurrencia de una fuga no comunicada

Las fugas no comunicadas se caracterizan por ser caudales detectables sólo mediante la implementación de un control activo de fugas, no siendo posible su detección de manera visible al aflorar a la superficie pues sus caudales son muy bajos. Sus efectos se contabilizan mediante descensos en la presión.

Mediante la simulación en EPANET de una fuga no comunicada en cada una de las tuberías de estudio se conoce el descenso de presión experimentado en la red en una hora de máxima demanda (11 a.m).

Se supone una penalización de 1 punto por cada nudo con descenso de presión en el intervalo de 3 a 6 m.c.a., 2 puntos en el intervalo de 6 a 9 m.c.a., y 3 puntos en el intervalo de 9 a 12 m.c.a. Suponiendo un máximo de 6 nudos afectados en cada intervalo, la puntuación máxima es de 36 puntos. Este valor se hace corresponder con la máxima calificación: 10 puntos.

5.2.2.2.5 *Variaciones en la red ante la demanda imprevista por la atención a un incendio*

Ante la ocurrencia de un incendio, y dado que en ese mismo instante los consumos habituales en el sector de la red influenciado no cambian ni se detienen ante la ocurrencia del inesperado evento, resulta lógico pensar que la red se verá afectada y que dicha afectación debe ser considerada en el análisis.

Pero el efecto negativo, traducido en la falta de presión para abastecer la nueva demanda temporal, puede ser debido no sólo a las condiciones particulares de la tubería directamente afectada, sino también a causa del estado actual del resto de las tuberías del sector colindante, y es por esto, que la afectación debe valorarse no sólo en la tubería de análisis sino además en las del sector en que se ubica.

La calificación debida a la demanda imprevista ocasionada por la atención de un incendio tiene dos componentes:

- El descenso de presión en el nodo desde donde se alimenta el hidrante
- La cantidad de nodos del resto de la red influenciados por el descenso de presión.

La simulación hidráulica mediante el software EPANET permite conocer la variación de la presión en el nodo directamente afectado, así como la variación de la presión en el resto de nodos en el mismo instante.

La calificación según los dos componentes considerados se realiza en el estudio así:

En el caso de la falta de presión en el nudo, cuando la presión no alcance el valor de 10 m.c.a. en el nudo donde está funcionando el hidrante, se asigna una

calificación de 2 por cada m.c.a. que falta para el valor mínimo de 10m.c.a. A partir de 7 m.c.a. se concede la calificación máxima que es de 5.

Para el caso del número de nudos influenciados por el descenso de la presión, se ha supuesto una penalización de 1 punto por cada nudo del intervalo de 3 a 6 m.c.a., 2 puntos en el intervalo de 6 a 9 m.c.a., 3 puntos en el intervalo de 9 a 12 m.c.a. y 4 puntos para cada nudo con una disminución en la presión de más de 12 m.c.a.

Para cada intervalo, se supone un número máximo de 10 nudos afectados. Así pues, se asigna un valor máximo de calificación de 5 por influencia en otros nodos al caso más extremo posible: obtener 100 puntos (10 nudos x 1 punto + 10 nudos x 2 puntos + 10 nudos x 3 puntos + 10 nudos x 4 puntos).

5.2.2.2.6 *Tiempo de renovación óptimo según propuesta de Shamir-Howard*

A medida que se reparan todas las roturas que se van generando aumenta el coste de mantenimiento de cada tubería con el tiempo. Ese ritmo aumenta a un punto tal, que llega un instante en el tiempo es mucho más rentable sustituir que continuar con el proceso repetitivo de salida de operación-reparación-operación.

Mediante la teoría presentada por Shamir y Howard (Shamir y otros, 1979) se halla el año de renovación óptimo, t_s , siendo así castigada la tubería que arroje, a partir de un año de referencia, t_o , una fecha de renovación más pronta.

Se propone asignar una calificación de 0 a tuberías que presentan un periodo de renovación óptimo calculado ($t_s - t_o$) mayor o igual de 25 años (teniendo en cuenta que la tubería más nueva de las incluidas en el estudio tiene de 30 años de instalada), y calificar con 10 puntos a un período de renovación ($t_s - t_o$) de 0 años

El año óptimo de renovación de una tubería (t_s) para el cual el coste es mínimo, se calcula mediante la Ec. 111 (Shamir y otros, 1979) ,la cual incluye los efectos del coste de sustitución de la tubería (C_s) y de los costes de reparación (C_r) habidos en el periodo $t_s - t_o$.

El índice i representa la tasa anual de inflación, A es la tasa de crecimiento de las roturas en el tiempo y $N(t_o)$ es el número de roturas ocurridas en el año de instalación de la tubería.

Mediante regresión lineal de los valores de roturas para grupos homogéneos en las características material y diámetro se calculan estos dos últimos parámetros.

$$t_s = t_0 + A^{-1} \left[\frac{C_s \ln(1+i)}{C_r N(t_0)} \right] \quad \text{Ec. 111}$$

Para cada tubería se conocen los costos de sustitución por km en el periodo analizado, así como los costos de reparación por rotura en el mismo lapso de tiempo. El año de referencia base tomado para el estudio es 2003.

5.2.2.2.7 Deficiencia en los estándares de servicio por la suspensión del abastecimiento de agua

Ante la necesidad de suspender el servicio, ya sea debido a razones de mantenimiento o renovación (acciones proactivas) o bien para la realización de una reparación inesperada (acciones correctivas) se genera una afectación de naturaleza heterogénea tanto en la cantidad como en el tipo de usuarios, y además, en el tipo de afectación.

Los abonados “pegados” directamente a la tubería cortada no tendrán ningún abastecimiento de agua, mientras que los restantes sufrirán los efectos en forma de disminución de la presión del servicio, y esto en periodos de tiempo diversos (desde unas cuantas horas, hasta días enteros).

Para la evaluación de este factor, se simula en el programa EPANET el corte de cada tubería del grupo de análisis y se contabiliza el número de nudos afectados en hora punta (en este caso, se eligió las 11 h).

Conocidos los nudos afectados, y contando con la información acerca de la densidad de consumos específicos por nudo, se pueden calcular el número de consumos afectados de cada tipo de consumidor. Se le asigna un peso de importancia a cada tipo de usuario (hospitales: 100, colegios: 30, lugares de habitación: 10, bares y cafeterías: 3, tiendas y oficinas: 1).

5.2.2.2.8 *Impacto ambiental por una rotura*

Los posibles efectos adversos que una rotura puede causar en el medio ambiente donde se ubica son de muy compleja cuantificación: no son magnitudes numéricas traducibles a una misma escala, resultan ser valoraciones que en ciertas ocasiones sobrepasan el límite de la objetividad al generarse como “interpretaciones” de la situación por parte del evaluador.

Se hace pues imprescindible, si lo que se desea es evaluar este aspecto, utilizar escalas semánticas que “traduzcan” al lenguaje matemático conceptos que, como ya se ha dicho, son de naturaleza cualitativa.

Para la evaluación del criterio se consideran cuatro grados de incidencia (nula, escasa, normal e importante), efectuando posteriormente una valoración semántica respecto a la densidad de tráfico, densidad de locales a nivel, densidad de garajes y densidad de comercios en la zona donde se ubica la tubería.

Con una valoración de 10 para una densidad importante, 6 para una densidad normal, 3 para el caso de una densidad escasa y 0 para una densidad nula; y suponiendo un peso relativo del 25 % para cada uno de los 4 factores analizados, se obtiene la puntuación de cada tubería.

Otros factores a incluir como representativos del impacto ambiental por la ocurrencia de una rotura, son también objeto de análisis. También resulta interesante discutir la forma de cuantificar la localización geográfica del elemento respecto a los sitios catalogados como importantes (por ejemplo, mediante radios de acción, o “buffers”).

En este análisis juega un papel importante la inclusión de los resultados de las consultas en el sistema de información geográfico que se utilice.

5.2.2.3 **Calificación para cada criterio**

5.2.2.3.1 *Para el criterio edad de la tubería*

La ecuación propuesta (de tipo parabólico) admite muchas discusiones sobre su forma: el material de la tubería, la capacidad técnica de los operarios encargados de la instalación inicial, el grado de compactación sobre el cual yace la estructura,

etc., son factores que pueden dinamizar el proceso de deterioro del elemento, acelerándolo o ralentizándolo, y en consecuencia, planteando diferentes variantes para esta expresión matemática.

Ella en sí, aun considerando materiales, condiciones de instalación y factores de suelos iguales, puede ser ajustada en diferentes formas para reflejar mejor el proceso de deterioro en una red o en otra. Los resultados de la evaluación de este criterio se muestran en la Tabla 60. La tubería de 110 años de edad de Intxaurreondo es, por supuesto, la más penalizada del grupo de estudio.

Tabla 60. Calificación de cada tubería según edad. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)

ID	Edad	Calificación
P 900	30	0,74
P 600	30	0,74
G A	45	1,67
G C	45	1,67
E C	65	3,49
U P	55	2,50
I C	50	2,07
I H	110	10

5.2.2.3.2 Para el criterio historial de fallos

El historial de fallos reúne los efectos combinados de la edad de la tubería (que por considerarse fundamental, recibe un tratamiento individual), así como de otros factores de difícil caracterización (por ejemplo, las técnicas de instalación utilizadas, la calidad en la producción de la tubería en la época en que fue puesta en servicio, factores ambientales de diferente índole, entre otros) que intervienen activamente en el proceso de deterioro de la conducción.

En la Tabla 61 se incluyen los resultados de la evaluación de este criterio. A la conducción ubicada en el centro de Gros, por presentar un mayor número de fallos por unidad de longitud y edad, se le asigna la máxima calificación. La tubería de Intxaurreondo, aun cuando es más vieja, presenta un mejor comportamiento que la mayoría de tuberías del grupo. Esto denota un comportamiento estable de esta tubería respecto a su tasa de deterioro.

Tabla 61. Calificación de cada tubería según número de roturas por año y unidad de longitud. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)

ID	Número de roturas (Roturas / km-año)	Calificación
P 900	0,95	3,18
P 600	0,85	2,82
G A	1,31	4,52
G C	2,78	10
E C	1,63	5,70
U P	2,31	8,25
I C	2,59	9,28
I H	1,28	4,42

5.2.2.3.3 Para el criterio capacidad de transporte

El comportamiento hidráulico de la tubería, con el paso del tiempo, tiende a variar. Este cambio se aprecia, generalmente, mediante una disminución en la capacidad de transporte tomando como punto de referencia la capacidad que tenía la tubería cuando fue instalada. La Tabla 62 incluye la evaluación respecto a este criterio. La mayor pérdida de capacidad de transporte, y por ende la mayor penalización, se presenta en la tubería del Polideportivo de Ulía.

La tubería histórica de Intxaurre, aunque según el criterio anterior no registra una tasa de fallos significativa respecto al grupo, sí presenta una pérdida de capacidad hidráulica importante, esto debido a las deposiciones calcáreas generadas con el tiempo.

Tabla 62. Calificación de cada tubería según pérdida de capacidad hidráulica. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)

ID	Pérdida de Capacidad hidráulica	Calificación
P 900	0,70	2,89
P 600	0,97	3,33
G A	2,59	4,30
G C	1,81	4,03
E C	3,64	5,15
U P	4,69	5,19
I C	4,44	5,06
I H	2,82	5,14

5.2.2.3.4 Para el criterio variaciones en la red ante la ocurrencia de una fuga no comunicada

Mediante la simulación en EPANET, se logra identificar que las mayores variaciones en presión y caudal al incluir en el modelo la ocurrencia de una fuga, se presentan en las tuberías polideportivo de Ulía y centro de Intxaurrondo (Tabla 63).

Sin embargo, la calificación para estas tuberías sigue siendo baja en la escala de 0 a 10, pues los puntos por penalización alcanzados son pocos en comparación con el máximo de puntos posible según la definición hecha para este criterio.

Tabla 63. Calificación de cada tubería según variaciones en la red por ocurrencia de fuga. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)

ID	Puntos de penalización por nudos afectados en cada intervalo	Calificación
P 900	0	0
P 600	0	0
G A	1	0,28
G C	0	0
E C	2	0,56
U P	12	3,33
I C	12	3,33

5.2.2.3.5 Para el criterio variaciones en la red ante la demanda imprevista por la atención a un incendio

Ante la posible ocurrencia de un incendio, la tubería del centro de Intxaurrondo sería la que más afectaciones - en el comportamiento de la presión - causaría en su entorno. En segundo lugar se encuentra la tubería del Polideportivo de Ulía. La tubería histórica parece seguir brindando un aceptable abastecimiento para emergencias de este tipo. La Tabla 64 contiene los resultados de penalización por este criterio.

Tabla 64. Calificación de cada tubería según variaciones en la red por ocurrencia de un incendio. Método de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)

ID	Puntuación por la falta de presión en el nudo	Puntuación por la influencia en los nudos cercanos	Calificación
P 900	0	0	0
P 600	0	0	0

ID	Puntuación por la falta de presión en el nudo	Puntuación por la influencia en los nudos cercanos	Calificación
GA	0	$1 \times 2 = 2$	0,1
GC	0	0	0
EC	0	$7 \times 1 + 2 \times 2 = 11$	0,55
UP	$2 \times (10 - 8,5) = 3$	$18 \times 1 + 2 \times 2 + 1 \times 3 + 6 \times 4 = 49$	2,45
IC	5 (Presiones negativas)	Presiones negativas	5
IH	0	0	0

5.2.2.3.6 Para el criterio tiempo de renovación óptimo según Shamir-Howard

Al aplicar la Ec. planteada por Shamir-Howard para establecer el tiempo óptimo en el cual se debe intervenir la tubería para mejorar sus condiciones de servicio con costo mínimo, se establece que la tubería histórica de Intxaurreondo es la que requiere una actuación preventiva - como era de esperarse - con mayor premura (ver Tabla 65).

Sin embargo, al conocer los resultados de la evaluación de esta misma conducción respecto a otros criterios, en la cual la tubería se desempeña adecuadamente, queda claro que la limitante de la Ec. de Shamir-Howard radica en que sus resultados dependen exclusivamente de la relación entre costos de sustitución y renovación, de la tasa de inflación anual y de la edad del elemento, ignorando otros factores que evidentemente también son relevantes.

Tabla 65. Calificación de cada tubería ante el tiempo de renovación óptimo según modelo de Shamir y Howard (Almandoz y otros, 2005)

ID	$t_s - t_o$	Calificación
P 900	22,7	0,92
P 600	14,9	4,06
GA	15,8	3,68
GC	6,8	7,28
EC	11,4	5,42
UP	9,3	6,28
IC	11,2	5,52
IH	5,3	7,87

5.2.2.3.7 Para el criterio deficiencia en los estándares de servicio por la suspensión del abastecimiento de agua

Ante un corte en la prestación del servicio, las tuberías con mayores diámetros son las que afectan a un mayor número de usuarios (P900 y P600). Estas tuberías, por ser tan importantes dentro de la estructura de funcionamiento de la red, reciben constante atención y tradicionalmente resultan priorizadas para recibir intervención.

Exceptuando estas dos tuberías, las restantes del grupo (Tabla 66) presentan una penalización similar, siendo la del centro de Intxaurreondo la siguiente en el orden de calificación.

Tabla 66. Calificación de cada tubería ante la deficiencia en los estándares de servicio por la suspensión del abastecimiento de agua (Almandoz y otros, 2005)

ID	Nº de nudos afectados a las 11 h				Calificación
	3-10 (mca)	10-20 (mca)	20-30 (mca)	> 30 (mca)	
P 900	0	0	0	168	10
P 600	45	19	82	0	4,86
G A	0	0	0	0	0,12
G C	0	0	0	0	0,04
E C	0	0	0	0	0,16
U P	2	2	0	0	0,12
I C	5	0	0	0	0,18
I H	0	0	0	0	0

5.2.2.3.8 Para el criterio impacto ambiental por una rotura

Las mayores afectaciones en el entorno, causadas por una potencial rotura, las generan las tuberías ubicadas en los lugares más céntricos (esto es, en el centro de Gros y en el centro de Intxaurreondo, seguidas de cerca por la tubería localizada en el centro de Eguía).

Las tuberías de mayores diámetros (P900 y P600), aun cuando debido a su caudal, podrían causar emergencias importantes, no resultan penalizadas en gran medida (Tabla 67), por ser aducciones localizadas en sitios retirados de la gran concentración demográfica de San Sebastián.

Tabla 67. Matriz de valoración semántica y calificación de cada tubería ante el impacto ambiental causado por una rotura (Almandoz y otros, 2005)

ID	Tráfico	Locales a nivel	Garajes	Comercios	Calificación
P 900	Nula	Nula	Nula	Nula	0
P 600	Escasa	Nula	Nula	Nula	0,75
G A	Importante	Escasa	Nula	Normal	4,75
G C	Importante	Importante	Nula	Importante	7,5
E C	Importante	Escasa	Importante	Normal	7,25
U P	Normal	Nula	Normal	Nula	3
I C	Importante	Importante	Nula	Importante	7,5
I H	Normal	Nula	Nula	Nula	1,5

5.2.3 Resultados finales de prioridad a la renovación

5.2.3.1 Lista priorizada de tuberías

Al interior del grupo de los ocho criterios evaluados, se le concede un peso relativo de 0.25 al criterio edad, 0.30 al historial de roturas, 0.05 a la capacidad de transporte, igual valor a los efectos de una fuga no comunicada y de la misma forma a los efectos de una demanda adicional por la ocurrencia de un incendio, y 0.10 a cada uno de los criterios año óptimo de renovación, efectos de un corte del suministro e impacto de una rotura en el entorno.

La suma de las puntuaciones de cada tubería dada en porcentaje, la prioridad de intervención (1: intervención muy prioritaria, 8: intervención muy poco prioritaria), se presentan en la Tabla 68.

Tabla 68. Resultado final de la aplicación del modelo de sumas ponderadas (Almandoz y otros, 2005)

Prioridad de intervención	ID	Calificación de la condición (%)
1	I C	55,4
2	G C	51,0
3	I H	50,2
4	U P	47,4
5	E C	41,8
6	G A	28,6
7	P 900	23,8
8	P 600	21,6

El análisis de resultados deja ver de manera inmediata que no es la tubería más antigua la primera en el grupo de tuberías seleccionadas a pesar de su edad.

Por el contrario, la tubería de Intxaurreondo centro, de 50 años (60 años menor que la tubería IH), tiene un historial de roturas mucho más grave (2,59 roturas/km y año), una clara incidencia en la red ante una fuga no comunicada y ante un incendio, y una probabilidad de impacto en el entorno también relevante.

5.2.3.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó mediante la introducción de variaciones en los pesos de los criterios.

Si en el peso relativo se le da mayor importancia al criterio edad, restándole peso al criterio historial de roturas (por ejemplo, 0.30 para la edad y 0.25 para el historial de roturas) y se conservan los pesos de importancia de los demás criterios, el ordenamiento variaría tal y como refleja la Tabla 69.

La tubería histórica debería ser la primera en renovar. Las restantes permanecen igual, excepto las dos tuberías principales que intercambian sus prioridades de renovación.

Tabla 69. Resultados de la aplicación del modelo decisional de sumas ponderadas. Análisis de sensibilidad (1) ante la variación de pesos de importancia de los criterios. Mayor importancia al criterio edad.

Prioridad de intervención	ID	Calificación de la condición (%)
1	I H	53,0
2	I C	51,8
3	G C	46,9
4	U P	44,5
5	E C	40,2
6	G A	27,2
7	P 900	22,6
8	P 600	20,6

Esta última combinación de pesos responde a un enfoque de gestión técnica muy tradicional y característico de empresas que solo cuentan con la información

básica (sólo cuentan una base de datos de inventario de activos y con una base de datos incipiente de registros de órdenes de trabajo).

Una modelación hidráulica detallada de la red genera simulaciones con bajos valores de incertidumbre. De ahí la importancia que tiene recopilar adecuadamente los datos de entrada a la herramienta informática que se utilice para modelar.

Si el modelo es confiable (pues se verifica que éste atiende a la realidad) pueden asignarse mayores pesos de importancia a los criterios hidráulicos, pues ellos dan buena cuenta de lo que pasa actualmente con la infraestructura.

Respecto al análisis anterior, si solo se cambia el peso del criterio edad y el peso del criterio variaciones en la red ante la ocurrencia de una fuga, disminuyendo a un valor de 0.15 el primer peso, aumentando a 0.20 el segundo, y dejando los demás criterios sin variaciones, se obtienen los resultados de la Tabla 70.

Tabla 70. Resultados de la aplicación del modelo decisional de sumas ponderadas. Análisis de sensibilidad (2) ante la variación de pesos de importancia de los criterios. Mayor importancia al criterio capacidad hidráulica.

Prioridad de intervención	ID	Calificación de la condición (%)
1	I C	53,7
2	U P	45,8
3	G C	44,3
4	I H	38,0
5	E C	36,3
6	G A	25,1
7	P 900	21,4
8	P 600	19,5

Al restar importancia a la edad, la tubería de IH (de 110 años) deja de ocupar alguno de los tres primeros puestos de prioridad a la intervención. En su lugar, ingresa al grupo prioritario la tubería del polideportivo de Ulía (UP).

Esto denota alta sensibilidad en los valores de presión en hora punta por la ocurrencia de la fuga en la tubería UP (descensos notables en la presión en ciertos nodos, y además gran cantidad de nodos del resto de la red afectados en menor cuantía).

Si se cuenta con acceso a bases de datos externas a las propias de la empresa (por ejemplo, las pertenecientes al ayuntamiento o la alcaldía, o bien a las de la oficina de dirección local de tránsito), y si la calidad de tal información es verificable, la evaluación de impacto ambiental causado por una avería en la red puede ser mucho más acertada.

De nuevo, respecto al análisis anterior, si el peso de importancia por variaciones en la red ante la ocurrencia de una fuga vuelve a establecerse en 0.05, y en cambio se aumenta el peso de importancia del criterio impacto ambiental por una rotura a 0.25, se generan los resultados de la Tabla 71.

El resultado generado tras esta última asignación de pesos es el esperado: las tuberías localizadas en lugares céntricos (IC, en el centro de Intxaurre, y también GC, en el centro de Gros) pasan a ocupar los lugares de mayor prioridad a la intervención, pues una potencial rotura en ellas causaría un colapso importante de ambos sectores.

Tabla 71. Resultados de la aplicación del modelo decisional de sumas ponderadas. Análisis de sensibilidad (3) ante la variación de pesos de importancia de los criterios. Mayor importancia al criterio impacto ambiental.

Prioridad de intervención	ID	Calificación de la condición (%)
1	I C	60,0
2	G C	55,6
3	E C	46,3
4	U P	45,3
5	I H	40,3
6	G A	31,8
7	P 900	21,4
8	P 600	20,6

En este resultado juega un rol principal la construcción de la matriz de valoración semántica que describe el grado de incidencia de la rotura en los diferentes tipos de usuarios, según la densidad de estos últimos en el sector.

Claramente el modelo decisional responde con resultados diversos para los tres primeros puestos de prioridad. Debe notarse que los tres últimos puestos (aquellos

de menos prioridad a la intervención) siempre son ocupados por las mismas tres tuberías: P600, P900 y GA.

Las dos primeras son consideradas como principales por la empresa de aguas, y permanecen bajo constante observación. GA (Ambulatorio de Gros), por su criticidad al abastecer a principal la entidad de salud del sector, también requiere especial atención.

Es claro que en la medida en que se cambian los pesos de importancia, se afecta el orden de prioridad final (los puestos superiores), más no así los puestos de menor prioridad la intervención (el fondo de la tabla). Aquí se evidencia la importancia de la opinión experta, y en tal sentido, lo acertado que puede ser el congregar dicho conocimiento en una base de datos específicamente creada para tal fin.

5.2.4 Enseñanzas y crítica a la propuesta

5.2.4.1 Bondades

El método de las Sumas Ponderadas constituyó el inicio del proceso tendiente a establecer una forma de priorización de tuberías, que fuera sistemática, y que permitiera considerar los criterios que cada empresa prestadora del servicio de abastecimiento o saneamiento considerara pertinentes.

Como punto de partida constituye una gran herramienta, pues permite dar una idea inicial de las tuberías y/o sectores que con mayor premura requieren intervención. Además de lo anterior, su implementación condujo a una serie de cuestiones que difícilmente se harían en ausencia de ella:

- ¿Qué criterios son pertinentes para el sistema de transporte de aguas estudiado?, ¿cómo elegirlos?
- ¿En qué forma se deberá evaluar cada criterio?
- ¿A qué nivel de la red se desea impactar con la aplicación del sistema de apoyo a la decisión: tuberías individuales?, ¿sectores?, ¿el sistema entero?
- ¿A qué nivel de la gestión se desea impactar con la aplicación del sistema de apoyo a la decisión: gestión técnica?, ¿gestión administrativa?, ¿ambas?

- ¿Se cuenta con suficiente información para implementar el sistema de apoyo a la decisión definido?
- ¿Qué grado de calidad posee dicha información?
- ¿Cuál es el equipo de personas que se verán directa e indirectamente involucradas para que la implementación del sistema de apoyo a la decisión sea exitosa y permanente?

Estas preguntas siguen siendo válidas, aún en la aplicación de otras propuestas de decisión diferentes a las Sumas Ponderadas.

5.2.4.2 Defectos

El principal factor limitante para aconsejar la implementación del método de las Sumas Ponderadas, radica en su naturaleza misma: la ponderación involucra la asignación de pesos de importancia. En este sentido, podría afirmarse que los resultados de la aplicación del sistema de apoyo basado en Sumas Ponderadas dependen en gran medida de los pesos asignados a cada factor incluido en el estudio. Prueba de ello lo constituyen los diferentes análisis de sensibilidad incluidos en este estudio.

En el primer análisis de sensibilidad presentado se da mayor importancia a la edad, y en consecuencia la tubería de Intxaurrondo, denominada histórica (con 110 años de funcionamiento), pasa a ocupar el sitio de máxima prioridad del grupo de estudio. Esta variación en la prioridad atiende, evidentemente, a la variación en los pesos de importancia. Las tuberías cuya edad es extrema se verán afectadas en su prioridad de manera preponderante.

Los pesos se asignan de manera subjetiva, y en consecuencia existe un relevante grado de subjetividad en los resultados. Lo anterior debe ser entendido como un aspecto diferente a la incertidumbre con la que el decisor define los resultados según un criterio dado. La incertidumbre está asociada a la actividad misma de la medición de valores respecto a una variable, y en mayor o menor grado está presente en todos los modelos matemáticos donde se involucran factores físicos.

Sin embargo, respecto al peso de importancia de un criterio, existen técnicas de trabajo grupal que pueden aplicarse para definirlo, y que buscan mediante el

alcance de un consenso, disminuir la subjetividad que una u otra persona, de manera individual, le pueden imprimir a la evaluación una determinada característica.

La asignación de pesos también puede ser interpretada erróneamente como una forma de restar importancia a aquellos criterios de los cuales se cuenta con poca información. Asignar pesos de importancia bajos a aquellas características de las cuales se tiene información escasa o poco fiable, constituye un error procedimental que puede llevar a resultados que difieran con la realidad. Iniciar una medición sistemática de las variables que se consideren relevantes para caracterizar la red, es la única manera de contar a futuro con modelos decisionales fiables.

Otro problema detectado al aplicar el método de las Sumas Ponderadas, aunque no es exclusivo de dicha metodología, consiste en la adopción de funciones para evaluar cada criterio en la fase previa a la ponderación mediante pesos. Para la evaluación de las tuberías de estudio respecto al criterio Edad, se asumió una función cuadrática para asignar una calificación a cada conducción, en un rango entre 0 y 10. Para otros criterios, la función asumida era de tipo lineal (como es el caso de la capacidad de transporte) o logarítmica (en el caso del tiempo de renovación óptimo).

La elección de una u otra función depende exclusivamente del comportamiento de la variable estudiada, y aunque la literatura técnica puede proveer aproximaciones, es el grupo de decisores quien determina dicha función, de acuerdo con su conocimiento y con los registros históricos que denotan el comportamiento particular de la red respecto a la variable.

5.3 Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de tuberías de abastecimiento mediante Programación Por Compromiso

5.3.1 Base metodológica de la Programación Por Compromiso

5.3.1.1 Estructura matemática de la Programación Por Compromiso

En general, la solución de un problema multicriterio mediante la Programación por Compromiso se desarrolla mediante la aplicación de la siguiente estructura:

- Identificación del problema, objetivos y propósitos.
- Establecimiento de criterios para la evaluación del sistema que relacionen estados actuales del sistema y especificaciones o valores ideales.
- Establecimiento de alternativas relacionadas con la consecución de los objetivos.
- Cuantificación del estado de cada alternativa respecto a cada uno de los criterios considerados (y desde este punto, generación de la matriz criterios/alternativas)
- Ejecución del modelo y realización del análisis de sensibilidad de los resultados ante diferentes pesos de criterios, pesos de grupos y factores de balance P.

El sistema soporta a la toma de decisión multicriterio mediante la Programación Por Compromiso, al igual que sus similares pertenecientes al grupo de métodos basados en la distancia, identifican las soluciones que se encuentran más cerca de la solución ideal, mediante cierta medida de dicha distancia o desviación.

Las soluciones identificadas como más cercanas a la solución ideal (o con menor desviación) son llamadas Soluciones de Compromiso y constituyen el Conjunto de Compromiso. En este sistema de ayuda a la decisión lo que se busca es, pues, comparar distancias obtenidas por cada alternativa respecto a un valor considerado como ideal, que si bien muchas veces no se conoce a priori pues se genera a partir de la combinación de óptimos de todos los criterios considerados en un mismo grupo, sí es el mismo para todas las alternativas.

5.3.1.1.1 *Función de desviación relativa, factor de balance, peso y distancia al valor ideal*

En primera instancia se requiere asegurar que la desviación de la alternativa i respecto a un valor óptimo para un criterio dado j , $f_{j,i}$, sean conmensurable con otras desviaciones (y respecto a otros criterios).

Por ello, la desviación a considerar debe ser relativa y no absoluta, siendo el rango utilizado para dicha operación el comprendido entre los valores ideal, $f_{j,ideal}$,

y anti-ideal, $f_{j,anti-ideal}$, valores que en la mayoría de los casos corresponden con los máximos y mínimos del grupo de las alternativas que son objeto de consideración en el estudio.

Así, la función de escalado lineal del valor de calificación (o evaluación) de la alternativa i respecto al criterio j viene dada por:

$$S_{j,i} = \left| \frac{f_{j,ideal} - f_{j,i}}{f_{j,ideal} - f_{j,anti-ideal}} \right| \quad \text{Ec. 112}$$

La elección del factor de balance refleja la preocupación del gestor respecto a la desviación máxima. Un valor de P igual a 1 hace que todas las desviaciones absolutas (distancias) sean valoradas (mediante el peso que las afecta) de igual manera, y de ahí que exista total compensación entre criterios. Con P igual a 2 cada desviación será valorada acorde con su magnitud (mayores desviaciones serán proporcionalmente más valoradas).

A medida que el factor de balance P aumente más y más, la desviación más grande recibirá más y más peso y de ahí que influirá más en la distancia final.

Un factor P igual a ∞ implicaría que no existe compensación alguna entre criterios, pues la máxima desviación correspondiente a un sólo criterio dominaría totalmente la solución respecto a la agregación de las demás.

Junto con el factor de balance P , el peso W conforma la pareja de parámetros presentes en la programación por compromiso.

El peso no hace más que reflejar el grado de importancia que el decisor otorga a determinado criterio o grupo de criterios cuando lo compara con sus similares. Éste, a diferencia de los factores de balance P mayores a 2, es una magnitud cuya representación es intuitiva y por ello su utilización en cierta medida facilita la aplicación exitosa de gran parte de las metodologías para la toma de decisión multicriterio.

Por otro lado, el peso W conduce los resultados a favor o en contra de ciertos criterios.

A partir de la elección del factor de balance P y de la determinación de las desviaciones relativas de la alternativa para cada criterio del grupo, se calcula la distancia de dicha alternativa al valor ideal posible del grupo k, conformado por j criterios, así:

$$L_{k,i} = \left[\sum_{j=1}^{j=J} w_j^{P_k} \times S_{j,i}^{P_k} \right]^{1/P_k} \quad \text{Ec. 113}$$

5.3.1.2 Establecimiento del grado de prioridad a la renovación de tuberías

5.3.1.2.1 Mediante el uso de la programación por compromiso simple

El uso exclusivo de la Programación Por Compromiso con el objeto de alcanzar la solución final del problema multicriterio comporta, al interior de todos los niveles jerárquicos planteados, un conocimiento acertado al más alto grado de las relaciones de importancia entre sus integrantes.

Esto es así dado el papel preponderante que el factor de balance P asume en la estructura matemática: actúa como exponente que penaliza, cada vez más en la medida que se le incrementa, las mayores desviaciones del valor ideal para el cual se trata de encontrar la distancia a la que la alternativa se encuentra.

Tomando como nuevas desviaciones relativas las distancias de las alternativas a los valores ideales para cada grupo de criterios, calculadas en la iteración anterior, y haciendo uso de un único valor P global, y de los pesos ya no de cada criterio, sino de cada grupo, se ejecuta una nueva iteración que genera, para cada alternativa, la distancia final al valor ideal global.

Para la confección de la lista con el orden de prioridad, dichas distancias se ordenan de mayor a menor (aparejadas, como es obvio, con el identificativo de la tubería correspondiente) siendo pues las mayores magnitudes aquellas que acarrearán una más imperiosa necesidad de renovación, pues son las que se encuentran más distanciadas del valor ideal, aquel de poca o nula necesidad de renovación.

Se tiene entonces, para k grupos de criterios, que la distancia global de la alternativa i al valor ideal (también global) viene dada por:

$$L_{globali} = \left[\sum_{k=1}^{k=K} w_k^{P_{global}} \times L_{k,i}^{P_{global}} \right]^{1/P_{global}} \quad Ec. 114$$

5.3.1.2.2 Mediante la ponderación de distancias

Ante la posibilidad de enfrentar un moderado o alto grado de incertidumbre en la conformación de los grupos de criterios o en el establecimiento de las relaciones de importancia entre ellos, podría no ser recomendable el uso de la programación por compromiso para la ejecución de una segunda iteración que genere los resultados finales.

Esta situación potenciaría en gran medida el aumento del posible error en las relaciones o en la conformación de los grupos, al penalizar las mayores desviaciones al ideal sin estar seguros que estas en realidad existan.

Se presenta como método alternativo, el uso de la ponderación de aquellas distancias de cada alternativa al valor ideal de cada grupo considerado por el peso de importancia que se le asigne a cada uno de estos últimos (y no la potenciación de estas distancias por el factor P) y la posterior sumatoria de dichos productos. Así pues, se tiene:

$$L_{globali} = \sum_{k=1}^{k=K} w_k \times L_{k,i} \quad Ec. 115$$

Ante el posible surgimiento de dudas sobre los criterios que deben integrar un grupo, o sobre las relaciones de importancia entre grupos, el presente método podría constituirse en mejor opción para la obtención de los resultados finales. La razón es que esta opción no incluye en su planteamiento al factor de balance P, el cual penaliza claramente las desviaciones relativas más grandes, convirtiéndolas en valores preponderantes en la consecución del resultado final.

En caso de no asegurar la fiabilidad de dichas desviaciones, al utilizar el factor de balance P se estaría magnificando un posible error inducido por la consideración de desviaciones que en la realidad pueden no ser tan grandes.

5.3.2 Ejemplo de aplicación de la metodología de Programación Por Compromiso a una red de abastecimiento del norte de España

El siguiente caso de estudio considera las mismas 8 tuberías incluidas en la aplicación del método de las Sumas Ponderadas para tuberías de abastecimiento. La metodología resulta adecuada para cualquier número de tuberías.

5.3.2.1 Tuberías del estudio

Las tuberías incluidas en este estudio son las mismas del ejemplo de la metodología de Sumas Ponderadas. Estas tuberías son (Tabla 72):

Tabla 72. Listado de tuberías de estudio

Tubería	ID
Principal de diámetro 900 mm	P 900
Principal de diámetro 600 mm	P 600
Ambulatorio de Gros	G A
Centro de Gros	G C
Centro de Eguía	E C
Polideportivo de Ulía	U P
Centro de Intxaurreondo	I C
Histórica de Intxaurreondo	I H

5.3.2.2 Criterios incluidos en el estudio

Los criterios considerados para este caso de aplicación son los mismos que se incluyeron en el ejemplo de la metodología de Sumas Ponderadas. Ellos son:

- Edad de la tubería
- Historial de fallos
- Capacidad de transporte
- Variaciones en la red ante la ocurrencia de una fuga no comunicada

- Variaciones en la red ante la demanda imprevista por la atención a un incendio
- Tiempo de renovación óptimo según Shamir-Howard
- Deficiencia en los estándares de servicio por la suspensión del abastecimiento de agua
- Impacto ambiental por una rotura

5.3.2.3 Cálculo de las distancias de compromiso de cada alternativa al valor ideal de cada grupo de criterios

Como se indicó anteriormente, el cálculo de la distancia de compromiso de la i -ésima alternativa al j -ésimo grupo de criterios parte de la normalización del valor que cada alternativa alcanza en cada criterio de dicho grupo.

Así pues, para la tubería IC y considerando el criterio Edad de la tubería (perteneciente al grupo Fundamentales), su valor escalado para asegurar su pertenencia al rango [Mín, Máx] es:

$$S_{EdadTubería,IC} = \left| \frac{f_{EdadTubería,ideal} - f_{EdadTubería,IC}}{f_{EdadTubería,ideal} - f_{EdadTubería,anti-ideal}} \right| \quad \text{Ec. 116}$$

Los valores ideales y anti-ideales de la función f , son en este estudio los mejores y peores valores que han alcanzado las 8 tuberías en la magnitud característica de cada criterio, siendo el mejor valor aquel que conduzca a una necesidad prioritaria para la renovación menor y viceversa.

Por ejemplo, para el criterio Edad de la tubería, el mejor valor alcanzado en el grupo, y por tanto el F ideal, lo obtienen las tuberías P900 y P600 (30 años de antigüedad).

Así mismo, el peor valor lo obtiene, por supuesto, la tubería IH (110 años) que corresponde pues al F anti-ideal. La Tabla 73, la Tabla 74 y la Tabla 75 citan los valores de F ideales y anti-ideales considerados para cada criterio según el grupo al que éstos pertenecen, además del factor de balance P en principio aplicado a todos los grupos de criterios.

Tabla 73. Valores ideales y anti-ideales de los criterios pertenecientes al grupo "Fundamentales"

Grupo		FUNDAMENTALES		
Criterio	Edad de la tubería	Roturas en 30 años		P grupo
W criterio	0,45	0,55		2,00
F ideal	30,00	5,00		
F anti-ideal	110,00	18,00		

Tabla 74. Valores ideales y anti-ideales de los criterios pertenecientes al grupo "Hidráulicos"

Grupo		HIDRÁULICOS			
Criterio	Pérdida de capacidad de transporte	Sensibilidad de la red ante una fuga	Rta. Ante incendio (A +B)		P grupo
W	0,33	0,33	0,17	0,17	2,00
F ideal	0,70	0,00	47,30	0,00	
F anti - ideal	4,69	12,00	-4,00	49,00	

Tabla 75. Valores ideales y anti-ideales de los criterios pertenecientes al grupo "Especiales"

Grupo		ESPECIALES		
Criterio	Tiempo de renovación óptimo	Influencia de un corte de agua	Impacto de una rotura en el entorno	P grupo
W	0,33	0,33	0,33	2,00
F ideal	22,69	0,00	0,00	
F anti-ideal	5,32	114694,00	7,50	

A manera de ejemplo, se muestra la obtención del valor de evaluación escalado S para la tubería IC, referido al criterio Edad de la tubería, y utilizando para ello la expresión que relaciona los valores ideal, anti-ideal y el propio asignado a la alternativa. Así pues, considerando que la tubería IC tiene 50 años de instalada en campo, se tiene que:

$$S_{EdadTubería,IC} = \frac{|30 - 50|}{|30 - 110|} = 0.250 \quad \text{Ec. 117}$$

Mediante la expresión que relaciona estos valores normalizados con el factor de balance P de cada grupo de criterios, se consigue cuantificar la distancia de compromiso L_p a la que se encuentra cada alternativa del valor ideal del grupo de criterios.

Siguiendo con el ejemplo, y considerando para la tubería IC un valor $S_{\text{historial roturas}}=0.308$, y un factor $P_{\text{Fundamentales}}=2$, se obtiene la siguiente distancia de IC al valor ideal del grupo “Fundamentales”, $L_{\text{Fundamentales, IC}}$, igual a:

$$L_{\text{Fundamentales, IC}} = \left[\sum_{j=1}^{j=2} w_j^2 \times S_{j, IC}^2 \right]^{1/2} = \left[(0.45^2 \times 0.250^2) + (0.55^2 \times 0.308^2) \right]^{1/2} = 0.20 \quad \text{Ec.}$$

118

De la misma manera se han obtenido las distancias de compromiso de cada alternativa para cada grupo de criterios. Dichos valores se encuentran en la Tabla 76, la Tabla 77 y la Tabla 78.

Tabla 76. Parámetros $F(x)$, S y distancia de las alternativas al valor ideal del grupo “Fundamentales”

Grupo	FUNDAMENTALES				
	Tub.	F(x) Edad	S Edad	F(x) Roturas	S Roturas
P 900	30,00	0,00	8,00	0,23	0,13
P 600	30,00	0,00	15,00	0,77	0,42
G A	45,00	0,19	12,00	0,54	0,31
G C	45,00	0,19	5,00	0,00	0,08
E C	65,00	0,44	10,00	0,38	0,29
U P	55,00	0,31	7,00	0,15	0,16
I C	50,00	0,25	9,00	0,31	0,20
I H	110,00	1,00	18,00	1,00	0,71

Tabla 77. Parámetros $F(x)$, S y distancia de las alternativas al valor ideal del grupo "Hidráulicos"

Grupo		HIDRÁULICOS							
Tub.	F(x) Cap. Trans	S Cap. Trans.	F(x) Fuga	S Fuga	F(x) Incen A	S Incen A	F(x) Incen B	S Incendio B	Dist. de la alternativa al ideal del grupo
P 900	0,70	0,00	0,00	0,00	47,30	0,00	0,00	0,00	0,00
P 600	0,97	0,07	0,00	0,00	47,30	0,00	0,00	0,00	0,02
G A	2,59	0,47	1,00	0,08	37,60	0,19	2,00	0,04	0,16
G C	1,81	0,28	0,00	0,00	47,30	0,00	0,00	0,00	0,09
E C	3,64	0,74	2,00	0,17	42,70	0,09	11,00	0,22	0,25
U P	4,69	1,00	12,00	1,00	8,50	0,76	49,00	1,00	0,52
I C	4,44	0,94	12,00	1,00	-4,00	1,00	43,00	0,88	0,51
I H	2,82	0,53	0,00	0,00	22,80	0,48	0,00	0,00	0,19

Tabla 78. Parámetros $F(x)$, S y distancia de las alternativas al valor ideal del grupo "Especiales"

Grupo		ESPECIALES					
Tubería	F(x) Tiempo Renov. Óptimo	S Tiempo Renov. Óptimo	F(x) Corte servicio	S Corte servicio	F(x) Impacto Rotura	S Impacto Rotura	Dist. de la alternativa al ideal del grupo
P 900	22,69	0,00	114694,00	1,00	0,00	0,00	0,33
P 600	14,86	0,45	55687,64	0,49	0,75	0,10	0,22
G A	15,81	0,40	1427,00	0,01	4,75	0,63	0,25
G C	6,80	0,92	404,00	0,00	7,50	1,00	0,45
E C	11,44	0,65	1846,00	0,02	7,25	0,97	0,39
U P	9,29	0,77	1353,48	0,01	3,00	0,40	0,29
I C	11,20	0,66	2011,85	0,02	7,50	1,00	0,40
I H	5,32	1,00	0,00	0,00	1,50	0,20	0,34

5.3.3 Resultados finales de prioridad a la renovación

5.3.3.1 Lista priorizada de tuberías

Basados en las distancias obtenidas en el paso anterior, se obtiene, bien mediante el uso de pesos (ponderación por pesos de las distancias al valor ideal del grupo, en la fase de cálculo final) o mediante una nueva iteración del método de las

distancias (programación por compromiso simple), el grado de prioridad para la renovación que cada tubería posee dentro del conjunto global de alternativas y criterios considerados.

5.3.3.1.1 Mediante el uso de la programación por compromiso simple

La confección de una lista priorizada de las tuberías a renovar, obtenida mediante el sólo uso de la programación por compromiso, requiere, bajo el esquema de problema aquí planteado - que consta de un nivel jerárquico donde se citan los criterios que conforman un grupo dado y otro donde se relacionan todos los grupos existentes - una segunda iteración en la que se aplica el citado método, adicional a la primera ya ejecutada y en la que previamente se obtienen las distancias de cada alternativa al valor ideal de cada uno de los grupos de criterios establecidos.

En la segunda iteración, a diferencia de la primera, las distancias que se generan como resultado serán aquellas a las cuales cada alternativa se encuentra del valor ideal global, es decir, estas distancias son el resultado final de la aplicación del método, siendo una mayor magnitud en ellas sinónimo de mayor prioridad para la renovación. Para la ejecución de esta segunda iteración, los resultados finales de la primera iteración (distancias de las alternativas a cada grupo) se convierten en valores de entrada a partir de los cuales, y mediante un valor de P ya no específico para cada grupo, sino global, se obtiene una única distancia de cada alternativa al valor ideal (ver Tabla 79), también global.

Tabla 79. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso simple

P=2	FUNDAMENTALES	HIDRÁULICOS	ESPECIALES
W Grupo	0,55	0,15	0,3
Alternativa	Distancia al valor ideal global	Ordenación	Prioridad para renovar
P 900	0,14913415	0,57369549	I H
P 600	0,29753213	0,30120773	G C
G A	0,20482145	0,29753213	P 600
G C	0,30120773	0,29385024	I C
E C	0,29057937	0,29057937	E C
U P	0,18705663	0,20482145	G A
I C	0,29385024	0,18705663	U P
I H	0,57369549	0,14913415	P 900

5.3.3.1.2 Mediante el uso de la programación por compromiso con ponderación de las distancias de compromiso en la fase de cálculo final

Si el decisor, en nuestro caso concreto el gestor de la red, quien proporciona los pesos iniciales de grupos y criterios, no tiene suficiente claridad sobre la conveniencia de incluir o no determinados criterios en uno u otro grupo, o posee cierta duda sobre los grados de importancia entre grupos, resulta arriesgado continuar con la aplicación de la programación por compromiso con factor de balance $P=2$ o mayor en una segunda iteración (y este es el rango de P para el cual el método resulta verdaderamente útil), como base matemática para la obtención de la solución final.

Cabe recordar que el valor de $P=2$ hace que en el cálculo cada desviación sea sopesada en proporción a su magnitud, y que a medida que se aumente P las alternativas con desviaciones mayores del valor ideal reciben un peso cada vez mayor, induciendo por esto a errores cada vez mayores en el caso que tales relaciones sean imprecisas. Es recomendable pues, en este caso, calcular los resultados finales a partir de la ponderación de las distancias calculadas en el paso previo, por los pesos asignados de manera subjetiva a cada grupo de criterios (ver Tabla 80).

Tabla 80. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso y de la ponderación de distancias en su última fase

W Grupo	FUNDAMENTALES	HIDRÁULICOS	ESPECIALES
	0,55	0,15	0,3
Alternativa	Suma de distancias ponderadas	Ordenación	Prioridad para renovar
P 900	0,169707692	0,521883636	I H
P 600	0,303044969	0,313346177	E C
G A	0,268532554	0,307679732	I C
G C	0,195705516	0,303044969	P 600
E C	0,313346177	0,268532554	G A
U P	0,254361232	0,254361232	U P
I C	0,307679732	0,195705516	G C
I H	0,521883636	0,169707692	P 900

5.3.3.2 Análisis de sensibilidad

5.3.3.2.1 Ante variaciones en el peso de los criterios

Conservando siempre la suma de los pesos de cada grupo de criterios igual a 1, se induce un aumento del 50% en el peso de un criterio (con la consecuente disminución en el peso de los restantes criterios del grupo) dejando constantes los pesos de los criterios de los restantes grupos, con la finalidad de observar la sensibilidad de los resultados finales ante tales variaciones (Tabla 81).

Tabla 81. Variaciones introducidas en los pesos de los criterios del grupo "Fundamentales" para la realización del análisis de sensibilidad de los resultados

Grupo	Criterio	W criterio nuevo	W criterio anterior
FUNDAMENTALES	Edad actual	0,68	0,45
	Roturas en los últimos 30 años	0,32	0,55

Las nuevas distancias de compromiso de las alternativas al valor ideal del grupo afectado por el cambio, así como los nuevos resultados finales que se producen ante tales variaciones, se muestran en la Tabla 82.

Tabla 82. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso con ponderación de distancias en su última fase final, ante la variación en los pesos de los criterios del grupo "Fundamentales"

Alternativa	Nueva distancia de la alternativa al valor ideal del grupo FUNDAMENTALES	Nueva suma de distancias ponderadas de la alternativa	Distancias ordenadas	Prioridad para renovar
P 900	0,0846	0,1464	0,5535	I H
P 600	0,2821	0,2255	0,3344	E C
G A	0,2345	0,2282	0,3076	I C
G C	0,1266	0,2189	0,2842	U P
E C	0,3273	0,3344	0,2282	G A
U P	0,2184	0,2842	0,2255	P 600
I C	0,2030	0,3076	0,2189	G C
I H	0,7682	0,5535	0,1464	P 900

Ante la implementación de los nuevos pesos de criterios que componen el grupo “Fundamentales”, palpable en un aumento de la importancia de la edad de la tubería al interior del grupo, se obtiene un nuevo orden de prioridad a la renovación, en el cual la tubería del Polideportivo de Uliá ya urge de manera más pronunciada una pronta renovación, y ya no tanto la tubería principal de diámetro 600 mm.

Similarmente, se pueden generar sendas listas de prioridad a partir de las nuevas sumas de distancias ponderadas de las alternativas, halladas a partir del aumento de 50% en uno de los criterios del grupo “Hidráulicos” y en uno de los criterios del grupos “Especiales”, respectivamente.

A partir de los nuevos pesos de criterios se generan cambios en las distancias de las alternativas al valor ideal de cada grupo de criterios: la Figura 82 muestra una disminución drástica de la distancia de compromiso de la tubería principal de 600 mm al valor ideal del grupo “Fundamentales”.

De forma similar, se percibe un aumento de la distancia de compromiso de la tubería del centro del barrio Eguía al valor ideal del grupo “Hidráulicos”, y un aumento de la distancia de compromiso de esta misma y de la relativa a la tubería del centro del barrio de Intxaurreondo al valor ideal del grupo “Especiales”.

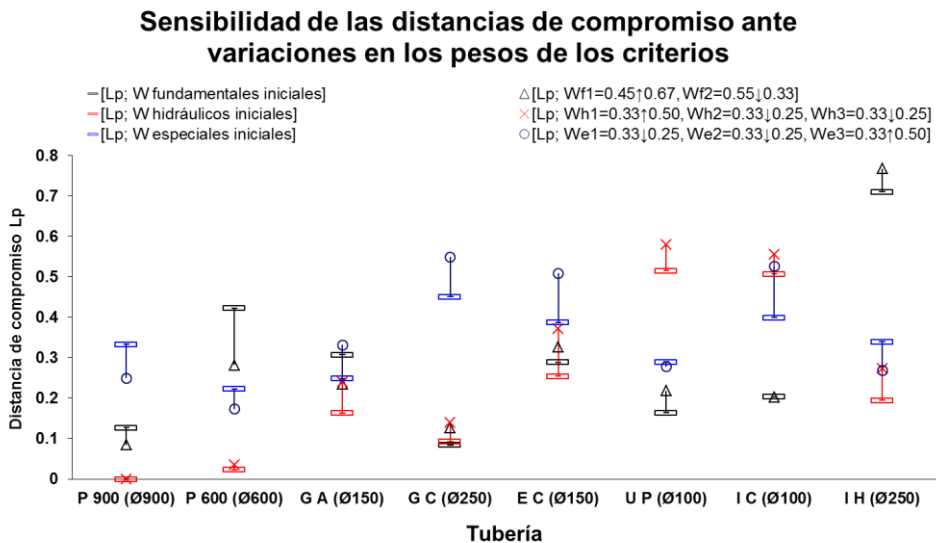


Figura 82. Cambios en las distancias de compromiso de cada grupo de criterios ante variaciones introducidas en los pesos de los criterios que lo componen

Lo anterior se manifiesta, de manera inmediata, en una disminución del valor de la suma ponderada de las distancias de compromiso globales a cada grupo de criterios, perteneciente a la tubería principal de 600 mm y por ende en una disminución de su necesidad de ser renovada con más urgencia, todo esto ante el aumento en el peso del criterio “Edad de la tubería”.

De igual manera, y debido a un aumento del peso del criterio “capacidad de transporte”, aumenta la necesidad de una pronta renovación de la tubería del centro del barrio de Egía. Ante el aumento en el peso del criterio “Impacto de una rotura en el entorno”, las tuberías del centro de los barrios de Egía e Intxaurreondo pasan a necesitar una intervención más pronta.

Sensibilidad de los resultados finales ante variaciones en los pesos de los criterios

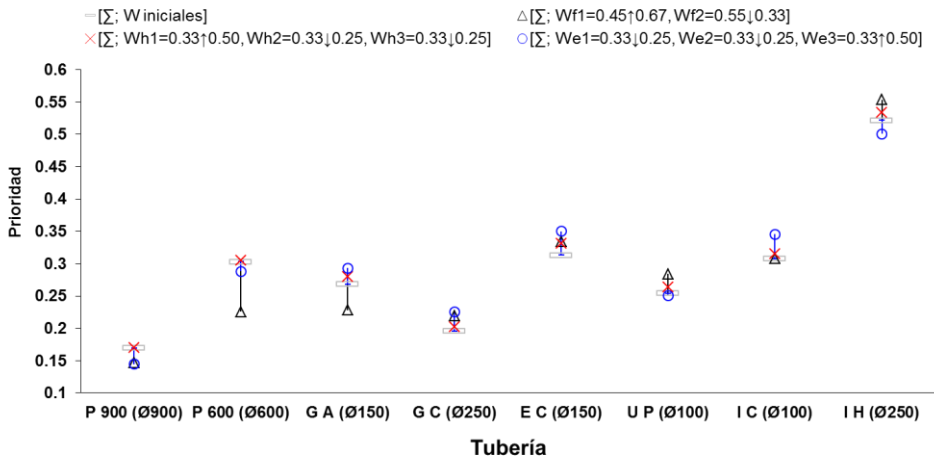


Figura 83. Cambios en los resultados finales ante variaciones introducidas en los pesos de los criterios, mediante el uso de la programación por compromiso y la ponderación de distancias en última fase

5.3.3.2.2 Ante variaciones en el peso de los grupos de criterios (mediante la ponderación de distancias en la fase final)

En un nivel más general, y haciendo uso de la ponderación de las distancia en la fase final del proceso, se desea conocer el grado de afectación que ocurre en el

orden de prioridad final (Tabla 84) ante el aumento del 50 % en el peso de un grupo de criterios, con la consecuente disminución de los otros dos pesos de grupos restantes para que la suma final de pesos sea siempre igual a 1 (Tabla 83).

Tabla 83. Aumento introducido en el peso del grupo de criterios “Fundamentales” para la realización del análisis de sensibilidad de los resultados generados mediante la programación por compromiso y la ponderación de distancias en la fase final

Aumento en peso del grupo FUNDAMENTALES			
Grupo	FUNDAMENTALES	HIDRÁULICOS	ESPECIALES
W Grupo	0,825 (antes 0,55)	0,058333333 (antes 0,15)	0,116666667 (antes 0,3)

Los cambios introducidos en los pesos de los tres grupos de criterios (al aumentar el del grupo “Fundamentales” disminuyen los correspondientes a los grupos “Hidráulicos” y “Especiales”) generan cambios en el orden de prioridad.

Se presenta un aumento sustancial de la prioridad de renovación de la tubería principal de 600 mm (cuya distancia de compromiso al grupo “Fundamentales” es, después de la de la tubería histórica de Intxaurre, la mayor de la muestra).

Además ocurre un intercambio de puestos de orden de prioridad entre la tubería del centro del barrio de Gros y la principal de 900 mm, y moderados cambios en las prioridades de renovación de las tuberías del centro del barrio de Intxaurre y del ambulatorio del Gros.

Tabla 84. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso con ponderación de distancias en su última fase ante el aumento del peso del grupo “Fundamentales”

Alternativa	Nueva suma de distancias ponderadas de la alternativa	Distancias ordenadas	Prioridad para renovar
P 900	0,1436	0,6372	I H
P 600	0,3764	0,3764	P 600
G A	0,2926	0,2985	E C
G C	0,1277	0,2926	G A
E C	0,2985	0,2438	I C
U P	0,1992	0,1992	U P
I C	0,2438	0,1436	P 900
I H	0,6372	0,1277	G C

De igual forma, se presenta un par listas de prioridad a partir de las nuevas sumas de distancias de las alternativas, halladas a partir del aumento de 50% en el peso del grupo de criterios “Hidráulicos” y “Especiales” respectivamente, y disminuyendo de manera proporcional a su valor original el peso de los dos grupos no afectados restantes.

El cambio introducido en el peso del grupo “Fundamentales”, más una posterior aplicación de la programación por compromiso y la ponderación de distancias en última fase, muestran un aumento mayor en la suma ponderada final (resultado final del método) de la tubería histórica de Intxaurreondo. Este aumento verifica el primer puesto en el orden de prioridad que ya tenía desde la evaluación original, según lo visto en la Figura 84. Allí también se nota como el aumento en la suma ponderada de la tubería principal de 600 mm la catapulta automáticamente hacia una posición de urgente necesidad de renovación, cuando antes se encontraba muy igualada entre sus similares GA, EC, UP e IC.

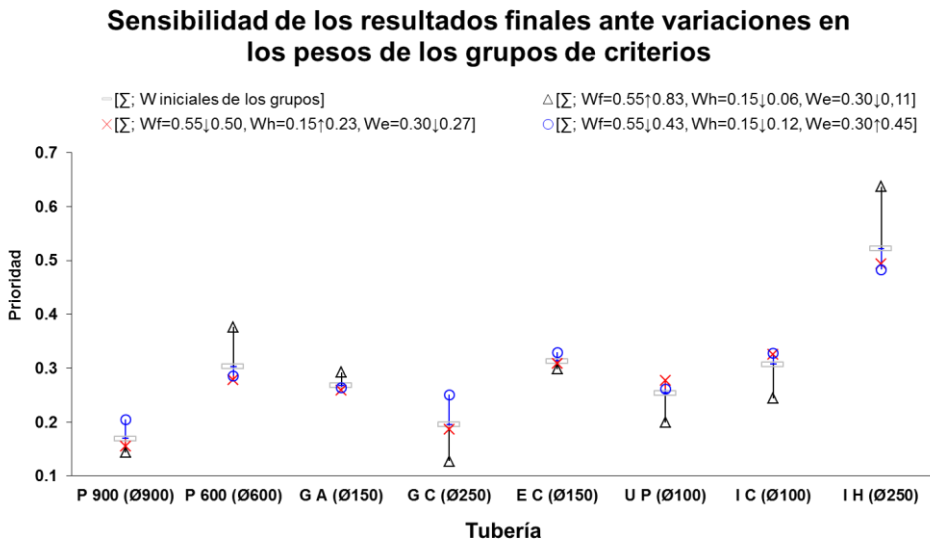


Figura 84. Cambios en los resultados finales ante variaciones introducidas en los pesos de los grupos de criterios, mediante el uso de programación por compromiso y la ponderación de distancias en última fase

5.3.3.2.3 Ante variaciones en el peso de los grupos de criterios (mediante el uso de la programación por compromiso simple)

Similar a lo analizado en el epígrafe anterior, pero esta vez haciendo uso exclusivo del método de la programación por compromiso simple, se desea también conocer el grado de afectación ocurrido en el orden de prioridad para renovación de alternativas final (Tabla 86)

El cambio en el orden de prioridad se da tras el aumento del 50 % en el peso de un grupo de criterios, con la ya mencionada disminución de los otros dos pesos de grupos restantes para que la suma final de pesos sea igual a 1 (Tabla 85).

Tabla 85. Aumento introducido en el peso del grupo de criterios “Fundamentales” para la realización del análisis de sensibilidad de los resultados generados mediante la programación por compromiso simple

Aumento en peso del grupo FUNDAMENTALES			
Grupo	FUNDAMENTALES	HIDRÁULICOS	ESPECIALES
W Grupo	0,825 (antes 0,55)	0,058333333 (antes 0,15)	0,116666667 (antes 0,3)

En función del cambio introducido en el peso del grupo de criterios “Fundamentales”, y obteniendo aquí los resultados finales mediante el uso de la programación por compromiso simple, se puede observar una necesidad de renovación mayor en la tubería que abastece el Ambulatorio de Gros.

Éste es el único cambio drástico sufrido respecto al orden de prioridad para la renovación original alcanzado mediante este mismo método.

Tabla 86. Resultado final tras la aplicación del método de la programación por compromiso simple ante el aumento del peso del grupo de criterios “Fundamentales”

Alternativa	Nueva distancia de la alternativa al valor ideal global	Distancias ordenadas	Prioridad para renovar
P 900	0,079346769	0,827434802	I H
P 600	0,446195397	0,446195397	P 600
G A	0,295376824	0,295376824	G A
G C	0,117164198	0,283776955	E C
E C	0,283776955	0,189437226	I C

Alternativa	Nueva distancia de la alternativa al valor ideal global	Distancias ordenadas	Prioridad para renovar
U P	0,124689783	0,124689783	U P
I C	0,189437226	0,117164198	G C
I H	0,827434802	0,079346769	P 900

Al inducir cambios en los pesos de los grupos de criterios (en este caso, aumento en el del grupo “fundamentales” y disminución en los referidos a los dos grupos restantes), y mediante una posterior aplicación de la programación por compromiso simple, se nota (Figura 85) un aumento mayor en la distancia al valor ideal global de la tubería histórica de Intxaurre y de la tubería principal de 600 mm.

También se detecta una disminución mucho más notable en la distancia al valor ideal global de la tubería GC, este último caso no tan claro en los resultados mediante la aplicación del método de la programación por compromiso con ponderación de distancias en última fase.

Sensibilidad de los resultados finales al valor ideal global ante variaciones de los pesos de los grupos de criterios

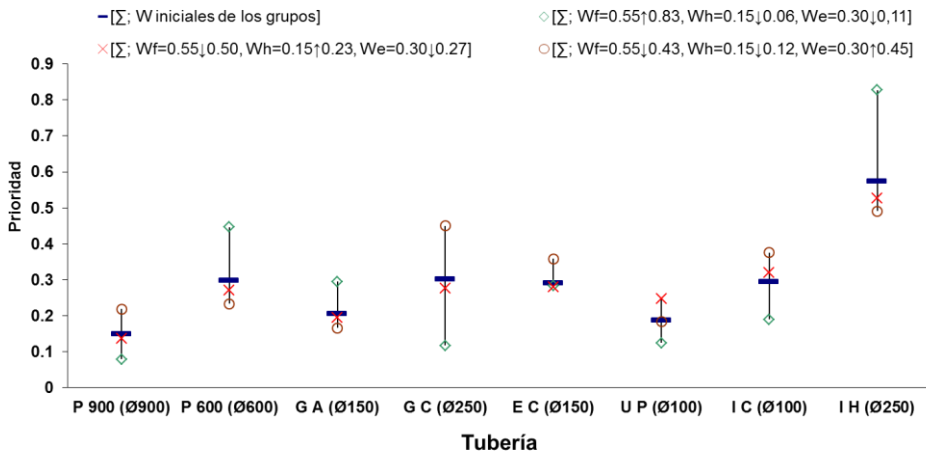


Figura 85. Cambios en los resultados finales ante variaciones introducidas en los pesos de los grupos de criterios, mediante el uso de la programación por compromiso simple

5.3.4 Enseñanzas y crítica a la propuesta

5.3.4.1 Bondades

El método de la programación por compromiso permite identificar la alternativa más cercana (o más lejana, si se habla de prioridades a la renovación) respecto a un valor ideal mediante la medida de la distancia a dicho valor.

Esta medida de distancia de cada elemento al ideal es cuantificable, normalizable, y comparable con otras medidas del mismo tipo tomadas en diferentes sistemas de abastecimiento (o saneamiento) al estudiado. Esto ocurre mediante la implementación de la función de desviación relativa.

5.3.4.2 Defectos

En la aplicación del método se ha establecido como valor ideal de cada criterio, aquel del grupo de alternativas que representa menor necesidad de intervención. Esta simplificación se hace ante la dificultad para identificar un valor ideal para cada criterio en un espectro general.

Así pues, definir el estado ideal de una tubería cuando se analiza un criterio es una tarea difícil, pues requiere el conocimiento más profundo de sobre la relación entre dicho criterio y el proceso de deterioro en general, para desde allí, establecer de un punto de referencia sobre el cual se evaluará cada elemento desde su estado actual.

La medida de la distancia de cada alternativa (tubería o sector) a dicho valor ideal, representa también un proceso complejo, más aún cuando el factor de balance P , que afecta cada medida de distancia al valor ideal, y por tanto los resultados finales, debe ser definido por el decisor sin mediar un proceso que le permita hacerlo de manera objetiva. Aun cuando la literatura técnica hace algunas recomendaciones (Romero, 1986) para su elección, esta tarea sigue presentando un alto grado de subjetividad, al igual que lo sucedido con la asignación de pesos de importancia.

El método no resulta suficientemente intuitivo para abordar por decisores expertos en el comportamiento del sistema, pero que desconocen al detalle este sistema de decisión. Más aún, el método no permite al decisor reflejar su opinión acerca del comportamiento de cada una de las variables involucradas mediante funciones matemáticas.

Por último, debe mencionarse que el método no cuantifica la incertidumbre en el establecimiento de sus parámetros fundamentales (valor ideal, distancias de cada alternativa al valor ideal, y parámetro P), y que además requiere pesos de importancia para valorar en mayor medida a unos criterios, y en menor medida a otros, con lo cual las críticas basadas en la subjetividad que se han hecho al método de las sumas ponderadas también aplican aquí.

5.4 Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de sectores mediante el Proceso de Jerarquías Analíticas

5.4.1 Base metodológica del Proceso de Jerarquías Analíticas

5.4.1.1 Estructura matemática del Proceso de Jerarquías Analíticas

El problema de decisión enfrentado mediante el uso de este método requiere una división de sus elementos constitutivos en niveles importancia o jerarquías (Saaty, 1980). Cada nivel incluye un número definido de elementos, agrupándose en grupos que a su vez constituyen las entradas del nivel siguiente (ver).

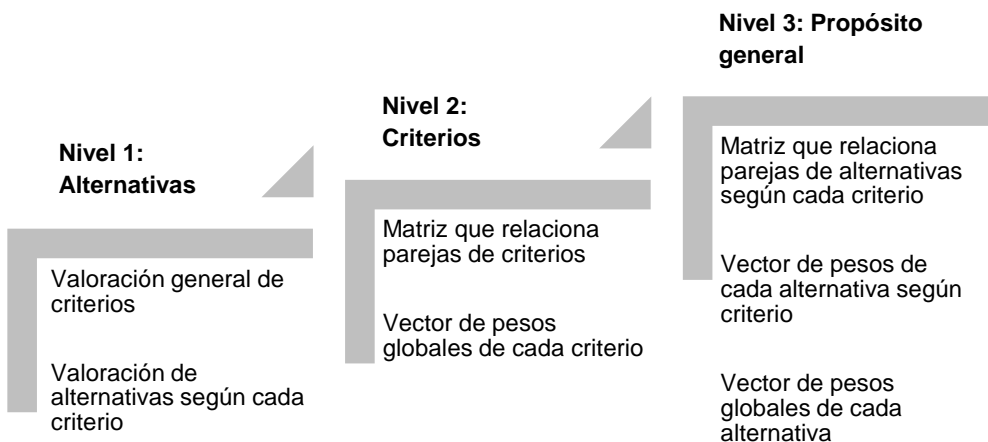


Figura 86. Estructura básica del Método de las Jerarquías Analíticas

La estructura general permite reunir varios criterios similares en un grupo (cada uno de los mencionados criterios es evaluado para todas las alternativas – ya sean tuberías o sectores -, las cuales están situadas en el nivel jerárquico más bajo).

Este grupo de criterios, unido a otros similares podría, eventualmente, conformar otro “grupo de grupos de criterios” en un nivel jerárquico aún superior, y así sucesivamente, dependiendo de la complejidad y cantidad de información inicial, siendo el nivel más alto el conformado por un único objetivo global (en este caso, la prioridad a la intervención para sustituir o renovar).

En el primer nivel jerárquico el decisor asigna una valoración simple y general a cada uno de los criterios incluidos en el estudio. En este mismo nivel se evalúa cada alternativa (es decir, cada sector) respecto a cada criterio, según una escala única definida por el decisor.

Para el segundo nivel jerárquico de este estudio se ha planteado solo un grupo de criterios. Es en este punto donde el decisor plantea las relaciones de importancia entre cada una de las posibles parejas de criterios que se puedan formar. Las anteriores relaciones conforman una matriz que genera una ecuación de minimización de desviaciones positivas y negativas, y asociada a ella, un sistema de restricciones en forma de ecuaciones lineales, cuya solución genera un vector que contiene los pesos globales de cada criterio inferidos desde las relaciones por pares.

5.4.1.2 Establecimiento del grado de prioridad a la renovación de sectores

Es en el último paso del Proceso de Jerarquías Analíticas, donde se logran establecer las prioridades de renovación para cada uno de los sectores incluidos. El tercer nivel jerárquico está compuesto por tantas matrices como criterios han sido incluidos en el nivel anterior. En cada una de estas matrices se consignan las importancias relativas entre alternativas respecto a cada criterio. Como entrada para este cálculo se utilizan los resultados del primer nivel jerárquico (valoración de criterios, y de alternativas según criterios).

En consecuencia, la solución de cada matriz produce un vector de pesos de importancia de cada una de las alternativas respecto al criterio asociado a la matriz. Estos vectores se ponderan por el peso de cada criterio obtenido en el segundo nivel, generando un vector solución de pesos globales de cada alternativa.

En el caso en que se pretenda encontrar un orden de prioridad de renovación de tuberías, el nivel jerárquico más bajo de la estructura del problema estaría

compuesto por la importancia de cada criterio respecto a la renovación, y por las importancias individuales de cada tubería respecto a cada criterio.

El segundo nivel estaría conformado por los grados de importancia entre parejas de criterios respecto al gran objetivo global (o si se quiere, respecto a un grupo particular de criterios, para después relacionar estos grupos en el nivel siguiente). El último nivel se formaría con las relaciones entre parejas de tuberías respecto a cada criterio (o grupos de criterios, si se llegó a este estado) y el resultado de su matriz, afectado por los pesos globales de cada criterio. El resultado que se conseguiría sería una lista priorizada de tuberías a la renovación.

5.4.2 Ejemplo de aplicación de la metodología de Proceso de Jerarquías Analíticas a una red de abastecimiento del norte de España

5.4.2.1 Sectores de estudio

Se tienen 3 sectores geográficos de la red de San Sebastián (Figura 87, Figura 88 y Figura 89), que en conjunto integran el distrito de Gros, cada uno de ellos conformado por nudos de caudal y tuberías con algunas características similares que permiten agruparlos. El diagrama de la red es simple pero se ajusta a la realidad: cuenta con 214 nudos de consumo, 233 tuberías y un depósito que alimenta la red (Mons).

En la Figura 87 se identifica el sector 1, cuya gestión se puede realizar mediante abertura y cierre de válvulas de corte instaladas en las 13 tuberías que lo unen al sector 2 y que recibe alimentación por las tubería principal 199 (implementando en el inicio de la misma un punto de medición para el control del caudal que ingresa a la zona), y que está conectada al depósito de Mons mediante la línea 127.

El estado ideal es, sin embargo, que cada sector esté comunicado con sus similares por pocas líneas, para lo cual, si se opta por esta configuración de distritos, se deberían rediseñar algunos tramos.

También resulta deseable que la tubería principal haga su entrega en uno o dos puntos como máximo, y que cada sector esté alimentado por una sola línea, esto para facilitar su monitorización. Todos los nudos del sector 2 poseen cotas superiores a los 18 metros. La red de la Figura 88 pertenece al sector 2, el cual se

aísla mediante el accionar de válvulas de corte puestas en las 20 tuberías que lo unen al sector 1 y al 3, y alimentado por la tubería 1 (con un punto de medición en esta última) que está precedida de la tubería principal 199. Los nudos del sector poseen cotas entre los 10 y los 18 metros.

El sector 3 se cierra mediante válvulas de corte instaladas en las 12 tuberías que le brindan continuidad con el sector 2, y se abastece por la tubería 128, ramal de la tubería 1. Los nudos del sector poseen cotas menores a los 10 metros. Dicho distrito está representado en la Figura 89.

Así pues, el problema de toma de decisión consiste en asignar prioridad a cada uno de los tres sectores respecto a los demás, facilitando la escogencia de aquel a afectar primero en el ámbito de un plan de renovación de redes. Merece la pena recordar que la sectorización aquí planteada no tiene otra intención que clasificar y caracterizar geográficamente los resultados generados, y que existen otras configuraciones que, buscando la consecución de objetivos diferentes al de este estudio (cual es asignar prioridad a sectores), pueden resultar de mejor aplicación.

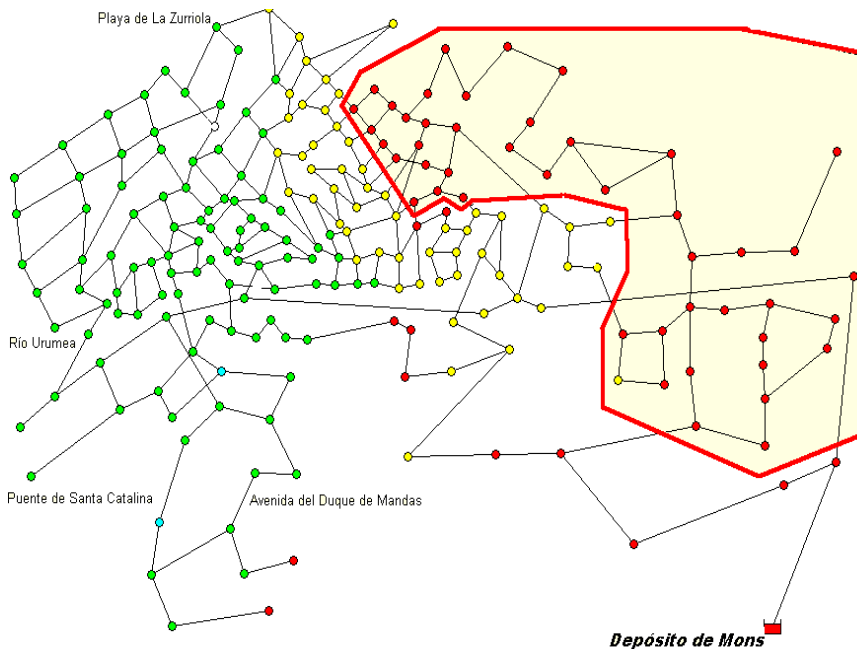


Figura 87. Sector 1 del distrito de Gros: Mons, falda del monte Ulía, parte alta del barrio de Intxaurrondo

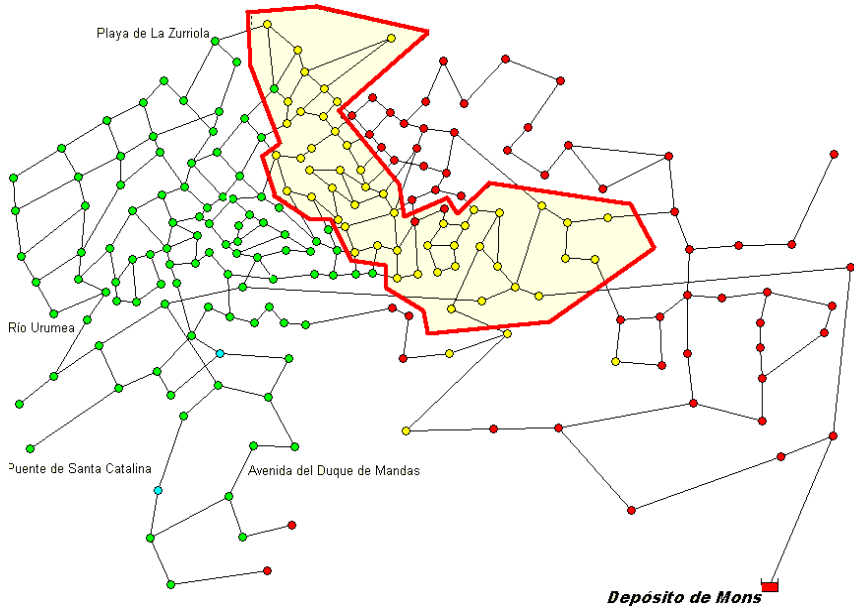


Figura 88. Sector 2 del distrito de Gros: parte alta del barrio de Gros, centro de Intxaurreondo, parte baja del barrio de Ulía

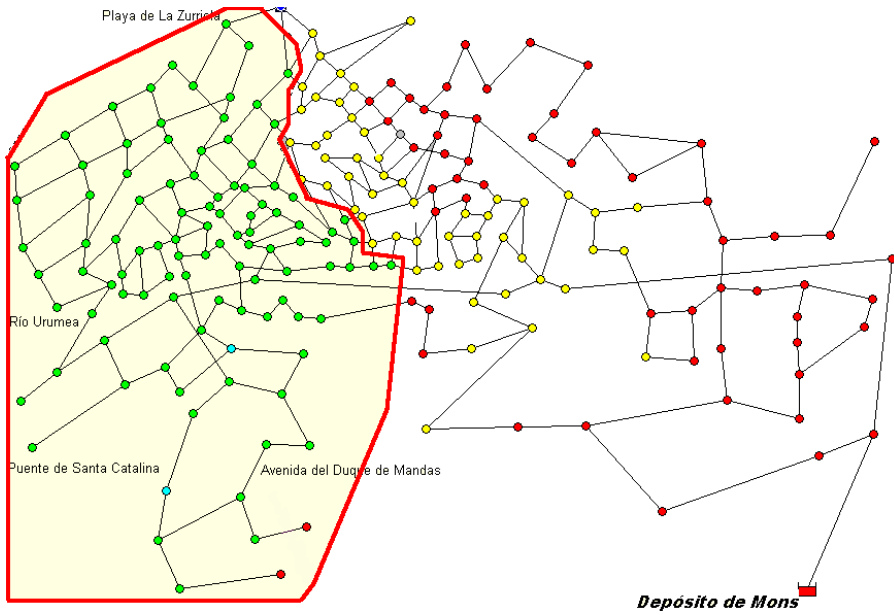


Figura 89. Sector 3 del distrito de Gros: Barrio de Egía, Gros centro, playa de la Zurriola

5.4.2.2 Criterios incluidos en el estudio

El plan que priorice los sectores a la renovación debe incluir en su estructura el análisis de cada zona atendiendo a criterios como los que se citan a continuación.

5.4.2.3 Nivel de exceso de fugas en el sector

Expresado como la diferencia entre el nivel de fugas actual y el nivel de fugas objetivo ($l/acometida \cdot h$ para fugas latentes en acometidas, y $l/km \cdot h$ para tuberías de distribución). También puede ser definido como la cantidad en que el caudal nocturno excede al caudal nocturno objetivo (en m^3/h).

El método más sencillo para cuantificar el coste del agua perdida consiste en multiplicar el exceso de fugas por el coste unitario de agua en el sector, lo que proporciona una medida del valor del agua que puede ser ahorrada mediante reducción de fugas (García, 2004).

5.4.2.4 Tiempo desde la última inspección

Se considera este criterio para valorar los posibles efectos de pérdidas de fondo que no hayan sido debidamente identificadas pues no se ha revisado ninguna de las tuberías del sector, y por tanto existe una probabilidad más alta de necesidad de intervención que en aquellos sectores donde se ha hecho un control activo y desde dicho control, renovaciones específicas.

5.4.2.5 Situación social y ambiental

Aquí se incluyen aquellos aspectos del proceso constructivo que afectan el entorno y causan perturbaciones comúnmente no estimadas en términos económicos.

Tal es el caso de las interrupciones en el flujo vehicular durante largos períodos de tiempo, el bloqueo de accesos peatonales a zonas comerciales, la interrupción temporal del suministro de agua y su inmediata afectación de aquellos inmuebles

que la necesitan prioritariamente para el cumplimiento de su labor (hospitales, escuelas, bares, hoteles, restaurantes), entre otras.

5.4.2.6 Calificación de cada criterio evaluado

A continuación se muestra el proceso de calificación para sector 1, referido a los criterios nivel de exceso de fugas en el sector, situación socio-ambiental y tiempo transcurrido desde que el abastecimiento realizó la última inspección como medida para la detección de fugas de fondo. Igual procedimiento se utilizó para calificar los sectores 2 y 3.

Los valores medios de fugas de fondo en acometidas y en tuberías de distribución fueron estimados mediante la aplicación de la metodología propuesta en la tesis doctoral *Directrices Y Herramientas De Mejora Del Rendimiento Hídrico En Redes De Agua Urbana* (Almandoz, 2002) para una presión de referencia de 40 m.c.a.

Los estándares medios aceptables para las pérdidas latentes o de fondo acometidas y tuberías de distribución han sido tomados del artículo *A review of indicators for real losses from water supply systems* (Lambert y otros, 1999). El valor de la presión promedio de cada sector se obtiene mediante la simulación de la red en EPANET (EPA, 2002).

La situación socio-ambiental hace referencia a un compendio de factores que usualmente marcan la pauta de afectación a nivel comunitario cuando se desarrolla un proyecto de renovación. Este grupo de factores es, por supuesto, relativo, y varía según las preferencias y la experiencia de quien ejecute el estudio de valoración.

El tiempo transcurrido desde la última inspección en la búsqueda de fugas, trata de valorar en este estudio, la situación de aquellos sectores que no son inspeccionados frecuentemente, pues su comportamiento referido al nivel de fugas suele ser óptimo y ello conlleva a ser relegados en este ámbito (a veces sin revisión durante un año o más).

A continuación se muestra la aplicación de los criterios mencionados arriba, en el sector 1 (barrio de Intxaurreondo y zona de Ulía).

5.4.2.7 Nivel de exceso de fugas

En la Tabla 87 y la Tabla 88 se registran los valores relativos al nivel de exceso de fugas para el sector 1 en acometidas y tuberías de distribución, respectivamente.

Tabla 87. Nivel de exceso de fugas en acometidas del sector 1

Presión promedio de los nudos del sector	29.55 mca.
Pérdidas de fondo medias estimadas en acometidas (en función de la presión)	0.0625 l/aco*h*mca.
Pérdidas de fondo medias estimadas en acometidas	1.85 l/aco*h
Valor medio aceptable de pérdidas de fondo en acometidas	2.5 l/aco*h
Nivel de exceso de fugas (pérdidas estimadas – pérdidas aceptables)	No se presenta

Tabla 88. Nivel de exceso de fugas en tuberías de distribución del sector 1

Presión promedio de los nudos del sector	29.55 mca.
Pérdidas de fondo medias estimadas en tuberías de distribución (en función de la presión)	1 l/km*h*mca.
Pérdidas de fondo medias estimadas en tuberías de distribución	29.55 l/km*h
Valor medio aceptable de pérdidas de fondo en tuberías de distribución	40 l/km*h
Nivel de exceso de fugas (pérdidas estimadas – pérdidas aceptables)	No se presenta

Se asigna la misma importancia a las fugas de fondo en acometidas que a las ocurridas en tuberías de distribución, lo cual se ve traducido, para cada caso, en una valoración de 5 para un sector con un nivel de exceso de fugas máximo, y de 0 para un sector sin exceso de fugas.

5.4.2.7.1 En acometidas

El nivel de exceso de fugas de fondo máximo en acometidas corresponde a una calificación de 5, y es el máximo hallado en el conjunto de los tres sectores. Para este caso el nivel de exceso de fugas máximo es 0.77 l/aco*h

El nivel de exceso de fugas mínimo es aquel donde no exista ningún exceso de fugas de fondo en acometidas, y corresponde a una calificación de 0.

5.4.2.7.2 En tuberías de distribución

Al igual que para las acometidas, el nivel de exceso de fugas máximo en tuberías de distribución corresponde a una calificación de 5, y es el máximo hallado

en el conjunto de los tres sectores. Para este caso el nivel de exceso de fugas máximo es 12.31 l/km*h

El nivel de exceso de fugas mínimo es aquel donde no exista ningún exceso de fugas de fondo en tuberías de distribución, y corresponde a una calificación de 0.

Para cada sector, y tanto en acometidas como en tuberías de distribución, el nivel de exceso de fugas obtenido se califica mediante la extrapolación entre los valores anteriormente citados. La suma de la calificación por fugas en acometidas y por fugas en tuberías de distribución constituye la calificación global del sector para el criterio “nivel de exceso de fugas”.

En la Tabla 89 aparecen relacionados los sectores y las calificaciones a ellos asignadas según el nivel de exceso de fuga que presenten.

Tabla 89. Calificación por sector según su nivel de exceso de fugas

	Calificación por NEF en acometidas	Calificación por NEF en tuberías de distribución	Calificación global por NEF
Sector 1	0	0	0
Sector 2	1.7	1.8	3.5
Sector 3	5	5	10

5.4.2.8 Tiempo desde la última inspección

El periodo de tiempo transcurrido desde que, por última vez, se realizó una inspección en el sector 1 con el objeto de identificar pérdidas de fondo con caudal detectable, se muestra en la Tabla 90.

Tabla 90. Tiempo desde la última inspección para el sector 1

Entre 0 y 4 semanas	Entre 5 y 8 semanas	X
Entre 9 y 12 semanas	Entre 13 y 16 semanas	
Entre 17 y 20 semanas	Entre 21 y 24 semanas	
Entre 25 y 28 semanas	Entre 29 y 32 semanas	
Entre 33 y 36 semanas	Entre 37 y 40 semanas	
Entre 41 y 44 semanas	Entre 45 y 48 semanas	
Entre 49 y 52 semanas	Más de 52 semanas	

La calificación máxima para este criterio (10 puntos) se asigna a aquellos sectores de la red que no hayan experimentado al menos una revisión para la detección de fugas en algunas de sus zonas hace más de un año.

La calificación mínima (0 puntos) se establece para los sectores que hayan tenido una revisión en alguna zona del mismo hace 16 semanas o menos. Las calificaciones que se encuentre en el rango establecido entre estos dos valores extremos se conocen mediante extrapolación. Teniendo en cuenta lo anterior, las valoraciones por sector y según el criterio “tiempo desde la última inspección” se traducen en las calificaciones que aparecen en la Tabla 91.

Tabla 91. Calificación por sector según el tiempo transcurrido desde la última inspección

Sector 1	0
Sector 2	6
Sector 3	4

Enfocando el estudio exclusivamente al campo de la gestión técnica, se opta por asignar la siguiente calificación referida a los criterios escogidos para la evaluación, en una escala entre 10 (máxima importancia del criterio en las preferencias globales de la persona o grupo encargado de la toma de decisiones) y 0 (mínima importancia del criterio en las preferencias globales de la persona o grupo encargado de la toma de decisiones). Estos parámetros de calificación se resumen en la Tabla 92.

Tabla 92. Calificación asignada a los criterios según su importancia general

Nivel de exceso de fugas	10
Tiempo desde la última inspección	6
Situación socio-ambiental	4

Pero además, y para el caso específico de cada criterio, dado que se pretende implementar un baremo de calificación de los sectores desde 10 (para el sector que presente la mayor afectación según el criterio) hasta 0 (para el sector que no presente afectación según el criterio), se hace imprescindible considerar una calificación propia según el rango en el que se desenvuelve la(s) magnitud(es) objeto de evaluación de dicho criterio. Dichas calificaciones están sujetas a las siguientes consideraciones:

5.4.2.9 Situación socio-ambiental

Las tendencias para el sector 1, en términos del uso del suelo, así como sus características de tránsito vehicular y peatonal, se indican en la Tabla 93.

En los distritos con densidad de flujo vehicular alta una rotura ocasiona mayores trastornos en el ambiente, pues una mayor cantidad de personas se ve involucrada en retenciones (sin importar aquí la magnitud del atasco), y, debido a ello, debe esta potencial situación recibir una puntuación elevada (2 puntos). Los distritos con densidad de flujo vehicular media se valoran con 1 punto, y por último, a los distritos con baja densidad se les califica con 0 puntos

A los sectores con ancho de aceras angosto, donde la ocurrencia de una fuga pueda perjudicar de manera grave e inmediata las propiedades vecinas, se les adjudica una puntuación de 1.5. Los sectores con ancho de aceras medio se ven afectados con 1 punto, y los sectores con ancho de acera amplio no reciben punto alguno por este ítem.

Tabla 93. Situación socio-ambiental del sector 1

Densidad del flujo vehicular	Alta			
	Media			
	Baja		X	
Ancho de las aceras	Amplio		X	
	Medio			
	Angosto			
Ancho de las calzadas	Amplio		X	
	Medio			
	Angosto			
Tipo de zona	Residencial, con algún sector de	Colegios	X	Colegios
		Hospitales		Hospitales
		Comercio		Comercial, con algún sector de
		Oficial		Oficial
		Turismo		Turismo
		Solo res.		Solo com.

Las zonas con ancho de calzada angosto, donde se deba cortar casi totalmente el tráfico y probablemente desviarlo en caso de cierre provisional por reparaciones debidas a la aparición de fugas, reciben una calificación de 1.5 puntos, los sectores con ancho de calzada medio tienen una calificación asociada de 1 punto, y por último, sectores con ancho de calzada amplio se califican con 0 puntos.

Si la zona está predominantemente conformada por comercios recibe una puntuación base de 3, si es en su mayoría viviendas la puntuación base es 2. A las puntuaciones base se les adiciona puntuación que depende del otro tipo de sector que subyazca en su interior en segundo plano. Si este tipo de sector es hospital se adiciona 2 puntos a la puntuación base, si se trata de colegios o comercio 1 punto, si es sector oficial o de turismo, 0.5 puntos, si se trata de viviendas la puntuación base no recibe adición alguna.

Así pues; un distrito recibe la máxima calificación (10 puntos) para este criterio si cuenta con: densidad de flujo vehicular alta (2 puntos), aceras de ancho angosto (1.5 puntos), calzadas de ancho angosto (1.5 puntos), conformado por una zona predominantemente de comercios (puntuación base: 3 puntos) y con núcleos importantes de hospitales (adición a la puntuación base: 2 puntos).

En el otro extremo, la calificación más baja posible (2 puntos) se asigna a un sector con: baja densidad de flujo vehicular (0 puntos), aceras de ancho amplio (0 puntos), calzadas de ancho amplio (0 puntos), y cuya característica de población sea predominantemente residencial (puntuación base: 2 puntos), y sin ningún núcleo interno relevante diferente al de viviendas (adición a la puntuación base: 0 puntos)

Dadas estas condiciones, la Tabla 94 resume las calificaciones para los sectores analizados en este ítem.

Tabla 94. Calificación por sector según su situación socio-ambiental

Ítem	Sector 1	Sector 2	Sector 3
Densidad del flujo vehicular	0	2	1
Ancho de las aceras	0	1.5	0
Ancho de las calzadas	0	1.5	0
Tipo de zona	3	3	3.5
Puntuación total para el sector	3	8	4.5

5.4.3 Resultados finales de prioridad a la renovación

Para los criterios “nivel de exceso de fugas” (NEF), “situación socio-ambiental” (SSA) y “tiempo transcurrido desde la última inspección” (TUI), y para las alternativas “sector 1” (S1), “sector 2” (S2) y “sector 3” (S3), se generan los conjuntos matriciales que seguidamente se describen.

5.4.3.1 Nivel jerárquico 1: valoraciones individuales de alternativas y criterios

Valoración simple de la importancia de criterios a nivel general: asignación según las preferencias y basándose en experiencias previas.

$$X_{NEF} = 10$$

$$X_{SSA} = 4$$

$$X_{TUI} = 6$$

Valoración del conjunto de alternativas respecto a cada criterio:

$$X_{S1/NEF} = 0$$

$$X_{S2/NEF} = 3.5$$

$$X_{S3/NEF} = 10$$

$$X_{S1/SSA} = 3$$

$$X_{S2/SSA} = 8$$

$$X_{S3/SSA} = 4.5$$

$$X_{S1/TUI} = 0$$

$$X_{S2/TUI} = 6$$

$$X_{S3/TUI} = 4$$

5.4.3.2 Nivel jerárquico 2: valoraciones entre parejas de criterios

La matriz que refleja la importancia relativa entre criterios se cita en la Tabla 95.

Tabla 95. Matriz que relaciona parejas de criterios

	NEF	SSA	TUI
NEF	1	2.5	1.67
SSA	0.4	1	0.67
TUI	0.6	1.5	1

El problema a resolver, generado por la matriz anterior y ya escrito en forma de meta transformada, es decir, con la inclusión de las variables de desviación positiva y negativa, es:

Minimizar:

$$n_1 + p_1 + n_2 + p_2 + n_3 + p_3$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$1 * W_{NEF} + 2.50 * W_{SSA} + (n_1 - p_1) = 0$$

$$1 * W_{NEF} + 1.67 * W_{TUI} + (n_2 - p_2) = 0$$

$$1 * W_{SSA} + 0.67 * W_{TUI} + (n_3 - p_3) = 0$$

$$n_1 \geq 0, p_1 \geq 0$$

$$n_2 \geq 0, p_2 \geq 0$$

$$n_3 \geq 0, p_3 \geq 0$$

$$W_{NEF} + W_{SSA} + W_{TUI} = 1$$

La solución al sistema lineal de ecuaciones es:

$$W_{NEF} = 0.5$$

$$W_{SSA} = 0.2$$

$$W_{TUI} = 0.3$$

$$n_1 = p_1 = n_2 = p_2 = n_3 = p_3 = 0$$

La última igualdad demuestra que el conjunto de pesos no negativos satisface perfectamente el sistema de ecuaciones.

5.4.3.3 Nivel jerárquico 3: resultados finales de prioridad a la renovación

Los siguientes arreglos matriciales manifiestan la importancia relativa entre alternativas para cada criterio particular:

Para el criterio “nivel de exceso de fugas” (Tabla 96):

Tabla 96. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio NEF

	S1	S2	S3
S1	1	0.000	0.0001
S2	3500	1	0.35
S3	10000	2.86	1

Para el criterio “situación socio-ambiental” (Tabla 97):

Tabla 97. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio SSA

	S1	S2	S3
S1	1		0.38
S2	2.67	1	1.78
S3	1.5	0.56	1

Para el criterio “tiempo desde la última inspección” (Tabla 98):

Tabla 98. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio TUI

	S1	S2	S3
S1	1	1,6E-05	2.5E-05
S2	60000	0	1
S3	40000	0	0.67

Los enunciados de las metas transformadas asociadas a las tres matrices anteriores son:

Para el criterio “nivel de exceso de fugas” (NEF):

Minimizar:

$$n_{1/NEF} + p_{1/NEF} + n_{2/NEF} + p_{2/NEF} + n_{3/NEF} + p_{3/NEF}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$1 * W_{S1/NEF} + 0.0003 * W_{S2/NEF} + (n_{1/NEF} - p_{1/NEF}) = 0$$

$$1 * W_{S1/NEF} + 0.0001 * W_{S3/NEF} + (n_{2/NEF} - p_{2/NEF}) = 0$$

$$1 * W_{S2/NEF} + 0.35 * W_{S3/NEF} + (n_{3/NEF} - p_{3/NEF}) = 0$$

$$n_{1/NEF} \geq 0, p_{1/NEF} \geq 0$$

$$n_{2/NEF} \geq 0, p_{2/NEF} \geq 0$$

$$n_{3/NEF} \geq 0, p_{3/NEF} \geq 0$$

$$W_{S1/NEF} + W_{S2/NEF} + W_{S3/NEF} = 1$$

Para el criterio “situación socio-ambiental” (SSA):

Minimizar:

$$n_{1/SSA} + p_{1/SSA} + n_{2/SSA} + p_{2/SSA} + n_{3/SSA} + p_{3/SSA}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$1 * W_{S1/SSA} + 0.38 * W_{S2/SSA} + (n_{1/SSA} - p_{1/SSA}) = 0$$

$$1 * W_{S1/SSA} + 0.67 * W_{S3/SSA} + (n_{2/SSA} - p_{2/SSA}) = 0$$

$$1 * W_{S2/SSA} + 1.78 * W_{S3/SSA} + (n_{3/SSA} - p_{3/SSA}) = 0$$

$$n_{1/SSA} \geq 0, p_{1/SSA} \geq 0,$$

$$n_{2/SSA} \geq 0, p_{2/SSA} \geq 0,$$

$$n_{3/SSA} \geq 0, p_{3/SSA} \geq 0$$

$$W_{S1/SSA} + W_{S2/SSA} + W_{S3/SSA} = 1$$

Para el criterio “tiempo transcurrido desde la última inspección” (TUI):

Minimizar:

$$n_{1/TUI} + p_{1/TUI} + n_{2/TUI} + p_{2/TUI} + n_{3/TUI} + p_{3/TUI}$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$1 * W_{S1/TUI} + 1.6667E - 05 * W_{S2/TUI} + (n_{1/TUI} - p_{1/TUI}) = 0$$

$$1 * W_{S1/TUI} + 2.5E - 05 * W_{S3/TUI} + (n_{2/TUI} - p_{2/TUI}) = 0$$

$$1 * W_{S2/TUI} + 1.5 * W_{S3/TUI} + (n_{3/TUI} - p_{3/TUI}) = 0$$

$$n_{1/TUI} \geq 0, \quad p_{1/TUI} \geq 0$$

$$n_{2/TUI} \geq 0, \quad p_{2/TUI} \geq 0$$

$$n_{3/TUI} \geq 0, \quad p_{3/TUI} \geq 0$$

$$W_{S1/TUI} + W_{S2/TUI} + W_{S3/TUI} = 1$$

Las soluciones para el logro de las metas transformadas se citan a continuación:

$$W_{S1/NEF} = 7,3069E-05$$

$$W_{S2/NEF} = 0.26$$

$$W_{S3/NEF} = 0.74$$

$$n_{S1/NEF} = p_{S1/NEF} = n_{S2/NEF} = p_{S2/NEF} = n_{S3/NEF} = p_{S3/NEF} = 0$$

$$W_{S1/SSA} = 0.27$$

$$W_{S2/SSA} = 0.45$$

$$W_{S3/SSA} = 0.27$$

$$p_{2/SSA} = 1,8368E-09$$

$$n_{3/SSA} = 1,1021E-09$$

$$n_{S1/SSA} = p_{S1/SSA} = n_{S2/SSA} = p_{S3/SSA} = 0$$

$$W_{S1/TUI} = 1,0001E-05$$

$$W_{S2/TUI} = 0.60$$

$$W_{S3/TUI} = 0.40$$

$$p_{S2/TUI} = 1,2543E-09, n_{S3/TUI} = 5,0172E-10, n_{S1/TUI} = p_{S1/TUI} = n_{S2/TUI} = p_{S3/TUI} = 0$$

En resumen, la matriz de pesos de alternativas cruzadas con criterios (Tabla 99) es:

Tabla 99. Matriz que relaciona alternativas individuales y criterios

	NEF	SSA	TUI
S1	7,3069E-05	0.27	1,000E-05
S2	0.26	0.45	0.60
S3	0.74	0.27	0.40

Que ponderándola por el vector de pesos globales de los criterios

$$W_{NEF}=0.5 \quad W_{SSA}=0.2 \quad W_{TUI}=0.3$$

Genera el vector solución de pesos globales de cada alternativa. Esto es:

$$W_{S1} = 7.3069E - 05 * 0.5 + 0.27 * 0.2 + 1.0001E - 05 * 0.3 = 0.05$$

$$W_{S2} = 0.26 * 0.5 + 0.45 * 0.2 + 0.60 * 0.3 = 0.40$$

$$W_{S3} = 0.74 * 0.5 + 0.27 * 0.2 + 0.40 * 0.3 = 0.54$$

Las soluciones halladas señalan al sector 3 como aquel que, con mayor urgencia de los tres, requiere iniciar el plan de rehabilitación.

Y es lo esperado, si consideramos que el sector 3 posee el nivel de exceso de fugas más alto, y es este criterio el que, según las preferencias generales expuestas en el nivel jerárquico 1, posee la más alta relevancia a la hora de elegir entre un conjunto de distritos susceptibles de renovación.

De hecho, el peso global del criterio mencionado (NEF) es el que marca la diferencia cuando se debe escoger entre los sectores 2 y 3. En el caso de los dos criterios restantes (SSA y TUI) los valores consignados en la matriz de pesos de alternativas cruzadas, correspondientes al sector 2, son mayores que sus similares para el sector 3. Sin embargo, ellos se ven ponderados en menor medida en el vector solución por los pesos globales asignados a los criterios SSA y a TUI.

El sector 1 se ve relegado a situarse en última instancia dentro del cronograma del plan de rehabilitación, dado que no presenta exceso de fugas, y además a sido objeto de inspección en búsqueda de ellas hace muy poco respecto a los otros sectores en evaluación.

Para observar la importancia que al interior del esquema planteado, poseen los pesos globales, que en un principio se le hacen corresponder a los criterios incluidos en el proceso de toma de decisión, merece la pena repetir todo el anterior procedimiento, efectuando variaciones solo en este punto.

Así pues, considerando un escenario donde sea el tiempo transcurrido desde la última revisión, y ya no el nivel de exceso de fugas, aquel criterio de mayor peso cuando se trate de dar prioridad a los sectores para su pronta renovación, se propone la asignación de pesos globales explícita en la Tabla 100.

Tabla 100. Nueva calificación asignada a los criterios según su importancia general

Tiempo desde la última inspección	10
Situación socio-ambiental	6
Nivel de exceso de fugas	4

Para este caso, el nuevo vector solución es:

$$W_{S_1} = 0.05$$

$$W_{S_2} = 0.51$$

$$W_{S_3} = 0.44$$

Resulta claro pues, que una mejor valoración del criterio “tiempo transcurrido desde la última inspección” conduce a la elección del sector 2 como aquel que en primera instancia ha de ser renovado, desplazando al sector 3 a un segundo plano.

5.4.4 Enseñanzas y crítica de la propuesta

5.4.4.1 Bondades

La organización de la metodología mediante jerarquías permite establecer importancias globales a partir de relaciones fácilmente definibles entre parejas de criterios. Esta forma de trabajo facilita el trabajo del decisor pues no le obliga a pensar en relaciones de más de dos criterios a la vez.

La posibilidad de crear múltiples jerarquías permite pensar en la agrupación de criterios de naturaleza similar. Así, el decisor puede relacionar parejas de criterios que pertenecen al grupo de servicio, o al grupo operativo, o al grupo financiero, o al grupo ambiental, etc. En la siguiente jerarquía, el decisor podrá asignar mayor prioridad a unos grupos respecto a otros. El concepto de jerarquía se presta para evidenciar importancias que en la estructura empresarial pueden determinarse desde el nivel operativo, siguiendo con el táctico, y llegando al estratégico.

Esta forma de trabajo sistemática facilita evidenciar expresamente las directrices de la alta gerencia de la empresa sobre lo que para ella es realmente relevante, pues la asignación de importancias relativas entre grupos de criterios en diferentes jerarquías deja ver claramente si el proceso de intervención en la red debe responder a una mayor rentabilidad, a un compromiso de sostenibilidad en el manejo del recurso hídrico, a una intención de disminuir los niveles de riesgo de fallo de la infraestructura, a una mejora en los niveles de servicio, o a una combinación estratégica de algunas políticas de las anteriormente mencionadas.

5.4.4.2 Defectos

Como se ha dicho, para cada elemento (alternativa, criterio o grupo de criterios) se debe asignar un grado de importancia relativa en el nivel jerárquico al que pertenece. Este grado o peso de importancia se transforma en comparaciones de importancia de dicho elemento con sus similares para el nivel tratado mediante la conformación de parejas. Obligar al decisor a definir un único valor (peso de importancia) para establecer relaciones entre pares le deja sin la posibilidad alterna de construir una función matemática en la cual se expresa el comportamiento (y en consecuencia la importancia) de dicho criterio.

El decisor no tiene la oportunidad de expresar matemáticamente la incertidumbre que tiene respecto a dicha relación, y en consecuencia, tal incertidumbre no queda inmersa en los datos de entrada y no se verá reflejada en el resultado final, haciendo que tales resultados sean diferentes de aquellos que el conocimiento experto puede generar si se le capta en toda su dimensión.

La solución a la ecuación lineal de desviaciones que resuelve una matriz de parejas de elementos (alternativas respecto a un criterio, criterios respecto a un grupo de criterios, etc.) en una jerarquía dada, involucra un número de ecuaciones de restricción que aumenta en función de los elementos que componen la matriz.

La inclusión de múltiples criterios y múltiples alternativas representa un trabajo arduo en una hoja de cálculo tradicional (aún con la creación de rutinas de programación dentro de ella), y puede requerir el uso de un paquete informático especializado, que asegure la convergencia de la función de suma de desviaciones positivas y negativas al cero mediante un método rápido.

5.5 Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de tuberías de saneamiento mediante Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio

5.5.1 Base metodológica de la Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio

Este aporte propone evaluar las necesidades de intervención de tuberías de redes de saneamiento según criterios estructurales y de servicio. Los criterios incluidos surgen tras el estudio minucioso de distintas bases de datos de alcantarillados, lo que permite aseverar que en la gran mayoría de los casos se podrá contar con la información que este modelo decisional requiere.

Aunque la estructura matemática que se utiliza para calcular el valor final de prioridad a renovación de tuberías es la correspondiente a las Sumas Ponderadas, esta propuesta plasma su aporte en la forma en que se evalúan los criterios incluidos. Puede notarse entonces, que los criterios que resultan coincidentes con los de la primera propuesta que se expone en este capítulo (para tuberías de

abastecimiento) se evalúan de una manera diferente, y que además, se incluyen otros que resultan especialmente relevantes tras definir las características locales de la red que conforma el caso de estudio.

Así, la expresión matemática que define la calificación de la condición de cada elemento, viene dada por la Ec. 119:

$$C_{final} = W_{ed} \cdot C_{ed} + W_{pr} \cdot C_{pr} + W_{L/D} \cdot C_{L/D} + W_{se} \cdot C_{se} + W_{ac} \cdot C_{ac} + W_{fa} \cdot C_{fa} + W_{ob} \cdot C_{ob}$$

Ec. 119

Donde:

C_{final} : calificación de la condición final para la tubería evaluada

W_{ed} : Peso de importancia asignado al criterio edad

C_{ed} : calificación obtenida por la tubería según el criterio edad

W_{pr} : Peso de importancia asignado al criterio profundidad

C_{pr} : calificación obtenida por la tubería según el criterio profundidad

$W_{L/D}$: Peso de importancia asignado al criterio relación longitud/diámetro

$C_{L/D}$: calificación obtenida por la tubería según la relación longitud/diámetro

W_{se} : Peso de importancia asignado al criterio sedimentación

C_{se} : calificación obtenida por la tubería según el criterio sedimentación

W_{ac} : Peso de importancia asignado al criterio estado de las acometidas

C_{ac} : calificación obtenida por la tubería según el criterio estado de acometidas

W_{fa} : Peso de importancia asignado al criterio fallos estructurales

C_{fa} : calificación obtenida por la tubería según el criterio fallos estructurales

W_{ob} : Peso de importancia asignado al criterio obstrucciones

C_{ob} : calificación obtenida por la tubería según el criterio obstrucciones

La anterior ecuación tiene asociada la restricción (Ec. 120):

$$W_{ed} + W_{pr} + W_{L/D} + W_{se} + W_{ac} + W_{fa} + W_{ob} = 1 \quad \text{Ec. 120}$$

La validación de los resultados generados tras aplicar la metodología propuesta puede realizarse a través de una comparación con los resultados obtenidos tras inspeccionar la red de saneamiento mediante Circuito Cerrado de Televisión (CCTV), asumiendo el hecho de que no siempre esta última técnica resulta suficiente para evaluar con suficiencia el estado estructural y operativo actual de una conducción.

5.5.1.1 Estructura matemática para la evaluación de cada uno de los criterios incluidos

La evaluación de estos criterios considera además valores característicos que aparecen en la literatura técnica para cada uno de ellos. En algunos de ellos la expresión matemática que los describe incluye términos que cuantifican la incertidumbre asociada a la fiabilidad de los datos de entrada.

5.5.1.1.1 Criterio estructural: edad de la tubería

Una variante que aquí se propone a la opción de tipo parabólico considerada en el método de las sumas ponderadas es la Ec. de tipo polinomial, con dos términos independientes que reflejan dos hechos diferentes del proceso de envejecimiento de la estructura, aunque relacionados a éste.

El primer término independiente (a) refleja el efecto de las condiciones constructivas habituales, así como aquellas relativas a la capacitación impartida al personal involucrado en la instalación de la tubería.

Estas condiciones varían entre las diferentes empresas prestadoras del servicio y deben ser evaluadas de manera honesta por el personal involucrado en la gestión técnica.

En la medida que se implementen protocolos apropiados de construcción, de registro de las condiciones en que se efectuó la instalación de la infraestructura, e igualmente en tanto se incluyan como obligatorios dentro de los Manuales de Buenas Prácticas los procesos de capacitación y actualización en proyectos de instalación de tuberías, este término independiente deberá disminuir.

El segundo término independiente (b) considera la inclusión de un nivel de incertidumbre asociado a la determinación de la edad exacta de la tubería.

Este caso se presenta en aquellas empresas con problemas asociados a la gestión de la base de datos, y específicamente, cuando en ellas se presenta multiplicidad del campo edad (es decir, su presencia en dos o más bases de datos).

El mismo caso también se presenta donde aun teniéndose un único campo, éste no es el producto de un adecuado registro, y en consecuencia está constituido por una estimación a partir de fechas de instalación de otras redes o de registros no sistemáticos basado en informaciones fragmentarias.

Al igual que en el caso del término independiente "a", el valor del término independiente "b" deberá disminuir en evaluaciones futuras, siempre y cuando se adopten protocolos para que el personal encargado de nuevas instalaciones registre adecuadamente, y en una base de datos única y bien definida, la fecha de instalación del elemento.

La propuesta que se hace en el presente texto con el objeto de hacer de esta una Ec. más universal, adaptable según las características particulares de cada red, es pues (Ec. 121):

$$C_{edad} = (a + b) + [10 - (a + b)] \left[\frac{t}{s} \right]^n \quad \text{Ec. 121}$$

Donde:

a: factor de incertidumbre asociado a los procesos de instalación que se tenían implementados al momento de empezar a contabilizar la edad de la tubería.

b: factor de incertidumbre asociado a la fiabilidad en la determinación de la edad de las tuberías. Rango de variación sugerido para la suma de a y b: 0,5 y 2,5

n: factor de forma de la curva de calificación del deterioro de la tubería que el decisor debe definir en función de la edad, dependiente del tipo de material, suelo, etc. Rango de variación sugerido: entre 0,5 y 2,5

t: edad de la tubería estudiada, en años

S: tiempo de supervivencia del elemento estudiado

La Tabla 101 propone los aspectos a evaluar para la asignación del factor de incertidumbre “a”. Esta tabla puede ser reformada por cada grupo de gestores, en función del conocimiento que se tenga a cerca de los puntos débiles en los procesos constructivos propios, y así mismo, sobre los procesos de cualificación del personal encargado de la instalación de la tubería.

Tabla 101. Características para la asignación del factor de incertidumbre “a”

Característica	Factor de incertidumbre “a”
El personal se encontraba debidamente capacitado para ejercer las labores de instalación de la tubería (se dispone de certificados de capacitación avalados por una entidad competente). Las condiciones de instalación de la tubería se conocen, y eran totalmente adecuadas en términos de humedad del terreno, ancho y profundidad de la zanja, visibilidad de la zona de trabajo por parte del operario, disponibilidad de materiales y georreferenciación.	0,5
El personal se encontraba debidamente capacitado para ejercer las labores de instalación de la tubería (<u>no</u> se dispone de certificados de capacitación avalados por una entidad competente). Las condiciones de instalación de la tubería se conocen, y eran totalmente adecuadas en términos de humedad del terreno, ancho y profundidad de la zanja, visibilidad de la zona de trabajo por parte del operario, disponibilidad de materiales o georreferenciación.	1,0

Característica	Factor de incertidumbre "a"
El personal se encontraba debidamente capacitado para ejercer las labores de instalación de la tubería (se dispone de certificados de capacitación avalados por una entidad competente). Las condiciones de instalación de la tubería se conocen, y <u>no</u> eran totalmente adecuadas en términos de humedad del terreno, ancho y profundidad de la zanja, visibilidad de la zona de trabajo por parte del operario, disponibilidad de materiales o georreferenciación.	1,0
El personal no se encontraba debidamente capacitado para ejercer las labores de instalación de la tubería (su conocimiento es empírico). Las condiciones de instalación de la tubería se conocen, y eran adecuadas en términos de humedad del terreno, ancho y profundidad de la zanja, visibilidad de la zona de trabajo por parte del operario, disponibilidad de materiales o georreferenciación.	1,5
El personal no se encontraba debidamente capacitado para ejercer las labores de instalación de la tubería (su conocimiento es empírico). Las condiciones de instalación de la tubería se conocen, y eran inadecuadas en términos de humedad del terreno, ancho y profundidad de la zanja, visibilidad de la zona de trabajo por parte del operario, disponibilidad de materiales o georreferenciación.	2,0
No se sabe si el personal instalador se encontraba debidamente capacitado al momento de la instalación. No se tiene conocimiento sobre las condiciones de instalación de la tubería.	2,5

La Tabla 102 incluye las características a considerar para determinar el factor de incertidumbre tipo "b". Una adecuada gestión de la base de datos que contiene las dimensiones características de los elementos de la red permitirá asignar bajos factores de incertidumbre de este tipo.

Tabla 102. Características para la asignación del factor de incertidumbre "b"

Característica	Factor de incertidumbre "b"
Se cuenta con registro de edad de la tubería, y a éste se le puede hacer una correcta trazabilidad. Le edad de la tubería resulta coherente respecto a la fecha de inicio de instalación de tuberías del mismo material en dicho ámbito geográfico.	0,5

Característica	Factor de incertidumbre "b"
Se cuenta con registro de edad de la tubería, pero a éste <u>no</u> se le puede hacer una correcta trazabilidad. Le edad de la tubería resulta coherente respecto a la fecha de inicio de instalación de tuberías del mismo material en dicho ámbito geográfico.	1,0
Se cuenta con registro de edad de la tubería, y a éste se le puede hacer una correcta trazabilidad. Le edad de la tubería <u>no</u> resulta coherente respecto a la fecha de inicio de instalación de tuberías del mismo material en dicho ámbito geográfico.	1,0
Se cuenta con registro de edad de la tubería, pero a éste <u>no</u> se le puede hacer una correcta trazabilidad. Le edad de la tubería <u>no</u> resulta coherente respecto a la fecha de inicio de instalación de tuberías del mismo material en dicho ámbito geográfico.	1,5
No se cuenta con registro de edad de la tubería. Se realizó una estimación de la misma a partir de datos de la misma red.	2,0
No se cuenta con registro de edad de la tubería. Se realizó una estimación de la misma a partir de datos de otras redes o de evidencias indirectas (por ejemplo, hechos históricos que animan a inferir la edad aproximada del elemento)	2,5

Nótese que en el mejor de los casos, la penalización por edad para una tubería tendría un valor diferente de cero (de hecho, según las tablas propuestas, y considerando una tubería que no ha completado su primer año de funcionamiento, este valor sería 1,0).

Se plantea de esta manera, pues debe considerarse que el sólo hecho de tener el elemento instalado y en operación, debe ser penalizado, al no saber a ciencia cierta que tanto ha sufrido la estructura en el corto lapso temporal en que se encuentra activa dentro del sistema.

En un artículo de Souza y otros (2009), los autores presentan una tabla de calificación de durabilidad en función de la edad y simultáneamente, del material de la tubería.

En ella, a las tuberías hechas con materiales basados en cemento y con edades mayores a 30 años se les asigna la máxima penalización (10 puntos), y en

contraposición, a las tuberías hechas con polietileno de alta resistencia (HDPE), o policloruro de vinilo (PVC), se les asigna la mínima penalización (en su caso, también, 1 punto).

5.5.1.1.2 *Criterio estructural: profundidad de instalación de la tubería*

La evaluación de la profundidad que aquí se presenta, intenta reflejar los aportes de varias investigaciones en el tema.

Sousa recopila información al respecto y concluye que la mayoría de los defectos asociados a la profundidad comienzan a ocurrir a partir de los 2,0 m, pero que la tasa de defectos incrementa sustancialmente a partir de los 5,5 m.

Se sugiere que el comportamiento anteriormente descrito puede relejar un decrecimiento en la influencia de factores superficiales, como la carga de tráfico y las actividades de mantenimiento de redes, y el aumento de la influencia de factores sub-superficiales, como la presencia del nivel freático (Sousa, 2009).

Lester y Farrar han encontrado que la frecuencia de defectos decrece con el incremento de la profundidad (Lester y otros, 1979). En un estudio similar, Ferner y Sweeting concluyen que las tuberías instaladas a profundidades menores a los 2 m presentan mayor promedio de fallos (Fenner y otros, 1999).

Anderson y Cullen estiman porcentajes de ocurrencias de fallos según la profundidad de instalación de la tubería (Anderson y otros, 1982): solo el 25% de los reportes están asociados a profundidades de 2 a 4 m, y el 65% a profundidades menores a los 2 m (no se especifica en el texto la profundidad asociada al 10% restante).

Los hallazgos anteriores están determinados en gran medida por las condiciones propias de las redes estudiadas. Los valores mencionados sirven de referencia, aunque debe realizarse un análisis particular a cada sistema, con base en la información estadística disponible, y en el conocimiento experto local, para definir los rangos de profundidad y las tendencias de ocurrencia de fallos propias de cada uno de ellos.

La dificultad asociada al proceso constructivo a grandes profundidades puede conllevar a instalaciones defectuosas. Sobre este aspecto, la experiencia del autor

del presente documento indica que una profundidad de 2 m resulta ideal para la actividad de instalación.

A partir de este valor, el proceso de entibado de la zanja se vuelve engorroso, y debajo de los 3 m las presiones del suelo sobre la estructura falsa que demarca la zanja involucran un factor de riesgo laboral importante (que debe ser evitado cuando esto sea posible).

Una vez realizado el lleno y la compactación por debajo de los 3 m, la tubería se ve sometida a presiones que son el resultado de la carga de suelo por encima de ella, más el aporte hidrostático del nivel freático, que varía según las condiciones locales.

Se propone entonces una función de calificación compuesta por tres rangos delimitados en función de la profundidad promedio (P) de instalación del elemento (Ec. 122).

$$C_{Profundidad} = \left[\begin{array}{ll} 8, & \text{si } P < 1 \text{ m} \\ -8P + 16, & \text{si } 1 \text{ m} \leq P < 2 \text{ m} \\ [e^{2,3979 \times (P-2)}] - 1, & \text{si } 2 \text{ m} \leq P < 3 \text{ m} \\ 10, & \text{si } P \geq 3 \text{ m} \end{array} \right] \quad \text{Ec. 122}$$

Las tuberías instaladas en el primer metro de profundidad deben ser fuertemente penalizadas (8 sobre un máximo posible de 10) por su alto grado de exposición a cargas superficiales.

A partir del primer metro, el efecto de la penalización en la calificación por este criterio disminuye linealmente con la profundidad (desde una calificación igual a 8 para elementos instalados a 1 metro de profundidad, hasta una calificación igual a 0 cuando la tubería se encuentra instalada a 2 m).

Se propone que las tuberías instaladas en el rango entre 2 y 3 metros reciban calificaciones que aumenten exponencialmente (desde el valor mínimo de calificación igual a 0, cuando el elemento está a 2 m, hasta el valor máximo de calificación de 10, para tuberías ubicadas en promedio a 3 metros).

La función exponencial se utiliza en este rango de profundidad, pues a diferencia de lo ocurrido en el rango entre 1 y 2 m, en éste la condición de la tubería empeora cada vez más rápido (es decir, la tasa de deterioro no es constante) a medida que se profundiza la instalación, por los efectos cada vez más presentes de fuerzas internas del suelo y del nivel freático.

A partir de los tres metros de profundidad se considera que las condiciones constructivas y las presiones en el suelo someterán al elemento a un proceso de deterioro acelerado, y en consecuencia se propone la asignación de la máxima calificación de condición posible (10 sobre 10).

5.5.1.1.3 Criterio estructural: estimación indirecta de los efectos del pandeo mediante la relación Longitud-Diámetro

Las tuberías son elementos estructurales que se ven sometidos principalmente a cargas transversales, y en menor medida a cargas longitudinales (las cargas de torsión en estas estructuras son muy poco frecuentes, siendo tal vez el único ejemplo de ello los movimientos de masas de tierra, pero aún en estos casos se espera que las cargas excepcionales de otro tipo predominen).

En tuberías fabricadas con materiales rígidos (fundición dúctil o frágil, concreto, arcilla vitrificada, asbesto-cemento), y en menor medida en tubería flexibles (por ejemplo, PVC), la combinación del sometimiento a cargas transversales y longitudinales puede generar importantes esfuerzos de pandeo.

Estos esfuerzos en algún momento pueden llegar a acelerar procesos de deterioro presentes en la tubería (por ejemplo, generar fisuras, fracturas u hoyos en zonas debilitadas previamente por la corrosión, o bien aumentar el recorrido de una fisura proveniente de la junta hacia la parte central de la conducción).

Los estudios de laboratorio que consideren esta combinación de factores son escasos. Rajani describe los diferentes modos de fallo de una tubería. Entre ellos, una condición de tensión circular y/o una condición de pandeo puede generar una rotura de tipo longitudinal.

Estas roturas tienden a ser más evidentes en tuberías a presión que sufren procesos avanzados de corrosión (Rajani y otros, 1996).

De igual manera, Kottmann reporta casos de roturas longitudinales en tuberías de grandes diámetros de fundición gris, asbesto-cemento y en PVC, sometidas a bajas presiones, como consecuencia de la formación de bolsas de aire durante condiciones climáticas cálidas (Kottmann, 1994).

Los procedimientos de instalación incorrectos pueden generar un mal soporte de la tubería por falta de compactación de la cama de reposo de la tubería, conduciendo a procesos de deterioro por pandeo (Rajani, 1996). Esta situación puede verse agravada por la expansión del material de soporte (tal es el caso de las arcillas).

Mecánicamente, la presión externa radial, P_e , que describe en parte los aportes de las cargas de la columna de suelo sobre la tubería (Ec. 123), puede definirse como (Rajani, 1996):

$$P_e = K_r u_r = \frac{E_s}{\left[\frac{D}{2}\right][1+\nu_s]} u_r \quad \text{Ec. 123}$$

Donde K_r y E_s son la rigidez radial y el módulo elástico del suelo circundante, y ν_s es la relación o ratio de Poisson del suelo. D es el diámetro; y u_r es el desplazamiento en la dirección radial, que en términos del mismo radio se expresa como (Ec. 124):

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r}{\frac{D}{2}} \quad \text{Ec. 124}$$

En la cual D es el diámetro de la tubería. ε_θ se define también como (Ec. 125):

$$\varepsilon_\theta = -\nu \frac{\partial u}{\partial x} + (1 - \nu^2) \frac{D}{t} \frac{(P_i - P_e)}{2E_p} + \nu(1 + \nu) \frac{(P_i + P_e)}{2E_p} + \alpha_p(1 + \nu)\Delta T \quad \text{Ec. 125}$$

Donde u es el desplazamiento axial, ΔT es el cambio de temperatura, E_p es el módulo elástico de la tubería, P_i es la presión interna en la tubería ejercida por el agua, y t es el espesor de la tubería. Reemplazando la Ec. 125 en la Ec. 123 se obtiene la Ec. 126.

$$\beta_1 P_e = \beta_2 P_i - \frac{\nu E_s}{(1+\nu_s)} \frac{\partial u}{\partial x} + \eta E_p \alpha_p \Delta T \quad \text{Ec. 126}$$

Donde:

$$\beta_1 = 1 + \eta(1 - \nu) \frac{D}{2t} - \eta \frac{\nu}{2}$$

$$\beta_1 = \eta(1 - \nu) \frac{D}{2t} + \eta \frac{\nu}{2}$$

$$\eta = \frac{E_s(1 + \nu)}{E_p(1 + \nu_s)}$$

Que describe la condición de equilibrio en la dirección radial, y cuya variación determina el grado de pandeo de la estructura.

Como puede apreciarse, el estudio del pandeo requiere la determinación de gran cantidad de variables sobre las cuales no se suele tener información en las bases de datos de las empresas prestadoras del servicio.

En tal sentido se propone en esta tesis, con el objetivo de considerar los efectos del diámetro y la longitud de la tubería, estimar de manera indirecta la relación de pandeo mediante la calificación de la proporción entre la longitud y el diámetro del elemento, L/D.

Dicha aproximación es respaldada por autores que concluyen acerca su estudio: Young y O'Reilly afirman que aunque las tensiones de pandeo aumentan con el diámetro de la tubería, estas tensiones lo hacen a una tasa más baja que el incremento en el módulo de sección de la tubería.

De lo anterior se desprende que las tuberías que tienen una alta proporción L/D pueden sufrir tensiones de pandeo con una mayor probabilidad (Young y otros, 1983).

En cualquier caso, esta calificación se aplicará a tuberías con un diámetro mínimo de 200mm. Tuberías de diámetros menores serán penalizadas con la

máxima calificación (10 sobre 10) pues se considera que el alto riesgo de sufrir obstrucciones que induzcan al fallo (sobre todo en redes de saneamiento) predomina sobre los efectos del pandeo y del valor de la pendiente del elemento.

De igual manera, desde la experiencia se reconoce que existe una alta probabilidad de que las tuberías con diámetros mayores a 800mm posean refuerzos mediante anillos metálicos, lo cual disminuye el riesgo de fallo por pandeo.

Por esta razón, a este tipo de tuberías se les asigna una calificación baja (2 sobre 10). Para tuberías con diámetros entre 200 y 800 mm, según el material del que están construidas, se asigna una calificación basada en la Tabla 103.

Tabla 103. Calificación de la condición de la tubería según rangos L/D y material

Material	Rango	Calificación
Acero	$L/D \leq 33,33$	4
Acero	$33,33 < L/D \leq 66,66$	6
Acero	$L/D > 66,66$	8
Concreto	$L/D \leq 200$	4
Concreto	$200 < L/D \leq 400$	6
Concreto	$L/D > 400$	8
Novafort	$L/D \leq 50$	4
Novafort	$50 < L/D \leq 100$	6
Novafort	$L/D > 100$	8
PVC	$L/D \leq 133,33$	4
PVC	$133,33 < L/D \leq 266,66$	6
PVC	$L/D > 266,66$	8

Los rangos de la tabla anterior han sido establecidos a partir del valor máximo y mínimo de la relación L/D de cada grupo homogéneo por material, tomados de la base de datos desde la cual se presenta el caso de aplicación de la metodología propuesta. Estos rangos deben ser adaptados a las condiciones de la red que se desea analizar.

5.5.1.1.4 Criterio estructural: pendiente y sedimentación

La sedimentación está asociada al aumento de la probabilidad de aparición de fallos que ocurren cuando el material sedimentado es agresivo y ataca matriz cementante de las tuberías de concreto.

Algunas de las propiedades de los materiales que una vez sedimentados pueden debilitar la condición estructural de la tubería son: pH menor a 5,5; sulfatos mayores a 200 mg/l, entre otros (WSA/FWR, 1991). Las zonas con materiales sedimentados agresivos también resultan adecuadas para la propagación de hoyos de corrosión.

En el estudio sobre autolimpieza de colectores combinados, basado en los principios de transporte de sedimentos realizado por Butler, May y Ackers, se plantea una relación entre el diámetro de la tubería y la pendiente mínima con que se debe diseñar el elemento para evitar sedimentación.

El estudio define una pendiente mínima de 0,28 % para diámetros mayores a 1200 mm. Para el rango de diámetros entre 300 y 1200 mm se propone una pendiente mínima aún menor (bajando incluso hasta los 0,22%).

A partir de los 300 mm la pendiente mínima comienza a aumentar linealmente con la disminución del diámetro: 0,28% para 300 mm, hasta 0,6 % para diámetros de 170 mm (Butler y otros, 2003).

Se propone la siguiente ecuación de calificación (Ec. 127) de la condición en función de la pendiente (e indirectamente de la sedimentación) del elemento, comparándola con la pendiente mínima propuesta por Butler para evitar sedimentación (Butler y otros, 2003).

Se plantea aquí una simplificación a los rangos de diámetros (y sus pendientes mínimas) propuestos por los anteriores autores, resumiéndolos en sólo en dos (Ec. 128).

$$C_{\text{sedimentación}} = \begin{cases} 10, & \text{si } S < 0.8 \times S_{\text{mín}} \\ 8, & \text{si } 0.8 \times S_{\text{mín}} \leq S < 0.9 \times S_{\text{mín}} \\ 6, & \text{si } 0.9 \times S_{\text{mín}} \leq S < 1.0 \times S_{\text{mín}} \\ 4, & \text{si } 1.0 \times S_{\text{mín}} \leq S < 1.1 \times S_{\text{mín}} \\ 2, & \text{si } 1.1 \times S_{\text{mín}} \leq S < 1.2 \times S_{\text{mín}} \\ 0, & \text{si } s \geq 1.2 \times S_{\text{mín}} \end{cases} \quad \text{Ec. 127}$$

Donde:

$$S_{min}(\%) = \left[\begin{array}{l} 0,28 \text{ si } D > 0.300 \text{ m} \\ -2.4615 \times D + 1.0185 \text{ si } D \leq 0.300 \text{ m} \end{array} \right] \quad \text{Ec. 128}$$

Debe notarse que la calificación penaliza pendientes pequeñas, pues el objetivo de ella es cuantificar el efecto de la sedimentación sobre la condición de la tubería.

En tal sentido se considera que una pendiente 20% mayor a la pendiente mínima es suficiente para considerar que no debe existir penalización por acumulación de sedimentos que puedan en el largo periodo de tiempo afectar la condición estructural de la tubería.

De manera similar podría evaluarse las altas pendientes, si lo que se pretende es calificar la condición de la tubería respecto a la abrasión que esta puede sufrir al transportar fluidos a altas velocidades

5.5.1.1.5 *Criterio de servicio: efecto de las acometidas en el desempeño de la tubería*

La discontinuidad estructural generada por la introducción de una acometida en una tubería, y sumado a ella, el mal estado de la unión entre ambos elementos, puede aumentar la probabilidad de fallo en la conducción analizada.

El Centro de Investigaciones del Agua (WRc, por sus siglas en inglés) afirma en su Manual Para Rehabilitación De Alcantarillados que el uso de accesorios específicamente fabricados para realizar las uniones conlleva a tener una conexión más estable, aunque las fisuras pueden presentarse como consecuencia del asentamiento diferencial y del movimiento del suelo debido a la construcción de la zanja de instalación (WRc, 2001).

Otros autores complementan lo anterior con afirmaciones más drásticas: Jones concluye que la práctica usual de hacer una perforación en la tubería principal para introducir la acometida sin proveer ningún elemento que rodee la junta, está relacionada con la aparición de problemas futuros (Jones, 1984).

El Manual De Prácticas WEF añade que la realización de una conexión inadecuada configura un ejemplo de defecto inicial que posteriormente conduce a un fallo estructural completo de la tubería (WEF/ASCE, 1994).

Similarmente, en el estudio realizado por O'Reilly al final de la década de los 80's, se concluye que la eliminación de conexiones ad-hoc (esto es, abriendo un hueco en la tubería receptora, e introduciendo directamente la acometida sin ningún aditamento sellante), y su sustitución por conexiones mediante uniones, eliminaría una fuente mayor de defectos estructurales en tuberías de alcantarillado (O'Reilly y otros, 1989).

Por supuesto, la única manera de comprobar in-situ la bondad de las conexiones entre acometidas y tuberías receptoras resulta ser la inspección visual interna de la tubería que recibe las conexiones. Esto se realiza mediante una exploración mediante Circuito Cerrado de Televisión (CCTV).

Algunos robots utilizados para esta labor permiten observar la parte del interior de la acometida justo antes de entregar sus agua a la tubería receptora, aunque por lo general, se limitan a dar cuenta del estado de la unión, y si ésta es prefabricada o se cuenta con un simple hoyo de conexión.

También se puede definir si la acometida penetra en la tubería (propiciando futuras obstrucciones que conducen a fallas estructurales en el largo periodo de tiempo), y así mismo, la dirección y la altura a la que penetra.

Ante la algunas veces escasa información que brinda la inspección de CCTV sobre la unión acometida-tubería, se propone aquí hacer la calificación de la condición en lo relativo a este criterio, mediante la relación entre el número de acometidas en mal estado (sin entrar en valoraciones sobre las causa de esto) y el número de acometidas totales que llegan a la tubería.

Una mejor evaluación del criterio se puede llevar a cabo ponderando la calificación mediante pesos de importancia asignados a cada uno de los tipos de problemas encontrados, cuando la información de CCTV disponible así lo permita. El protocolo de evaluación de defectos adoptado por la empresa realizadora de la inspección puede resultar muy útil en esta tarea.

Se calcula pues una calificación de la condición respecto al efecto de las acometidas entrantes (Ec. 129), que varía entre 0 (ningún defecto en las acometidas en el punto de entrega a la tubería, o bien, ninguna acometida llega a la

tubería) y 1 (todas las acometidas que llegan a la tubería presentan al menos un defecto en el punto de entrega a la tubería).

Necesariamente, para convertir este resultado a una escala entre 0 y 10 (en la cual se enmarcan el resto de criterios), la calificación se multiplica por 10.

$$C_{acometidas} = \frac{\text{Número de acometidas con algún defecto}}{\text{Número de acometidas totales que llegan a la tubería}} \times 10$$

Ec. 129

5.5.1.1.6 Criterio estructural: registro de fallos de la tubería en la base de datos de la empresa

El registro de fallos que la empresa lleva de cada una de las tuberías de la red constituye una fuente de información importante pues permite saber si una conducción ha entrado en el ciclo fallo-reparación-fallo que inexorablemente termina con la sustitución temprana o tardía del elemento.

Para la propuesta de calificación de la condición de la tubería sobre la base del historial de fallos, se propone los siguientes pasos:

- En primera instancia realizar una agrupación homogénea de tuberías respecto al material del que están hechas, con la intención de calcular posteriormente el promedio de fallos por unidad de longitud (y así mismo la desviación estándar de fallos por unidad de longitud), que en sí mismos constituyen estadísticos representativos de la tendencia al fallo de cada grupo, y que se ven afectados, implícitamente, por la tasa de fallo que los caracteriza.
- Una vez conocido el promedio y desviación estándar por unidad de longitud (por ejemplo, sobre m) característicos de cada grupo homogéneo por material, el siguiente paso consiste en comparar contra la combinación de esos dos valores, el promedio de fallos por unidad de longitud (también sobre m) de cada tubería.

Tanto el promedio como la desviación de cada grupo se calculan por unidad de longitud para eliminar la relación directa existente entre esta última dimensión y el número de fallos registrados.

La comparación del promedio de cada tubería se hace contra valores generados desde el grupo homogéneo al cual pertenece. Se hace así, con la intención de reflejar el comportamiento del elemento estudiado contra sus similares.

Esta medida elimina los efectos que en el resultado final pudiera tener el penalizar conducciones que desde su estado de fábrica, por estar fabricadas en diferentes materiales, presentan diferente resistencia de trabajo, resistencia última, módulo elástico, espesor para cada diámetro característico, coeficiente térmico, entre otros. Una mejor agrupación homogénea podría realizarse, si además de considerar el material, se tiene en cuenta además la época de fabricación. Este nuevo filtro permitiría cuantificar el efecto producido en la calificación final por la inclusión de diferentes tecnologías disponibles con el paso del tiempo, y que han aumentado (salvo algunos casos específicos) la calidad de las tuberías.

- Por último, la calificación de la condición para este criterio se propone hacerla con apego a la comparación del valor promedio de fallos por unidad de longitud del elemento, respecto al promedio del grupo (primer rango), promedio más una desviación estándar (segundo rango), más dos desviaciones (tercer rango), o superior a dos desviaciones (cuarto rango).

Por supuesto, si la tubería no registra fallos, no debe ser penalizada (rango cero: calificación de la condición igual a 0).

La Tabla 104 ilustra la calificación por rangos para este criterio.

Tabla 104. Calificación de la condición según el registro de fallos

Rango	Calificación
[0] (Prom. fallos tub _i) = 0	0
[1] $0 < (\text{Prom. fallos tub}_i) < (\text{Prom. fallos grupo})$	2
[2] $(\text{Prom. fallos grupo}) \leq (\text{Prom. fallos tub}_i) < (\text{Prom. fallos grupo} + 1 \text{ d.e.})$	4
[3] $(\text{Prom. fallos grupo} + 1 \text{ d.e.}) \leq (\text{Prom. fallos tub}_i) < (\text{Prom. fallos grupo} + 2 \text{ d.e.})$	6
[4] $(\text{Prom. fallos tub}_i) \geq (\text{Prom. fallos grupo} + 2 \text{ d.e.})$	10

5.5.1.1.7 *Criterio de servicio: registro de obstrucciones de la tubería en la base de datos de la empresa*

Aunque en menor medida que los fallos registrados para una tubería particular, el registro de sus obstrucciones da cuenta del deterioro que sufre el elemento, pues en el caso en que una obstrucción permanezca por un largo periodo de tiempo si ser eliminada, la tubería en ese sitio trabaja bajo una reducción de diámetro que altera las condiciones hidráulicas de diseño. Esta situación somete a toda la estructura a constantes esfuerzos adicionales tanto en su estado operativo, como en los momentos de limpieza de la obstrucción (Verbanck y otros, 1994), que pueden llegar a generar un fallo por fatiga del material, o bien auspiciando el crecimiento de aberturas por corrosión.

Más aún, existen reportes de investigación que afirman la existencia de una relación directa entre el uso de técnicas inapropiadas para la limpieza de obstrucciones, con la aceleración del deterioro estructural de la tubería. Los métodos de limpieza basados en altas presiones de agua (limpieza a chorro), así como algunos métodos de mantenimiento manual (raspado) pueden provocar daños en alcantarillados de algunos tipos de materiales modernos (Davies, 2001).

La propuesta de calificación por obstrucciones es en su estructura la misma propuesta presentada para la calificación por fallos. Para la propuesta de calificación de la condición de la tubería sobre la base del historial de obstrucciones, los pasos a seguir son los siguientes:

- Realizar una agrupación homogénea de tuberías respecto al material del que están hechas, para calcular luego el promedio de obstrucciones por unidad de longitud (y así mismo la desviación estándar de obstrucciones por unidad de longitud).
- Calculado el promedio y desviación estándar de obstrucciones por unidad de longitud característicos de cada grupo homogéneo por material, a continuación se debe comparar el valor promedio de obstrucciones de cada tubería contra la combinación de los dos valores característicos del grupo al que pertenece.

Tanto el promedio como la desviación de cada grupo, así como promedio y desviación del elemento estudiado, se calculan por unidad de longitud.

- Para finalizar, la calificación de la condición para el criterio se propone hacerla mediante comparación del valor promedio de obstrucciones por unidad de longitud del elemento, respecto al promedio del grupo (primer rango), promedio más una desviación estándar (segundo rango), más dos desviaciones (tercer rango), o superior a dos desviaciones (cuarto rango).

Si la tubería no registra obstrucciones, no debe ser penalizada (rango cero: calificación de la condición igual a 0).

La Tabla 105 muestra la calificación por rangos para el criterio obstrucciones.

Tabla 105. Calificación de la condición según el registro de obstrucciones

Rango	Calificac.
[0] (Prom. obstrucciones tub _i) = 0	0
[1] $0 < (\text{Prom. obstrucciones tub}_i) < (\text{Prom. obstrucciones grupo})$	2
[2] $(\text{Prom. obstr. grupo}) \leq (\text{Prom. f obstr. tub}_i) < (\text{Prom. Obstr. grupo} + 1 \text{ d.e.})$	4
[3] $(\text{Prom. obstr. grup} + 1 \text{ d.e.}) \leq (\text{Prom. obstr. tub}_i) < (\text{Prom. obstr. grup} + 2 \text{ d.e.})$	6
[4] $(\text{Prom. obstrucciones tub}_i) \geq (\text{Prom. obstrucciones grupo} + 2 \text{ d.e.})$	10

5.5.2 Ejemplo de aplicación de la metodología de Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio a una red de saneamiento de los Andes Colombianos

5.5.2.1 Tuberías del estudio

La aplicación de la metodología se realizó sobre un conjunto de 5794 tuberías de concreto, pertenecientes a una red de saneamiento que brinda servicio a una cuenca urbana con topografía de media montaña, ubicada en las laderas de un valle donde se asienta una ciudad de los Andes Colombianos. El rango de diámetros de la muestra inicial se define entre los 150 y los 1900 mm. La mayoría de la longitud instalada corresponde a elementos con diámetros menores a 300 mm (Figura 90).

Aporte de cada diámetro a la longitud total de la red

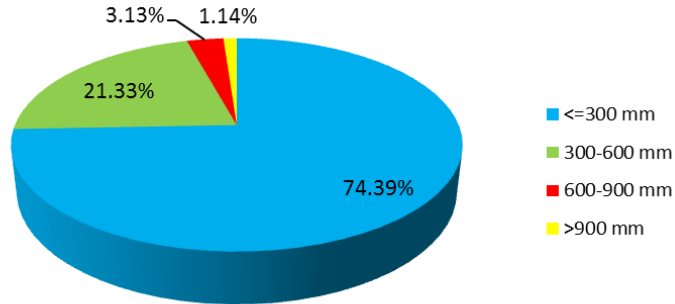


Figura 90. Porcentaje de la longitud total de la red según diámetro

La muestra está compuesta por la red secundaria, los colectores que reciben las aguas de la red secundaria, y están dispuestos ladera abajo, en dirección hacia el río principal, y el interceptor que capta las aguas de los colectores y transcurre paralelo al río principal hasta llegar a la planta de tratamiento de aguas residuales.

En algunos sectores, la red recibe exclusivamente aguas residuales, en algunos transporta únicamente aguas lluvias, y en otros sectores, la combinación de ambas. La red secundaria dedica una longitud aproximadamente igual al transporte de los tres tipos de aguas (aproximadamente 50.000 m a cada tipo de agua).

Se identifican algo más de 3000 m de colectores que transportan aguas residuales, y 500 m de colectores que transportan aguas combinadas. Los interceptores llevan exclusivamente aguas residuales en una longitud de un poco más de 1400 m (Figura 91).

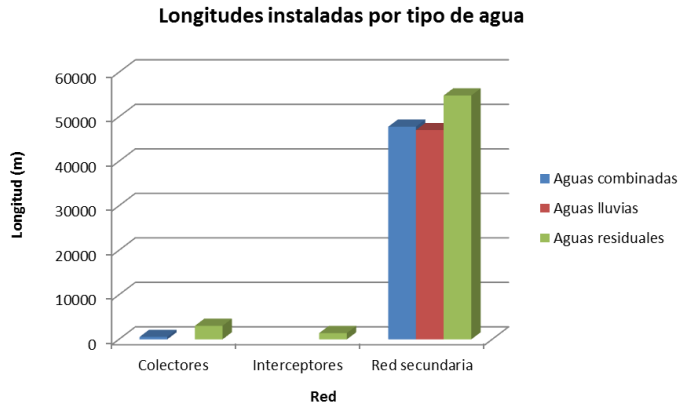


Figura 91. Distribución de longitudes instaladas en cada red por cada tipo de agua

La red secundaria se compone de tuberías con diámetros variados. La mayoría de su longitud la componen conducciones de diámetros entre 150 y 300 mm (Figura 92).

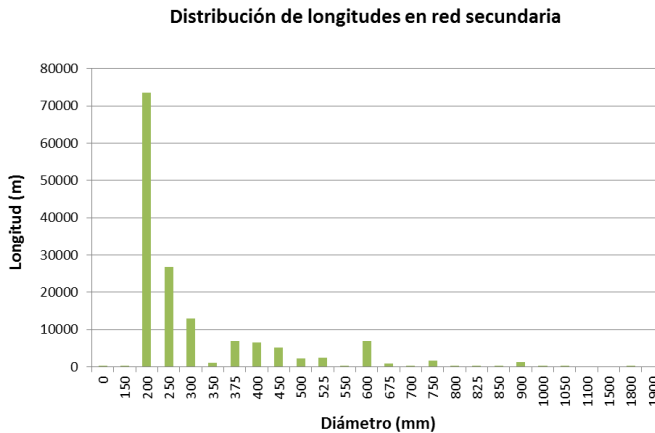


Figura 92. Distribución de longitudes instaladas por diámetro. Red secundaria

Los colectores poseen diámetros entre 200 y 500 mm (con una mayor longitud en elementos de 400 mm), y los interceptores con diámetros entre 1100 y 1900 mm, siendo este último diámetro el más representativo (Figura 93). Los segmentos de estudio se caracterizan por longitudes diversas (entre 0.5 m y casi 250 m).

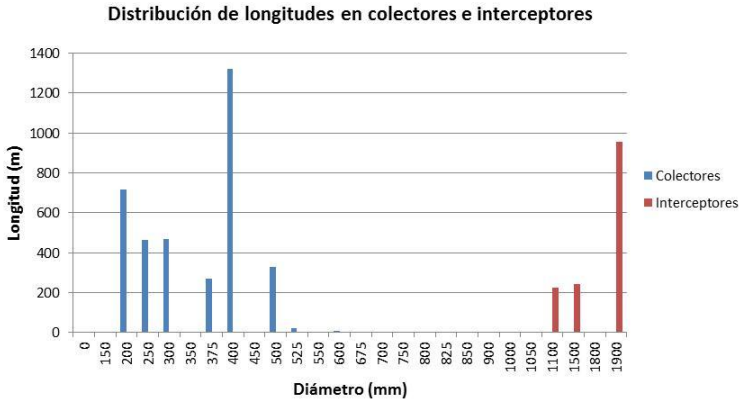


Figura 93. Distribución de longitudes instaladas por diámetro. Colectores e interceptores

La edad de los elementos también es variable, encontrándose tuberías con fecha de instalación de 1950, hasta tuberías instaladas en 2012. La dinámica de crecimiento del sistema puede apreciarse mediante la Figura 94. En ella se identifican cuatro períodos especialmente activos en lo que se refiere a instalaciones de tuberías de concreto: particularmente en los años 1975 y 1985, entre 1994 y 1995, y desde 2001 hasta 2008.

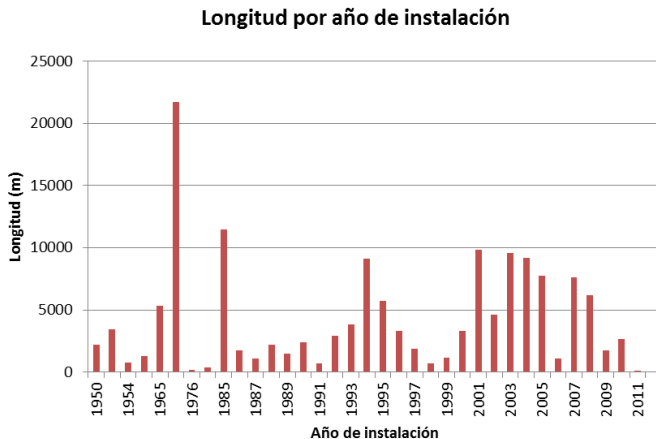


Figura 94. Distribución de longitudes instaladas desde 1950 hasta 2010

En dicha dinámica se puede apreciar también que a partir del 2000 las tasas de fallos y de obstrucciones comenzaron a disminuir notoriamente (Figura 95). Esto puede ser concordante con la implementación de un plan de mantenimiento preventivo.

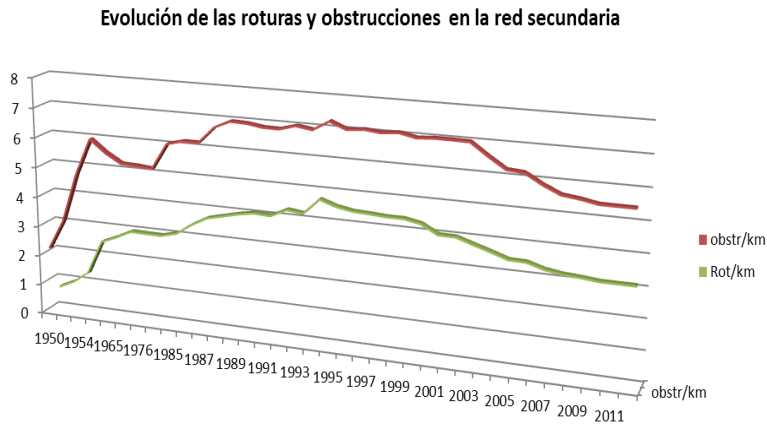


Figura 95. Comportamiento de dos tasas representativas de la dinámica de la red secundaria: tasa de fallos y de obstrucciones por km de red existente

5.5.2.2 Calificación para los criterios incluidos en el estudio

5.5.2.2.1 Edad

Para todos los elementos de la muestra el factor de incertidumbre a , de la Ec. 121, fue seleccionado en 0.5 tras concluir que el personal de campo se encontraba debidamente capacitado para ejercer las labores de instalación de la tubería. Igualmente se identificó que las condiciones de instalación de la tubería se conocen y se consideran adecuadas.

También para toda la muestra, el factor de incertidumbre b de la misma Ec., también se seleccionó en 0.5, pues se dispone del registro de edad de la tubería, y a éste se le puede hacer trazabilidad. También la edad de la tubería presenta coherencia con la fecha de inicio de instalación de tuberías del mismo material en dicho ámbito geográfico, según la bibliografía técnica.

Dado que toda la muestra del estudio está compuesta por elementos de concreto, el tiempo de supervivencia S ha sido seleccionado en 50 años después de realizar una revisión bibliográfica sobre la vida útil máxima de tuberías de este material. Un mayor refinamiento en la selección de este valor puede lograrse si se conoce para cada elemento características particulares sobre el tipo de concreto, y sobre si la conducción presenta refuerzos en acero.

El factor de forma de la curva de calificación, n , ha sido seleccionado en 1.5 para todos los elementos de la muestra, implicando que la curva de calificación (Figura 96), por preferencias del decisor, no debe resultar especialmente pronunciada para elementos de concreto de edades avanzadas.

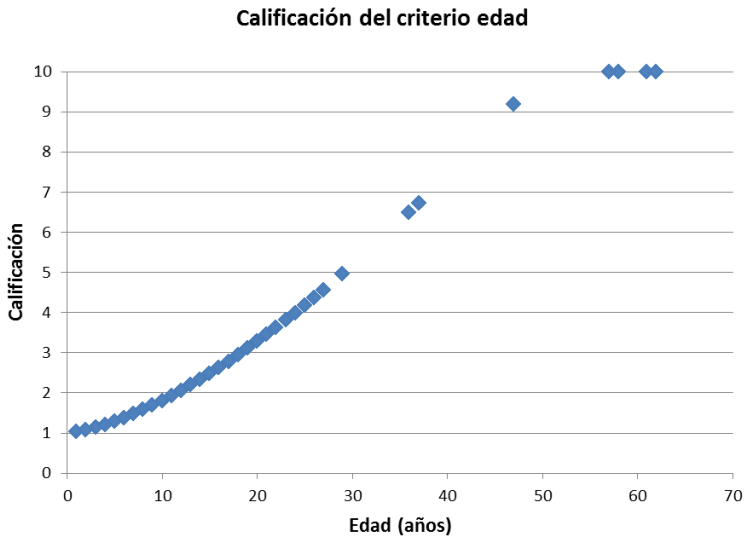


Figura 96. Calificación del criterio edad para la muestra de estudio (tuberías de concreto)

Conducciones de otros materiales, no incluidas en la muestra por tener un número de elementos poco representativo, también fueron analizadas. En el caso del PVC, el tiempo de supervivencia S se seleccionó en 40 años tras la revisión de la bibliografía técnica sobre dicho material. Para el acero este valor fue seleccionado en 20 años, luego de sopesar el comportamiento de este tipo de tuberías en la red. Los restantes parámetros fueron los mismos utilizados para las conducciones de concreto.

La Figura 97 evidencia valores de calificación más estrictos para tuberías de la misma edad y de diferente material al concreto. Las tuberías de acero de menos de 10 años resultan especialmente penalizadas. Las conducciones de PVC, por presentar según la literatura técnica un tiempo de supervivencia menor al de las de concreto, reciben una mayor calificación, y en consecuencia, por este criterio, aportará un más alto valor al ponderado final de necesidad de intervención.

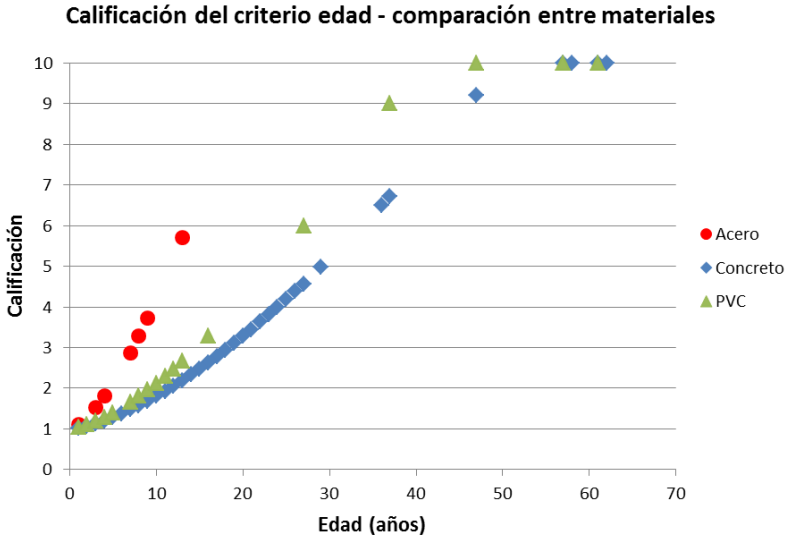


Figura 97. Calificación del criterio edad para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)

Como es de esperarse según la Ec. 121, las curvas de calificación resultan asintóticas al valor máximo de calificación (10) para las tuberías de 50 o más años de edad en el caso del concreto, para tuberías de 40 años o más si son de PVC, y de 20 años de edad si son de acero (en este último caso no existe ningún elemento que alcance dicho umbral).

5.5.2.2.2 Profundidad de instalación

En la Figura 98 se identifican los cuatro rangos característicos de la Ec. 122: el primero de ellos penaliza con una calificación igual a 8 a los elementos instalados a menos de 1 m de la superficie. El segundo rango asigna una calificación que disminuye linealmente según la profundidad de instalación aumenta desde 1 m (calificación igual a 8) hasta 2 m (calificación igual a cero, lo que refleja según la

revisión técnica, la profundidad ideal de instalación). A partir de los 2 m y hasta los 3 m la calificación aumenta exponencialmente desde 0 hasta 10, siendo éste el valor umbral que alcanzarán todas las tuberías instaladas a mayor profundidad.



Figura 98. Calificación del criterio profundidad de instalación para la muestra de estudio (t. de concreto)

La distribución de los elementos de la muestra (tuberías de concreto con suficiente información para ser evaluadas) en los cuatro rangos de calificación denota un condicionamiento de la profundidad de instalación a aspectos locales para cada caso. No se evidencia un valor de profundidad predominante entre los 0 y 5 m.

Para mayores profundidades el número de conducciones en dicha condición disminuye con claridad. A partir de los 6 m los casos de tuberías instaladas son esporádicos (Figura 98). No se encuentran casos de tuberías de otros materiales no incluidos en la muestra de estudio (PVC y acero) instaladas a profundidades mayores a los 5 m (Figura 99).

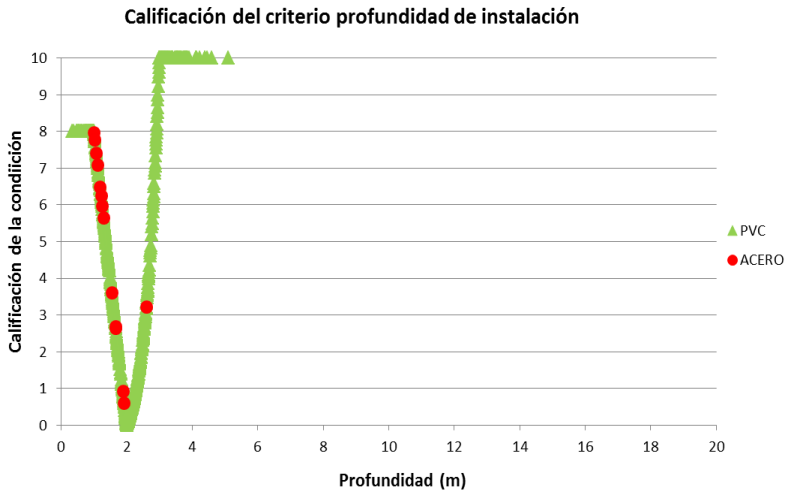


Figura 99. Calificación del criterio profundidad de instalación para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)

5.5.2.2.3 Pandeo: estudio de la relación L/D

Varias tuberías de igual diámetro pueden recibir diferentes calificaciones, pues ellas pueden diferir en su longitud característica, y en consecuencia, en el riesgo de fallo asociado al pandeo.

La Figura 100 muestra el promedio de calificación de las tuberías de un mismo diámetro. En ella se puede apreciar un grupo de tuberías que recibieron una calificación máxima (10 puntos) pues su diámetro es inferior a 200 mm, y varios grupos de tuberías con diámetros superiores a 800 mm a las cuales les fue asignada la mínima calificación establecida para este criterio (2 puntos).

Las tuberías con diámetros mayores o iguales a 200 mm y menores o iguales a 800 mm reciben diversos valores de calificación, en función de su relación L/D.

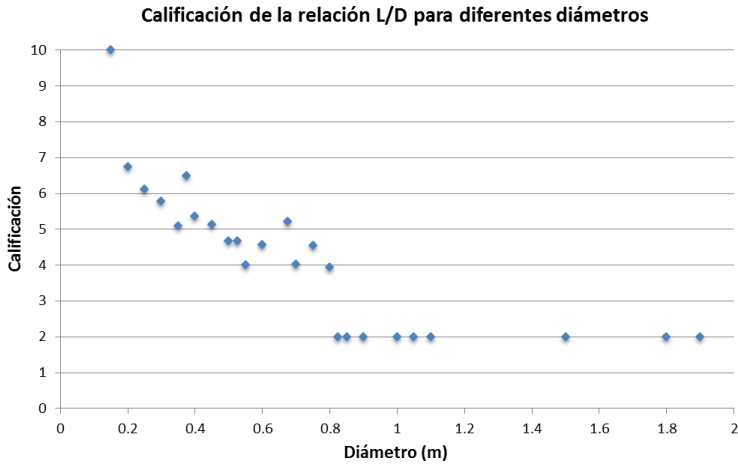


Figura 100. Calificación del criterio L/D para la muestra de estudio (tuberías de concreto)

La Figura 101 incluye calificaciones para elementos no incluidos en la muestra de estudio. Las pocas tuberías de acero presentes en la red reciben calificaciones superiores a 3 e inferiores a 6. Lo mismo ocurre con las tuberías de PVC con diámetros entre 200 y 800 mm.

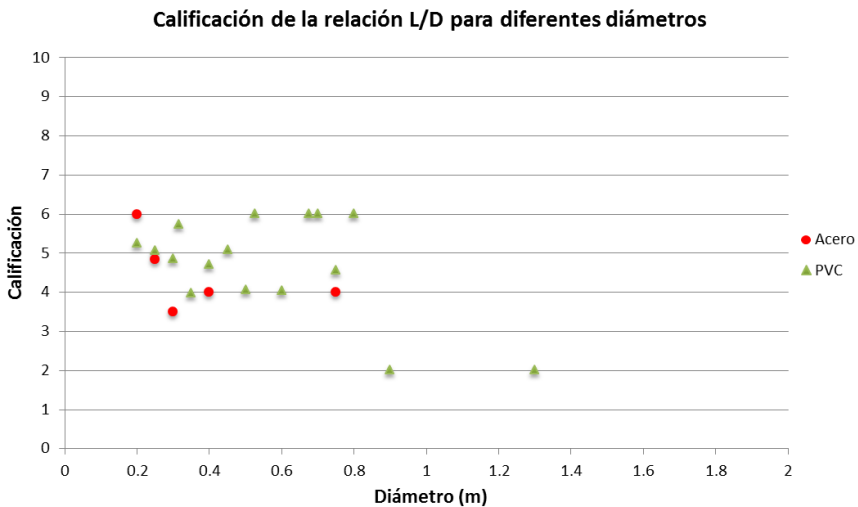


Figura 101. Calificación del criterio L/D para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)

Los valores de la relación L/D sobre la cual se califica de manera indirecta los efectos estructurales del pandeo, varían de acuerdo a cada material. Los valores

extremos de esta relación se encuentran, en todo caso, en tuberías de concreto. Aunque los valores promedio de L/D para acero, PVC y concreto son similares (Tabla 106), los rangos de variación en los dos primeros materiales son más sensiblemente más cortos que el rango de variación del concreto, lo cual conduce a pensar que es en este último material donde se pueden encontrar con mayor probabilidad casos de pandeo.

Tabla 106. Rangos de variación de la relación L/D para diferentes materiales: concreto (muestra de estudio), PVC y acero

	L/D Promedio	L/D Mínimo	L/D Máximo
Concreto	63.68	1.80	650.00
PVC	55.06	2.00	394.85
Acero	49.11	13.68	102.80

5.5.2.2.4 Sedimentación: estudio de la pendiente

Este criterio califica la conducción en función de su pendiente, comparada con la pendiente mínima que debe tener, valor que a su vez depende del diámetro del elemento. En la Figura 102 se puede apreciar que la mayoría de tuberías de la muestra, y todas las de otros materiales no incluidos en el estudio, reciben una calificación de 0 (su pendiente es más del 100% de la pendiente mínima para evitar sedimentación, que a la vez depende de su diámetro), o de 10 (su pendiente es menor al 80% de la pendiente mínima para su diámetro). Solo unos cuantos elementos de la muestra de tuberías de concreto no recaen en alguna de estas dos condiciones y alcanzan una calificación de 6.

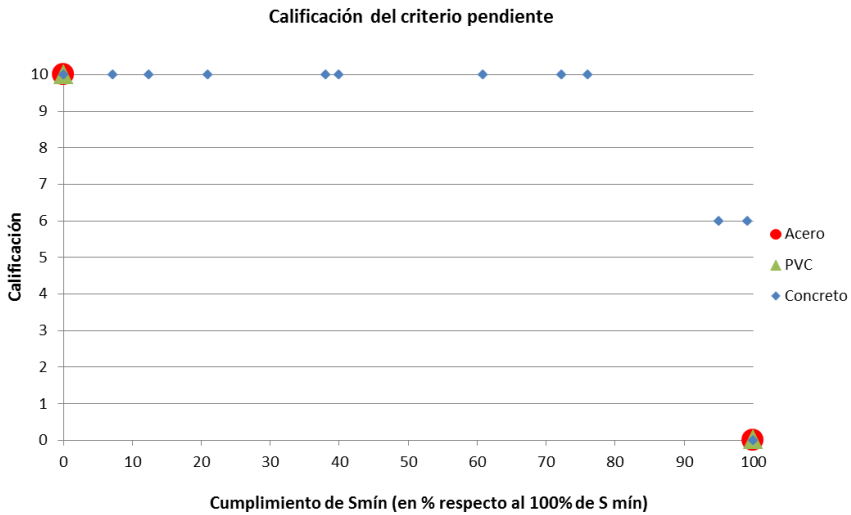


Figura 102. Calificación del criterio pendiente para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)

5.5.2.2.5 Efecto del estado de las acometidas que llegan a la tubería

En este criterio se calcula la relación entre el número de acometidas con algún defecto, y el número total de acometidas que se acoplan a la tubería en estudio. La mínima calificación (0) también puede asignarse a tuberías que no reciben acometidas.

Para cada diámetro característico de la red, se presenta en la Figura 103 el promedio de calificación de las conducciones, tanto de concreto (elementos de la muestra de estudio) como de PVC y acero. La calificación más alta posible solo es alcanzada por tuberías de PVC de diámetro 225 mm.

La mayoría de las tuberías de concreto quedan agrupadas en diámetros inferiores a los 400 mm y reciben calificaciones inferiores a 3.5 (a algunas con diámetro mayor a 600 mm se les asigna una calificación de 5). La gran mayoría de tuberías tiene asociada una calificación de 0. Esto se debe, bien a que no reciben acometidas en ninguna parte de su longitud, o bien porque las acometidas que entregan sus aguas a la tubería se encuentran en buen estado.

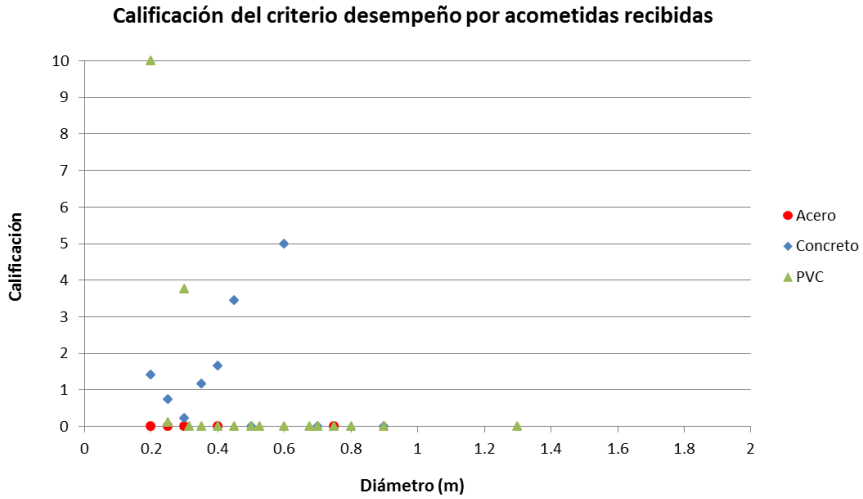


Figura 103. Calificación del criterio desempeño de la tubería debido al estado de las acometidas que recibe, para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de acero y PVC)

Muchas de las tuberías de la muestra no pueden ser calificadas bajo este criterio, pues para tal fin se requiere una inspección con CCTV para determinar el estado de las acometidas asociadas, y este procedimiento no se ha realizado en gran parte de la red.

5.5.2.2.6 Registro de fallos

La penalización para este criterio se calcula con base en la comparación entre los fallos estructurales por unidad de longitud registrados para la tubería, y el promedio del grupo homogéneo según material, al que pertenece. Este criterio puede evaluarse solo en tuberías de concreto y en tuberías de PVC. No se disponen de registros de fallos para tuberías de acero. Desde la Figura 104 se identifica una gran cantidad de conducciones con calificación de 10, lo que indica que existe una importante dispersión de registros de fallos/m respecto al valor medio del grupo homogéneo, tanto para tuberías de concreto como para tuberías de PVC.

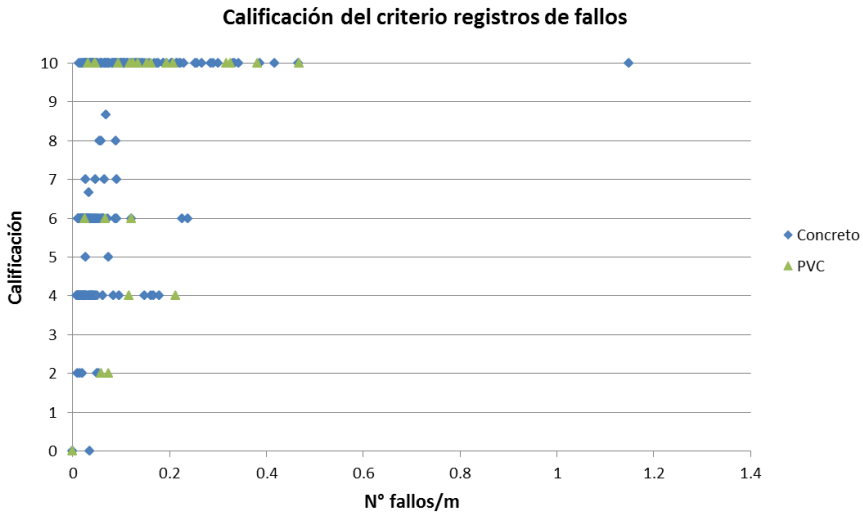


Figura 104. Calificación del criterio registro de fallos para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de PVC)

5.5.2.2.7 Registro de obstrucciones

La calificación que se asigna por este criterio ha sido determinada mediante proceso de comparación entre la cantidad de obstrucciones registradas por unidad de longitud para la tubería, y el promedio del grupo homogéneo por material al cual se encuentra asociada.

Al igual que en el criterio anterior, en este criterio pueden evaluarse solo tuberías de concreto y en tuberías de PVC, pues no se cuenta con registros de obstrucciones para tuberías de acero.

En la Figura 105 la calificación de 10 presenta la mayor frecuencia de ocurrencia para las conducciones evaluadas. Al igual que en el caso anterior, esto conduce a pensar que existe una importante dispersión de registros de obstrucciones/m respecto al valor medio del grupo homogéneo. Esto ocurre tanto en las tuberías de la muestra de estudio (concreto) como en las tuberías de PVC.

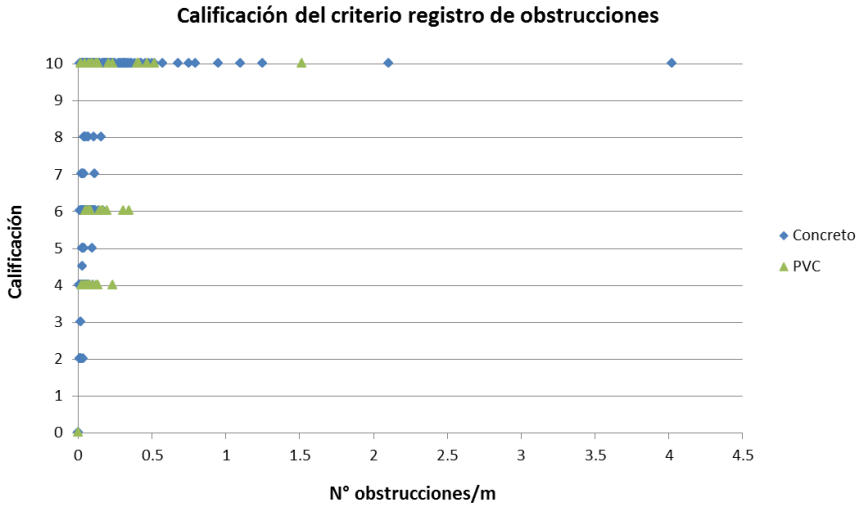


Figura 105. Calificación del criterio registro de obstrucciones para tuberías de concreto y para elementos no incluidos en la muestra (tuberías de PVC)

5.5.3 Resultados finales de prioridad a la renovación

Como se ha afirmado en la descripción de la metodología, la calificación de la condición se obtiene mediante la ponderación de criterios con pesos de importancia. Los pesos utilizados en el estudio inicial, permiten generar una calificación para cada una de las tuberías que cuenta con evaluación para los 7 criterios considerados. La validación, sin embargo, se realiza únicamente para aquellas tuberías que cumplen la anterior condición, y que además cuentan con resultados de inspección mediante CCTV.

Para este caso de estudio, los pesos de importancia utilizados para ponderar cada criterio se muestran en la Tabla 107.

Tabla 107. Pesos de importancia para la determinación de la calificación de la condición

W_{ED}	W_{PR}	$W_{L/D}$	W_{SE}	W_{AC}	W_{FA}	W_{OB}
0.1	0.05	0.05	0.15	0.15	0.25	0.25

5.5.3.1 Lista priorizada de tuberías

De las 5794 tuberías de concreto que integran la muestra de estudio, 323 tuberías poseen registros de CCTV, y en consecuencia que permiten validar el resultado de la aplicación de esta metodología. Se incluye en la Tabla 108 una selección compuesta por las 20 tuberías con mayor prioridad a la intervención.

Tabla 108. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con mayor prioridad a la intervención según la calificación de la condición

Prioridad	IPID	Calificación 0-10 (metodología propuesta)	Prioridad (metodología propuesta)
1	6242495	7.301479599	Alta
2	6247545	6.787427128	Alta
3	6234276	6.578914863	Alta
4	6242485	6.392914863	Alta
5	6243415	6.334726424	Alta
6	6247661	6.055708626	Alta
7	6241882	5.507949081	Media
8	6243405	5.444	Media
9	6234289	5.428914863	Media
10	6249440	5.2704	Media
11	8578553	5.057135604	Media
12	6240350	4.716671024	Media
13	8578554	4.682135604	Media
14	6247669	4.5744	Media
15	6242222	4.256416435	Media
16	6243409	4.237841003	Media
17	6243403	4.231743929	Media
18	6241885	4.184276032	Media
19	6247142	4.132227432	Media
20	6239819	4.111822959	Media

Las tuberías con mayores historiales de fallos y obstrucciones, con baja pendiente (alta posibilidad de sedimentación) y simultáneamente con mal estado de las acometidas que entregan sus aguas a dichas conducciones, resultan altamente penalizadas. Así por ejemplo, la tubería identificada con el IPID 6242495 registra 3 obstrucciones y un fallo estructural en 4 años, una pendiente registrada en las bases de datos del 0% (que implica una tendencia a la ocurrencia de sedimentación), y un estado crítico de las acometidas que recibe.

Adicionalmente se presentan las 20 tuberías con menor prioridad a la intervención (Tabla 109). Ellas se caracterizan por no presentar registros de obstrucciones o fallos estructurales, pendientes mayores al valor mínimo según su diámetro, y un buen estado de sus acometidas.

Tabla 109. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con menor prioridad a la intervención según la calificación de la condición

Prioridad	IPID	Calificación 0-10 (metodología propuesta)	Prioridad (metodología propuesta)
20	9127081	0.335735236	Muy baja
19	9127097	0.335227245	Muy baja
18	9169593	0.333173583	Muy baja
17	9136703	0.330216095	Muy baja
16	9213969	0.329707991	Muy baja
15	9137430	0.327542832	Muy baja
14	9175707	0.326364675	Muy baja
13	9127133	0.325227245	Muy baja
12	9175702	0.324742114	Muy baja
11	9213698	0.324675186	Muy baja
10	9169606	0.323078664	Muy baja
9	9127202	0.322365362	Muy baja
8	9176110	0.322364675	Muy baja
7	9176080	0.321578113	Muy baja
6	9137349	0.319227245	Muy baja
5	9137421	0.316316278	Muy baja
4	9213707	0.314936914	Muy baja
3	9213970	0.314936914	Muy baja
2	9213709	0.312897112	Muy baja
1	9213705	0.311577439	Muy baja

Así por ejemplo, la tubería con IPID tiene una pendiente del 8.9% (lo que asegura suficiente fuerza de arrastre bajo condiciones normales), ninguna obstrucción o fallos estructural registrado, y un buen estado de todas las acometidas que a ella llegan.

La Figura 106 permite identificar el comportamiento de los promedios de calificación de la condición alcanzados para cada diámetro. La figura incluye además las calificaciones asignadas por la empresa de aguas mediante el análisis

exclusivo de los resultados de inspecciones en CCTV, y de manera alternativa, mediante la combinación que la empresa hace de estos resultados con la evaluación de otros criterios como edad, material, profundidad, diámetro, número de acometidas, daños, obstrucciones, etc.

Las evaluaciones de criterios (posteriormente combinadas con los resultados de CCTV) son sin embargo, en algunos casos, imprecisas y pueden generar calificaciones anormalmente altas: algunas de estas evaluaciones asumen valores de calificación únicos para rangos muy amplios dentro de los cuales se describe el posible comportamiento de una variable.

Un ejemplo, consiste en calificar con un solo valor a todas las tuberías con diámetro inferior a un único límite, y calificar con otro valor extremadamente opuesto a las restantes tuberías, con lo cual, a una tubería de 595 mm de diámetro se le asigna una calificación de 0.8 y a una tubería con solo 10 mm más de diámetro se le asigna una calificación de 0.2. También resulta un buen ejemplo de imprecisión, el asumir una función lineal para calificar la edad, lo cual desconoce la aceleración que sufre el proceso de deterioro con el paso del tiempo.

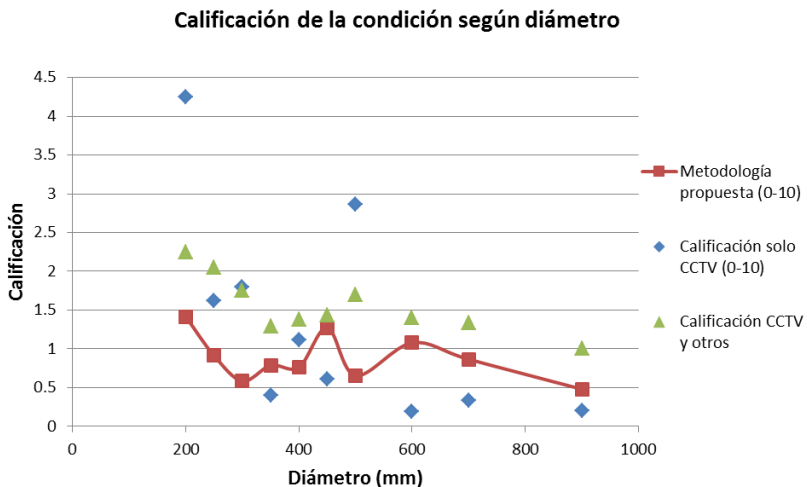


Figura 106. Calificación de la condición mediante la metodología propuesta y comparación con resultados de inspección mediante circuito cerrado de TV y combinación de otros criterios

En la figura se puede apreciar un comportamiento intermedio de los resultados de la metodología propuesta respecto a las dos metodologías que aportan valores comparativos. Si bien los resultados de la metodología propuesta se encuentran siempre por debajo de los resultados de la calificación que incluye la inspección de CCTV y otros parámetros, también puede apreciarse que resultan superiores a los de la calificación exclusiva por CCTV cuando se trata de tuberías con diámetros superiores a los 350 mm.

La calificación solo por CCTV desconoce la influencia directa de criterios no apreciables visualmente, como lo es la profundidad de instalación y la pendiente. Ella depende también, en gran medida, del protocolo usado para convertir las observaciones visuales en calificaciones. Un mismo video puede generar diversas calificaciones que dependen del procedimiento de evaluación adoptado.

Los resultados encontrados revisten de validez a la metodología propuesta, dado que ellos se encuentran dentro del rango definido por las otras dos metodologías, con la ventaja que se sabe que la evaluación planteada para cada criterio fue más estricta que la encontrada, y se ha basado en una revisión exhaustiva de la literatura técnica para tales fines.

Los errores relativos a la metodología que combina CCTV y otros criterios se encuentran entre el 10% (para tuberías de 450 mm de diámetro) y el 66% (para tuberías de 300 mm de diámetro). Los errores relativos a la metodología exclusiva de CCTV son mayores. Esto se explica por la naturaleza misma de la metodología basada exclusivamente en CCTV, que no tiene en cuenta otros criterios relevantes que no se aprecian en dicho procedimiento. En este caso, las calificaciones para tuberías de diámetros mayores (superiores a 600 mm), son aquellas donde generan las mayores diferencias entre ambas metodologías.

5.5.3.2 Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de identificar el grado de sensibilidad de la metodología ante la introducción de variaciones en sus datos de entrada, se realizó un análisis de sensibilidad en el cual se cambiaron los pesos de importancia de los criterios. Los nuevos pesos se muestran en la Tabla 110.

Tabla 110. Pesos de importancia para la determinación de la calificación de la condición. Análisis de sensibilidad

W_{ED}	W_{PR}	W_{LD}	W_{SE}	W_{AC}	W_{FA}	W_{OB}
0.3	0.05	0.05	0.15	0.15	0.15	0.15

Los cambios introducidos reflejan un aumento en la importancia del criterio edad y una disminución en la calificación final de los efectos de los registros de fallos y obstrucciones. Esto concuerda con una visión más tradicional en la cual la edad se asume como aquel factor primordial para explicar la evolución del grado de deterioro.

Después de aplicados los cambios, se genera un nuevo listado de prioridad a la intervención. La Tabla 111 incluye las primera 20 tuberías con mayor calificación de la condición. En ella se aprecian 8 tuberías que alcanzan una prioridad alta (contra 6 tuberías en el listado inicial). Dos de estas 8 tuberías registran una calificación por encima de los 7 puntos.

La tubería con IPID 6243415, con 56 años de funcionamiento, 9 obstrucciones y un fallo estructural, pendiente del 0% y acometidas entrantes en regular estado, es la conducción que mayor calificación alcanza.

De las 20 tuberías que conforman la lista de mayor prioridad a la intervención en el estudio inicial, 18 se encuentran (aunque en diferente posición) en la lista de mayor prioridad del estudio de análisis de sensibilidad. Lo anterior indica que aunque las posiciones de prioridad varían, la tendencia en general a obtener calificaciones altas se conserva para las tuberías de la parte alta de la lista. Esto permite pensar que la metodología no resulta especialmente sensible a cambios en los pesos de importancia, cuando se analizan los elementos que mayor urgencia de intervención posee.

Tabla 111. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con mayor prioridad a la intervención según la calificación de la condición tras variaciones en el conjunto de pesos de importancia.

Prioridad	IPID	Calificación 0-10 (metodología propuesta)	Prioridad (metodología propuesta)
1	6243415	7.334726424	Alta
2	6243405	7.044	Alta
3	6234276	6.924744588	Alta
4	6242495	6.776438798	Alta
5	6242485	6.738744588	Alta
6	6242222	6.256416435	Alta
7	6243409	6.237841003	Alta
8	6240350	6.116671024	Alta
9	6247142	5.972682296	Media
10	6247545	5.944281384	Media
11	6243403	5.831743929	Media
12	6234289	5.774744588	Media
13	6241882	5.296749081	Media
14	6240293	5.094	Media
15	8578553	4.971406813	Media
16	6247661	4.930667824	Media
17	6249440	4.6592	Media
18	8578554	4.596406813	Media
19	6241885	4.582872791	Media
20	6241876	4.336406813	Media

De manera similar a lo hecho en el estudio inicial, en este análisis de sensibilidad se muestran las 20 tuberías (Tabla 112) que menor prioridad de intervención poseen después de efectuados los cambios en los pesos de los criterios.

Tabla 112. Lista de las 20 tuberías de la muestra de estudio con menor prioridad a la intervención según la calificación de la condición tras variaciones en el conjunto de pesos de importancia.

Prioridad	IPID	Calificación 0-10 (metodología propuesta)	Prioridad (metodología propuesta)
20	9175702	0.565471465	Muy baja
19	9127082	0.563681734	Muy baja
18	9127200	0.563681734	Muy baja
17	9176110	0.563094026	Muy baja
16	9176080	0.562307464	Muy baja
15	9127081	0.562189725	Muy baja
14	9127097	0.561681734	Muy baja
13	9169593	0.559628072	Muy baja

Prioridad	IPID	Calificación 0-10 (metodología propuesta)	Prioridad (metodología propuesta)
12	9137430	0.553997321	Muy baja
11	9127133	0.551681734	Muy baja
10	9169606	0.549533154	Muy baja
9	9127202	0.548819851	Muy baja
8	9137349	0.545681734	Muy baja
7	9213969	0.544107991	Muy baja
6	9137421	0.542770768	Muy baja
5	9213698	0.539075186	Muy baja
4	9213707	0.529336914	Muy baja
3	9213970	0.529336914	Muy baja
2	9213709	0.527297112	Muy baja
1	9213705	0.525977439	Muy baja

Las cuatro tuberías con menor calificación de condición de todas, bajo estas nuevas condiciones, siguen siendo aquellas que ocupaban esta misma posición de prioridad en el estudio inicial. Otras tres tuberías de las lista de 20 con menor prioridad en el estudio inicial, figuran en la de menor prioridad del análisis de sensibilidad.

Así, la sensibilidad de la metodología ante cambios en los pesos de importancia es mayor para las evaluaciones de tuberías que se encuentran clasificadas en la parte baja de la lista, es decir, aquellas con menores necesidades de intervención.

Al igual que en la figura anterior, en la Figura 107 se identifica un comportamiento intermedio de los resultados de la metodología propuesta respecto a las dos metodologías de control. En este caso, los resultados de la metodología propuesta son coincidentes con los de la inspección de CCTV y otros parámetros para tuberías a partir de los 600 mm. Para tuberías de diámetros inferiores a 300 mm, las calificaciones generadas por la metodología propuesta son siempre inferiores a los de las otras dos metodologías.

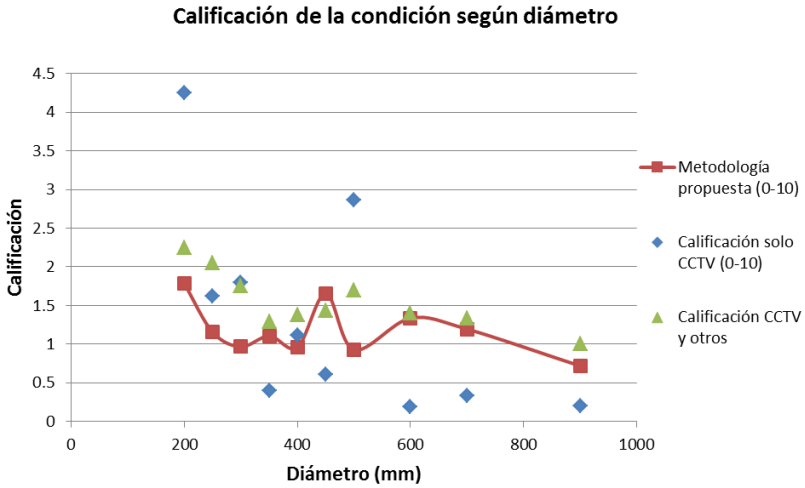


Figura 107. Calificación de la condición mediante la metodología propuesta y comparación con resultados de inspección mediante circuito cerrado de TV y combinación de otros criterios. Análisis de sensibilidad de los resultados ante la variación en los pesos de importancia

Si bien los errores relativos respecto a la calificación promedio de las metodologías de comparación son de una magnitud apreciable (en este estudio de sensibilidad, varían entre el 19 y el 68%), los resultados de la metodología propuesta se hallan de nuevo dentro del rango delimitado por las otras dos metodologías.

Los errores relativos a la metodología que combina CCTV y otros criterios se encuentran entre el 4% (para tuberías de 600 mm de diámetro) y el 44% (para tuberías de 300 mm de diámetro). Los errores relativos a la metodología exclusiva de CCTV son mayores, siendo en las tuberías de diámetros 350, 450 y 600 mm, donde se generan las mayores diferencias entre ambas metodologías. Ambos grupos de errores relativos (tanto respecto a CCTV exclusivamente, como respecto a CCTV y otros criterios) resultan ser de menor magnitud en comparación con sus similares del estudio inicial.

5.5.4 Enseñanzas y crítica a la propuesta

5.5.4.1 Bondades

El principal aporte de esta propuesta radica en el planteamiento de sistemas de evaluación más técnicos, no solo respecto a lo que se puede esperar en cuanto al comportamiento de cada criterio, sino además en lo relacionado con aquello que sobre cada criterio se ha dicho ya por los expertos.

La revisión de literatura técnica, combinada con un análisis de las diferentes bases de datos disponibles, ha permitido generar formas de evaluación más adecuadas para cada criterio, y en tanto lo son, también se espera que el resultado final de calificación de la condición sea más ajustado a la realidad.

Otro punto positivo del planteamiento radica en la inclusión de criterios que han sido elegidos tras el estudio de varias bases de datos típicas, lo cual asegura que la metodología resulta aplicable, pues los datos de entrada que requiere estarán en efecto disponibles (aunque con diferentes niveles de cantidad y calidad) en una porción importante de las empresas prestadoras del servicio.

Por último, la metodología que se propone es sencilla, tanto en la fase de evaluación de cada criterio, como en la fase de cálculo de la calificación de la condición final. Si se quiere, la propuesta podría aplicarse a valores promedio de sectores de la red, y no a elementos individuales, encontrando entonces una lista priorizada de sectores con mayor o menor necesidad de intervención.

5.5.4.2 Defectos

Al igual que lo sucedido con el método de las Sumas Ponderadas, esta metodología produce resultados con base en la ponderación mediante pesos de importancia. Para disminuir en lo posible el grado de subjetividad, como ya se dijo, los métodos de búsqueda de consenso resultan ser una buena alternativa.

Otro problema que resulta evidente al aplicar la metodología radica en la obligación que adquiere el decisor de escoger una única función matemática para representar su conocimiento acerca del comportamiento de un criterio. En este aspecto, antes que intentar reflejar la experticia de tal forma, resulta preferible plantear conjuntos de funciones matemáticas que describan lo que el experto

conoce respecto a la variable estudiada, y que permitan incorporar la incertidumbre que el mismo experto posee sobre el comportamiento de la variable.

Como ya se dijo, la elección de una u otra función depende exclusivamente del comportamiento de la variable estudiada, y aunque la revisión bibliográfica provee ideas valiosas, es el decisor local quien debe construir dicha función, de acuerdo con su conocimiento y con el contenido de las bases de datos disponibles en la empresa.

Capítulo 6

***Plan básico de actuación para la
gestión técnica de redes de
transporte de agua***

Los aportes del presente capítulo resultan aplicables a cualquier entidad prestadora del servicio de abastecimiento o saneamiento de agua, que requiera aumentar la eficiencia asociada al proceso de intervención de sus redes, pero en especial, para aquellas empresas pequeñas y de países en desarrollo, que desean dar sus primeros pasos hacia la debida gestión de su patrimonio en infraestructura.

Se pretende mediante las ideas que aquí se exponen, y desde un punto de vista técnico, determinar la secuencia lógica de actividades que componen un plan de acciones iniciales en su forma más básica, encaminado a mantener la red en buen estado y con un buen desempeño. Estas acciones son planeadas a nivel táctico, y desarrolladas a nivel operacional.

La implementación de un plan como el que se propone en este capítulo puede concebirse como un primer gran paso en el ámbito de la gestión técnica, permitiendo a la entidad prestadora del servicio adoptar con mayor facilidad un plan de gestión patrimonial de infraestructura en un futuro cercano. Muchas de las actividades que se proponen en este plan básico de actuación, hacen parte del plan de gestión del patrimonio en infraestructura.

6.1 ¿En qué consiste el plan básico de actuación para la gestión técnica de redes de transporte de agua?

Un plan básico de actuación a nivel de gestión de redes de acueducto y alcantarillado es, como aquí se propone, un compendio de fases (mediante módulos), que a su vez contienen acciones, enfocadas a obtener un aumento en el nivel de eficiencia en el uso del recurso hídrico, o en la disposición de las aguas residuales, asegurando al mismo tiempo niveles de prestación del servicio óptimos.

Un plan de actuación básico enfocado a la gestión eficiente de redes, debe velar por:

- Mantener unos estándares de servicio adecuados según las políticas de la empresa.
- Minimizar los costos incurridos por operación y mantenimiento del sistema, y a la vez, asegurar la recuperación de costos (siguiendo del principio de autosostenibilidad).

- Mantener el patrimonio en infraestructura de la red en un nivel de riesgo de fallo siempre por debajo del nivel declarado por la entidad como máximo admisible.

Mencionar el término “mantenimiento” requiere una ampliación sobre su definición. Esto es así, pues diferentes interpretaciones dan pie a diferentes alcances sobre las actividades que abarca. La interpretación que se le da en este texto a la palabra mantenimiento, viene dada por los conceptos de Vanier y Alegre.

Según Vanier (Vanier, 2006), dicho término se encuentra asociado a la agregación de varias actividades: inspecciones para monitorizar el estado actual de la red, mantenimiento de tipo preventivo, mantenimiento de tipo correctivo (reparaciones necesarias tras la ocurrencia de fallos), renovación de componentes mayores del sistema y sustitución de elementos por fallos que así lo ameriten (esta última acción es diferente a la sustitución que se realiza por la terminación de la vida útil técnica de la tubería, o por la obsolescencia de la misma).

El uso del término “mantenimiento” no debe verse limitado a su aplicación inmediata sobre los elementos físicos de la red. También debe hacerse un mantenimiento de los inventarios de los componentes del sistema, y de los registros asociados a la conservación del mismo (Alegre, 2010)

6.2 ¿Por qué implementar un plan básico de actuación?

Para las entidades cuyos sistemas de transporte de agua son nuevos o recientes, comenzar a gestionar técnicamente sus redes constituye una prioridad para avanzar en su crecimiento. La planeación, implementación y mejora continua de las acciones de gestión técnica iniciales, resultan fundamentales para asegurar que la misión y visión de la empresa puedan cumplirse.

Existe una motivación creciente hacia el diseño y puesta en marcha de un plan de actuación por parte de las empresas de abastecimiento o saneamiento de agua. Tal actitud viene marcada por una sana presión surgida desde diferentes entes estatales que mediante leyes propenden por un uso adecuado del recurso hídrico, y por un cuidado del medio ambiente al cual se vierten las aguas ya utilizadas. Una manera de demostrar que una empresa de abastecimiento o saneamiento se

encuentra, o quiere seguir la senda del desarrollo sostenible, radica en emprender la implementación de un plan de actuación (en su forma más básica) a nivel de gestión de redes.

También mediante el seguimiento de un plan de actuación se eleva la eficiencia en la operación y la gestión técnico-administrativa de la red, al disminuir el nivel de fugas e intrusiones patógenas en redes presurizadas y las filtraciones de aguas negras al suelo circundante en redes de saneamiento.

Pero en el fondo, el esfuerzo de seguir un plan de actuación viene justificado en mayor medida por la mejora que a nivel global adquiere la empresa en la forma en que invierte sus recursos físicos y humanos, y que se ve plasmada mediante los resultados de diferentes indicadores de gestión. Dicho de otro modo “la implementación de técnicas enmarcadas en un plan de gestión conduce hacia la consecución de una infraestructura municipal sostenible” (Vanier, 2006).y en el mejor de los casos, autosostenible.

Por último, la adopción de un plan de actuación implica el uso de herramientas (tanto teóricas como informáticas) que de otro modo no se hubiera llevado a cabo. Dichas herramientas no sólo intervienen activamente en la gestión del inventario actual sino que además dan una perspectiva clara de las necesidades futuras. Por ello, un plan de actuación sirve para plantear un horizonte sobre el cual se planea las futuras inversiones del sistema.

6.3 Aportes más relevantes del esquema de plan básico de actuación propuesto

Aunque existe un número considerable de propuestas al respecto (Babani, 2007; Grigg, 2003; Christchurch City Council, 2002; etc.), la que aquí se expone difiere en su filosofía última respecto a las anteriores, pues busca no sólo el establecimiento de la secuencia de los procesos, sino además la implementación de una serie de herramientas que redundan en un beneficio global para el sistema, permitiendo su aplicación en sistemas pequeños. Ello se da porque:

- Las herramientas que se proponen son de fácil implementación. No se requiere un alto nivel de formación técnica, ni la disposición de recursos

informáticos diferentes a los existentes en la gran mayoría de empresas de abastecimiento y saneamiento.

- El uso de las herramientas se enmarca en una secuencia de acciones con un fin determinado según la política de la empresa (misión y visión). No constituyen aplicaciones aisladas.
- Las herramientas incluidas en el plan pueden ser utilizadas por empresas de cualquier tamaño, aunque las pequeñas entidades las encontrarán de mayor utilidad. La estructura modular del plan de actuación permite, más adelante, integrarse con mayor facilidad a un plan de gestión patrimonial de infraestructura que abarque los niveles operacional, táctico y estratégico.

El módulo de mejora continua (que se describe en detalle más adelante) abarca la integración de nuevas herramientas:

- Propuesta de estructura de una base de datos de conocimiento experto que para optimizar el proceso de decisiones sobre intervenciones en la red.
- Propuesta de diseño óptimo de una base de datos de un sistema de transporte de agua que integra la información relativa a inventario de la infraestructura, la relacionada con las incidencias sufridas en el sistema, y la de las intervenciones que se han de realizar.
- Consideración de la evaluación de las prioridades de intervención mediante Lógica Difusa, lo cual asegura la inclusión de las preferencias del gestor y su conocimiento sobre el sistema dentro del plan.
- Cuantificación periódica del estado global del sistema mediante una propuesta de indicadores de gestión fundamentales, lo cual permite monitorear el crecimiento del sistema en el tiempo, y también comparar el estado actual del sistema local, con el estado de otros en similares circunstancias.
- Auditoría permanente de la destinación del agua inyectada a la red (en el caso de empresas de abastecimiento de agua), mediante la inclusión en la estructura propuesta, de ejecuciones periódicas de un balance hídrico, ya sea este enfocado a la medición o a la facturación.

De igual forma, en el módulo de mantenimiento, evaluación y predicción (que interactúa continuamente con el de mejora continua), se propone la inclusión de manera permanente de un modelo de deterioro de las tuberías de la red, que permita una ajustada estimación del riesgo de fallo de las mismas.

6.4 Algunas consideraciones económicas indispensables

Aunque el lector encontrará que los temas económicos no se encuentran en el alcance de esta tesis, el autor quiere incidir en que dichos tópicos no son menos importantes que aquellos de carácter técnico. De hecho, son trascendentales y merecen estudios completos sólo en este enfoque.

Vale la pena entonces realizar algunas anotaciones someras que dejan entrever el orden de magnitud de las inversiones que deben realizarse en el ámbito de un plan básico de actuación. De nuevo se recurre a las apreciaciones que sobre el tema ha hecho Instituto para la Investigación en la Construcción, perteneciente al Consejo de Investigaciones de Canadá, NRC (Vanier, 2006). Se puede apreciar que el panorama financiero que condiciona un plan de actuación se encuentra altamente influenciado por la disponibilidad de recursos, y ella a su vez estrechamente ligada con el accionar político y la gestión tarifaria.

De manera general, se acepta que “no menos del 2% del valor actual de los activos del sistema, es decir, del valor de reemplazo actual de toda la red, debe ser invertido anualmente en gastos de mantenimiento” (Vanier, 2006). Anteriormente ya se definieron las actividades englobadas en el término “mantenimiento”, cuando éste se refiere específicamente a elementos físicos del sistema.

“El valor recomendado para tal fin se encuentra entre el 2 y el 4% del valor de los activos” (Vanier, 2006). Esto es válido en aquellos casos en que los elementos de la infraestructura ya se han pagado en periodos administrativos anteriores y ahora compete únicamente lo concerniente a inversiones en mantenimiento de la red.

En el caso particular de los abastecimientos españoles establecer esto último resulta en sí mismo todo un reto. Las administraciones locales frecuentemente encargan estudios técnicos cuya finalidad radica en establecer qué tanto por ciento de cada activo de la red ha sido amortizado a la fecha. Dichos estudios sin embargo

no constituyen garantía de buenas actuaciones: el cambio constante de administraciones condiciona y en algunos casos inhibe la toma de decisiones sobre las inversiones en activos de la red.

Porcentajes de inversión en mantenimiento inferiores a ese umbral mínimo del 2% del valor total de los activos de la red, generarán un eventual estado de abandono, que se manifiesta en un deterioro progresivo, y en consecuencia, en una incursión en mayores costos de reparación, y en el peor de los casos, “una renovación prematura” (Vanier 2006).

Otro problema añadido a la disposición de recursos para inversión en intervenciones de mantenimiento, radica en asumir el precio político del agua, pues quien fije una tarifa que realmente asegure la recuperación de costos se verá permanentemente señalado por la comunidad como aquel que aumentó la tarifa en detrimento de la inversión social.

Esta recuperación de costos es, paradójicamente, el deseo explícito de la Directiva Marco del Agua en Europa, siempre en la senda del Desarrollo Sostenible. La creación de dicha directiva es en sí misma una prueba fehaciente de la honda problemática en esta cuestión. Ese mismo precio político del agua es, a juicio de expertos en el tema “una de las causas fundamentales del deterioro progresivo de los sistemas de abastecimiento españoles” (Cabrera y otros, 1997). Se vislumbra pues, a nivel español, que la solución al tema tarifario pasa en gran medida por la educación y la toma de conciencia pública (en el ciudadano común, y en el político) sobre el valor del recurso hídrico, y paralelamente -aunque no es lo mismo- sobre el costo real del agua.

La inversión en intervención (sustitución o renovación) que se estima tendrá que hacerse sobre una tubería, corresponde aproximadamente al acumulado del 2% anual del valor de reemplazo del elemento en cada año, durante todos los años de su vida útil. El concepto de sostenibilidad en renovación o sustitución, según Vanier (Vanier, 2006), radica en asegurar la disponibilidad de esta cuantía - que se ejecutará al final del tiempo de vida estimado del elemento - mediante la toma de acciones como ahorro anual destinado para ese futuro fin, o bien mediante la autorización y programación del cobro de impuestos que cubran el monto de la intervención al final de la vida útil.

En resumen, el aseguramiento de la sostenibilidad económica de la infraestructura se logra entonces mediante la disponibilidad anual de entre el 2% y el 4% del valor de reemplazo actual de la red, para destinarlo a intervenciones que aseguren su buen estado, y la sustitución de elementos de la misma cuando ello sea necesario.

6.4.1.1.1 Ideas básicas sobre Momento Óptimo de renovación

Para comprender con suficiencia el origen de las curvas que definen el momento óptimo de renovación es necesario abordar brevemente los procesos precedentes de deterioro y evaluación de la condición de una tubería. En general, el costo esperado de fallo para una tubería de edad t , se define (Ec. 130) como:

$$E[C^F(t)] = C^F m_k^t \quad \text{Ec. 130}$$

Donde el término C^F hace referencia al costo de fallo, e incluye los gastos de reparación, los costos por daños directos e indirectos y los costos sociales (Kleiner, 2001); y m_k^t es el valor de la función de masa de probabilidad $M(t)$ evaluada en el k -ésimo estado de condición (el último estado de todos) en el instante t .

Los costos de inspección y evaluación de la condición, C^I , hacen referencia a los gastos incurridos para hacer un diagnóstico del estado de la estructura, y varían en función de las características estructurales de cada elemento. En el Capítulo 3 se abordan las técnicas de inspección más comunes y los diferentes protocolos existentes para transformar sus resultados en evaluaciones de la condición estructural y de servicio. Estos costos son de fácil conocimiento pues no dependen de la condición actual de la tubería, y dado que no dependen del tiempo, no constituyen costos esperados.

A diferencia de los costos de inspección y evaluación, los costos esperados de intervenciones planeadas para renovación, C^P , dependen de la técnica utilizada, y ella a su vez, de la condición de la tubería al momento de su ejecución. Estos costos, considerando i estados de condición (desde 1 hasta K estados) y una tasa de actualización R , para una tubería de edad t , se pueden modelar (Kleiner, 2001) de la siguiente manera (Ec. 131):

$$E[C^P(t)] = [C_1^R, C_2^R, C_3^R, C_4^R, \dots, C_{k-1}^R] \cdot [m_1^t, m_2^t, m_3^t, m_4^t, \dots, m_{k-1}^t]^T \quad \text{Ec. 131}$$

Donde C_i^P es el costo de la intervención específicamente planeada para la renovación de la conducción en el estado i . La expresión que relaciona los tres costos descritos (C^F , C^I y C^P) adopta la forma de una curva típica de optimización económica entre dos variables inversamente proporcionales. En este caso, se encuentra descrita por (Ec. 132):

$$C^{\text{total}}(t) = (E[C^F(t_0 + t)] + C^I + E[C^P(t_0 + t)]) \times e^{-R \cdot t} \quad \text{Ec. 132}$$

Dicha expresión describe el comportamiento del costo total por fallos, inspecciones e intervenciones para una tubería en un instante dado de su vida útil (Figura 108), y brinda la posibilidad de tomar una decisión sobre si rehabilitar o programar una próxima inspección para evaluar la condición de la tubería.

Merece una especial atención el trato dado a los costos ambientales y sociales en el esquema general de la programación de inspecciones o intervenciones de renovación. Ellos, aunque resultan relevantes en su magnitud, por su propia naturaleza no son abordados explícitamente en la gran mayoría de los enfoques que cuantifican los costes totales esperados de reemplazo de la tubería.

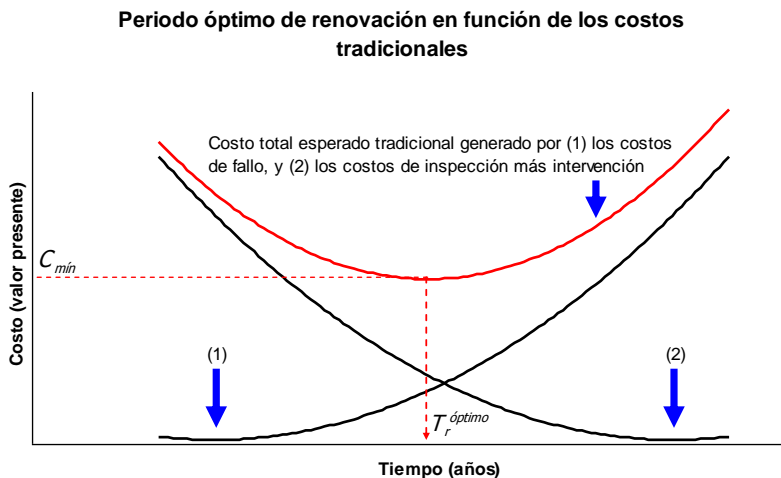


Figura 108. Establecimiento del periodo óptimo de renovación en función de los costos tradicionales esperados

Cabrera (Cabrera y otros, 2007), basado en la estructura de costos de Shamir (Shamir y otros, 1979), profundiza en este aspecto al proponer la inclusión de nuevos costos variables del agua:

- Costos del líquido ya potabilizado.
- Costos asociados a la energía perdida, tanto por bombeo como por pérdidas.
- Costos sociales, asociados a impactos ambientales debidos a la reparaciones y penalizaciones por el no alcance de los estándares mínimos de servicio.
- Costos de oportunidad, entendiéndose estos como los ahorros que se desprenden de aprovechar los trabajos que llevan a cabo otras empresas de servicios públicos para ejecutar la renovación de la tubería.

Los anteriores aportes se suman a los costos típicamente evaluados (costos de renovación y de mantenimiento). Las nuevas inclusiones implican un periodo de renovación más corto. El periodo óptimo de renovación, según la propuesta de Cabrera (Cabrera y otros, 2007) es (Ec. 133):

$$T_r^{\text{óptimo}} = T_0 + \frac{1}{A} \ln \left[\frac{C_I \cdot \ln[1 + R]}{C_m \cdot N(t_0)} \right] \quad \text{Ec. 133}$$

Donde T_0 es el año de referencia, A representa el crecimiento temporal de los fallos, C_I es la suma de los costos de renovación (tubería e instalación de la misma), más los costos sociales debidos a las molestias causadas por los trabajos, C_m es el costo de mantenimiento anual debido al envejecimiento, R es la tasa de actualización y $N(t_0)$ es el número de fallos por unidad de longitud en el año de referencia.

Dicha expresión, a diferencia de la planteada por Shamir y Howard (Shamir y otros, 1979), comprende, no sólo los costos asociados a la ocurrencia de fugas, sino además los efectos de la técnica de instalación utilizada.

El autor, mediante un caso de estudio muestra los efectos de considerar sólo los costos tradicionales de renovación (C_r), reparación y mantenimiento (C_{rm}), en

contraposición con la consideración de los costos adicionales ya mencionados (C_T) en el establecimiento del periodo de renovación óptimo.

El ejemplo considera el caso de una tubería de polietileno de 1 metro de longitud y gran diámetro, y con una tasa de actualización conocida. Para ella se presentan dos posibilidades de renovación: con y sin zanja. La Figura 109 ilustra la diferencia en el costo total, y en consecuencia en el periodo óptimo de renovación.

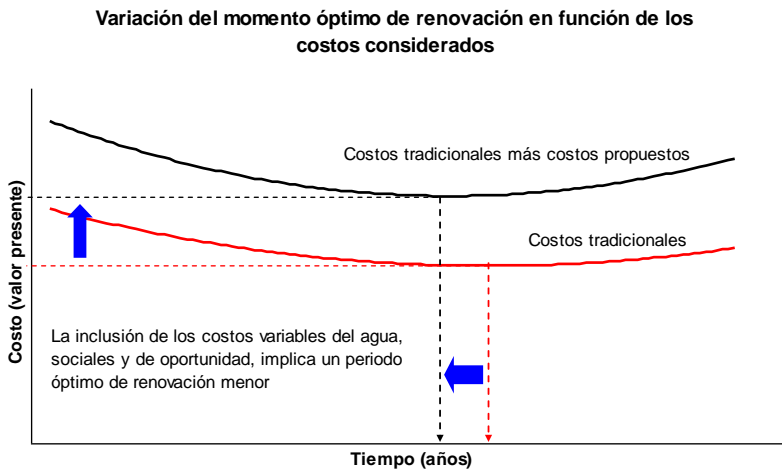


Figura 109. Efecto de la consideración de costos adicionales de renovación y mantenimiento sobre el periodo óptimo de renovación (Cabrera y otros, 2007)

Dados los costos de totales incurridos en una y otra alternativa, el periodo óptimo de renovación, en el caso de considerar no sólo los costos tradicionales sino además aquellos propuestos en el enfoque, se adelanta, lo cual resulta económicamente perjudicial para el abastecimiento en una primera instancia, aunque a largo plazo puede resultar beneficioso pues se está cuidando mejor la infraestructura, evitando daños imprevistos y sus respectivos sobrecostos.

Dentro del plan básico de actuación resulta fundamental contar con un esquema como el anterior. Estas curvas, siempre a título orientativo, le permiten al gestor saber hasta cuando es posible esperar -minimizando así el costo de inspección e intervención- antes de intervenir, sin asumir un riesgo de fallo por encima del admisible. Este último concepto se analiza a continuación.

6.4.1.1.2 Riesgo de Fallo de una tubería

El Riesgo de Fallo se define como la combinación producida entre la probabilidad de fallo de un elemento y las consecuencias que dicho fallo pueden acarrear. Este último término varía menos en el tiempo en comparación con el primero. La probabilidad de fallo es pues, el término que de manera principal condiciona la variabilidad del riesgo de fallo de una tubería a lo largo de su vida útil.

Una forma de cuantificación de la probabilidad de fallo es la que presenta Kleiner (Kleiner, 2006), mediante procesos markovianos. Este enfoque discretiza el proceso continuo de deterioro mediante estados de condición. La propuesta asume además que la probabilidad de fallo es igual a la probabilidad de que una tubería se encuentre en el último de los estados de deterioro definidos.

La propuesta se complementa con el establecimiento del grado de severidad de las consecuencias del fallo, mediante la inclusión de 9 calificaciones de intensidad. Las nueve calificaciones son: extremadamente bajo, muy bajo, bajo, moderadamente bajo, medio, moderadamente severo, severo, muy severo y extremadamente severo. El autor, sin embargo, no propone una manera de cuantificar los valores de pertenencia de una conducción a cada uno de estos estados difusos de consecuencia del fallo.

Desde lo dicho se aprecia que las posibles consecuencias que acarrea el fallo de una tubería definen directamente el tipo de actuación y la cuantía de los recursos a invertir para prevenir su ocurrencia. Los costos directos asociados a la falla comprenden los costos de reparación, los costos del agua ya tratada que se pierde, los costos generados por daño a propiedades y los costos de los procesos legales desprendidos del evento (demandas). Los costos indirectos pueden ser innumerables, y abarcan desde la pérdida de la producción en determinada empresa afectada por el corte del servicio, hasta costos generados por incendios que no han podido ser apagados por la falta de agua en la red.

Existen otro tipo de costos, igualmente importantes: los costos sociales. Ellos comprenden costos de afectación en la calidad del agua debido a intrusión de contaminantes, costos no cuantificables como disminución de la calidad de vida, o costos debidos al corte del servicio para abonados muy importantes, como hospitales y colegios.

Parece claro entonces, que el paso fundamental, previo a evaluar las consecuencias del fallo de una tubería (cualquiera sea la metodología que se emplee), consiste en plantearse una serie de preguntas enfocadas a evaluar las afectaciones potenciales que pueden generarse. A continuación se listan las cuestiones que a juicio del autor resultan imprescindibles.

En el caso de tuberías de abastecimiento:

- Si ocurre un fallo en la tubería, y dada la máxima presión a la que dicho elemento puede trabajar bajo condiciones habituales, ¿cuál será el caudal de fuga generado?
- En condiciones normales de funcionamiento de la empresa, y dada la ubicación e importancia de la tubería, ¿cuánto tiempo transcurrirá hasta que se asigne un grupo de trabajadores encargados de reparar el fallo?, ¿cuánto tardará la cuadrilla de trabajadores en reparar la fuga? (las respuestas a estas dos preguntas, y en combinación con el valor estimado de caudal fugado, permiten estimar en volumen que se perderá)
- ¿A cuánto asciende el precio del agua fugada (que debería ser entregada a los abonados), incluyendo, no sólo los costos del agua potabilizada, sino además los costos del bombeo necesario para llevar el agua hasta el sitio de la rotura?
- ¿Cuál será la vía de escape de ese volumen de agua hasta la superficie, y una vez en ella, hasta su ingreso a la red de saneamiento?
- En su transcurrir por la superficie, y hasta su ingreso a la red de saneamiento, ¿a qué abonados (comercios, hospitales, oficinas, residencias, entre otros) afectará?
- ¿En qué grado afectará a cada uno de estos abonados?

- ¿Qué estructuras municipales (pavimentos, aceras, entre otras) se verán afectadas?
- ¿En qué grado se verá afectada cada una de estas estructuras?
- El corte en el servicio, que se producirá como consecuencia de la reparación de la fuga, ¿a qué tipo de abonados perjudicará, dejándolos temporalmente sin servicio?
- Para cada tipo de abonado perjudicado (abonados que no necesariamente se encuentran en o cerca al lugar de la rotura), ¿cuál es el grado de afectación que produce un corte en el servicio?
- Para cada tipo de abonado perjudicado, cuál es el tiempo medio transcurrido desde que se interrumpe el servicio hasta que se reestablece?
- ¿Cuántos abonados perjudicados, por tipo, existen?
- ¿A cuántos abonados (por tipo de abonado) perjudicará la rotura de la tubería, ya no por el corte del servicio, pero sí por una posible disminución en la presión de servicio?, ¿cuál es la cuantía de dicha disminución en cada caso?

En el caso de tuberías de saneamiento:

- Si ocurre un fallo en la conducción o canal, y encontrándose ella en estado de carga, ¿cuál será el caudal asociado al fallo, que sale incontroladamente de la red?

- Conocido el caudal asociado al fallo, ¿resulta necesario reparar el daño, o el sistema puede seguir funcionando sin intervención alguna? (en sistemas de saneamiento esto último no es poco común).
- En condiciones normales de funcionamiento de la empresa, una vez decididas la necesidad y tipo de reparación, y dada la ubicación de la conducción o canal, ¿cuánto tardará la cuadrilla de trabajadores en reparar el fallo?
- ¿A cuántos abonados (por tipo de abonado) perjudicará la reparación de la conducción, en términos de interrupción del tráfico y del acceso a lugares de trabajo y residencia? (esto último también es aplicable a redes de abastecimiento).
- ¿Existe alguna vía por la cual el volumen perdido y contaminante pueda alcanzar la superficie?
- Según el volumen perdido, y el destino del mismo, ¿cuál es el nivel de afectación ambiental por contaminación que se alcanzará como consecuencia del vertido?
- ¿Cuál es la probabilidad de que ocurra una infiltración de estas aguas residuales en la red de abastecimiento?
- En su transcurrir por la superficie (en caso de hacerlo), y hasta su ingreso de nuevo a la red de saneamiento, ¿a qué abonados (comercios, hospitales, oficinas, residencias, entre otros) afectará?, ¿en qué grado?
- ¿Qué estructuras municipales (pavimentos, aceras, entre otras) se verán afectadas?, ¿en qué grado?

6.5 Módulos del plan básico de actuación propuesto

La estructura del plan de actuación que se propone en la presente tesis, se encuentra conformada por tres módulos que se complementan: el módulo de planeación, el módulo de mantenimiento, evaluación y predicción, y el módulo de mejora continua.

El módulo de planeación se divide a su vez en tres fases de gestión básicas, mientras que el módulo de mantenimiento, evaluación y predicción se divide en dos fases de gestión avanzadas. Por último, el módulo de mejora continua se divide en dos fases de gestión proactivas. La estructura general de un plan de actuación se conserva tanto para empresas de abastecimiento como para entidades de saneamiento, aunque existen variaciones en las actividades específicas.

Las fases básicas del módulo de planeación determinan tanto la cantidad de activos físicos del sistema que se incluyen en el plan, como los requerimientos mínimos que el sistema debe asegurar para la prestación del servicio. En el caso de abastecimientos, ellas son:

- Gestión de inventarios
- Gestión de la demanda
- Gestión de estándares de servicio

Las fases avanzadas del módulo de planeación establecen las intervenciones necesarias en la red para mantenerla en condiciones estructurales y operativas óptimas. Estas fases son:

- Gestión del mantenimiento preventivo y correctivo
- Gestión de la evaluación de la condición actual
- Gestión de la evaluación de la condición futura

Las fases proactivas del módulo de mejora continua permiten planear las intervenciones mayores en la red, y a la vez retroalimentar a los gestores

involucrados en la planificación e implementación del plan sobre el desempeño del sistema en el tiempo, siendo éstas fases:

- Gestión de la renovación y sustitución
- Gestión mediante indicadores y balances
- Gestión financiera

En la Figura 110 se muestra un esquema gráfico que contiene los diferentes módulos del plan básico de actuación para una empresa de abastecimiento de agua, sus fases e interacciones.

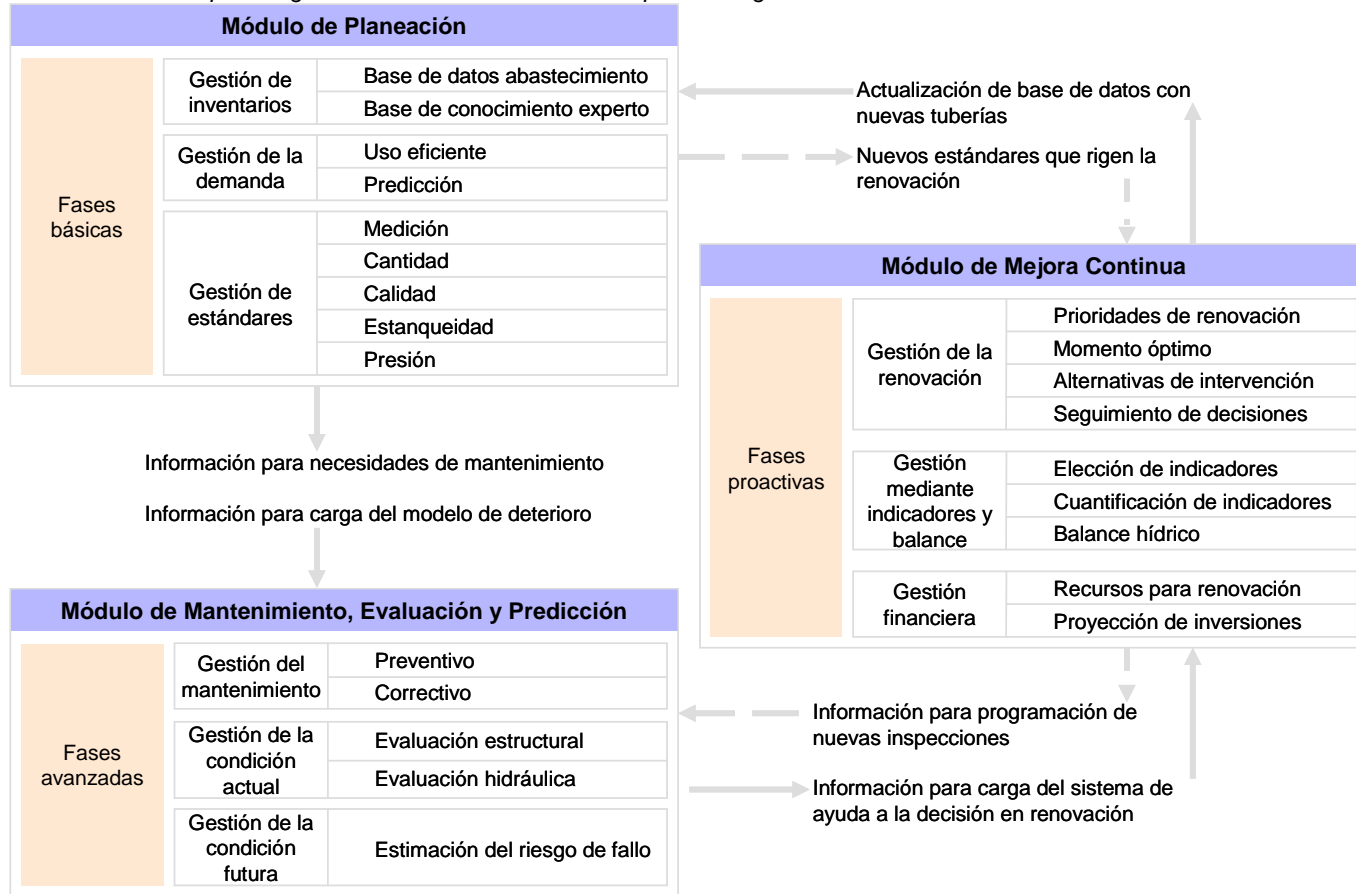


Figura 110. Esquema de plan básico de actuación para una empresa de abastecimiento

Para empresas de saneamiento, dentro de las fases básicas del módulo de planeación, y a diferencia del caso de los abastecimientos, se contempla ya no la gestión de la demanda, sino la referida a las aportaciones.

Las fases avanzadas en redes de saneamiento incluyen, dentro de la gestión de la condición actual, la evaluación de las condiciones operativas. Dichas condiciones pueden verse afectadas por intrusiones que afectan el flujo, tales como residuos sólidos, raíces, etc. En redes de abastecimiento, aunque también se presentan estos fenómenos que interfieren en la operación, su evaluación es bastante compleja debido a los pequeños diámetros que impiden una inspección interior sin interrumpir el servicio. En la actualidad, sin embargo, existen metodologías, principalmente enfocadas a la inspección de oleoductos y gasoductos, que se están adaptando de manera experimental para su uso en acueductos. Por ahora, su costo y dificultad de empleo limitan su extensión a este campo.

La evaluación estructural de alcantarillados y sistemas de evacuación de aguas pluviales también resulta más fácil y completa que la hecha en acueductos, pues dicha práctica puede extenderse, en el primer caso, no sólo a las manifestaciones externas de los defectos que conducen al fallo estructural, sino a aquellas evidencias internas que influyen en él.

Las fases proactivas del módulo de planeación, en el mismo caso de redes de saneamiento, y en oposición con el caso de los abastecimientos, no incluyen, en general, una que se enfoque a la ejecución del balance hídrico, aunque dicho balance sí puede realizarse para efectos puntuales, como lo es, en el caso de una gran avenida, determinar las zonas de inundación de la red.

En la Figura 111 se detalla el plan de actuación propuesto en la presente tesis para el caso de redes de saneamiento. Las diferencias con su símil de abastecimientos pueden encontrarse en el módulo de planeación y en el módulo de mantenimiento, evaluación y predicción. Las similitudes entre planes hacen que las empresas que lleven la gestión de ambos sistemas encuentren una facilidad añadida en la implementación de ambos.

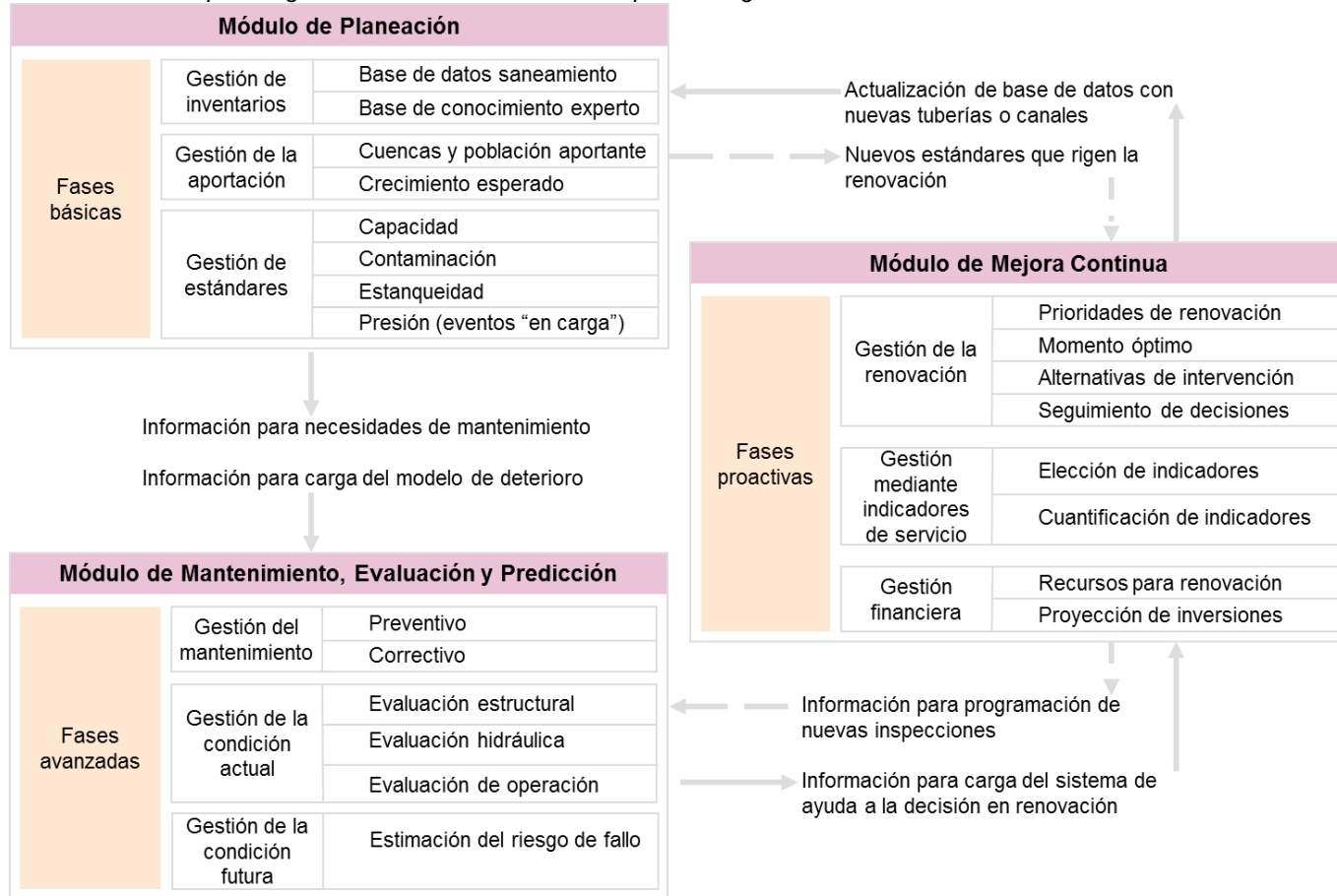


Figura 111. Esquema de plan básico de actuación para una empresa de saneamiento

A continuación se describen las actividades integrantes de cada módulo.

6.5.1 Módulo de planeación

Comprende la definición de actividades fundamentales para el funcionamiento mínimo del sistema. A continuación se detalla la naturaleza de cada fase integrante de este módulo.

6.5.1.1 Gestión de estándares

Entendiéndose el concepto de “estándar” como aquel valor o actuación que sirve como modelo, patrón o referencia para alcanzar o seguir, se puede aceptar que los principales estándares de servicio al interior de un sistema de gestión técnica de una red de transporte de agua son:

6.5.1.1.1 Estándar de medición

Se menciona este en primera instancia pues la medición es, a día de hoy, la actividad que más se debe impulsar en la búsqueda de la eficiencia en los procesos de gestión de redes. En los sistemas de abastecimiento y saneamiento pequeños, adquirir desde el principio la disciplina de la medición puede facilitar su crecimiento, al conocer desde el principio, y con certeza, la evolución en cada campo de la gestión técnica. Todo volumen (inyectado, y consumido ya sea facturado o no) debe ser medido.

Otras variables como la presión en horas de máxima y mínima demanda y la cantidad de cloro presente en diferentes puntos de la red también deben ser medidas. Lo que se mide es susceptible de ser gestionado. De aquello que no se mide nada se conoce, y en consecuencia poco campo de maniobra resta para una mejora en su administración. La medición de una variable en el tiempo permite conocer la evolución favorable o no de ella, y tomar medidas en consecuencia.

6.5.1.1.2 Estándar de cantidad

En segunda línea de trabajo, y en el contexto de las nuevas y crecientes políticas de satisfacción total de las aspiraciones del cliente (en este caso el abonado), se debe asegurar el suministro de agua no interrumpido y directo (la

interrupción del suministro, voluntaria o no, genera fenómenos transitorios indeseables y afecta a mediano y largo plazo la condición estructural). En el aspecto que se refiere al suministro directo, la utilización de depósitos en el predio del abonado es considerada energéticamente ineficiente, e inapropiada desde el punto de vista de la cantidad de agua suministrada, pues el llenado de estos depósitos genera en ocasiones interrupciones en el servicio prestado a la propiedad a la que abastece.

En general, a día de hoy el crecimiento demográfico urbano causado por las grandes migraciones del hombre a la ciudad desde las zonas rurales, dictaminan una igualmente creciente necesidad de agua. Abastecer a grandes ciudades constituye todo un reto, en el cual la gestión de la demanda juega pues un papel preponderante.

6.5.1.1.3 *Estándar de calidad*

Se refiere, en sistemas de abastecimiento de agua, al suministro de agua en condiciones de ser consumida por las personas (agua potable) mediante el control de la concentración de cloro en diferentes puntos de la red. En sistemas de saneamiento la calidad se encuentra asociada al tratamiento de las aguas servidas para su debida reincorporación al medio natural.

En acueductos, los indicadores de calidad más frecuentes se miden mediante dos tipos de resultados: numéricos, o cualitativos. Estos últimos dictaminan, con cierta rapidez y además mediante análisis más baratos, la presencia o no de un organismo patógeno, pero no dan idea de qué cantidad de la bacteria se encuentra presente. Entre los análisis cuantitativos más comunes se encuentran aquellos que buscan la presencia de la bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*), y la presencia de la bacteria *Enterococcus*.

6.5.1.1.4 *Estándar de capacidad*

Los estándares de capacidad suelen verse definidos por la respuesta que la red de saneamiento puede dar ante determinados eventos (lluvias con un periodo de retorno dado) sin generar inundaciones, y que viene regida directamente por los diámetros de diseño.

En el plan básico de actuación la definición de las zonas de frecuente inundación, que se logra mediante el cruce de las experiencias reportadas en la

base de datos de la empresa, con los resultados del modelo hidráulico de la red, resulta altamente relevante para una adecuada prioridad de intervención (ya sea ésta enfocada a la sustitución de tuberías por otras de diámetros mayores, o bien enfocada a rehabilitaciones que aseguren la disponibilidad de la totalidad de la sección transversal de los conductos).

6.5.1.1.5 *Estándar de estanqueidad*

Este parámetro se encuentra directamente ligado al concepto de eficiencia técnica, pues se refiere a la disminución del nivel de fugas (también conocido como nivel de pérdidas reales) en la red. Se mide mediante el porcentaje de agua entregada al usuario (sea esta facturada o no) respecto al volumen total inyectado al sistema.

El anterior enfoque es extrapolable a redes de saneamiento, pues en estos sistemas también se debe asegurar que no se presenten pérdidas a través de las tuberías, colectores, uniones y conducciones desde los usuarios a la red principal. Aunque dichas pérdidas suelen ser mucho menores a las presentadas en los sistemas de abastecimiento, resultan importantes desde el punto de vista ambiental, pues pueden ser las causantes de afectaciones ambientales relevantes e intrusiones patógenas en el acueducto.

En los sistemas de saneamiento más avanzados, el estándar de estanqueidad debe extenderse además a la consideración de la debida operación de la red en condiciones de vacío total, el cual se genera para crear un vaciado del sistema mediante una absorción de todo aquello que se encuentra en su interior.

6.5.1.1.6 *Estándar de contaminación*

La contaminación de espacios donde habita el hombre puede generarse por un erróneo diseño de la red, que se traduzca en inundaciones de aguas pluviales mezcladas con aguas negras, por una mala gestión de las trampas sépticas, o por el vertido al medio natural de aguas servidas sin el debido tratamiento.

Los estándares de contaminación usualmente se refieren a indicadores relativos a la cantidad de agua que puede ser desbordada a través de un imbornal, o bien a través de una cámara de inspección, y al tiempo transcurrido hasta que dicho volumen es de nuevo introducido en su totalidad al sistema de saneamiento.

6.5.1.1.7 Estándar de presión

Está relacionado con varios valores de presión: un valor máximo que debe fijarse para mantener el nivel de fugas de la red por debajo de un valor con anterioridad establecido como el más alto aceptable, y para preservar la integridad estructural de todos los elementos del sistema; un valor mínimo en el punto (o zona) más desfavorable de la red asegurando un servicio óptimo de todos los abonados; y un valor medio que refleja las condiciones normales de servicio de la red a nivel general.

En el caso de los sistemas de saneamiento, en los eventos en que la red entra en carga, aunque el valor de presión no se regula directamente, si se suele considerar los efectos de esta situación temporal. Para ello se instalan depósitos enterrados, dotados con compuertas accionadas automática o mecánicamente, y que habilitan su llenado y posterior vaciado (el costo de este tipo de dispositivos constituye en ciertos casos una limitante importante).

Otras soluciones que permiten almacenar el volumen que la red no es capaz de transportar instantáneamente, y a la vez laminar el caudal pico del evento, consisten en la derivación hacia algunos puntos de la red, de dicho volumen mediante aliviaderos en los cuales la altura de su cresta determina el caudal para el cual el sistema de derivación entra en funcionamiento. También para redes de saneamiento que reciben aguas desde cuencas alejadas, se utiliza una derivación en origen, mediante un sistema de alerta temprana que ejecuta el cierre del paso a la red principal, y a la vez la apertura de una red especial para ese evento específico.

Existe también la posibilidad de configurar sitios “inundables”, denominados “balsas de Laminación”, es decir, aquellos lugares (parques, depresiones, zonas baldías o franjas paralelas a vías) que ante tales situaciones están adaptados para recibir el exceso de agua que el sistema no es capaz de transportar y disponer finalmente, manteniéndolo en superficie, y asegurando su reingreso a la red de saneamiento con un retardo mínimo, mediante un aliviadero especialmente adecuado.

En el plan de actuación, la consideración de este tipo de soluciones resulta fundamental a la hora de decidir sobre inversiones en renovación o sustitución total

de largos tramos de tuberías, que pueden ser evitadas mediante la adopción de medidas alternativas como las citadas.

6.5.1.2 Gestión de inventarios: base de datos

En el diseño de las bases de datos, y en la inserción del inventario de activos físicos en dichos medios, o en la actualización de las mismas, si ya se tienen, se debe definir el alcance del inventario (es decir, cuales elementos incluir y cuales no). Una única base de datos de inventario de patrimonio en infraestructura debe considerar un diseño que incluya los siguientes campos: ID de la tubería, variables no dependientes del tiempo (localización geográfica, longitud, diámetro, material, año de instalación, etc.), variables dinámicas (temperatura media, humedad del suelo, presión media y máxima del sector, etc.), historial de fallos (fecha del aviso, fecha de la reparación, tipo de fallo y tipo de reparación), e inspecciones programadas si se hacen (fechas de ejecución, resultado de dichas inspecciones y acción adoptada).

Se cita a continuación un conjunto de condiciones que debe caracterizar a la información de estas bases de datos.

6.5.1.2.1 Uniformidad

El mayor problema relacionado con la gestión de la información reside en la uniformidad sobre la forma en que se toman los datos. Esto se evidencia cuando se comparan resultados históricos referidos a eventos de fallos en conducciones, y donde claramente la habilidad del operario para describir el tipo y causa del fallo, así como otros datos complementarios del suceso, es mayor en unos casos que en otros, y en consecuencia la calidad de la información varía, y con ella sus posibilidades de explotación.

6.5.1.2.2 Agregación

Se refiere a la disponibilidad de un mismo tipo de dato (esto es, un mismo campo) en un único sitio. Lo opuesto a la agregación, la disgregación de la información en diferentes sitios físicos, suele ser frecuente y constituye un inconveniente - aunque superable - importante. Dicha disgregación se refiere a la existencia de diferentes archivos con el mismo tipo de información en una misma base de datos, diferentes bases de datos equivalentes en un mismo departamento,

y en un último nivel, diferentes empresas que han operado la misma red y que no comparten la información.

6.5.1.2.3 Actualización

En la gestión del patrimonio en infraestructura, la actualización de los datos juega también un papel relevante. Las intervenciones que se llevan a cabo en la red deben ser debidamente registradas, y en consecuencia la base de datos tiene que actualizarse continuamente. De lo contrario se estará gestionando en el papel, no en la realidad. De igual forma, las ampliaciones del sistema, que ocurren en la medida en que crece la población atendida, deben ser adicionadas tan pronto como ellas ocurran. De no ser así, las necesidades de renovación o sustitución serán fijadas en función de requerimientos menores a los que realmente existen.

6.5.1.2.4 Coherencia

Gran parte del éxito en la explotación de una base de datos radica en el nivel de coherencia de sus datos. El contenido de una base de datos, por sí sólo, no da una idea de su coherencia. Es el gestor del sistema o el personal técnico quien puede advertir una anomalía en los registros. Además, existe información adicional que puede dar cuenta de posibles datos erróneos (por ejemplo, el encontrar tuberías de determinado material con una fecha de instalación anterior a la fecha de puesta en mercado de dicho material, automáticamente identifica un error y en consecuencia sugiere la eliminación de dicho registro, o por los menos el contraste por otros medios de tal información).

Es la coherencia, como característica deseable en una base de datos, la que induce a una actividad imprescindible como paso primero en cualquier explotación de registros: la limpieza previa de la base de datos. Ella se refiere al estudio detallado de su contenido, en la búsqueda de posibles anomalías. La limpieza también implica la búsqueda de la practicidad, y ello se refiere a la sustracción temporal de aquellos registros que se consideran, para el caso particular tratado, innecesarios. Esto último, puede sin embargo conducir al fenómeno indeseable (pues genera disgregación) de la duplicidad de registros.

Una buena limpieza de la base de datos, que asegure coherencia en su contenido, debe considerar:

- Definición de los objetivos de la limpieza

Se debe conocer la meta (una o varias) que se busca con la limpieza. Por ejemplo, la eliminación de registros técnicamente erróneos desde la experiencia del gestor y según la variable asociada (el más frecuente, tal vez, el de registros con fecha de instalación incoherente), la eliminación de registros duplicados, la eliminación de registros con información irrelevante para el objeto mismo de la base de datos, la eliminación de registros provenientes de fuentes dudosas (este es el caso de las inspecciones a la red hechas sin seguir un determinado protocolo), eliminación de registros con entradas desconocidas o del tipo “error”, y que en consecuencia no podrán ser aprovechadas bajo ninguna circunstancia, entre otros.

- Establecimiento de los parámetros que regirán la limpieza

Para cada campo de la base de datos, y asociado a una variable técnica, se debe fijar un valor límite aceptado, y desde éste, comenzar el proceso de limpieza como tal. Un ejemplo de dicho establecimiento lo constituye la realización de un estudio histórico en el cual se establezca, para cada tipo de material que conforma la red, el año en que se comenzó a comercializar su materia prima en el sector geográfico donde se encuentra emplazado el sistema, y en consecuencia se pudo dar la elaboración de tuberías de estas características. Desde aquí se puede conocer el año de instalación más antiguo aceptable para cada material.

- Determinación de la secuencia lógica de las diferentes etapas de la limpieza

La limpieza debe enfocarse, en primera instancia en la eliminación de datos referidos a variables cuyos valores límites sean, sin género de duda, perfectamente conocidos, y avanzar en dicha limpieza paso a paso incluyendo variables con valores límite cada vez más discutibles. En función de aquellas variables que servirán para primeras fases de la limpieza se puede llegar a admitir un mayor grado de flexibilidad en la fijación de valores límite para posterior fases de este proceso. El objetivo de hacer la limpieza con una secuencia lógica radica en saber en qué momento detener el proceso y considerar la limpieza como hecha.

- Elaboración de los estadísticos que describen la limpieza realizada

Es importante que después de hecha la limpieza de la base de datos, se genere un informe con los porcentajes eliminados, tanto a nivel parcial (para cada variable analizada) como en el total de los registros. Ello resulta crucial a la hora de respaldar, y en algunos casos, desvirtuar los resultados desprendidos de posteriores estudios realizados con la base de datos depurada. En algunos casos (sobre todo, aquellos enfocados a análisis estadísticos) dichos estudios no llegan ni siquiera a realizarse debido al reducido tamaño de la muestra poblacional susceptible de ser incluida en el estudio.

- Trazabilidad de lo eliminado para su posterior recuperación

No es infrecuente la pérdida irreparable de información después de una limpieza de la base de datos. Parece obvio que se debe guardar una copia de la base de datos original (ello con el peligro ya mencionado de incurrir en la práctica indeseable de la duplicidad) para posteriores usos. Para evitar entrar en estado donde no se tiene certeza sobre el alcance de la información con la que se trabaja, se debe conocer la secuencia de los filtros aplicados o de las tablas dinámicas hechas (en el caso de hojas de cálculo como Excel,) o de las consultas diseñadas y ejecutadas sobre tablas (en el caso de programas de manejo de bases de datos, como Access). La programación informática también suele ser una herramienta útil para realizar depuraciones, y su código fuente la clave de lo hecho.

A continuación se muestra un ejemplo real de limpieza de una base de datos, que contiene registros relativos a las tuberías de una red de abastecimiento de una ciudad española. Dicho ejemplo incluye los principales aspectos de las fases descritas en los párrafos anteriores, a saber: (1) objetivo, (2) secuencia de las diferentes etapas de limpieza y parámetros utilizados en cada una de ellas, y (3) datos estadísticos sobre eliminación de información en cada etapa.

(1) Objetivo: “obtener una base de datos idónea para estudiar la frecuencia de fallos debidos al deterioro en tuberías de fundición dúctil (FD), fundición gris (FG), polietileno (PE) y fibrocemento (UR)”. Lo anterior define qué etapas de limpieza deben ser consideradas, y dentro de ellas, los filtros a utilizar para cada material.

(2) Parámetros y secuencia lógica para las diferentes etapas de limpieza: ambos aspectos quedan consignados en la Tabla 113.

Tabla 113. Secuencia de limpieza para una base de datos de una empresa de abastecimiento

Parámetros y secuencia lógica de limpieza	
Etapa de limpieza	Campo: [parámetro de filtro para el campo]
L1: Eliminación de registros con fecha de instalación no creíble	FechaInstalación: [< 1971 (FD), < 1921 (FG), < 1991 (PE), < 1956 (UR)]
L2: Eliminación de registros con incoherencias entre sus fechas de instalación y reparación	FechaInstalación: [> FechaReparación, para cualquier material]
L3: Eliminación de registros con causa de rotura no natural	OrigenRotura: [<>"Natural", para cualquier material]

(3) Estadísticos sobre la limpieza realizada: la Tabla 114 muestra los porcentajes de información descartada en la primera etapa de limpieza. En colores diferentes se resaltan los porcentajes de registros descartados para cada material a partir de la implementación del filtro escogido para la etapa L1.

Tabla 114. Porcentaje de registros descartados por material y época de instalación tras la primera etapa de limpieza

Porcentaje de tuberías instaladas en el rango de años					
Rango / Material	FD	FG	PE	UR	% por rango
<1901	2.8	0.9	0.2	10.5	14.4
1901-1905	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1906-1910	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1911-1915	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1916-1920	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1921-1925	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1926-1930	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1931-1935	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1936-1940	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1941-1945	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1946-1950	0.0	0.1	0.0	0.1	0.3
1951-1955	0.1	0.2	0.0	0.3	0.6
1956-1960	0.1	0.4	0.0	1.6	2.2
1961-1965	0.1	0.3	0.0	3.1	3.5
1966-1970	0.5	0.3	0.0	5.5	6.3
1971-1975	1.9	0.2	0.2	4.0	6.3

1976-1980	3.5	0.0	0.2	2.8	6.6
1981-1985	4.9	0.0	0.1	0.6	5.6
1986-1990	7.6	0.1	0.1	0.4	8.2
1991-1995	12.8	0.0	0.2	0.5	13.6
1996-2000	15.1	0.0	0.1	0.1	15.3
2001-2005	16.6	0.0	0.3	0.2	17.1
>2006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	66.10	2.65	1.45	29.80	100.00
% descartado	3.7	0.9	0.8	10.9	16.3

La Figura 112 incluye tanto la cantidad de datos que “sobreviven” a cada una de las tres etapas limpieza (L1, L2 y L3), como el porcentaje que, tanto para el total de registros de cada material, como respecto al total de datos originales, se descarta en cada etapa.

Desde los resultados de la limpieza L1 se observa que para las tuberías de fibrocemento (UR), existe un gran porcentaje de registros descartados por poseer un año de instalación menor a 1900. Un estudio más detallado de estos registros arroja que dicha fecha no es real, y que el año 1900 se utilizó como valor por defecto al no conocerse con certeza su fecha de puesta en funcionamiento.

Estos datos representan cerca del 40 del total de tuberías de este material, y poco más del 10 de toda la base de datos. Es una eliminación importante de información, y puede influir negativamente sobre decisiones futuras respecto a la adopción de políticas de renovación o sustitución basadas en el tipo de material.

Proceso de limpieza de una base de datos de abastecimiento

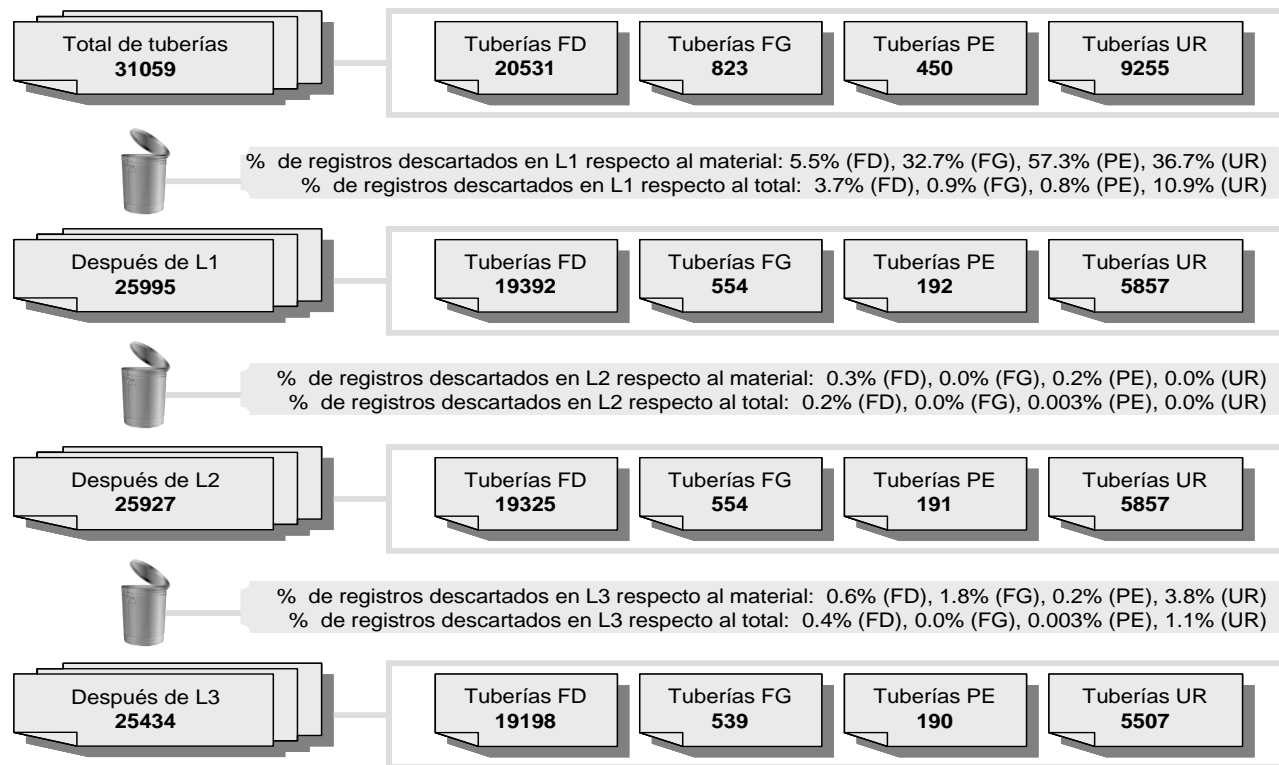


Figura 112. Limpieza de una base de datos de abastecimiento: secuencia de etapas y estadísticas de información descartada

6.5.1.3 Gestión de inventarios: base de conocimiento experto

Como paso fundamental en la confección de un plan básico de actuación dirigido a la búsqueda de la eficiencia técnica en la gestión de un sistema de abastecimiento o saneamiento, existe un importante factor a valorar: el aporte hecho por el recurso humano formado y experimentado. Cualquier sistema de ayuda en el ámbito de la renovación o reposición constituye únicamente una herramienta para el soporte de lo que el personal encargado decida. Como tal no representa un medio final de decisión, pues se incurriría en el error de dejar a un lado impresiones subjetivas pero con gran contenido acerca de la operación y administración de la red, y que el sistema de decisión en ciertas ocasiones no llega a considerar en su totalidad.

A continuación se propone una estructura de fácil implementación para constituir una base de conocimiento experto. Dicha base de conocimiento debe contener, no sólo la información que se ha generado tras la solución a problemas anteriores, y que se reúne en el elemento (I) de la Figura 113, sino además los procedimientos de actuación a nivel de toma de decisiones, que corresponden a los elementos (II) y (III) de la misma figura, y que se deben seguir en estos casos especiales. Esto último es vital, pues constituye el medio para explotar la experiencia pasada (experiencia que usualmente se identifica con el término “Saber Cómo”, traducido del anglosajón “know how”) al definir quién y cómo lo hará, y desde ese punto, encontrar una solución óptima al problema presente.

6.5.1.3.1 *Saber Cómo*

En la estructura propuesta se considera, en primera instancia y con especial importancia, la recopilación de experiencias pasadas que resulten singulares (por ejemplo, fallos poco comunes o inesperados en tuberías, o casos donde se haya implementado una solución innovadora, de bajo costo, o basada en una tecnología nunca antes utilizada en la empresa).

Dejar consignada toda la información referida a estos casos no supone un esfuerzo importante, y por el contrario, los beneficios que de esta práctica se pueden desprender son evidentes. Esta actividad se concreta mediante la creación de una base de datos sobre eventos pasados, compuesta por dos tablas que deben mantenerse actualizadas, y que conforman el archivo histórico de casos singulares

ocurridos en la red que gestiona la empresa (elemento I de esta propuesta). La creación de estas tablas constituye las acciones (A) y (B):

(A) La primera tabla está conformada por la información acerca del problema de carácter especial a solucionar, y debe contener al menos los siguientes campos:

- Identificación del elemento afectado en la base de datos de inventario de la empresa.
- Identificación del elemento en la presente base de datos.
- Fecha de ocurrencia.
- Forma en que se identificó el problema.
- Razón por la cual el caso resulta singular.
- Datos físicos del elemento.
- Datos del ambiente circundante.
- Otros datos de contexto que puedan resultar relevantes.

(B) La segunda tabla agrupa toda la información relacionada con la solución adoptada en ese entonces, y que en un futuro servirá de referente para abordar problemas similares de una manera más rápida y con una utilización de recursos más eficiente. Los campos básicos que deben conformarla son:

- Selección de soluciones propuestas.
- Costo de la intervención asociada a cada solución.
- Solución adoptada, a nivel de detalle.
- Personal que tomó las decisiones pertinentes.
- Personal que llevó a cabo la intervención.

6.5.1.3.2 *Protocolo de explotación de experiencias pasadas*

Posteriormente se requiere plantear una serie de pasos que reflejen las actuaciones a seguir cada vez que se presente un caso especial, y que por su naturaleza tendrá una solución igualmente singular, lo que exige explotar la información sobre eventos pasados similares. Dicho protocolo está conformado por

un trabajo en equipo, denominado aquí como elemento II, y que se a su vez está definido por las acciones (C) y (D); y por una estructura de decisión, llamada elemento III, y ella integrada por las acciones (E) y (F).

A continuación se describen estas 4 acciones:

(C) La definición del grupo de personas que estarán encargadas de tomar la decisión relativa a qué solución adoptar (renovación o sustitución, técnica de renovación, o en caso de sustitución, diámetro de la nueva tubería, material, entre otras). Este grupo no siempre debe ser el mismo, pues al interior de la empresa existen personas más idóneas para solucionar determinados problemas, pero que pueden no ser referentes en otro tipo de situaciones.

(D) Una vez establecidas las personas que asumen el proceso de decisión, debe considerarse la forma en que se llegará a una solución consensuada respecto a un problema a solucionar. Por ejemplo, tras tener conformada una base de datos de casos especiales, y donde ya algún número de sus registros se refieren a obstrucciones repentinas y no esperadas de tuberías de saneamiento, tras eventos importantes de lluvias en una zona determinada de la ciudad, se debe buscar un consenso acerca del tipo de solución que en principio se debe tomar en caso de que un hecho de tales características vuelva a suceder. Aunque debe evitarse generalizar la cuestión, sí se puede explotar la información ya existente para dar una idea de las soluciones potenciales a este tipo de casos. Por supuesto, basado en los datos del pasado cada experto puede proponer soluciones diferentes. Es aquí donde se debe buscar un punto de convergencia que posteriormente genere una solución robusta.

En la literatura se exponen diferentes mecanismos para este fin. El que aquí se aconseja por su facilidad de implementación, es el denominado "Método Delphi". Esta técnica busca la previsión y el consenso en ambientes de incertidumbre, donde además se cuenta con información objetiva escasa (tal es el caso de las bases de datos referidas a fallos inesperados y poco comunes en redes de abastecimiento o saneamiento). Otros métodos son igualmente válidos. Las características que identifican al método Delphi (IEAE, 2002) son las siguientes:

- Existe un coordinador (o grupo coordinador) del proceso, que aporta control al proceso y elimina información irrelevante.

- El proceso se da bajo absoluto anonimato, lo que asegura que las respuestas de un gestor experto no se vean influenciadas por factores relativos a la personalidad de los demás.
- El proceso es iterativo y retroalimentativo, dándole la oportunidad al gestor de pensar sobre la respuesta que inicialmente ofreció, al conocer la opinión de los restantes integrantes del grupo, y cambiarla de manera objetiva.
- El consenso final nace de los resultados estadísticos generados tras la frecuencia en las respuestas posibles para cada pregunta hecha en el formulario enviado a los gestores. De esto se infiere que todas las opiniones, en mayor o menor grado, aportan algo a la solución final.

Un proceso de estas características puede ser llevado a cabo al interior de una misma empresa de abastecimiento o saneamiento, o bien entre empresas similares. En este último caso, el grupo coordinador sería, no una persona, sino una de las empresas participantes.

Las fases que requiere la aplicación del método Delphi se resumen en:

- Identificación y selección de la información de entrada relevante (proveniente, tanto de las actividades de recopilación de datos y análisis de soluciones pasadas, como de las características que definen el problema actual), la cual soportará la decisión que proponga cada gestor.
- Selección de gestores expertos (no necesariamente es el mismo equipo gestor de la base de conocimiento experto).
- Diseño de cuestionarios que buscan, mediante las respuestas que ellos aporten, encontrar la solución al problema planteado de renovación o sustitución.
- Organización del proceso de recogida de información (el proceso no tiene por qué ser temporal o espacialmente coincidente entre los diferentes participantes involucrados).
- Análisis de la información y retroalimentación de resultados parciales.
- Edición de resultados finales tras iteraciones sucesivas, hasta alcanzar un nivel de satisfacción dado (establecido desde el principio) en todos los

participantes respecto a sus propias respuestas, y hasta alcanzar un nivel dado de dispersión de todas las respuestas.

(E) Los resultados generados tras la aplicación del método de consenso seleccionado pueden ser puntuales, o bien abarcar un rango de posibilidades de entrada y en consecuencia un rango de posibilidades de salida. Supóngase, por ejemplo, que se quieren analizar todos los registros de la base de datos de casos especiales que se refieren a fallos por aplastamiento ocurridos en tuberías plásticas. En este caso, no debería buscarse un solo resultado, y en vez de ello sí plantear la casuística específica que para tuberías plásticas se presenta en toda la base de datos, agruparla adecuadamente, y obtener soluciones para cada caso.

Para esto se requiere establecer un conjunto de reglas de decisión basadas en operadores lógicos, reglas del tipo “SI [x] Y [y] ENTONCES [z]”. Un ejemplo de ello sería la frase “para evitar fallos súbitos por aplastamiento, frecuentes en la zona i, SI el material de la tubería es [Poliétileno] Y la presión de servicio media del elemento se encuentra entre [35 y 40] m.c.a., el material de sustitución será [Fundición Dúctil]”. En general, el planteamiento anterior se puede expresar mediante una matriz de reglas de decisión que incluya las diferentes combinaciones generadas a partir de las entradas y salidas contempladas para el caso específico. Un ejemplo de ello se plantea en la Tabla 115.

Tabla 115. Matriz de decisión en una base de conocimiento experto

Para evitar casos futuros de fallos en forma de cuña en las uniones, frecuentes en la zona i, SI la tubería es de material [x] Y su edad está entre [y₁] años y [y₂] años, ENTONCES se debe llevar a cabo la siguiente actuación [z]				
		Rango de edad en años, y		Actuación, z
		Y ₁	Y ₂	
		0	30	No intervenir
	Hormigón reforzado	41	70	No intervenir. Programar inspección en dos años
Material		71	>71	Renovar con revestimiento interior
		0	30	No intervenir. Programar inspección en dos años
	Fibro cemento	31	50	Renovar con revestimiento interior
		51	>51	Sustituir con PEAD

(F) Tras analizar el ejemplo anterior, resulta evidente la necesidad de definir una serie de valores típicos, o estándares de decisión (diferentes estos de los que se citan en epígrafe “Gestión de estándares”), para cada variable que contenga la matriz de decisión.

En el caso de la edad, estos valores corresponden con los años límite para cada uno de los rangos en los cuales el gestor experto desea definir un determinado comportamiento de la tubería. Otros estándares se pueden asociar a variables como la presión media de servicio, el diámetro de la sección transversal o la altura de rugosidad, entre otros. La elección de estas magnitudes resulta fundamental en el proceso de decisión pues influye en gran medida en los resultados finales, lo cual obliga al grupo de gestores a alcanzar el máximo grado de consenso en su establecimiento.

Pero además de los casos puntuales en los que se requiere el conocimiento de los gestores como ayuda a la toma de decisiones acerca de una solución a adoptar para determinado problema de renovación o sustitución en la red, la opinión experta también debe plasmarse, de manera global, en las siguientes tres etapas del plan básico de actuación.

6.5.1.3.3 *En la etapa de diseño*

Lo que cada empresa pretende con la implantación de un plan de actuación tendiente a gestionar con atino su red resulta propio de sus condiciones locales de operación.

Los planes de actuación “importados” de otras redes deben ser rediseñados para adaptarlos a las necesidades y características propias. Sí se pueden adoptar como propios algunos lineamientos generales sobre qué debe contener (esto es precisamente lo que se planteará en lo sucesivo del presente capítulo), pero son los gestores quienes, desde su conocimiento adquirido a lo largo de su profesión, y desde las experiencias de operación y gestión recopiladas, dictaminan la estructura, fases y secuencia de actividades que mejor encajan en el perfil de sistema de transporte de agua propio.

6.5.1.3.4 En la etapa de aplicación

Ya inmersos en el implementación del plan, el papel del gestor sigue condicionando el proceso, en la medida en que cualquier sistema de gestión, en alguna de sus etapas, requiere la introducción de valores subjetivos, ya sea en forma de pesos asociados a la importancia relativa de unos u otros factores, o mediante la simple introducción de valores estimados respecto a las variables consideradas como relevantes. Se debe, por tanto, aceptar la existencia de un cierto nivel de incertidumbre asociado a valoraciones personales. Esto no constituye un impedimento para validar la bondad de los resultados.

De hecho, el buen juicio del gestor o del personal técnico a la hora de ejecutar las etapas consideradas en el plan constituye una forma implícita y permanente de validación de cada una de las mismas. Dejar a un lado el juicio experto sería un desatino. Lo que se debe buscar es un grado máximo cercanía de las opiniones técnicas con la realidad.

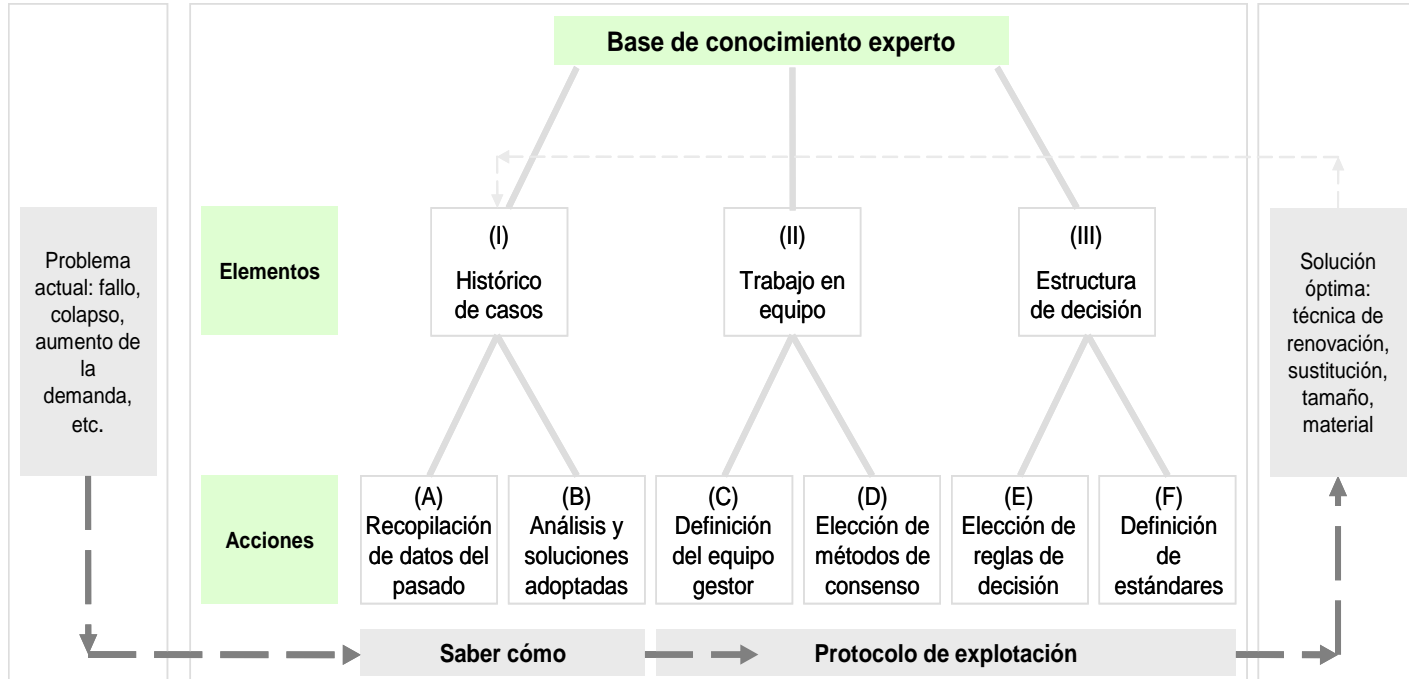


Figura 113. Esquema propuesto de base de conocimiento experto para sistemas de transporte de agua

6.5.1.3.5 *En la etapa de verificación de resultados*

Aunque más adelante se verá que un plan de actuación constituye en realidad una serie de etapas que se relacionan formando un ciclo de retroalimentación, sí pueden definirse estados del proceso donde se obtienen resultados susceptibles de verificación.

El procedimiento para la validación conlleva en gran medida el juzgamiento sobre lo apropiado que los resultados son en el contexto. Así, un plan de actuación puede en una instancia determinada indicar la sustitución de tuberías de cierto material por otro determinado. El personal técnico tiene la potestad de discrepar de esa acción basado en tendencias referidas a nuevas tecnologías que propongan otro tipo de intervención u otro nuevo material.

Ello sin embargo no quiere decir que el plan de actuación falla por no considerar este aspecto, tan sólo puede significar que el alcance del plan no contempla en principio estas nuevas tecnologías. Lo correcto sería entonces, la ejecución de una nueva iteración de algunas etapas del plan, que basadas en la experiencia experta, generen nuevos resultados aún más acordes con lo esperado.

6.5.1.4 **Gestión de la predicción de la demanda**

Se basa en el estudio cuyo objetivo es el conocimiento de la demanda futura en el sistema. Existen dos métodos ampliamente conocidos para lograr dicha meta:

- El método global

Se basa en una extrapolación de las demandas de años pasados para establecer una tasa de crecimiento que permite, en consecuencia, estimar las demandas futuras.

- El método analítico

Este método lleva a cabo un análisis independiente de cada una de las variables consideradas relevantes para el caso particular (aquellas que afectan la demanda de un sistema específico), obteniendo un comportamiento

que rige la demanda global. En este método se requiere además un conocimiento completo de los patrones de consumo imperantes.

6.5.1.5 Gestión del uso eficiente

Posee estrecha relación con una serie de requerimientos de tipo medioambiental, social y económico. La gestión del uso eficiente conlleva implícito beneficios (Cobacho, 2002):

- Para los consumidores: pues el uso racional del agua conlleva un menor volumen consumido y por ende, una menor cuantía a pagar por este concepto.
- Para la empresa de abastecimiento o saneamiento: una disminución en la demanda implica un mantenimiento de las condiciones de servicio actuales por un periodo de tiempo mayor, y ello conlleva un alargamiento de la vida útil de la red.

Para el medio ambiente: disminuir la necesidad de abastecimiento implica disminuir la necesidad de captación, prolongando la disponibilidad del recurso y permitiendo una planificación más sostenible.

6.5.1.6 Gestión de la aportación: cuencas y población aportante

El continuo crecimiento poblacional obliga a mantener un catastro permanentemente actualizado, desde el cual se genera un esquema de las diferentes áreas de aportación a un nudo específico de la red de drenaje.

Paralelamente se debe contar con un sistema de información geográfica que represente con exactitud tanto la cantidad como la ubicación de los pozos de registro existentes. La asociación de una cuenca a un nudo dado, y el área misma de dicha cuenca, resultan objeto de cuidadoso estudio.

En general resulta deseable que todas las cuencas tengan un área del mismo orden de magnitud. Áreas pequeñas generarán un número muy elevado de cuencas de aportación, el cual requerirá una mayor disponibilidad de recursos informáticos, en tanto que áreas grandes podrían no representar con suficiente exactitud lo que pasa al interior de cada una de ellas, debido a la pérdida de homogeneidad en diferentes zonas de la misma área de drenaje, pues cada área es representada mediante valores únicos: pendiente, porcentaje de área impermeable, coeficiente de rugosidad superficial impermeable y permeable, y profundidad de almacenamiento impermeable y permeable.

La población equivalente se genera a partir de la tasa existente entre los caudales típicos tratados en las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa y la dotación de carga contaminante por persona equivalente, previamente asumida como aceptable según las condiciones de la población.

Las determinaciones, tanto de los caudales tratados en planta, como de la dotación representativa, deben asumirse como actividades programadas, a realizarse cada cierto tiempo, pues contar con valores actualizados de estas dos variables resulta imprescindible para conocer con certeza el funcionamiento del sistema mediante un modelo hidráulico. De aquí la importancia de considerarlas como parte del plan de actuación.

6.5.1.7 Gestión de la aportación: crecimiento esperado

En el plan básico de actuación se debe considerar un estudio encaminado a determinar la evaluación del número de residentes permanentes y además aquellos picos de población que pueden ocurrir a lo largo del año y que, mezclados con posibles eventos de precipitación, generan un escenario de condiciones extremas para el funcionamiento del sistema de saneamiento.

La estimación de la población residente futura se realiza con base en los datos actuales y pasados de residentes. Ellos, afectados por una tasa anual de crecimiento, generan la curva que permite establecer los valores correspondientes a años venideros. Esta predicción puede ser más o menos refinada dependiendo de la calidad de los datos de partida disponibles y de la adEc. de las tasas de crecimiento anuales a la tendencia de crecimiento particular de la población estudiada. El plan de actuación debe contar pues con un estudio que permita

predecir, a partir del crecimiento poblacional, las necesidades de ampliación de la red de saneamiento y de las estaciones de bombeo de aguas residuales integradas.

6.5.2 Módulo de mantenimiento, evaluación y predicción

Abarca las actividades que permiten un funcionamiento adecuado del sistema (ya no sólo mínimo, como lo es el caso del módulo de planeación). A continuación se ahonda en la filosofía de cada fase perteneciente a este módulo.

6.5.2.1 Gestión del mantenimiento preventivo

Las actividades tendientes a un mantenimiento preventivo hacen referencia a componentes de un programa de cuidado de los elementos del sistema. Un programa de este tipo implica una programación temporal de inspecciones a la red y a los elementos operativos que la complementan. El concepto de seguimiento a la condición estructural (y cuando se pueda, a la condición operativa) de los elementos de la red también se encuentra asociado al mantenimiento preventivo.

6.5.2.2 Gestión del mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo tiene lugar cuando un evento inesperado sucede y en consecuencia se realiza una intervención en la red. Opuesto a las acciones proactivas propias del mantenimiento preventivo, las acciones del mantenimiento correctivo no dan lugar a mejoras sustantivas en la condición del sistema, pues mediante estas acciones no se optimiza el funcionamiento de la red, tan sólo se pretende devolver a una condición óptima de servicio a un elemento que ha quedado temporalmente sin dicha condición, perjudicando en ese mismo lapso de tiempo la operación del sistema.

6.5.2.3 Gestión de la condición actual mediante evaluaciones

La gestión de la condición actual implica una serie de evaluaciones encaminadas a cuantificar el estado presente de la tubería. Dicha cuantificación puede lograrse mediante un enfoque:

- Estructural: consiste en evaluar el estado del elemento en función de su capacidad estructural para soportar las cargas que sobre él se imprimen, y que se evidencian por la presencia interna y externa de signos de afectación como grietas (longitudinales o transversales), hoyos, puntos de corrosión, pérdida de alineamiento, desacople con las tuberías circundantes, entre otros.
- Hidráulico: se basa en evaluar la pérdida de capacidad de transporte de la conducción comparada con su capacidad cuando fue instalada, y que se ve influenciada por fenómenos como el aumento de la rugosidad (y en un caso extremo la pérdida de sección) y la presencia de depósitos calcáreos. La cuantificación del aumento de la rugosidad generalmente se hace mediante una estimación asociada a la edad del elemento.
- De la condición de servicio: en sistemas de saneamiento las condiciones actuales de servicio pueden ser fácilmente evaluadas mediante técnicas visuales presenciales, o mediante imágenes y datos logrados por medios robotizados en combinación con circuitos cerrados de televisión. La aplicación de una u otra técnica permite establecer la magnitud de los efectos que puede generar la presencia de desechos de tipo orgánico (raíces principalmente) o inerte.

A diferencia de la condición hidráulica, que se ve disminuida lentamente, la condición de servicio puede empeorar drásticamente y en casos extremos llegar a un punto inaceptable, que corresponde con un taponamiento repentino de la totalidad de la sección.

Para cualquiera de los enfoques mencionados, un compendio de las actividades que deben seguirse es el siguiente:

- Inspección mediante una técnica elegida de cada uno de los elementos incluidos en la base de datos (para ello se hace necesario la programación de inspecciones, contratación de servicios de evaluación estructural

mediante hidrófonos, contratación de servicios de inspección interior de conductos mediante circuito cerrado de televisión, entre otros).

- Cuantificación de los resultados de la inspección mediante un protocolo de transformación de defectos en pesos. Se debe asumir la adopción de un único sistema estandarizado de calificación de defectos para todos los elementos (existen varios comúnmente usados: WRc del Reino Unido, NRC de Canadá, etc.), o bien la creación de uno propio.
- Transformación de los resultados de la inspección en una calificación de la condición (estructural o hidráulica).
- Modelación mecánica o estadística del deterioro basada en la calificación de la condición actual del elemento y en la información sobre los estados de condición en años pasados, bien creando o bien adoptando alguna formulación para predecir la condición futura (tiempo estimado de fallo). Aquí se deben incorporar reglas para el control y validación de los resultados, basadas en la experiencia del gestor sobre la dinámica local del deterioro en la red.

6.5.2.4 Gestión de la condición futura mediante estimación del riesgo de fallo

A partir de los resultados de la modelación del deterioro (es decir, del conocimiento expreso de la tasa de deterioro propia del elemento) se debe llegar a la obtención de una función de probabilidad o posibilidad de fallo de la conducción.

Paralelamente se debe adoptar un sistema tendiente a la cuantificación de las potenciales consecuencias del fallo de cada tubería estudiada. Para ello puede elegirse un enfoque económico (en términos de costos directos e indirectos generados por el fallo), un enfoque técnico (en función de las afectaciones en el sistema, generadas por el fallo de la tubería, y de los posibles efectos ambientales de dicho fallo), o la combinación de ambos.

6.5.3 Módulo de mejora continua

Este módulo tiene como objetivo primordial planear y ejecutar actuaciones que se ven enmarcadas en una constante intención de mejora y no obedecen a la solución de situaciones inesperadas. Propende por el funcionamiento auto-sostenible del sistema (y no sólo adecuado, como es el caso del módulo de mantenimiento). Además de ello, este módulo tiene una función adicional, al servir de interfaz de retroalimentación entre el módulo de planeación y el módulo de mantenimiento, evaluación y predicción.

6.5.3.1 Gestión de la renovación

La gestión de la renovación implica las actividades de:

- Análisis de la base de datos: este estudio debe realizarse como actividad inicial enfocada a cumplir los objetivos de renovación previamente fijados (en el caso de tuberías, usualmente, un monto de inversión anual correspondiente a un porcentaje de longitud de la red de la red). Desde este análisis se deben escoger aquellos elementos que poseen mayor urgencia de renovación/sustitución, y consecuentemente, prioridad de inversión.
- Orden de prioridad a la renovación: con base en una serie de criterios escogidos según las peculiaridades que hacen única a la red, y según la valoración que cada elemento obtiene según cada criterio, se obtiene una lista priorizada de elementos susceptibles de intervención para su mejora.

En esta parte del módulo de gestión de la renovación, la propuesta para el establecimiento de necesidades de intervención mediante lógica difusa hecha en el capítulo correspondiente a este aporte, puede integrarse de manera natural, asegurando otra forma de incorporación del conocimiento experto al plan básico de actuación, adicional a la que se plantea mediante la propuesta de construcción de la base de conocimiento experto.

- Momento óptimo de renovación

Una vez se defina las partes de la red que deben ser intervenidas, el siguiente paso consiste en saber el momento óptimo para hacerlo. Si los elementos del sistema son reemplazados antes de tiempo o si dicho reemplazo se efectúa demasiado tarde, ello genera un costo adicional evitable para la empresa.

- Selección y evaluación de alternativas de intervención

Basándose en las características propias de los elementos de la red a intervenir, se deben listar los diferentes tipos de intervención que resultan apropiados. Aquí se debe hacer diferencia entre técnicas de rehabilitación (intervenciones menores), de renovación (técnicas que requieren una intervención mayor con el objetivo de devolver al elemento a su estado “como nuevo”, es decir a las condiciones que tenía al momento de su instalación) y de sustitución (que implican un cambio total del elemento por otro nuevo).

- Identificación y ejecución de la solución óptima

Una vez establecido el abanico de posibilidades de intervención se debe valorar cada una de ellas tanto en el ámbito del esfuerzo técnico y operativo que requiere, como en la inversión económica asociada a cada una. En función de lo anterior, se debe escoger la más apropiada (también puede ser un grupo de intervenciones conjuntas que resulten ser complementarias y óptimas). Aquí, como en otras tantas fases del plan básico de actuación, la opinión experta del gestor resulta fundamental.

Lógicamente, los siguientes pasos consisten en la programación de la intervención, la destinación de los medios, y posteriormente, la ejecución. Si la magnitud de las obras de renovación/sustitución lo justifican, estos últimos tres pasos deben reunirse en un plan de intervención específico.

- Seguimiento de la decisiones adoptadas

Un último paso de un potencial plan de intervención conformado en el anterior epígrafe, lo constituye el seguimiento de las mejoras infringidas en los elementos, mediante una nueva evaluación del estado de condición post-intervención.

6.5.3.2 Gestión mediante indicadores

Un indicador de desempeño (también llamado “indicador de gestión”) “constituye una medida de la eficiencia y la eficacia de las empresas de abastecimiento y saneamiento” (Alegre, 1998), en lo referente a uno o varios aspectos específicos de la actividad técnica o administrativa.

Aunque en un principio (años 90) la actividad de implementación y seguimiento de indicadores de desempeño no resultaba habitual entre las empresas prestadoras de servicios de abastecimiento o saneamiento de agua, a partir del incremento en las privatizaciones de estas entidades (finales del siglo pasado y primera década del presente siglo) se dio un vuelco de actitud generalizado en este sentido.

La continua adopción de controles para el cumplimiento de las metas propuestas facilitó la consolidación de los indicadores de desempeño como herramientas útiles de enlace entre los resultados técnicos y la administración del sistema.

La evaluación del estado de forma técnico-administrativo de una empresa de abastecimiento o saneamiento de agua mediante indicadores de desempeño constituye una práctica sana pues:

- Permiten una monitorización más eficiente de los procesos internos.
- Ayudan en la organización de la información con que cuenta la empresa.
- Permiten construir un mapa de fortalezas y debilidades, y en función de ello, generar lineamientos de trabajo futuros.

- Estimulan la creación de ciclos proactivos en búsqueda de la mejora de la calidad, la satisfacción del cliente, y el aumento de la eficiencia en todos los procesos.

La constitución de un sistema de indicadores de desempeño no es, sin embargo, un asunto inmediato. No todos los indicadores resultan apropiados para todos los sistemas de transporte de agua. Al igual que en la mayoría de fases que constituyen el presente plan de actuación, se debe actuar siempre en concordancia con las características propias de cada red.

Así, un sistema de indicadores debe cumplir las siguientes condiciones (Alegre, 1998):

- Contener indicadores que sean relevantes para el comportamiento de la red, y estar delimitados en el tiempo.
- No contener indicadores con factores de ponderación subjetivos.
- Considerar únicamente indicadores con un significado y alcance definido, y que no se solapen entre sí.
- Incluir indicadores que puedan ser evaluados bajo condiciones de operación normales.
- Los resultados de la evaluación respecto a cada indicador deben ser trazables y verificables.

En el epígrafe “Indicadores de desempeño fundamentales” se abordan en más detalle los indicadores incluidos en la herramienta informática y que se consideran de alta relevancia para la mayor parte de las empresas de abastecimiento y saneamiento. Ello no implica, sin embargo, una lista cerrada de indicadores. De nuevo se vuelve sobre el concepto de las “particularidad de cada sistema” como directriz en el planteamiento de un plan de actuación.

6.5.3.2.1 Elección de indicadores de desempeño

Como ya se ha dejado claro, una buena elección de los indicadores que serán incluidos en la fase de “gestión de indicadores” dependerá en gran medida de la

opinión experta que establezca cuáles de ellos resultan relevantes en función de las características locales de la red. Sin embargo, dichos indicadores no pueden ser evaluadores de características únicas del sistema, pues dejarían de ser útiles para una posterior comparación con otras empresas, en la búsqueda de puntos débiles sobre los que se puede mejorar. Este tipo de práctica es conocida con el término anglosajón Benchmarking, y se encuentra ya ampliamente difundida en la industria del agua como medida encaminada al aumento de la eficiencia en los procesos asociados.

La elección de los indicadores de gestión a incluir en el plan de actuación de una empresa, desde una lista de indicadores potencialmente aplicables, debe basarse en:

- Su viabilidad de evaluación, lo que significa que el indicador elegido pueda ser usado con base en la información existente en la base de datos de la entidad, o en aquella información que se planea obtener.
- Que el indicador cuente con una fórmula de cálculo clara, es decir, que sus componentes, para el caso específico de la empresa, no se presten para controversia.
- Que el indicador obedezca a un valor objetivo, meta de logro positiva o negativa, que pueda ser establecida por la empresa, basándose en la experiencia propia, en la legislación existente, o en la comparación con otras empresas similares.
- Que el indicador ayude a evaluar uno o varios aspectos técnicos o administrativos relevantes dentro del plan básico de actuación: existen indicadores que pueden resultar importantes en otros campos de gestión, pero no en el que abarca un plan encaminado a aumentar la eficiencia asociada a los procesos de operación y renovación.

6.5.3.2.2 *Cuantificación de variables*

Un primer paso en la evaluación de un indicador lo constituye la cuantificación (ya sea mediante cálculo, medición o por estimación) cada una de las variables que lo componen. Según la propuesta de la Asociación Internacional del Agua, IWA, las variables pueden ser clasificadas en diferentes grupos:

- Datos de volumen
- Datos de personal
- Datos de activos físicos
- Datos operacionales
- Datos demográficos y de abonados
- Datos acerca de la calidad del servicio
- Datos económicos y financieros

Una descripción de las variables que conforman cada grupo, muchas de las cuales resultan además útiles para realizar un balance hídrico determinado, se muestra en el Anexo I.

6.5.3.2.3 *Cuantificación de indicadores*

Similarmente, los indicadores de desempeño conformados por las variables anteriormente introducidas, pueden ser clasificados en grupos:

- Indicadores de recursos hídricos.
- Indicadores de personal.
- Indicadores físicos.
- Indicadores operacionales.
- Indicadores de calidad del servicio.
- Indicadores económicos y financieros.

6.5.3.3 Gestión a partir del balance hídrico de la red

La realización de un balance hídrico en un sistema de abastecimiento permite auditar, en los aspectos técnico y administrativo, el nivel de desempeño de la red. El desempeño técnico se evalúa, como se verá más adelante, bien mediante una

cuantificación de los volúmenes realmente entregados a los abonados (y en consecuencia, a partir de estos, el conocimiento de los caudales físicamente perdidos), o bien mediante la cuantificación de los volúmenes autorizados (y desde ellos, y previo conocimiento del caudal inyectado, los no autorizados).

El desempeño administrativo, en el enfoque que permite establecer los volúmenes consumidos, se evalúa mediante el establecimiento de la cantidad de agua que no sólo es consumida, sino también registrada a través de caudalímetros instalados por la empresa.

6.5.3.3.1 *Elección del balance a realizar*

En el apartado “Balances hídricos: enfoque hacia la autorización del consumo y enfoque hacia la medición del consumo” se presentan las características fundamentales y estructura de estas dos propuestas. Ambos balances requieren la medición del caudal inyectado al sistema en un determinado periodo de tiempo, actividad que en sí implica un aumento en el grado de incertidumbre de los resultados finales al depender de la adecuada calibración del instrumento medidor.

Pero no sólo la medición del caudal de entrada trae un error asociado, pues el resto de las componentes de ambos balances son, o resultados a partir de una lectura generada por un aparato medidor (caudalímetro o contador) al cual se le puede atribuir diferentes tipos de error, o estimaciones volumétricas indirectas.

Lo anteriormente dicho deja claro que, más que buscar un método de mayor exactitud, la elección adecuada de uno u otro balance radica en conocer la filosofía de cada enfoque y valorar su conveniencia: si se busca con ahínco entrar en un proceso de comparación con otras empresas (benchmarking) el balance de la IWA resulta ideal, pues su uso es generalizado. Pero si lo que se pretende es establecer el grado real de uso del agua, sin entrar en discusiones sobre la autorización de su consumo, y ahondar en el proceso de medición como base del conocimiento del funcionamiento del sistema, el balance planteado por Almandoz (Almandoz, 2002) resulta ideal.

6.5.3.3.2 *Rendimientos hídricos a partir del balance enfocado a la medición de consumos*

Una herramienta adicional para cuantificar a diferentes niveles el grado de eficiencia de un sistema de abastecimiento, la constituye el cálculo de los rendimientos hídricos generados a partir de las componentes del balance hídrico enfocado a la medición de consumos (estos rendimientos son también, en última instancia, indicadores de desempeño). Por supuesto, estos rendimientos hídricos son una consecuencia natural del balance mencionado, y en consecuencia se requiere la adopción de este último para el cálculo de los primeros.

Los rendimientos que aquí se mencionan, y propuestos por Almandoz (Almandoz, 2002) en su tesis doctoral, resultan especialmente adecuados para diagnosticar la eficiencia técnico-administrativa de un abastecimiento, la eficiencia física de la red, y a partir de ellas, la eficiencia global del sistema. En el fondo, su filosofía es la misma que rige el balance enfocado a la medición.

La primera de estas eficiencias se define mediante el rendimiento establecido a partir de la relación entre caudal registrado, Q_r , y caudal suministrado, Q_s . Dicho rendimiento técnico-administrativo, η_g , queda determinado por:

$$\eta_g = \frac{Q_r}{Q_s} \quad \text{Ec. 134}$$

Esta relación refleja qué tanto del volumen que en un periodo de tiempo ha sido suministrado a los usuarios, en realidad ha sido registrado, y en consecuencia medido (con mayor o menor exactitud).

El rendimiento de la red, η_r , y que de algún modo refleja la eficiencia física del entramado de tuberías, se define mediante la razón existente entre el volumen suministrado a los usuarios en un periodo de tiempo y el volumen que en ese mismo lapso temporal se ha inyectado a la red. Viene dado por:

$$\eta_r = \frac{Q_s}{Q} \quad \text{Ec. 135}$$

El resultado de este cociente determina qué fracción del volumen ingresado a la red se ha entregado realmente a los usuarios (sin entrar en detalles sobre si esta

entregada ha sido controlada mediante la medición del consumo o no). En general, éste es un rendimiento que refleja la salud de la red, que será buena o no dependiendo, entre otros factores, de la forma de operación y de las actividades de mantenimiento y control activo de fugas.

Por último, al eficiencia expresada por el rendimiento global del sistema, η_s , engloba (como su nombre lo indica) los efectos tanto de la eficiencia técnico-administrativa como de la eficiencia física de la red. Se define como:

$$\eta_s = \eta_g \times \eta_r \quad \text{Ec. 136}$$

Este rendimiento, una vez hecha la simplificación de sus componentes, se resume en la relación que existe entre el volumen que en un periodo de tiempo ha sido suministrado y además registrado, y el volumen que en ese mismo periodo ha sido inyectado al sistema.

$$\eta_s = \frac{Q_r}{Q} \quad \text{Ec. 137}$$

Por supuesto la cuantificación, no sólo de los rendimientos expuestos, sino en general el balance que los genera, exige un esfuerzo de gestión importante, y que constituye en su visión global todo un ejercicio de auditoría sobre el abastecimiento. No es esto, entonces, una tarea inmediata.

A continuación se listan algunas ideas básicas que aseguran la disposición de elementos suficientes para llevar a cabo una auditoría hídrica en una red de abastecimiento. No son excluyentes, pero la consideración de todas ellas asegura en buena medida la apropiada realización de la auditoría y la obtención de resultados óptimos desprendidos de ella.

6.5.3.3.3 *Lineamientos fundamentales para disponer de datos suficientes para realizar una auditoría hídrica*

- Respecto a la monitorización de variables: se debe realizar una constante medición de caudales inyectados a la red, caudales entrantes a sectores aislables mediante apertura y cierre de válvulas, y medición de presión en horas de máxima y mínima demanda en las zonas hidráulicamente más desfavorables. El conocimiento de la red exige que estas actividades constituyan, más que eventos de gestión aislados, tareas rutinarias.
- Respecto al parque de contadores: el objetivo que se debe buscar en toda red es siempre el mismo, y consiste en lograr un cubrimiento total de la red en lo referente a la medición de consumos mediante contadores apropiados según el tipo de usuario, y mediante la apropiada gestión de la base de datos de este tipo de elementos. Esto último resulta especialmente relevante para establecer las curvas características para cada tipo de abonado, y que finalmente determinarán la disgregación de volúmenes del balance.
- Respecto a la modelación matemática de la red: se debe contar con un modelo hidráulico en periodo extendido de la red, que simule con suficiencia el comportamiento general del sistema mediante la inclusión de sus demandas, y mediante la adecuada simplificación del entramado real.

Existe multitud de programas informáticos que, con mayor o menor detalle, logran dicha representación del comportamiento del sistema. Ante todo, resulta importante considerar los efectos que las simplificaciones asumidas pueden ocasionar en los resultados finales tras la simulación. La calibración del modelo hidráulico constituye también una actividad clave, y su adecuación depende en gran medida de la disponibilidad de datos reales tras la monitorización de las variables básicas ya mencionadas (caudal y presión).

6.5.3.4 Gestión financiera

Aunque usualmente existe un departamento de contabilidad que se encarga de ejercer una labor fiscalizadora sobre las inversiones en renovación/reposición, es

en última instancia el departamento técnico el que dictamina cuándo y dónde se deben realizar las inversiones. De ahí que una fluida comunicación entre ambos grupos resulte fundamental para que el cronograma de inversiones se ejecute con éxito. Resulta muy importante, dicho esto, que los gestores técnicos conozcan con cierto grado de detalle el funcionamiento financiero que posibilita ejecutar las acciones que conforman el plan básico de actuación.

6.5.3.4.1 Cuantificación de ingresos (fondos) destinados a la renovación o sustitución

Una parte crítica del plan de actuación la constituye el establecimiento de las fuentes de financiación para las intervenciones en la red. Entre los métodos de financiación usuales se encuentran los aportes por impuestos del municipio o por sobretasas de servicios. En el epígrafe sobre consideraciones económicas se mencionó el orden de magnitud de los ahorros anuales que debe hacer la empresa para asegurar intervenciones futuras, y el porcentaje anual (respecto al valor de reemplazo actual de todo el sistema) a invertir en intervenciones con el ánimo de no perder la batalla contra el inexorable deterioro. El alcance de la presente tesis deja por fuera un estudio de este tipo, reconociendo de nuevo su importancia en paralelo con el aspecto técnico que aquí se aborda.

6.5.3.4.2 Proyección de egresos (inversiones) y flujo de caja necesarios para ejecutar el plan básico de actuación

Por regla general, toda empresa debe hacer proyecciones de flujo de caja y balances que aseguren la viabilidad de las inversiones en renovación (Grigg, 2003). El caso contrario constituiría un grave tropiezo en la senda de la auto-sostenibilidad. No resulta suficiente saber de dónde saldrá el dinero necesario para llevar a cabo el plan básico de actuación, se requiere también asegurar su disponibilidad en el momento preciso.

Tradicionalmente la asignación de inversiones se realiza desde lo más general (presupuesto global para operación y mantenimiento) hasta lo más específico (asignación de recursos para una intervención específica, con un desglose de sus componentes). La Figura 114 expone un esquema general de las actividades de una planeación financiera enfocada a sistemas de abastecimiento y saneamiento.

Tanto las fuentes de recursos como los costos de las intervenciones en la red pueden cambiar a lo largo del tiempo (resulta normal que el desarrollo de un plan de actuación se proyecte a varios años). Además de ello, aunque el costo final de cada intervención sólo se conocerá en el momento justo de su realización, resulta importante recalcular las cifras proyectadas cada cierto tiempo (mediante una actualización de la tasa de retorno) para tener el mayor grado de aproximación entre lo planeado y lo real.

La planeación financiera puede ser presentada (Grigg, 2003) en un informe que abarque un listado de entradas (y que incluya un valor estimado de las diferencias entre las ganancias y los gastos sobre un determinado lapso de tiempo), un presupuesto de efectivo (que muestre balances pero esta vez sobre períodos cortos de tiempo, y a un nivel de detalle mayor) y una hoja de balance (que consigne cambios en los activos y en los pasivos).

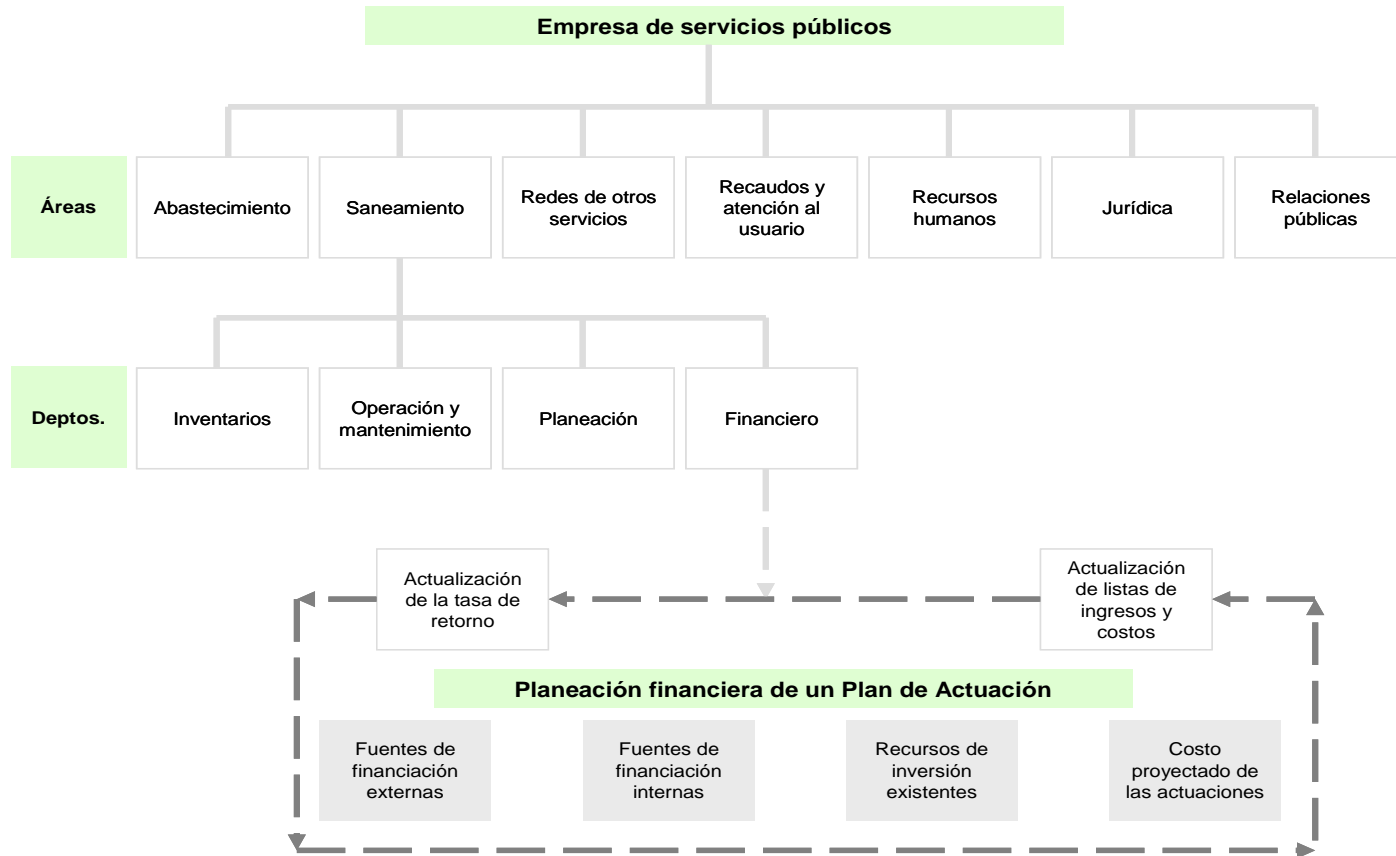


Figura 114. Esquema de planeación financiera al interior de un Plan de Actuación

6.6 Recursos para la ejecución del plan básico de actuación

Existen varias preguntas importantes que deben ser planteadas cuando inicialmente se pretende emprender un plan determinado; entendiéndose esto último como una secuencia de acciones tendientes a lograr un determinado objetivo, o un conjunto de ellos (en el caso que interesa, un plan de actuación para la gestión técnica de redes enfocado al aumento en la eficiencia de los procesos y del uso del recurso hídrico, a la par con la búsqueda de la auto-sostenibilidad). Entre ellas: ¿quién ejecutará cada acción?, y ¿de dónde saldrán los recursos para ello?

Los epígrafes siguientes intentan dar una idea orientativa sobre este par de aspectos (aunque no un dictamen definitivo, dado que cada empresa posee una estructura interna particular, y unos recursos de financiación también singulares).

6.6.1 Distribución de funciones según área de la empresa

Aunque resulta complejo establecer fronteras que indiquen qué parte de la compañía debe ejecutar una determinada fase de cada uno de los módulos propuestos, sí se puede hacer una repartición inicial de responsabilidades, siempre y cuando al interior de la empresa se tenga claro que el plan de actuación resulta en mayor o menor medida, responsabilidad de todos.

Asumir lo anterior resulta importante, porque el desarrollo de un plan de Actuación se ve, no de forma inusual, interrumpido por los vacíos de responsabilidad en la ejecución de acciones determinadas. Ello suele ocurrir cuando la naturaleza de dichas acciones se encuentra en el límite entre dos o más departamentos de la entidad. Por ejemplo, la fase de mantenimiento correctivo interesa al departamento de mantenimiento, pero también al departamento de operaciones, si esta división existe en la empresa.

Tabla 116 relaciona las fases descritas en el plan de actuación propuesto con los departamentos de una empresa encargada del abastecimiento o saneamiento de aguas que habitualmente se ven envueltos en el desarrollo de dicho plan. Los departamentos que aquí se consideran son 5: técnico, de operaciones, de mantenimiento, de planeación y financiero.

Tabla 116. Asignación de funciones en un plan de actuación

Módulo de planeación	
Fase	a cargo del departamento
gestión de inventarios	planeación, técnico
gestión de la demanda	planeación
gestión de estándares	planeación
Módulo de mantenimiento, evaluación y predicción	
Fase	a cargo del departamento
gestión del mantenimiento	operaciones, mantenimiento
gestión de la condición actual	operaciones, mantenimiento, técnico
gestión de la condición futura	técnico
Módulo de mejora continua	
Fase	a cargo del departamento
gestión de la renovación	técnico, financiero, planeación
gestión mediante indicadores	planeación, técnico
gestión financiera	financiero

6.6.2 Fuentes de financiación

Un plan básico de actuación exitoso debe contemplar los posibles inconvenientes que a futuro pueden presentarse para cubrir los gastos asociados a la renovación o sustitución de los elementos de la red. Las principales fuentes de financiación, además de las partidas presupuestarias que por defecto debe asignar la empresa a gastos de mantenimiento de activos físicos (incluida generalmente en el rubro asignado al departamento de operación o al de mantenimiento), se encuentran constituidas por ingresos debidos a impuestos municipales ordinarios o extraordinarios, y partidas destinadas al desarrollo en infraestructura regional provenientes del gobierno nacional, o de proyectos o convenios internacionales.

Más allá de lo anterior, una gestión eficiente debería asegurar, mediante los recaudos provenientes de las tasas asociadas a la prestación del servicio de acueducto o alcantarillado (parte del principio de recuperación de costos), la destinación de un porcentaje de estos recaudos a inversiones en prevención de fallos mediante buenas prácticas de operación, control activo de fugas y renovación de la red.

6.7 Propuesta de estructura óptima de una base de datos de un sistema de transporte de agua

La estructura que aquí se propone busca ante todo lograr un suficiente nivel de practicidad, que se ve expresado usualmente mediante la posibilidad de hacer consultas cruzadas entre tablas que contienen una campo común que las relacione, y que el resultado de dicha consulta abarque la totalidad de los elementos incluidos en la base de datos.

Para ello se plantea aquí el contenido (expresado en forma de campos) de dos hojas de datos indispensables, H1 y H2. La primera de ellas contiene los rasgos físicos fundamentales, y que resultan descriptivos de todos los elementos lineales de la red (tuberías, canales y conductos). Un análisis similar puede realizarse para elementos nodales (accesorios, uniones, y en el caso de las redes de abastecimiento, pozos de registro) y para aquellos que constituyen una estación de bombeo. La hoja H2 contiene toda la información sobre incidencias.

Una tercera hoja, H3, aunque resulta igualmente importante, podría ser eventualmente fusionada con la segunda. Para las tres tablas se presenta el grado de criticidad asociado a cada campo. Si bien es cierto que todos los campos propuestos son importantes, lo más o menos crítico que resulte cada campo aporta una idea de qué tan necesaria resulta su inclusión en la tabla. Dicho nivel de criticidad se ha elegido desde el punto de vista del proceso de renovación/sustitución en la red. Es posible que otro enfoque (por ejemplo, dirigido a la operación del sistema) dé lugar a otros valores de criticidad según el campo analizado.

6.7.1 Hoja de inventario en infraestructura (H1)

La hoja de inventario H1 constituye el núcleo de la base de datos de los elementos físicos de la red. Ella está destinada a recoger la información, tanto de las tuberías existentes, como de aquellas nuevas como consecuencia del crecimiento de la red o de sustituciones, y de aquellas inactivas temporalmente o que han sido dadas de baja de manera permanente.

La hoja de inventario mantiene una relación topológica tanto con la base de datos del sistema de información geográfica (mediante los campos “ID nudo inicial” e “ID nudo final”), como con las hojas de incidencias (H2) e intervenciones (H3), a través del campo “ID tubería”. Su permanente actualización resulta clave para evitar eventos de incompatibilidad y/o incoherencia de datos. La Tabla 117 contiene un listado de aquellos campos que deben considerarse en la hoja de inventario H1.

Tabla 117. Campos de la hoja de inventarios

Hoja de inventario (H1)			
Campo	Formato	Descripción	Criticidad
ID registro en H1	Alfanumérico	Identificador de registro en serie para H1	Media
ID tubería	Alfanumérico	Identificador único de la tubería o conducto. Campo común con H2 y H3	Alta
Estado inactivo	Booleano	Describe si la tubería se encuentra activa o inactiva (esto último, si por ella no existe posibilidad de que trascurra agua)	Media
Motivo de inactividad	Texto	Si el estado inactivo es verdadero, este campo describe si la tubería ha sido dada de baja temporal o totalmente, y además el motivo de la baja	Baja
Fecha registro en H1	aaaa-mm-dd	Año, mes y día de registro de la tubería en H1	Media
Fecha instalación	aaaa-mm-dd	Año, mes y día de puesta en terreno de la tubería	Alta
Material tubería	Texto	Material de la tubería puesta en terreno	Alta
Diámetro	real	Diámetro de la sección transversal del de la tubería puesta en terreno, en mm. En caso de secciones rectangulares, altura de la sección de la tubería puesta en terreno, en mm	Alta
Dimensión adicional	real	En caso de secciones rectangulares, ancho de la sección de la tubería puesta en terreno, en mm	Alta
ID nudo inicial	Alfanumérico	Identificador único del nudo inicial de la tubería según topología SIG. Campo común con la base de datos SIG	Alta
ID nudo final	Alfanumérico	Identificador único del nudo final de la tubería según topología SIG. Campo común con la base de datos SIG	Alta
X nudo inicial	real	Coordenada en la dirección X del nudo inicial. Campo común con la base de datos SIG	Baja
Y nudo inicial	real	Coordenada en la dirección Y del nudo inicial. Campo común con la base de datos SIG	Baja
Z nudo inicial	real	Coordenada en la dirección Z del nudo inicial. Campo común con la base de datos SIG	Baja
X nudo final	real	Coordenada en la dirección X del nudo final. Campo común con la base de datos SIG	Baja
Y nudo final	real	Coordenada en la dirección Y del nudo final. Campo común con la base de datos SIG	Baja

Z nudo final	real	Coordenada en la dirección Z del nudo final. Campo común con la base de datos SIG	Baja
Municipio	Alfanumérico	Aplicable si la red abarca varios términos municipales. Identificador del municipio al que pertenece	Baja
Sector	Alfanumérico	Aplicable si la red se encuentra hidráulicamente sectorizada. Identificador del sector al que pertenece	Media
Red	Texto	Hace referencia a si la tubería hace parte de una red arterial, primaria o secundaria	Baja
Clasificación	Texto	Hace referencia a si la tubería hace parte de una red en alta o en baja presión	Baja
Longitud	Real	Longitud de la tubería, en m	Alta
Suelo	Texto	Tipo de suelo predominante sobre el cual yace la tubería	Alta
Profundidad	Real	Profundidad, desde el nivel de pavimento, hasta la clave de la tubería, en cm	Media
Tráfico	Alfanumérico	Identificador del tráfico predominante bajo el cual se encuentra instalada la tubería	Alta
Presión	Real	Valor de la presión de servicio promedio de la tubería. En caso de no conocerse específicamente dicho valor, este campo puede ser reemplazado por un identificador de la zona de presión de la red a la cual pertenece la tubería.	Alta
Responsable instalación	Texto	Persona o grupo encargado de la instalación de la tubería	Alta
Comentarios sobre la instalación	Texto	Datos o descripciones particulares y relevantes sobre el proceso de instalación	Media

6.7.2 Hoja de incidencias (H2)

Esta hoja (cuyos campos se muestran en la Tabla 118) contiene tantos registros como eventos ocurran en las tuberías de la red, relativos a fugas, roturas, bloqueos, aplastamientos, y en general, cualquier evento que se pueda catalogar como una incidencia que intervenga en el estado estructural o en la operación del sistema.

Cada evento puede asociarse a uno o varios identificadores de tuberías, por lo cual, la ocurrencia de una incidencia que afecte a dos o más elementos debe ser expresada en ese mismo número de registros. Esta hoja reúne el diagnóstico de cada fallo identificado, y se encuentra relacionada topológicamente con H1 y H3 mediante el campo "ID tubería". La hoja de incidencia resulta fundamental en los estudios sobre el deterioro de la estructura, pues de ella se desprende el análisis de frecuencia de fallos, tanto a nivel de elementos individuales como de los sectores de la red y del sistema en general.

Tabla 118. Campos de la hoja de incidencias

Hoja de incidencias (H2)			
Campo	Formato	Descripción	Criticidad
ID registro en H2	Alfanumérico	Identificador de registro en serie para H2	Media
ID tubería	Alfanumérico	Identificador único de la tubería o conducto. Campo común con H1 y H3	Alta
Fecha registro en H2	aaaa-mm-dd	Año, mes y día de registro de la tubería en H2	Media
Fecha fallo	aaaa-mm-dd	Año, mes y día de ocurrencia del fallo, si se conoce con certeza	Alta
Fecha reporte fallo	aaaa-mm-dd	Año, mes y día de reporte del fallo por vía telefónica o en campo, y que puede no ser la fecha en que se produjo el fallo	Baja
Material tubería	Texto	Material de la tubería en la que se produjo el fallo. Este valor puede no ser el que en H1 aparece para el mismo "ID tubería" debido a intervenciones por fallos o mantenimientos anteriores	Alta
Diámetro	real	Diámetro de la sección transversal de la tubería en la que se produjo el fallo, en mm. En caso de secciones rectangulares, altura de la sección de la tubería en la que se produjo el fallo, en mm. Este valor puede no ser el que en H1 aparece para el mismo "ID tubería" debido a intervenciones por fallos o mantenimientos anteriores	Alta
Dimensión adicional	real	En caso de secciones rectangulares, ancho de la sección de la tubería en la que se produjo el fallo, en mm. Este valor puede no ser el que en H1 aparece para el mismo "ID tubería" debido a intervenciones por fallos o mantenimientos anteriores	Alta
Tipo fallo	Alfanumérico	Identificador del tipo de fallo asociado a la incidencia por la cual se generó el registro	Alta
Origen fallo	Texto	Declaración sobre si el fallo se generó a partir de un proceso de deterioro natural, o si por el contrario fue provocado por un tercero	Alta
Material gráfico	Booleano	Afirmación sobre la existencia o no de fotos o videos que respaldan el diagnóstico de la incidencia	Media
ID material gráfico	Alfanumérico	En caso de existir material gráfico de respaldo al diagnóstico de la incidencia, identificador (o identificadores) de dicho material	Media
Propiedades afectadas directamente por el fallo	Entero	Número de propiedades que han sufrido inundaciones, daños físicos de otro tipo, o afectadas por interrupciones en el tráfico a causa del fallo	Alta
Propiedades afectadas indirectamente por	Entero	Número de propiedades afectadas en la calidad del servicio por el fallo en la tubería	Media

el fallo			
Responsable atención incidencia	Texto	Persona o grupo encargado del diagnóstico de la incidencia	Alta
Comentarios sobre la incidencia	Texto	Datos o descripciones particulares y relevantes sobre el proceso de diagnóstico de la incidencia	Media

6.7.3 Hoja de intervenciones (H3)

La hoja de intervenciones consigna la información relativa a las decisiones adoptadas tras la ocurrencia de un fallo, o bien la información para llevar a cabo acciones programadas de mantenimiento (Tabla 119). Como se mencionó anteriormente, esta hoja puede ser fusionada con la hoja H2, si bien debe tenerse en cuenta que una intervención no siempre estará asociada a una incidencia (tal es el caso de las acciones de mantenimiento preventivo). Topológicamente, y al igual que en casos anteriores, el campo "ID tubería" sirve de conexión entre esta tabla y H1 o H2.

Tabla 119. Campos de la hoja de intervenciones

Hoja de intervenciones (H3)			
Campo	Formato	Descripción	Criticidad
ID registro en H3	Alfanumérico	Identificador de registro en serie para H3	Media
ID tubería	Alfanumérico	Identificador único de la tubería o conducto. Campo común con H1 y H2	Alta
Fecha registro en H3	aaaa-mm-dd	Año, mes y día de registro de la tubería en H3	Media
Fecha de la intervención	aaaa-mm-dd	Año, mes y día de comienzo de la intervención elegida	Baja
Mantenimiento	Booleano	Especifica si el registro se refiere a un caso de mantenimiento. El caso contrario implica la existencia de una incidencia asociada en H2 para ese mismo "ID tubería"	Media
Tipo intervención	Alfanumérico	Tipo de intervención escogida: sustitución, renovación, rehabilitación o refuerzo	Alta
Material	Texto	Material de la tubería nueva o del recubrimiento utilizado para la renovación o rehabilitación de la conducción que presentó el fallo o que fue objeto de mantenimiento	Alta
Diámetro	real	Diámetro de la sección transversal del de la tubería nueva, recién renovada o rehabilitada, en mm. En caso de secciones rectangulares, altura de la sección de la tubería, en mm.	Alta
Dimensión adicional	real	En caso de secciones rectangulares, ancho de la sección de la tubería nueva, recién renovada o	Alta

Duración de la reparación	Entero	rehabilitada, en mm Tiempo en minutos transcurrido desde el comienzo hasta el final de la intervención	Baja
Abonados afectados por la intervención	Entero	Número de propiedades afectadas por la suspensión del servicio para ejecutar la intervención	Alto
Costo de la reparación	Real	Costo total de la intervención realizada	
Responsable intervención	Texto	Persona o grupo encargado de la ejecución de la intervención	Alta
Comentarios sobre la intervención	Texto	Datos o descripciones particulares y relevantes sobre la intervención realizada	Media

6.8 Indicadores de desempeño fundamentales

Dentro del grupo de indicadores de desempeño propuesto por la Asociación Internacional del Agua, IWA (Alegre y otros, 2006), los que en términos generales evalúan la disponibilidad del recurso hídrico y las pérdidas de agua en los abastecimientos, se citan en la Tabla 120:

Tabla 120. Indicadores de desempeño de la IWA comúnmente utilizados para evaluar la disponibilidad y las pérdidas de agua en un sistema de abastecimiento

Indicadores de disponibilidad y pérdidas de agua	
Indicador [nomenclatura]: definición	Unidades
Recursos hídricos:	
Ineficiencia en el uso de los recursos hídricos [WR1]: (pérdidas reales durante el periodo de evaluación / volumen de entrada al sistema durante el periodo de evaluación) x 100	%
Disponibilidad de los recursos hídricos [WR2]: ((volumen de entrada al sistema durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / (capacidad anual de extracción de recursos propios + disponibilidad anual de agua importada)) x 100	%
Disponibilidad de recursos hídricos propios [WR3]: ((volumen de entrada al sistema durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / capacidad anual de extracción de recursos propios) x 100	%
Agua abastecida reusada [WR4]: (agua abastecida reusada durante el periodo de evaluación / volumen de entrada al sistema durante el periodo de evaluación) x 100	%
Indicadores financieros de pérdidas de agua:	
Agua que no produce ingresos, por volumen [FI46]: (agua que no genera ingresos / volumen de entrada al sistema durante el periodo de evaluación) x 100	%
Agua que no produce ingresos, por costo [FI47]: (valoración de los componentes hídricos que no generan ingresos / costos acumulados de funcionamiento durante el periodo de evaluación) x 100	%
Indicadores operativos de pérdidas de agua:	
Pérdidas de agua por acometida [OP23]: (pérdidas de agua durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de acometidas de servicio	m ³ /aco/año
Pérdidas de agua por longitud de tubería principal [OP24]: (pérdidas de agua	m ³ /km/año

durante el periodo de evaluación / periodo de evaluación) / longitud de tuberías principales	
Pérdidas aparentes por acometida [OP25]: (pérdidas aparentes / (volumen de entrada al sistema - agua exportada)) x 100	%
Pérdidas aparentes por volumen de entrada al sistema [OP26]: (pérdidas aparentes durante el periodo de evaluación / volumen de entrada al sistema) x 100	%
Pérdidas reales por acometida [OP27]: pérdidas reales durante el periodo de evaluación x 1000 / (número de acometidas de servicio x número de horas con el sistema presurizado durante el periodo de evaluación / 24)	l/aco/(día con sistema presurizado)
Pérdidas reales por longitud de tubería principal [OP28]: pérdidas reales durante el periodo de evaluación x 1000 / (número de tuberías principales x número de horas con el sistema presurizado durante el periodo de evaluación / 24)	l/aco/(día con sistema presurizado)
Índice de fuga estructural [OP29]: pérdidas reales [OP27] / nivel mínimo de pérdidas reales técnicamente alcanzable (con el sistema presurizado)	(adimens.)
Agua no medida [OP39]: ((volumen de entrada al sistema - volumen consumido medido) / volumen de entrada al sistema durante el periodo de evaluación) x 100	%

Aquellos indicadores propuestos por la IWA (Alegre y otros, 2006) referidos a la calibración de instrumentos, la inspección y renovación de la red, y su frecuencia de fallos, de uso generalizado en empresas de abastecimiento, son (Tabla 121):

Muchos de los indicadores utilizados en redes de abastecimiento pueden ser también implementados en el caso de las redes de saneamiento (es el caso de la mayoría de los indicadores de rehabilitación y de los indicadores económicos y financieros).

En función del tipo de variables que lo componen, cada gestor está en la capacidad de decidir si un indicador de gestión de redes de abastecimiento es extrapolable a redes de saneamiento. Sin embargo, para este último tipo de redes existen indicadores que por su naturaleza resultan exclusivos (ejemplos de ello son algunos indicadores de tipo ambiental).

Tabla 121. Indicadores de desempeño de la IWA comúnmente utilizados para evaluar la calibración de instrumentos, la inspección, la renovación y la frecuencia de fallos en un sistema de abastecimiento

Indicadores de calibración, inspección, renovación y fallos

Indicador [nomenclatura]: definición	Unidades
Calibración de instrumentos: Calibración de caudalímetros del sistema [OP7]: (número de calibraciones a caudalímetros del sistema llevadas a cabo durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número total de caudalímetros instalados temporal o permanentemente en el sistema	calibraciones/caud./año

Reemplazo de caudalímetros [OP8]: (número de medidores de agua a los usuarios, o contadores, reemplazados durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de medidores de agua a los usuarios, o contadores	reemplazos/caud./año
Calibración de medidores de presión [OP9]: (número de calibraciones a medidores de presión llevadas a cabo durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de medidores de presión temporal o permanentemente instalados en el sistema	calibraciones/med./año
Calibración de medidores de nivel de agua [OP10]: (número de calibraciones a medidores de nivel de agua llevadas a cabo durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de medidores de nivel de agua temporal o permanentemente instalados en el sistema	calibraciones/med./año
Inspección y mantenimiento de Infraestructura: Inspección de la red [OP3]: ((longitud de tuberías de transmisión y distribución donde al menos las válvulas y otros accesorios fueron inspeccionados durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud de tuberías principales) x 100	%/año
Control de fugas [OP4]: ((longitud de tuberías principales sujetas a control activo de fugas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud de tuberías principales) x 100	%/año
Reparaciones generadas tras un control activo de fugas [OP5]: (número de fugas detectadas y reparadas mediante control activo de fugas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / (longitud de tuberías principales x 100)	nº/100 km/año
Fallos: Fallos en bombas [OP30]: (para todas las bombas, suma del número de días durante el periodo de evaluación cuando las bombas se encuentran fuera de servicio x 365) / número total de bombas)	días/bomba/año
Fallos en tuberías principales [OP31]: (número de fallos en tuberías principales durante el periodo de evaluación (incluyendo fallos en válvulas y accesorios) x 365 / periodo de evaluación) / (longitud total de tuberías principales x 100)	nº/100 km/año
Fallos en acometidas de servicio [OP32]: (número total de fallos en acometidas de servicio durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / (número de acometidas de servicio x 1000)	nº/1000 aco/año
Rehabilitación tuberías principales, válvulas y acometidas: Rehabilitación de tuberías principales [OP16]: ((longitud de tuberías principales rehabilitadas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud de tuberías principales) x 100	%/año
Renovación de tuberías principales [OP17]: ((longitud de tuberías principales renovadas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud de tuberías principales) x 100	%/año
Reemplazo de tuberías principales [OP18]: ((longitud de tuberías principales reemplazadas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud de tuberías principales) x 100	%/año
Reemplazo de válvulas [OP19]: ((número de válvulas principales reemplazadas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número total de válvulas principales) x 100	%/año
Rehabilitación de acometidas de servicio [OP20]: ((número de acometidas de servicio reemplazadas o renovadas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número total de acometidas de servicio) x 100	%/año

Reemplazo de bombas [OP22]: $((\text{potencia nominal total de bombas reemplazadas durante el periodo de evaluación} \times 365 / \text{periodo de evaluación}) / \text{potencia nominal total de bombas}) \times 100$ %/año

Siguiendo con la propuesta de la IWA, esta vez para redes de saneamiento (Matos y otros, 2003), se listan a continuación algunos indicadores que resultan de uso frecuente, o que bien son altamente relevantes para compañías de este tipo.

En primera instancia (Tabla 122) se incluye una selección de los principales indicadores ambientales. Ellos definen el grado de cumplimiento de los estándares enfocados a la reducción del impacto ambiental causado por la disposición de las aguas residuales en el medio natural.

Tabla 122. Indicadores ambientales para redes de saneamiento

Indicadores ambientales	
Indicador [nomenclatura]: definición	Unidades
Aguas residuales:	
Conformidad de las plantas de tratamiento respecto a los acuerdos sobre vertidos [wEn1]: (población equivalente cuyo servicio por las plantas cumple con los estándares de calidad del efluente) / población equivalente servida por las plantas) x 100	%/año
Volumen rebosado de vertidos intermitentes [wEn4]: (volumen total rebosado durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de rebosaderos en la fecha de referencia	$(\text{m}^3/\text{rebosadero/año})$
Vertidos rebosados relacionados con lluvias [wEn5]: (volumen total de vertidos rebosados / volumen de lluvias) x 100	%/año
Residuos sólidos:	
Producción de fangos en la planta de tratamiento [wEn6]: (fango producido en las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / población equivalente servida por las plantas de tratamiento x 1000	(kg de fango/p.e./año)
Utilización de fangos [wEn7]: ((fango utilizado en agricultura, producción de materiales, sembrado de bosques, etc.) / fango manejado en la plantas) x 100	(%)
Disposición de fangos [wEn8]: ((fango dispuesto en el basurero más fango sobrante del procesos de utilización) / fango manejado en la plantas) x 100	(%)
Sedimentos provenientes de alcantarillas [wEn12]: (peso drenado de sedimentos removidos de las alcantarillas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas en la fecha de referencia	(ton/km de alcantarilla/año)
Desechos sólidos provenientes de trampas [wEn14]: (peso drenado de desechos removidos en plantas de tratamiento y estaciones de bombeo durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas en la fechas de referencia	(ton/km de alcantarilla/año)

Los indicadores físicos (Tabla 123) evalúan la capacidad instalada del sistema para dar abasto a la demanda de agua a tratar (Matos y otros, 2003). A diferencia de los indicadores de calidad del servicio, los indicadores físicos no se encargan de evaluar hasta qué punto se ha logrado la satisfacción de las necesidades de los abonados.

Los indicadores operacionales, a través de una valoración del estado de los diferentes elementos del sistema, se enfocan en brindar una idea de la condición de la red en lo relativo a su operación y mantenimiento.

Tabla 123. Indicadores físicos y operacionales para redes de saneamiento

Indicadores físicos y operacionales	
Indicador [nomenclatura]: definición	Unidades
Tratamiento de aguas residuales:	
Utilización de tratamientos preliminares [wPh1]: (máxima suma del volumen tratado de aguas residuales en plantas de tratamiento preliminar / suma de las capacidades máximas diarias de todas las plantas de tratamiento) x 100	%
Utilización de tratamientos primarios [wPh2]: (máxima suma del volumen tratado de aguas residuales en plantas de tratamiento primario / suma de las capacidades máximas diarias de todas las plantas de tratamiento) x 100	%
Utilización de tratamientos secundarios [wPh3]: (máxima suma del volumen tratado de aguas residuales en plantas de tratamiento secundario / suma de las capacidades máximas diarias de todas las plantas de tratamiento) x 100	%
Utilización de tratamientos terciarios [wPh4]: (máxima suma del volumen tratado de aguas residuales en plantas de tratamiento terciario / suma de las capacidades máximas diarias de todas las plantas de tratamiento) x 100	%
Alcantarillas:	
Sobrecarga en alcantarillas por gravedad en tiempo seco [wPh5]: (longitud de alcantarillas por gravedad donde ha ocurrido sobrecarga en tiempo seco durante el periodo de evaluación / longitud total de alcantarillas) x 100	%
Sobrecarga en alcantarillas por gravedad en tiempo de lluvias [wPh6]: (longitud de alcantarillas por gravedad donde ha ocurrido sobrecarga en tiempo de lluvias durante el periodo de evaluación / longitud total de alcantarillas) x 100	%
Inspección y mantenimiento:	
Limpieza de alcantarillas [wOp2]: ((longitud de alcantarillas que se han dejado limpias durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas) x 100	(%/año)
Inspección de cámaras ("manholes") [wOp3]: (número de cámaras inspeccionadas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número total de cámaras	(cámaras/año)
Entradas, infiltraciones, pérdidas:	
Entradas [wOp31]: (volumen de agua que entra a la red de saneamiento desde conexiones incorrectas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas	m ³ /km/año

Infiltraciones [wOp32]: (volumen de agua del subsuelo que entra a la red de saneamiento x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas	m ³ /km/año
Pérdidas [wOp33]: (volumen de fugas de la red de saneamiento al subsuelo / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas	m ³ /km/año
Fallos:	
Bloqueos de alcantarillas [wOp34]: ((número de bloqueos ocurridos en alcantarillas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas) x 100	(Nº/100 km de alcantarillas/año)
Inundaciones ocasionadas por alcantarillas [wOp37]: ((número de inundaciones relacionadas con alcantarillas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas) x 100	(Nº/100 km de alcantarillas/año)
Colapsos de alcantarillas [wOp40]: ((número de colapsos ocurridos en alcantarillas durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / longitud total de alcantarillas) x 100	(Nº/100 km de alcantarillas/año)

Los indicadores de calidad del servicio, a través de diferentes medidas que cuantifican el cubrimiento de las actividades del sistema en la población, dan una idea del grado de servicio que se le brinda al cliente (ya no solamente de la capacidad potencial que posee para hacerlo, y que se mide mediante los indicadores físicos).

Este tipo de indicadores es especialmente relevante en la fase del plan básico de actuación encargada de asegurar una mejora continua de los procesos (Tabla 124).

Tabla 124. Indicadores de calidad del servicio para redes de saneamiento

Indicadores de calidad del servicio	
Indicador [nomenclatura]: definición	Unidades
Población servida:	
Población residente conectada al sistema de alcantarillado [wQS1]: (población residente conectada al sistema de alcantarillado gestionado por la empresa / población residente) x 100	%
Población residente atendida por las plantas de tratamiento de aguas residuales [wQS2]: (población atendida por las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa / población residente) x 100	%
Población residente no atendida [wQS4]: (población residente para la cual sus aguas residuales no son ni recolectadas ni tratadas / población residente) x 100	%
Aguas residuales tratadas:	
Agua residual tratada en las plantas de tratamiento del sistema [wQS5]: (volumen de agua residual tratada en las plantas gestionadas por la empresa / total de aguas recolectadas) x 100	%
Tratamiento preliminar [wQS6]: (volumen de agua residual que recibe sólo tratamiento preliminar en las plantas gestionadas por la empresa / total de aguas recolectadas) x 100	%

Tratamiento primario [wQS7]: (volumen de agua residual que recibe sólo tratamiento primario en las plantas gestionadas por la empresa / total de aguas recolectadas) x 100	%
Tratamiento secundario [wQS8]: (volumen de agua residual que recibe tratamiento secundario en las plantas gestionadas por la empresa / total de aguas recolectadas) x 100	%
Tratamiento terciario [wQS9]: (volumen de agua residual que recibe tratamiento terciario en las plantas gestionadas por la empresa / total de aguas recolectadas) x 100	%
Inundaciones:	
Inundaciones en propiedades generadas por alcantarillas en tiempo seco [wQS10]: ((número de propiedades afectadas por inundaciones generadas por alcantarillas en tiempo seco durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de propiedades conectadas al sistema) x 1000	nº/1000 propiedades/año
Inundaciones en propiedades generadas por alcantarillas en tiempo de lluvias [wQS11]: ((número de propiedades afectadas por inundaciones generadas por alcantarillas en tiempo de lluvias durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de propiedades conectadas al sistema) x 1000	nº/1000 propiedades/año
Inundaciones en propiedades generadas por sistemas combinados en tiempo seco [wQS12]: ((número de propiedades afectadas por inundaciones generadas por sistemas combinados en tiempo seco durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de propiedades conectadas al sistema) x 1000	nº/1000 propiedades/año
Inundaciones en propiedades generadas por sistemas combinados en tiempo de lluvias [wQS13]: ((número de propiedades afectadas por inundaciones generadas por sistemas combinados en tiempo de lluvias durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / número de propiedades conectadas al sistema) x 1000	nº/1000 propiedades/año
Interrupciones:	
Interrupción de la recogida y transporte de aguas residuales [wQS15]: (para todo el periodo de evaluación, total de propiedades afectadas por interrupción del servicio multiplicadas por la duración de cada interrupción en horas / número de propiedades conectadas) x 100	%
Quejas:	
Total de quejas [wQS19]: ((número total de quejas relacionadas con el estado del sistema de saneamiento durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / población residente) x 1000	nº/1000 habitantes/año
Quejas por bloqueos [wQS20]: ((número de quejas relacionadas con bloqueos durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / población residente) x 1000	nº/1000 habitantes/año
Quejas por inundaciones [wQS21]: ((número de quejas relacionadas con inundaciones durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / población residente) x 1000	nº/1000 habitantes/año
Quejas por incidentes de contaminación [wQS22]: ((número de quejas relacionadas con incidentes de contaminación durante el periodo de evaluación x 365 / periodo de evaluación) / población residente) x 1000	nº/1000 habitantes/año

6.9 Balances hídricos: enfoque hacia la autorización del consumo y enfoque hacia la medición del consumo

Una adecuada evaluación de la condición actual del sistema se obtiene mediante la correcta realización de un balance hídrico. El término “correcta” hace referencia al suficiente entendimiento de la terminología (definición y alcance de cada componente) del balance que se ha escogido. Un detallado análisis terminológico, y desde allí, una revisión de los diferentes tipos de balances se presenta en la tesis doctoral de Almandoz (Almandoz, 2002).

En esta tesis se propone el uso de dos tipos de balances, entendiendo que ambos son técnicamente los más coherentes con la realidad de un sistema de distribución de agua. De cada uno de ellos se presenta aquí una reseña que ilustra su naturaleza. La definición del término “pérdidas” constituye la piedra angular que da pie a la diferencia entre los dos enfoques de balance que a continuación se citan, si bien en ambos, tales pérdidas son presentadas en forma de volumen por año.

6.9.1 Balance hídrico enfocado hacia la autorización del consumo

Para la IWA (Hirner, 1998; Alegre y otros, 2006), el concepto de “pérdidas” busca englobar todos aquellos consumos que no han sido autorizados, que bien pueden ser “pérdidas reales” si se trata de volúmenes que físicamente han salido de la red antes de ser entregados al usuario final, o “pérdidas aparentes” si son debidas a consumos fraudulentos o a errores en la medición. La Figura 115 ubica los componentes de entrada y salida, así como los puntos de medición necesarios para llevar a cabo la implementación de este balance hídrico.

La cantidad de puntos de medición resulta variable en función de los puntos de división de caudal con que cuente la red. Ellos son necesarios, no sólo para saber cuánto caudal transcurre por cada tramo bifurcado, sino además para establecer las pérdidas reales ocurridas entre dos dispositivos.

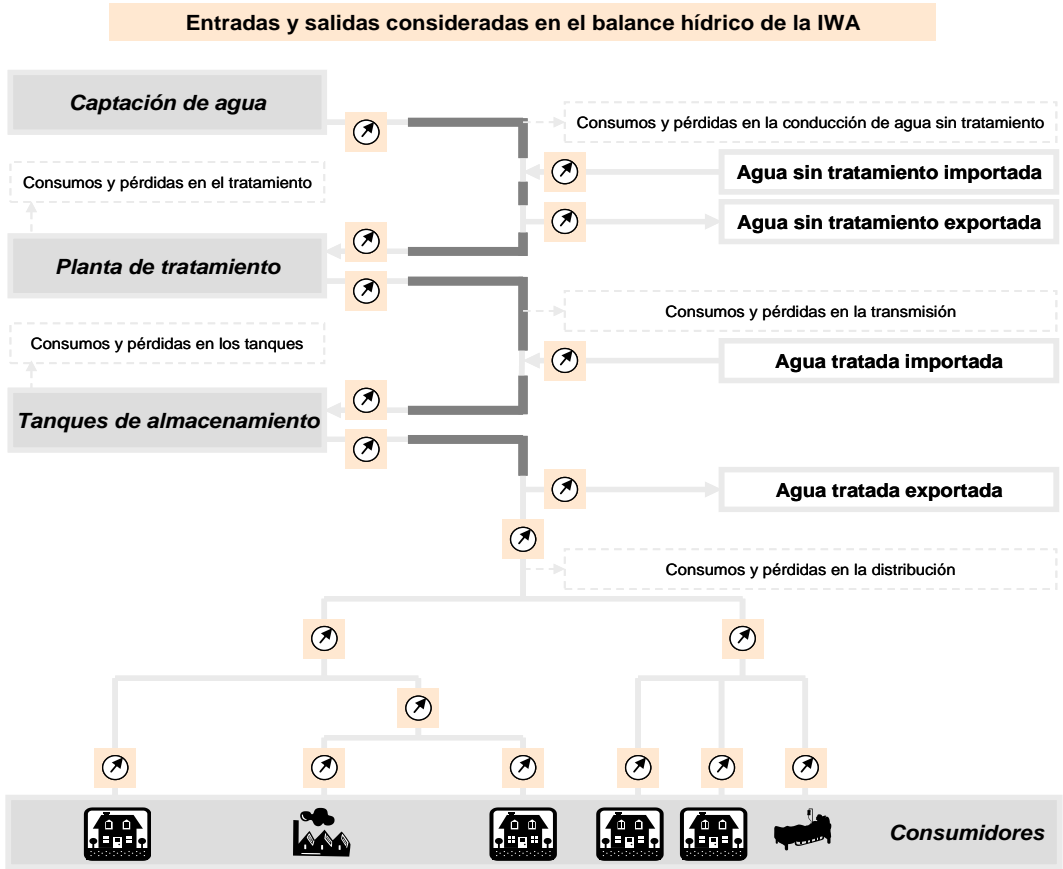


Figura 115. Puntos de medición, entradas y salidas características del balance hídrico propuesto por la IWA

Los componentes principales del balance, y que a su vez reúnen a otros menores, son:

- **Volumen de entrada al sistema:** es la cantidad de agua ingresada al sistema de abastecimiento durante el periodo de evaluación (generalmente correspondiente a un año). Resulta claro que este volumen de entrada es relativo a la zona sobre la cual se desea realizar el balance. En caso de no tratarse de toda la red, sino de un sector hidráulicamente aislable, el volumen de entrada se refiere a la suma del caudal inyectado por las posibles entradas a dicho sector.

- Consumo autorizado: volumen medido o no medido de agua suministrada a usuarios registrados o no registrados pero, en todo caso, autorizados.
- Pérdidas reales: derrames en tanques y fugas en las diferentes conducciones de agua tratada o no tratada y que van hasta los puntos de medición del usuario (no se incluyen pues, las pérdidas físicas que ocurren en el tramo de red ubicado más allá de los contadores y que transcurre hasta los diferentes puntos de consumo).
- Pérdidas aparentes: comprende los consumos que bajo ningún caso resultan autorizados, y además las inexactitudes generadas en el proceso de medición en los diferentes puntos donde esta práctica se realiza.
- Agua que no produce ingresos: se calcula por descarte de componentes, y comprende la diferencia entre el volumen inyectado y el volumen autorizado.

La Figura 116 detalla los diferentes aportes (en $\text{m}^3/\text{año}$) que conforman el balance enfocado a la autorización de consumos.

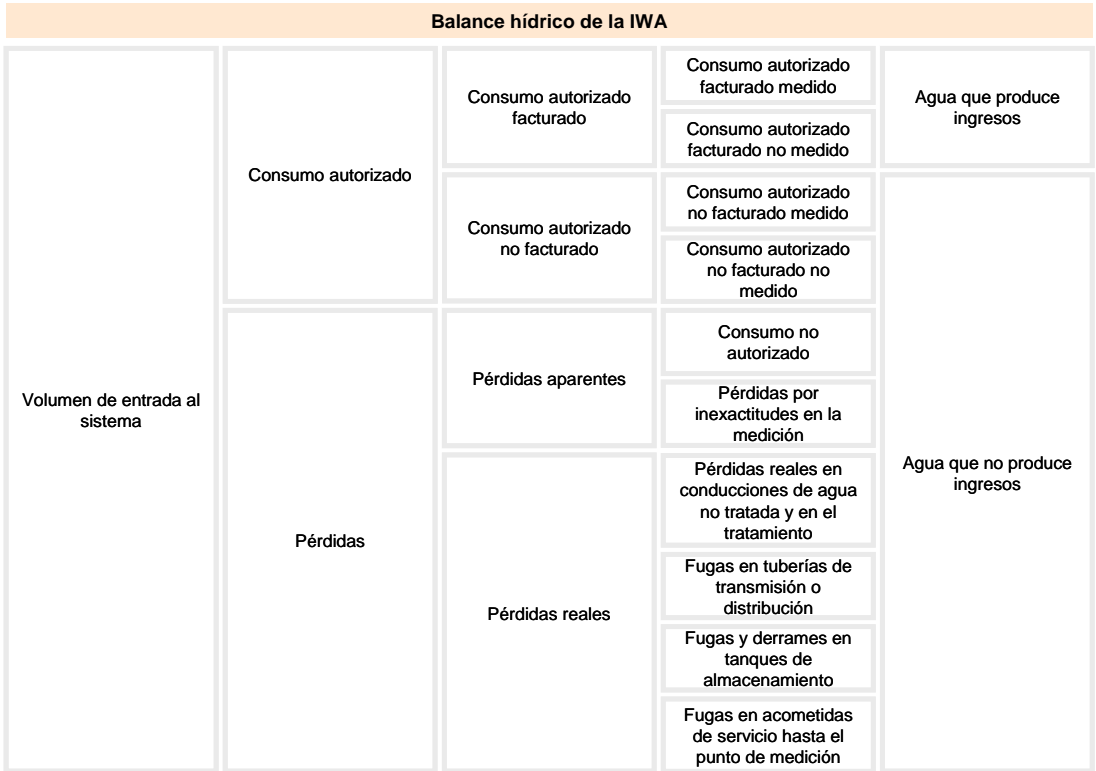


Figura 116. Estructura del balance hídrico enfocado a la autorización de consumos

6.9.2 Balance hídrico enfocado hacia la medición del consumo

Este enfoque (Almandoz, 2002) propone una estructura arbórea, que abarca, para un periodo de tiempo determinado, todos los volúmenes posibles de una red (Q) en un nivel general, disgregándolos posteriormente en aquellos que han sido registrados (Q_r) y los restantes de los cuales no se tiene control (Q_i), y que constituyen el nivel denominado “eficacia global de la gestión”.

Aquí se nota ya una diferencia importante con el balance que propone la IWA (Alegre y otros, 2006), pues el de esta institución define las “pérdidas” como la suma de los volúmenes que no fueron autorizados. Dicha autorización no es una acción cuantificable, como sí lo es la medición. El concepto de autorización, dada su naturaleza, no parece encajar con suficiencia en un balance de tipo técnico, aunque posee una validez implícita en el ámbito de la gestión integral del sistema.

El siguiente nivel considerado en el balance enfocado hacia la medición de los consumos recibe el nombre de “estado de la red”. Su objetivo es diferenciar la cantidad de agua incontrolada por falta de medición, o por inadecuada medición, pero que en efecto ha sido consumida (Q_{ic}), de aquella que se ha fugado de la red (Q_{if}), y que constituye las llamadas “pérdidas físicas”.

Un nivel más bajo en el árbol de balance, y por ello más específico que el anterior, se encuentra el llamado “nivel de eficacia en la medida”, y supone la disgregación del volumen incontrolado consumido en sus dos posibles componentes: la que corresponde a una falta de control porque no se mide adecuadamente (Q_{ice}), y la que no se controla porque no se tiene un dispositivo medidor instalado en su punto de entrega (Q_{ica}).

Dado que este último aporte resulta imposible de cuantificar sin caer en estimaciones, la tarea fundamental se centra en hacer un exhaustivo análisis de la base de datos del parque de contadores para establecer las curvas de consumo características de cada tipo de abonado y su error de medida asociado, con el fin de calcular el caudal no medido debido a esta causa.

Por último, y alcanzando el nivel de desagregación mayor, se incluye el “nivel de control de acometidas”. En éste (el nivel más bajo del árbol) sí se presenta una semejanza con el enfoque de balance propuesto por la IWA, dado que se considera el concepto de autorización, aunque en este caso para medir o no el consumo (no constituye una autorización para consumir). En efecto, se divide el volumen total no controlado dado que no se tiene medidor alguno instalado, en dos cantidades: la que consumen los usuarios que poseen autorización para no tener un contador instalado y funcionando (Q_{ical}), y la que, ilegalmente, se consume sin medirse (Q_{icai}).

La Figura 117 representa la estructura arbórea ya mencionada, y ubica en cada nivel considerado los dos volúmenes que lo conforman.

En el Anexo II se definen matemáticamente los indicadores complementarios a aquellos que Almandoz presenta, y que son utilizados para caracterizar la gestión técnico-administrativa de la red. En este mismo sentido, estos indicadores complementarios sirven para caracterizar el grado de afectación de dicha gestión técnico-administrativa.

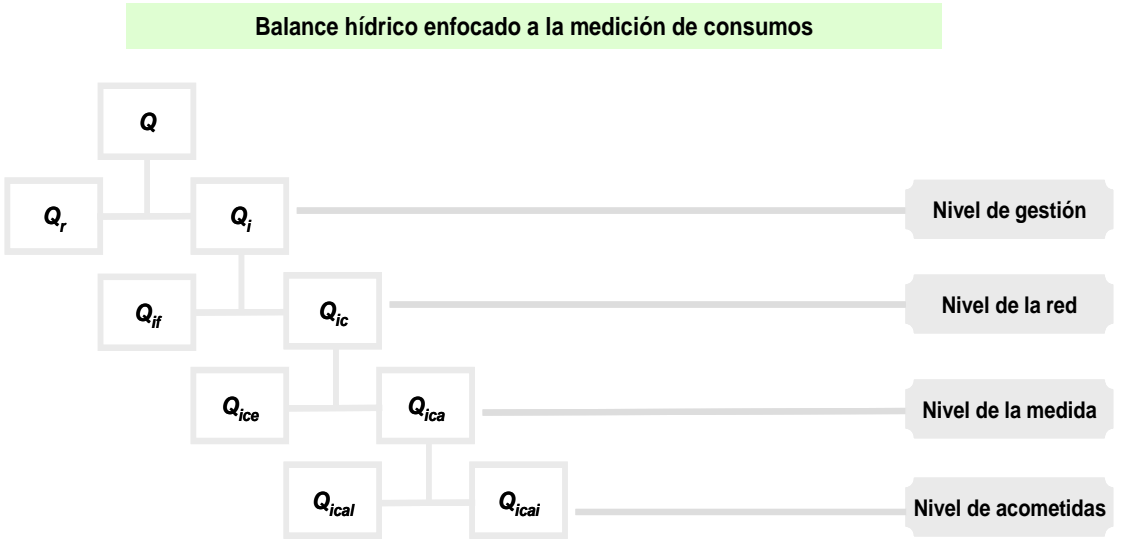


Figura 117. Niveles y componentes del balance hídrico de una red de abastecimiento enfocada a la medición de consumos

Capítulo 7

***Sistematización de la metodología
para determinación de prioridades de
intervención mediante lógica difusa***

A continuación se expone la estructura general que tiene el código escrito en Visual Basic para Excel para la versión de redes de abastecimiento, y que integra en varios módulos todas las etapas que han sido expuestas en el capítulo de Lógica Difusa.

Posteriormente se describe el procedimiento general que debe seguirse para obtener una lista priorizada de tuberías o sectores con base en su necesidad de intervención. En este punto se muestran algunas capturas de pantalla que pueden ilustrar al lector sobre los diferentes pasos del proceso que se sigue en la aplicación. Por último se hace un análisis sobre las bondades y posibles mejoras de esta herramienta, que en sí misma constituye un aporte más de esta tesis.

El objetivo principal de la aplicación consiste en sistematizar el proceso de aplicación de la Lógica Difusa para determinar las necesidades de intervención de las tuberías de la red. Esta aplicación informática, si bien está dirigida principalmente a redes de abastecimiento, también puede utilizarse, con adaptaciones menores en su código de ejecución, para priorizar tuberías de redes de saneamiento. La herramienta que aquí se describe incluye otros productos adicionales que complementan al objetivo principal y que en su conjunto integran el informe final que se obtiene.

La intención primordial de este capítulo consiste en ilustrar al lector sobre la forma en que se enfrentó el proceso de sistematización de la propuesta metodológica principal de esta tesis, con el propósito subyacente de animarlo a crear una similar para su propio sistema. Por ello se describen los módulos principales desarrollados, sus respectivas subrutinas, y así mismo, la serie general de pasos que el usuario debe seguir para conseguir los resultados finales. No se pretende presentar un paquete informático comercial, y tampoco afirmar que se ha alcanzado un nivel tal.

7.1 Estructura modular del código informático

En los numerales siguientes se describen los módulos más importantes del código informático que le da vida a la aplicación. En el subtítulo correspondiente, el nombre que aparece entre corchetes corresponde con el nombre asignado al módulo dentro de dicho código. En la parte final de la descripción de cada módulo se listan las rutinas que lo caracterizan. El nombre de éstas describe su objetivo principal.

7.1.1 Módulo de gestión de bases de datos externas [CodODBC]

Este módulo se encarga de dirigir los registros provenientes de diferentes bases de datos externas a una base de datos única. Una vez queda conformada la base de datos única, el módulo organiza los registros de manera tal que determina el número de fallos que ha tenido cada tubería.

El módulo utiliza una hoja temporal de incidencias, que se actualiza cada vez que se ingrese nueva información a la base de datos única, y donde automáticamente se calcula los resultados para el campo número de fallos/km/año asociado a cada identificador.

El usuario no dispone autorización de modificación para esta información, a no ser que se especifique lo contrario accediendo al interior del código mediante una clave de usuario, y una vez en él, haciendo visible la hoja que la contiene.

Las principales subrutinas (aunque no todas) de este módulo son:

- Actualizar formulario general ODBC
- Examinar archivos externos
- Captar nombre de archivo externo
- Elegir proceso según tipo de extensión de archivo
- Cargar encabezados
- Generar identificador para base de datos única
- Actualizar tablas dinámicas existentes
- Contar fallos por identificador de tuberías

7.1.2 Módulo de Lógica Difusa [CodMatematicaDifusa]

Este módulo es el más importante de toda la aplicación, y se encarga de sistematizar los tres pasos fundamentales en los cuales se materializa la adaptación de la Lógica Difusa a la renovación de tuberías.

En primera instancia, el módulo almacena y procesa las preferencias del gestor experto mediante la construcción de los diferentes conjuntos difusos relativos a cada criterio, y también mediante la configuración de las matrices de agregación.

Posteriormente, se encarga de calcular todos los vectores que se generan tras la evaluación de los registros contenidos en la base de datos única construida en el módulo anterior, al proyectarlos sobre los conjuntos difusos construidos.

Por último, este módulo se encarga de escoger las alturas mencionadas en el proceso de inferencia de Mamdani, alturas que luego se proyectan en el conjunto difuso de salida (tendencia a la falla). A continuación, se calcula el punto defuzificado característico de dicha tendencia para cada tubería, para lo cual la aplicación hace uso del método del Centro De Suma, el cual procesa el área difusa final y la convierte en un solo valor representativo.

Las subrutinas más representativas de este módulo son:

- Cargar registros para fuzificar
- Llamar formulario difusos
- Establecer escalar para fuzificar
- Fuzificar valores puntuales
- Generar gráfica de números difusos
- Eliminar registros difusos repetidos
- Escoger y cargar hoja difusos
- Borrar hoja difusos 1
- Borrar hoja difusos 2
- Borrar hoja difusos 3
- Copiar difusos criterio 1 en hoja difusos 1
- Copiar difusos criterio 1 en hoja difusos 3
- Copiar difusos criterio 2 en hoja difusos 2
- Copiar difusos criterio 2 en hoja difusos 3
- Copiar difusos criterio 3 en hoja difusos 1
- Copiar difusos criterio 3 en hoja difusos 2
- Copiar difusos criterio 3 en hoja difusos 3
- Agregar criterio 1 y criterio 2
- Agregar criterio 2 y criterio 3
- Agregar criterio 1, criterio 2 y criterio 3

- Defuzificar
- Defuzificar CUBOS
- Priorizar tuberías
- Priorizar tuberías CUBOS
- Priorizar sectores
- Priorizar sectores CUBOS
- Fuzificar valores puntuales AUTO
- Agregar AUTO
- Defuzificar AUTO
- Priorizar tuberías AUTO
- Priorizar sectores AUTO
- Ejecutar pasos previos y llamar a fuzificar AUTO

7.1.3 Módulo de informe de resultados [CodInforme]

Este módulo se encarga de configurar el informe final que contiene los resultados de priorización de tuberías y sectores (para las dos opciones que ofrece la aplicación y que se explican en detalle más adelante: matrices de agregación por parejas, y matrices de agregación que relacionan todos los criterios simultáneamente).

También se encarga de trasladar los datos generales de la empresa al encabezado del informe, y de insertar las gráficas descriptivas del inventario de tuberías que provienen desde las diferentes tablas dinámicas.

Por último, el módulo alberga las subrutinas que procesan los datos de entrada para el cálculo de los rendimientos característicos de la red, y así mismo para el cálculo de algunos de los indicadores incluidos en la aplicación y que ayudan a contextualizar los resultados (estos indicadores, de los tipos operacionales, económicos y financieros).

Las subrutinas que conforman el módulo son:

- Rellenar datos generales
- Calcular rendimientos
- Calcular indicadores de fallos
- Calcular indicadores adicionales

- Pegar gráficos
- Pegar gráficos AUTO
- Pegar lista de prioridad sectores AUTO
- Pegar lista de prioridad sectores CUBOS AUTO

7.2 Procedimiento general de uso de la aplicación

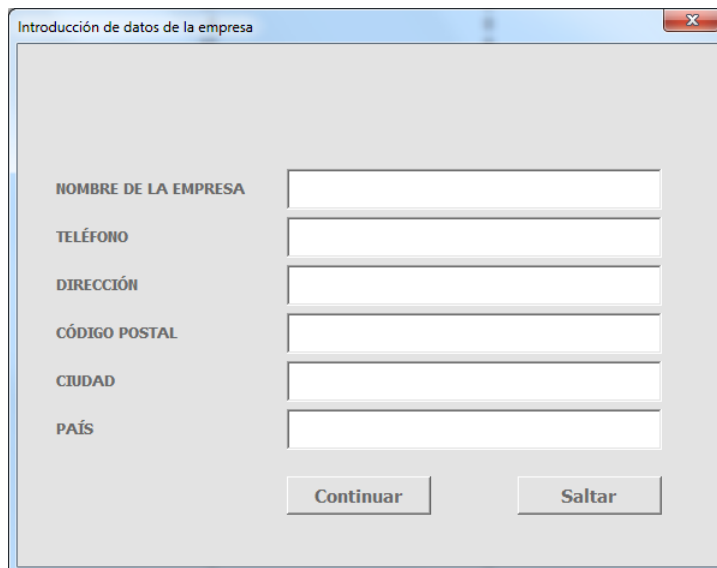
A continuación se describen los pasos y componentes de la interfaz gráfica de usuario (formularios) más importantes. En el subtítulo correspondiente, el nombre que aparece entre corchetes corresponde con el nombre asignado al formulario dentro del código informático. Aunque aquí se describen los más relevantes, el uso detallado de la aplicación puede generar pasos adicionales que se crean desde diferentes opciones que incluye la aplicación (y en consecuencia, pueden aparecer formularios adicionales) que no se explican en este texto.

7.2.1 Captura de datos externos y configuración de una base de datos única de trabajo

No todos los datos se encontrarán disponibles al momento de ejecutar el programa, y por tanto, la aplicación trabajará con los datos que sean ingresados y generará los resultados disponibles en función de la información suministrada. La captura de datos externos se realiza mediante dos formularios:

7.2.1.1 Formulario de datos generales de la empresa [FormDtosGenerales]

Este formulario se encarga de obtener y almacenar los datos generales de la empresa (nombre, teléfono, dirección, etc.), y así mismo datos sobre las variables básicas y de balance hídrico de la red (Figura 118). Su llenado no es obligatorio.



The image shows a software window titled "Introducción de datos de la empresa". The window contains a form with six input fields, each with a label to its left: "NOMBRE DE LA EMPRESA", "TELÉFONO", "DIRECCIÓN", "CÓDIGO POSTAL", "CIUDAD", and "PAÍS". Below the input fields are two buttons: "Continuar" and "Saltar". The window has a standard Windows-style title bar with a close button (X) in the top right corner.

Figura 118. Formulario de datos generales

7.2.1.2 Formulario de introducción de datos sobre variables básicas y de balance hídrico volumétrico [FormDtosRed]

Mediante esta parte de la interfaz se captan los datos relativos a usuarios y a abonados, a las cometidas del sistema, y a los diferentes volúmenes diarios característicos. Estos datos servirán posteriormente para calcular rendimientos y para realizar un balance hídrico volumétrico según la estructura de la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés). Una descripción informativa sobre algunas de las variables más importantes se obtiene mediante la acción de botones de información (Figura 119).

Introducción de datos: variables básicas y balance hídrico volumétrico

Abonados (nº)	<input type="text"/>		
Habitantes (nº)	<input type="text"/>		
Acometidas de servicio (nº) [C24]	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	Opción: Longitud promedio de acometida de servicio (m) <input type="text"/>
Longitud total de acometidas (km)	<input type="text"/>		
Longitud de tuberías principales (km) [C8]	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	
Presión promedio de operación (kPa) [D34]	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	
Volumen diario de entrada al sistema (m3) [A3]	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	
Volumen diario registrado en la red (m3)	<input type="text"/>		
Volumen diario incontrolado fugado de la red: pérdidas reales (m3) [A19]	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/>	Opción: % del volumen incontrolado total <input type="text"/>
Volumen diario consumido e incontrolado por errores de medición (m3)	<input type="text"/>		Opción: % del volumen incontrolado consumido <input type="text"/>
Vol. diario cons. e ilegal. inc.(ausencia no permitida de contador) (m3)	<input type="text"/>		Opción: % del volumen incontrolado por ausencia de contador <input type="text"/>

Figura 119. Formulario de introducción de datos básicos para realizar balance hídrico volumétrico

Este balance hace parte de un anexo al informe final que genera la aplicación, y ayuda a contextualizar los resultados obtenidos sobre necesidades de intervención. Por su naturaleza complementaria, su llenado no es obligatorio.

7.2.1.3 Formulario de transferencia de datos desde bases de datos externas [FormODBC1]

Este formulario tiene varias funciones:

En primera instancia, mediante el formulario se buscan y se abren bases de datos externas, al permitir navegar en todo el disco duro local y en el de otros equipos que se encuentren en red y a los que se tenga autorización de acceso.

Como segunda característica, una vez establecida la conexión entre las diferentes bases de datos externas y la aplicación, mediante listas desplegables el

programa utiliza el formulario para escoger y almacenar en campos específicos de la base de datos única de gestión de activos, los datos que a ellos corresponden pero que están dispersos en las bases externas.

Para ello, el formulario permite abrir una base de datos externa, tomar de ella el campo que se requiere para llenar su similar de la base de datos única, cerrar la base de datos externa, y abrir otra. Esto se hace las veces que sea necesario hasta llenar tantos campos de la base de datos única como sea posible según la información disponible en la empresa.

En tercer lugar, una vez que se han relacionado campos de las bases de datos externas con campos de la base de datos única, la aplicación permite que el usuario realice la transferencia de datos mediante este formulario (Figura 120).

Transferencia desde fuente externa

a: base datos **De: fuente ext.**

ID tubería (*)	<input type="text"/>	Profundidad	<input type="text"/>
X nudo inicial	<input type="text"/>	Tráfico	<input type="text"/>
Y nudo inicial	<input type="text"/>	Presión de servicio	<input type="text"/>
X nudo final	<input type="text"/>	Año instalación (aaaa) (*)	<input type="text"/>
Y nudo final	<input type="text"/>	Año fallo (aaaa)	<input type="text"/>
Sector (*)	<input type="text"/>	Origen del fallo (**)	<input type="text"/>
Red	<input type="text"/>	Tipo del fallo	<input type="text"/>
Clasificación	<input type="text"/>	Tipo de actuación	<input type="text"/>
Material	<input type="text"/>	Material tubería nueva	<input type="text"/>
Diámetro	<input type="text"/>	Responsable	<input type="text"/>
Longitud (*)	<input type="text"/>	Comentarios	<input type="text"/>
Suelo	<input type="text"/>		

(*) Campo obligatorio (**) Este campo es obligatorio para registros correspondientes a eventos de tipo incidencia (fallos, roturas, etc.)

Figura 120. Formulario para la transferencia de datos desde bases de datos externas

Los campos requeridos desde bases de datos externas, y que conforman la base de datos única, hacen referencia a los elementos lineales de la red (tuberías). Esta aplicación no determina las necesidades de intervención de otros elementos de la red diferentes a los anteriores.

Los campos incluidos en el formulario son aquellos relativos a la identificación y ubicación geográfica de la tubería, a las características de la red a la que pertenece el elemento, a las características físicas de la conducción, a las características del entorno, a sus condiciones de operación, y muy en especial, al historial de fallos e intervenciones que ha sufrido la estructura en su tiempo de operación.

Como cuarta característica, el formulario permite direccionar al usuario en una de dos direcciones: mediante el botón *opinión experta*, el usuario es dirigido al formulario del mismo nombre, donde podrá construir los diferentes conjuntos difusos característicos de los criterios que componen el espacio de decisión (hasta tres criterios para esta versión) y donde además podrá construir las matrices de agregación difusas.

Con el botón *ejecutar automático* el usuario evita la fase de construcción de números difusos y de agregación, al asumir un conjunto de valores por defecto que pueden ser actualizados en cualquier momento. Esta opción resulta muy práctica cuando solo se pretende actualizar las necesidades de intervención de las tuberías, sin necesidad de cambiar la información de entrada relativa a conocimiento experto.

7.2.2 Conformación de elementos de la Lógica Difusa [FormDtosDifusos]

Este formulario brinda la oportunidad de construir los conjuntos difusos que sirven para incluir al conocimiento experto que el decisor tiene sobre el comportamiento de los criterios a nivel local, en el proceso matemático de asignación de prioridades de intervención. En este formulario, para cada criterio involucrado el experto puede confeccionar conjuntos compuestos por 4 números difusos triangulares (Figura 121).

Aunque la forma triangular es la geometría predeterminada, desde el código informático, y bajo demanda del usuario, se pueden construir conjuntos de n números difusos trapezoidales, a través de sencillas modificaciones definidas mediante habilitación de instrucciones. Otras formas geométricas diferentes a las mencionadas, también pueden implementarse, aunque con modificaciones mayores al código.

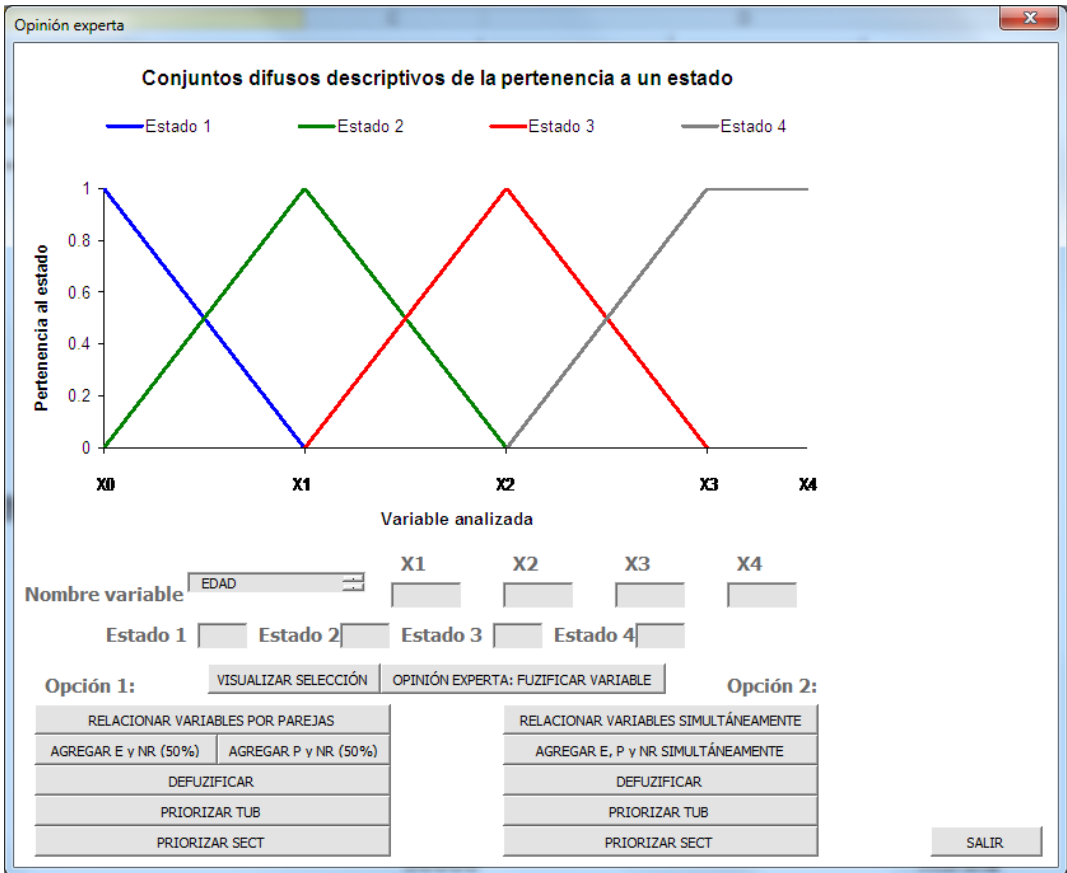


Figura 121. Formulario de conformación de Lógica Difusa

Para cada criterio involucrado en el estudio, una vez definidos los nombres y rangos de cada uno de los 4 números difusos que la describen, el siguiente paso a seguir en este formulario consiste en visualizar la selección hecha, con el fin de corroborar gráficamente que el comportamiento de la variable es coincide con las preferencias del experto (Figura 122). Esta visualización no constituye en sí un formulario, pues en ella no se pueden hacer modificaciones.

Específicamente, se deben verificar dos aspectos: el rango asignado a cada número del conjunto difuso, y el traslapo entre números difusos que representa la incertidumbre del decisor. Los dos aspectos mencionados aseguran que la gráfica corresponde efectivamente con lo observado desde la experiencia sobre el comportamiento local de dicho criterio. Este paso de verificación no es obligatorio, si bien resulta recomendable cada vez que se representa un criterio por primera

vez. Por último, el formulario cuenta con un botón de regreso al formulario de Lógica Difusa.

Una vez hecha la verificación sobre las preferencias del decisor en la conformación del conjunto difuso asociado a un criterio, el paso siguiente consiste en fuzificar. Esto significa que para cada criterio, se genera un vector de valores que corresponden con la evaluación de cada tubería en dicho conjunto difuso, según los datos que para ella se encuentran en el inventario de patrimonio de infraestructura. Este paso se hace mediante el botón *fuzificar*.

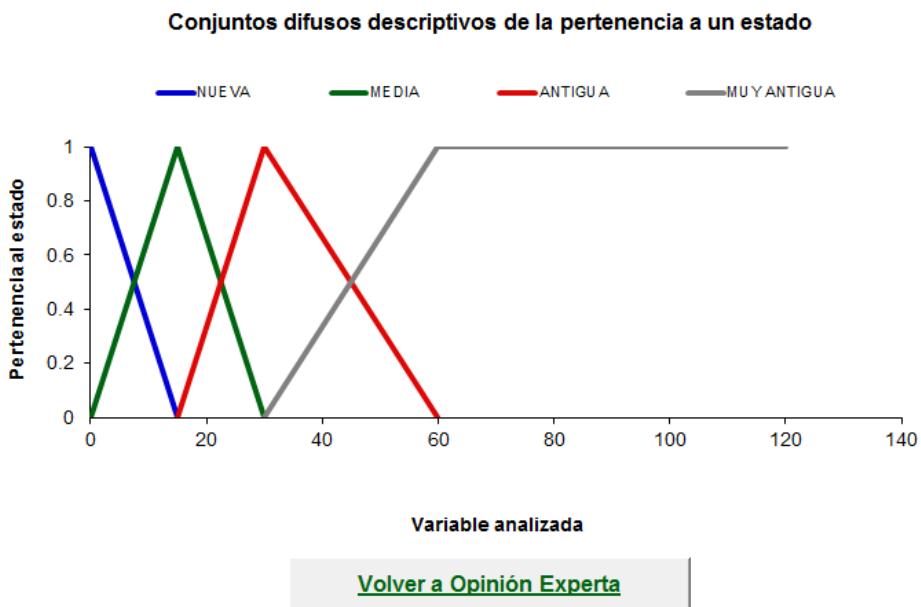


Figura 122. Visualización de la construcción de conjuntos difusos

De nuevo en el formulario de Lógica Difusa, el siguiente paso consiste en conformar las matrices de agregación. Para ello, el usuario tiene dos opciones:

En la primera se agregan los criterios por parejas. En consecuencia, se utilizan pesos de importancia para relacionar posteriormente los resultados de agregación, que han sido fijados por defecto, pero que se pueden cambiar desde el interior del código, bajo demanda del usuario.

En la segunda, se agregan todos los criterios simultáneamente, y consecuentemente, no se requiere asignación de pesos de importancia. La elección de una u otra depende del conocimiento más o menos claro que el usuario posee sobre la relación que a nivel local tienen los criterios.

7.2.3 Conformación de matrices de agregación y defuzificación

Obligatoriamente se debe elegir al menos una de las siguientes dos opciones.

7.2.3.1 Opción 1: matrices de agregación por parejas de criterios [FormMatrices]

Al oprimir el botón *relacionar variables por parejas*, el usuario es enviado a un formulario que en el caso de un espacio decisional conformado por tres criterios, contiene dos matrices de agregación que le permiten establecer relaciones entre los diferentes números difusos de ambos criterios (Figura 123).

La lista de desplazamiento para cada relación entre dos números difusos contiene 4 posibles selecciones (poco significativa, moderada, significativa y muy significativa) para definir la tendencia a la falla según los conocimientos del decisor (y desde ella, la prioridad a la intervención).

Estas cuatro alternativas en realidad constituyen números trapezoidales que conforman el conjunto difuso de salida, denominado “tendencia a la falla”, y que se incluye por defecto. También por demanda del usuario, y desde el interior del código informático, este conjunto difuso puede modificarse para incluir más o menos números, y para cambiar la forma geométrica y el rango de cada uno de ellos.

The screenshot shows a software window titled "Opinión experta" with a close button in the top right corner. It contains two forms for defining expert rules. The first form is titled "Una tubería de edad [X] y con un nivel de roturas/km/año [Y], presenta una tendencia a la falla según su envejecimiento". It has a header "[Y]= ROTURAS/KM/AÑO" and four columns: "Reducido", "Aceptable", "Elevado", and "Muyelevado". The rows are labeled "[X]= EDAD" with categories: "NUEVA", "MEDIA", "ANTIGUA", and "MUY". Each cell contains two dropdown menus with options "Poco significativa" and "Moderada". The second form is titled "Una tubería con presión de servicio media [X] y con un nivel de roturas/km/año [Y], presenta una tendencia a la falla según su condición de servicio...". It has a header "[Y]= ROTURAS/KM/AÑO" and the same four columns. The rows are labeled "[X]= PRESIÓN" with categories: "Baja", "Normal", "Alta", and "Muyalta". Each cell contains two dropdown menus with options "Poco significativa" and "Moderada". A "REGRESAR" button is located at the bottom right of the second form.

Figura 123. Formulario para la conformación de matrices de agregación por parejas de criterios

Una vez hechas las selecciones para todas las posibles combinaciones entre números difusos de los criterios, se debe regresar al formulario de Lógica Difusa para continuar el proceso.

7.2.3.2 Opción 2: matrices de agregación simultáneas [FormCUB1 hasta FormCUB8]

Esta opción permite relacionar los criterios que definen el espacio de decisión simultáneamente (mediante el botón *relacionar variables simultáneamente*). En el

caso de tres criterios, para la aplicación informática se decidió permitir la conformación de 8 unidades de decisión (o cubos). Cada una de ellas genera una matriz de agregación que debe ser diligenciada por el experto, mediante formularios como el de la Figura 124. Más o menos unidades de decisión pueden conformarse directamente desde el código, bajo demanda del usuario.

Al igual que en la primera opción, en esta se presentan cuatro posibles elecciones en las listas desplegables, que corresponden con números trapezoidales que conforman el conjunto difuso de salida “tendencia a la falla”, y que se incluye por defecto.

Opinión experta

Una tubería de edad [NUEVA], bajo una presión media de trabajo [BAJA] y con un número de fallos/km/año [REDUCIDO], presenta tendencia a la falla...

Una tubería de edad [NUEVA], bajo una presión media de trabajo [BAJA] y con un número de fallos/km/año [ACEPTABLE], presenta tendencia a la falla...

Una tubería de edad [NUEVA], bajo una presión media de trabajo [NORMAL] y con un número de fallos/km/año [REDUCIDO], presenta tendencia a la falla...

Una tubería de edad [NUEVA], bajo una presión media de trabajo [NORMAL] y con un número de fallos/km/año [ACEPTABLE], presenta tendencia a la falla...

Una tubería de edad [MEDIA], bajo una presión media de trabajo [BAJA] y con un número de fallos/km/año [REDUCIDO], presenta tendencia a la falla...

Una tubería de edad [MEDIA], bajo una presión media de trabajo [BAJA] y con un número de fallos/km/año [ACEPTABLE], presenta tendencia a la falla...

Una tubería de edad [MEDIA], bajo una presión media de trabajo [NORMAL] y con un número de fallos/km/año [REDUCIDO], presenta tendencia a la falla...

Una tubería de edad [MEDIA], bajo una presión media de trabajo [NORMAL] y con un número de fallos/km/año [ACEPTABLE], presenta tendencia a la falla...

REGRESAR A FORMATO DIFUSOS IR A CUBO DE DECISIÓN SIGUIENTE

Figura 124. Formulario para la conformación de matrices de agregación donde todos los criterios se relacionan simultáneamente

Debe tenerse cuidado en llenar todas las matrices de agregación, pues en el caso contrario se presentarán errores en la ejecución del código en el paso de defuzificación.

Una vez definidas las matrices de agregación por al menos una de las dos opciones, el siguiente paso consiste en agregar (ya sea por parejas o simultáneamente) los vectores que se generaron en el paso de fuzificación. Al oprimir el botón *agregar* (por parejas, o simultáneamente), la aplicación utilizará las

matrices conformadas para hallar las alturas a proyectar en el conjunto difuso de salida, mediante la adaptación del proceso de inferencia de Mamdani.

Después de ejecutado el paso anterior, para cualquiera de las dos opciones el siguiente paso consiste en defuzificar las áreas que se generan en el conjunto difuso de salida tras proyectar en él las alturas de la fase de agregación. El usuario no visualiza en ningún momento estas áreas, pues ello no es necesario.

Al oprimir el botón *defuzificar* la aplicación asigna a cada tubería un valor porcentual de tendencia a la falla entre 0 (nula tendencia a la falla) y 100 (máxima tendencia a la falla). Desde este valor asignado a cada elemento, se priorizan las tuberías y los sectores, mediante la organización de mayor a menor, de los valores para tuberías, y mediante valores promedio de los elementos que pertenecen a cada sector. Esto se logra con la acción de los botones *priorizar tub* y *priorizar sectores*, respectivamente.

7.2.4 Reporte de resultados

El reporte de resultados que se genera tras la aplicación de la Lógica Difusa en la hoja *informe* incluye un resumen de los sectores de la red que presentan mayor prioridad a la intervención según el valor promedio de tendencia a la falla de las tuberías que lo conforman. Este informe presenta los resultados de las dos opciones (agregación de criterios mediante parejas y pesos de importancia, y agregación simultánea de criterios).

Justo debajo de este resumen, el informe muestra en orden priorizado, para cada sector, las 10 tuberías con mayor necesidad de intervención, y así mismo, las 10 tuberías con menor necesidad de intervención (Figura 125).

Orden priorizado					Orden priorizado				
Sector	Ponderación	Longitud de red	% de la long. total	Sector	Ponderación	Longitud de red	% de la long. total		
1 ALCANTE5	46.8513	34.90253507	9.962253162	1 ALCANTE5	46.8151	34.90253507	9.9623		
2 ALCANTE9	46.4489	30.80330211	8.792206447	2 ALCANTE9	46.7802	30.80330211	8.7922		
3 ALCANTE8	45.4773	28.57804721	8.157059051	3 ALCANTE8	46.4766	28.57804721	8.1571		
4 ALCANTE7	42.6373	30.71324864	8.766502427	4 ALCANTE6	46.4519	27.95971207	7.9806		
5 ALCANTE4	42.2775	33.94751115	9.689600067	5 ALCANTE7	46.3954	30.71324864	8.7665		
6 ALCANTE10	41.2834	5.51445454	1.573994572	6 ALCANTE4	44.7540	33.94751115	9.6897		
7 ALCANTE6	40.9627	27.95971207	7.960558702	7 ALCANTE10	44.7520	5.51445454	1.5740		
8 ALCANTE1	35.2056	56.10487037	16.01404944	8 ALCANTE3	43.9837	43.73299523	12.4827		
9 ALCANTE3	35.0987	43.73299523	12.48273712	9 ALCANTE2	37.8371	56.09112561	16.5810		
10 ALCANTE2	33.6413	58.09112561	16.58098756	10 ALCANTE1	32.0125	56.10487037	16.0140		

Orden priorizado	ID tubería	Sector	Longitud	Resultado (Lóg Difusa + Ponderación)	Orden priorizado	ID tubería	Sector	Longitud	Resultado (Lóg Difusa cubos)
1 de 1000	40029	ALCANTE1	158.98957	52.22912838	1 de 1000	45074	ALCANTE1	163.46327	45.4167
2 de 1000	45514	ALCANTE1	76.09754	53.74381311	2 de 1000	44024	ALCANTE1	99.05241	46.4960
3 de 1000	46171	ALCANTE1	71.21924	54.45962862	3 de 1000	38640	ALCANTE1	95.4388	45.6649
4 de 1000	40530	ALCANTE1	65.53407	55.80214848	4 de 1000	37844	ALCANTE1	92.71066	45.8715
5 de 1000	44063	ALCANTE1	64.20149	51.58739802	5 de 1000	45514	ALCANTE1	76.09754	45.6512
6 de 1000	46036	ALCANTE1	63.24295	55.02842469	6 de 1000	46171	ALCANTE1	71.21924	47.0659
7 de 1000	45831	ALCANTE1	62.7551	54.44582894	7 de 1000	46036	ALCANTE1	63.24295	46.2186
8 de 1000	40031	ALCANTE1	45.68393	54.22580402	8 de 1000	45831	ALCANTE1	62.7551	47.3257
9 de 1000	45790	ALCANTE1	37.43866	54.44582895	9 de 1000	45665	ALCANTE1	52.75684	45.4021
10 de 1000	45180	ALCANTE1	36.95013	52.61652668	10 de 1000	45632	ALCANTE1	41.15684	45.4021
991 de 1000	91581	ALCANTE1	168.57032	35.96982231	991 de 1000	91581	ALCANTE1	168.57032	42.4038
992 de 1000	91835	ALCANTE1	25.59493	41.58108443	992 de 1000	91835	ALCANTE1	25.59493	42.4657
993 de 1000	92174	ALCANTE1	34.25586	48.84543651	993 de 1000	92174	ALCANTE1	34.25586	42.7588
994 de 1000	93047	ALCANTE1	12.00116	58.60938194	994 de 1000	93047	ALCANTE1	12.00116	44.4656
995 de 1000	93077	ALCANTE1	37.90055	57.25585699	995 de 1000	93077	ALCANTE1	37.90055	43.3031
996 de 1000	93109	ALCANTE1	6.07704	58.03241977	996 de 1000	93109	ALCANTE1	6.07704	43.3031
997 de 1000	93306	ALCANTE1	313.3547	44.36963575	997 de 1000	93306	ALCANTE1	313.3547	42.4907
998 de 1000	93405	ALCANTE1	36.22455	56.02818296	998 de 1000	93405	ALCANTE1	36.22455	44.5022
999 de 1000	93584	ALCANTE1	26.48528	66.41330469	999 de 1000	93584	ALCANTE1	26.48528	44.9727
1000 de 1000	97301	ALCANTE1	383.45194	38.19870565	1000 de 1000	97301	ALCANTE1	383.45194	42.0235

Figura 125. Resultados sobre necesidad de intervención. Resumen de cada sector

Como parte del informe se actualizan además las hojas *prioridad-tuberías*, *prioridad-tuberíasCUB*, *prioridad-sectores* y *prioridad-sectoresCUB*. Las hojas *prioridad-tuberías* y *prioridad-tuberíasCUB* contienen el listado completo de prioridad a la intervención de todos los elementos de la red, sin importar el sector al que pertenecen, ya sea para la primera o para la segunda opción desde lo elegido en las matrices de agregación (Figura 126).

A	B	C	D	E	F	G	H
ORDEN PRIORIZADO	ID TUBERÍA	SECTOR	LONGITUD	EDAD	PRESIÓN/ROTURAS/KM/AÑO	DEFUZIFICADO	GLOBAL
1	2 de 10485	ALCANTE4	9.55334	40	45.03	0	49.7157
2	2 de 10485	ALCANTE5	39.53661	40	29.85	0	49.5480
3	3 de 10485	ALCANTE5	80.74947	33	29.42	0	49.3217
4	4 de 10485	ALCANTE5	11.37496	10	29.3	0	49.3217
5	4 de 10485	ALCANTE5	97.09412	45	29.36	0	49.2905
6	6 de 10485	ALCANTE5	9.35793	32	29.34	0	49.2801
7	7 de 10485	ALCANTE4	15.17691	30	44.6	0	49.2778
8	9 de 10485	ALCANTE4	15.30698	36	45.43	0	49.2755
9	9 de 10485	ALCANTE5	5.87031	37	29.32	0	49.2697
10	10 de 10485	ALCANTE5	54.14834	41	29.3	0	49.2593
11	11 de 10485	ALCANTE5	20.86742	37	29.27	0	49.2437
12	12 de 10485	ALCANTE4	15.69868	38	44.53	0	49.2349
13	13 de 10485	ALCANTE5	3.56268	37	29.19	0	49.2023
14	14 de 10485	ALCANTE4	27.13049	37	30.83	0	49.1920
15	15 de 10485	ALCANTE5	15.98958	38	44.53	0	49.1866
16	16 de 10485	ALCANTE5	28.46804	40	28.9	0	49.0535
17	17 de 10485	ALCANTE5	5.94696	25	31.2	0	49.0025
18	18 de 10485	ALCANTE5	8.08672	8	29.52	0	49.0025
19	19 de 10485	ALCANTE5	5.42857	9	30.65	0	49.0025
20	20 de 10485	ALCANTE5	15.12091	17	31.26	0	48.9721
21	21 de 10485	ALCANTE4	2.74599	34	32.89	0	48.9691
22	22 de 10485	ALCANTE5	7.58422	36	32.04	0	48.9324
23	23 de 10485	ALCANTE4	1.33795	40	45.6	0	48.9303
24	24 de 10485	ALCANTE5	26.62955	31	31.48	0	48.8611
25	25 de 10485	ALCANTE5	81.10189	39	32.19	0	48.8585
26	26 de 10485	ALCANTE4	22.28339	41	44.12	0	48.8512
27	27 de 10485	ALCANTE5	35.40339	58	32.31	0	48.7997
28	28 de 10485	ALCANTE5	35.25678	27	32.14	0	48.7997
29	29 de 10485	ALCANTE4	101.66733	33	32.24	0	48.7777
30	30 de 10485	ALCANTE5	21.51308	37	31.89	0	48.6568
31	31 de 10485	ALCANTE4	11.79743	9	16.62	0	48.6034
32	32 de 10485	ALCANTE5	39.99581	40	32.08	0	48.5633
33	33 de 10485	ALCANTE5	56.01425	40	10.63	0	48.5633
34	34 de 10485	ALCANTE4	22.9856	9	21.92	0	48.4656
35	35 de 10485	ALCANTE5	24.34615	33	27.33	0	48.4042
36	36 de 10485	ALCANTE5	46.91696	36	27.29	0	48.3854
37	37 de 10485	ALCANTE5	5.65888	45	27.29	0	48.3854
38	38 de 10485	ALCANTE5	23.71518	43	12.9	0	48.2963
39	39 de 10485	ALCANTE5	26.73037	39	13.12	0	48.1941
40	40 de 10485	ALCANTE5	7.91995	44	33.63	0	48.1713
41	41 de 10485	ALCANTE4	1.56036	40	43.25	0	48.1674
42	42 de 10485	ALCANTE4	16.60366	24	43.74	0	48.1532
43	43 de 10485	ALCANTE5	57.80367	44	33.68	0	48.1481
44	44 de 10485	ALCANTE5	45.44372	37	33.69	0	48.1435
45	45 de 10485	ALCANTE5	30.83322	37	26.87	0	48.0595
46	46 de 10485	ALCANTE4	14.47645	32	43.08	0	48.0240
47	47 de 10485	ALCANTE4	65.52949	43	43.08	0	48.0240

Figura 126. Resultados sobre necesidad de intervención. Listado por tubería para toda la red

Las hojas *prioridad-sectores* y *prioridad-sectoresCUB* albergan los resultados detallados para cada sector (y para cada una de las dos opciones de agregación disponibles), conformados por el listado completo de las tuberías que lo componen, y la prioridad a la intervención de cada una de ellas (Figura 127). Así pues, la empresa puede definir, desde el resumen de sectores, aquel que mayor prioridad a la intervención posee, y desde esta última hoja, caracterizar los elementos individuales del sector con los cuales debe comenzar el proceso de renovación.

F	G	H	I	J	K
1	ORDEN PRIORIZADO	ID TUBERÍA	SECTOR	LONGITUD	DEFUZIFICADO GLOBAL
2	1 de 1000	45074	ALICANTE1	163.46327	45.41666667
3	2 de 1000	44024	ALICANTE1	99.05241	46.49601775
4	3 de 1000	38640	ALICANTE1	95.4398	45.66489631
5	4 de 1000	37844	ALICANTE1	92.71066	45.87147861
6	5 de 1000	45514	ALICANTE1	76.09754	45.65123816
7	6 de 1000	46171	ALICANTE1	71.21924	47.06594677
8	7 de 1000	46036	ALICANTE1	63.24295	46.21862383
9	8 de 1000	45831	ALICANTE1	62.7551	47.32565925
10	9 de 1000	45665	ALICANTE1	52.75684	45.40205381
11	10 de 1000	45632	ALICANTE1	41.15684	45.40205381
12	11 de 1000	44044	ALICANTE1	41.10809	45.44218442
13	12 de 1000	45790	ALICANTE1	37.43866	46.10066487
14	13 de 1000	45180	ALICANTE1	36.95013	46.51071815
15	14 de 1000	45854	ALICANTE1	33.37326	47.11769129
16	15 de 1000	45587	ALICANTE1	28.04444	46.61206979
17	16 de 1000	45421	ALICANTE1	24.51192	45.3818248
18	17 de 1000	38779	ALICANTE1	22.33879	45.46558731
19	18 de 1000	45315	ALICANTE1	19.67019	47.82252132
20	19 de 1000	45063	ALICANTE1	17.9207	45.41666667
21	20 de 1000	45531	ALICANTE1	15.20065	45.76430241
22	21 de 1000	46029	ALICANTE1	12.58442	45.33752112
23	22 de 1000	45661	ALICANTE1	8.40519	45.40205381
24	23 de 1000	44578	ALICANTE1	6.94774	46.40357372
25	24 de 1000	44394	ALICANTE1	6.5192	45.7837367
26	25 de 1000	44520	ALICANTE1	6.33282	46.01405205
27	26 de 1000	38702	ALICANTE1	21.49823	45.19497179
28	27 de 1000	44355	ALICANTE1	161.41184	44.97855909
29	28 de 1000	38351	ALICANTE1	55.02245	44.97004398
30	29 de 1000	44819	ALICANTE1	42.64341	44.95566361
31	30 de 1000	44187	ALICANTE1	52.43746	44.65333363
32	31 de 1000	38753	ALICANTE1	135.68112	44.57141307
33	32 de 1000	40029	ALICANTE1	158.98957	44.56700444
34	33 de 1000	40031	ALICANTE1	45.68393	44.56700444
35	34 de 1000	38302	ALICANTE1	41.56945	44.43829255
36	35 de 1000	39191	ALICANTE1	178.58648	44.28271013
37	36 de 1000	38308	ALICANTE1	44.84971	44.25271574
38	37 de 1000	40530	ALICANTE1	65.53407	44.02179755
39	38 de 1000	39037	ALICANTE1	28.07894	43.85007774
40	39 de 1000	44056	ALICANTE1	138.12143	43.69767779
41	40 de 1000	44154	ALICANTE1	28.83331	43.51793735
42	41 de 1000	38799	ALICANTE1	34.67143	43.4514299
43	42 de 1000	44063	ALICANTE1	64.20149	43.3418778
44	43 de 1000	37992	ALICANTE1	41.87873	43.21958987
45	44 de 1000	40969	ALICANTE1	351.17839	43.20628902
46	45 de 1000	44836	ALICANTE1	53.19917	43.17725948
47	46 de 1000	45047	ALICANTE1	8.55066	43.14715933
48	47 de 1000	41002	ALICANTE1	33.78141	43.0049367

Figura 127. Resultados sobre necesidad de intervención. Listado por tubería para cada sector

7.2.5 Otros formularios

Al interior de la hoja de informe se encuentran varias opciones complementarias (Figura 128) que ayudan a contextualizar los resultados obtenidos mediante Lógica Difusa, a través del cálculo de una selección de indicadores de desempeño del sistema de la IWA, y de la confección del árbol de balance volumétrico. También se

incluye la posibilidad de retornar al formulario de Lógica Difusa para hacer modificaciones y ejecutar de nuevo la aplicación.

VARIABLES BÁSICAS Y BALANCE VOLUMÉTRICO	VARIABLES DE VOLUMEN Y BALANCE IWA	VARIABLES OPERACIONALES	VARIABLES DE FINANCIERAS Y DE ACTIVOS	ÁRBOL DE BALANCE	OPINIÓN EXPERTA
---	------------------------------------	-------------------------	---------------------------------------	------------------	-----------------

Figura 128. Opciones complementarias en la hoja de informe

Los botones relacionados con variables básicas y de balance volúmetrico permiten ingresar información sobre algunos de los indicadores más importantes según el esquema de indicadores la IWA. Dichos botones remiten al usuario a los formularios que se describen a continuación.

7.2.5.1 Formulario de variables de volumen [FormDtosIndicadoresA]

Este formulario recopila datos requeridos por la IWA en la sección A (datos de volumen de agua) del capítulo de variables de su sistema de indicadores, necesarios para calcular algunos de los indicadores relativos a desempeño básico (indicadores sobre defectos, indicadores sobre volúmenes fugados, umbral mínimo de fugas e índice de fugas estructural), a la vez que suministra la definición técnica de cada volumen solicitado, con el objetivo de ilustrar al usuario sobre la forma en que debe estimarse cada dato (Figura 129).

Variable	Unidad	Código	Definición	Unidad	Código
Volumen diario de agua no tratada exportada	(m3)	[A5]	Volumen diario consumido autorizado	(m3)	[A14]
Volumen diario de agua tratada exportada	(m3)	[A7]	Volumen diario correspondiente a pérdidas de agua	(m3)	[A15]
Volumen diario consumido facturado medido	(m3)	[A8]	Volumen diario consumido no autorizado	(m3)	[A16]
Volumen diario consumido facturado no medido	(m3)	[A9]	Volumen diario correspondiente a pérdidas por inexactitudes en la medición	(m3)	[A17]
Volumen diario consumido facturado autorizado	(m3)	[A10]	Volumen diario correspondiente a pérdidas aparentes	(m3)	[A18]
Volumen diario consumido no facturado medido	(m3)	[A11]	Volumen diario de agua que genera ingresos	(m3)	[A20]
Volumen diario consumido no facturado no medido	(m3)	[A12]	Volumen diario de agua que no genera ingresos	(m3)	[A21]
Volumen diario consumido no facturado autorizado	(m3)	[A13]	Volumen diario de agua abastecida reutilizada	(m3)	[A22]

Figura 129. Formulario de introducción de datos para calcular algunos indicadores de desempeño básicos de la IWA

7.2.5.2 Formulario de variables de activos físicos, de usuarios, económicas y financieras [FormDtosIndicadoresCEG]

Este formulario recopila datos requeridos por la IWA en las secciones C (datos de activos físicos), E (datos demográficos y de abonados) y G (datos económicos y financieros) del capítulo de variables de su sistema de indicadores, necesarios para calcular algunos de los indicadores relativos a desempeño económico y financiero (agua que no produce ingresos en términos de volumen, y agua que no produce ingresos en términos de costo), a la vez que suministra la definición técnica de cada costo, tarifa o dispositivo físico de los cuales se piden registros (Figura 130).

Variable	Unidad	Valor	Variable	Unidad	Valor
Bombas (Nº) [C4]	[C4]	<input type="text"/>	Medidores de agua a los usuarios - contadores- (Nº) [E6]	[E6]	<input type="text"/>
Capacidad de las estaciones de bombeo (kW) [C6]	[C6]	<input type="text"/>	Costos acumulados de funcionamiento (euros) [G5]	[G5]	<input type="text"/>
Caudalímetros del sistema (Nº) [C10]	[C10]	<input type="text"/>	Tarifa promedio de agua para consumo directo (euros/m3) [G57]	[G57]	<input type="text"/>
Medidores de presión (Nº) [C12]	[C12]	<input type="text"/>	Costo unitario atribuido a pérdidas reales (euros/m3) [G58]	[G58]	<input type="text"/>
Medidores de nivel de agua (Nº) [C13]	[C13]	<input type="text"/>			

Continuar

Figura 130. Formulario de introducción de datos complementarios para calcular algunos indicadores de desempeño económicos y financieros de la IWA

7.2.5.3 Formulario de variables operacionales [FormDtosIndicadoresD]

Este formulario recopila datos requeridos por la IWA en la sección D (datos operacionales) del capítulo de variables de su sistema de indicadores, necesarios para calcular algunos de los indicadores de este mismo tipo, a la vez que suministra la definición técnica de cada proceso (de inspección, control o calibración), de cada intervención (renovación o reemplazo) o dato histórico de fallos, de los cuales se piden registros (Figura 131).

Variable	Unidad	Identificador
Inspección a la red	km	[D8]
Control de fugas	Nº	[D9]
Fugas reparadas mediante control activo de fugas	Nº	[D10]
Calibraciones de caudalímetros del sistema	Nº	[D12]
Calibraciones a medidores de presión	Nº	[D13]
Calibraciones a medidores de nivel de agua	Nº	[D14]
Rehabilitación de tuberías principales	km	[D20]
Renovación de tuberías principales	km	[D21]
Reemplazo de tuberías principales	km	[D22]
Reemplazo de válvulas	Nº	[D23]
Rehabilitación de acometidas de servicio	Nº	[D24]
Reemplazo de bombas	kW	[D26]
Fallos de bombas	días	[D27]
Fallos en tuberías principales	Nº	[D28]
Fallos en acometidas de servicio	Nº	[D29]
Reemplazo de medidores a usuarios -contadores-	Nº	[D45]

Figura 131. Formulario de introducción de datos complementarios para calcular algunos indicadores de desempeño operativos de la IWA

7.2.5.4 Formulario de árbol de balance [FormBalance]

Mediante el botón *árbol de balance* se visualizan los volúmenes que componen el gráfico de balance hídrico de la red (Figura 132). Los datos de entrada para conformar este árbol fueron suministrados en el formulario de introducción de datos básicos, y han sido disgregados según los diferentes niveles a los que pertenecen (eficacia de la gestión, estado de la red, eficacia de la medida y control de acometidas).

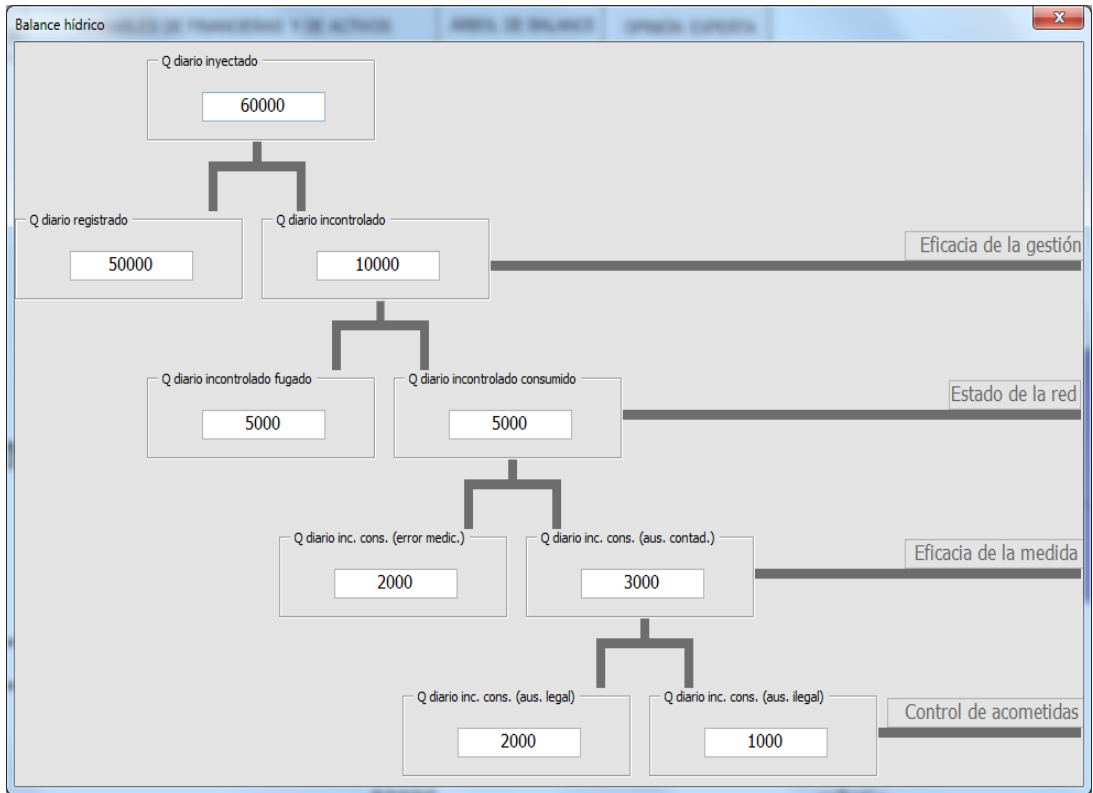


Figura 132. Resultado: árbol de balance hídrico de la red.

7.2.6 Otros productos incluidos en el reporte de resultados

La aplicación genera automáticamente una serie de gráficas que se construyen desde los campos que conforman la base de datos única que construye el paquete informático.

Cada una de estas gráficas es en sí la representación de los resultados de una tabla dinámica, Estas tablas se encuentran en hojas individuales del archivo de Excel. El usuario puede manipular estas tablas para personalizarlas y conformar productos a la medida de sus necesidades. Algunas de las gráficas más importantes, que se insertan automáticamente en la hoja informe (Figura 133), son:

- Aportes de cada material a la longitud total de la red
- Longitudes instaladas por material y década

- Longitudes instaladas por material y año de instalación
- Fracción de tuberías instaladas por material y año
- Número de fallos por km y año en función del tipo de fallo
- Evolución temporal del número de fallo/km en función del material
- Distribución de longitudes por material en función del diámetro y sector
- Número de fallos por km y año en función del material y sector

Resulta claro que solo se producirán automáticamente aquellas gráficas sobre las cuales se haya suministrado información de entrada.

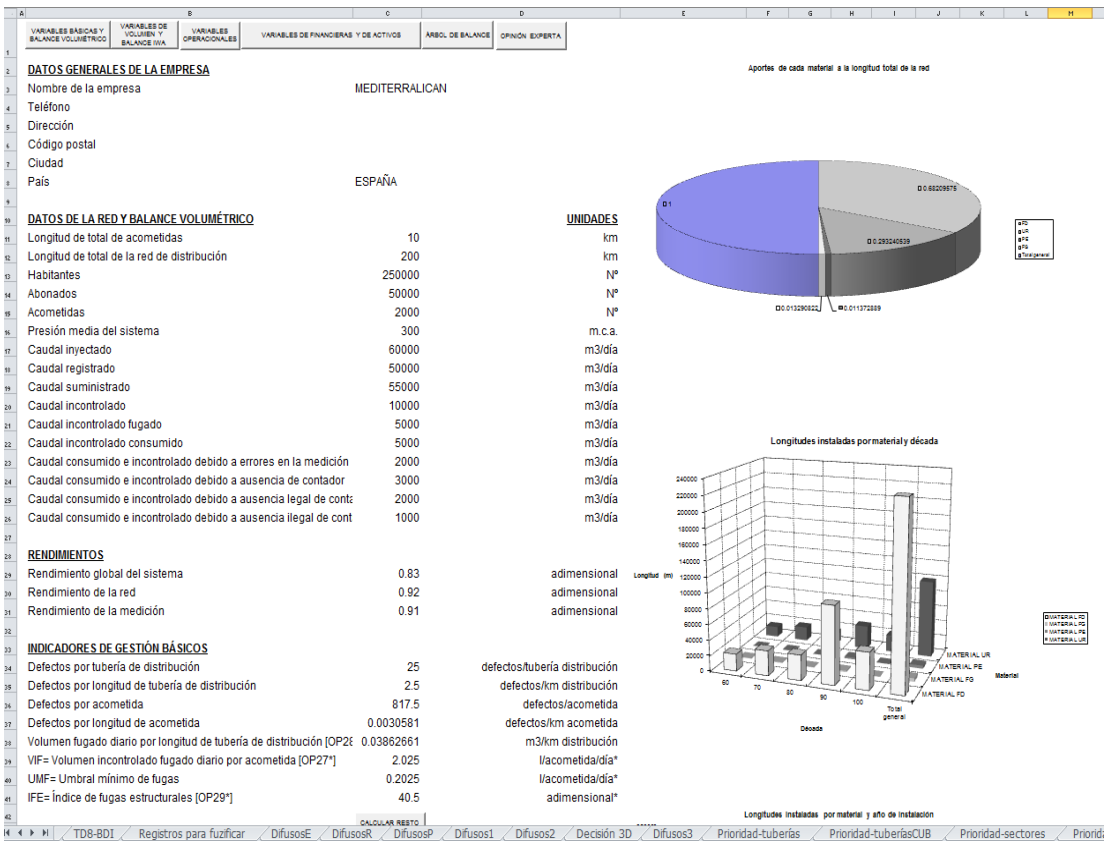


Figura 133. Algunas de las gráficas que se insertan automáticamente a la hoja informe.

7.3 Bondades y desarrollos futuros de la aplicación informática

7.3.1 Bondades

Aunque son muchas las observaciones que pueden hacerse sobre el diseño y desempeño de esta aplicación informática (el autor de esta tesis, y por supuesto, de la aplicación informática, no es experto en este oficio), resalta como aspecto positivo que ella en sí constituye un ejemplo de desarrollo local.

Cualquier empresa de abastecimiento y saneamiento puede generar una herramienta similar, con adecuaciones en función del nivel de complejidad y de las características de sus bases de datos. Así, su funcionalidad está casi asegurada, o al menos será superior a la de un paquete informático desarrollado por expertos foráneos. De hecho, aun cuando desde las diferentes exploraciones hechas, se concluye que existe una gran diversidad de configuraciones para las bases de datos de patrimonio de infraestructura, el estado a día de hoy de la aplicación informática permite que ella sea utilizada para una buena porción de casos de empresas de abastecimiento o saneamiento.

Por supuesto, debe considerarse en el análisis de lo bueno, que ésta es una aplicación pionera en el sentido de sistematizar el uso de la Lógica Difusa para establecer la prioridad a la intervención actual. Aun cuando la Lógica Difusa se presenta en otros paquetes, la estructura de esta aplicación, simple y clara, y que no pretende hacer una modelación sobre el comportamiento futuro del elemento, solicita información de entrada que se encuentra, con toda seguridad, en la gran mayoría de las empresas, en la forma de inventarios empresariales y de registros de intervenciones. No se pretende ignorar la importancia de los modelos predictivos; se quiere sí, resaltar la relevancia de una estimación fiable de la condición actual.

Otro aspecto que puede valorarse positivamente radica en las posibilidades de modificación a futuro. Esto es posible dado que la plataforma de programación elegida (Visual Basic) es ampliamente conocida en el ambiente técnico hidráulico, y viene inmersa en la mayoría de paquetes de ofimática. Además, la integración de herramientas informáticas hechas sobre la plataforma de Visual Basic para Excel, con otras como Epanet, ya ha sido probada por el autor de esta tesis mediante ensayos exitosos de programación en el Toolkit de esta última, lo que asegura que los desarrollos futuros tienen pocos límites.

7.3.2 Desarrollos futuros

No debe perderse de vista que el código actual ha sido escrito por una persona no experta en el tema informático. Esto lleva a concluir, sin género de dudas, que mediante una reescritura de las diferentes subrutinas se pueden alcanzar niveles más altos de eficiencia en tiempos de ejecución y consumo de recursos informáticos.

Todo aquello que en este texto aparece con la condición “bajo demanda del usuario”, y que en consecuencia está inmerso dentro del código, debe quedar disponible en la interfaz de usuario. Puede ser un trabajo dispendioso en algunos casos, pero indudablemente constituiría un aporte importante.

Tal es el caso de la asignación de pesos de importancia para relacionar parejas de criterios en una de las dos opciones de configuración de las matrices de agregación, la forma de los números difusos descriptivos de los criterios, la cantidad de números difusos en el conjunto difuso final y la cantidad de unidades de decisión.

La sistematización de la metodología propuesta permite agregar módulos que calculen los efectos de la intervención propuesta para cada elemento: tal es el caso de la extensión de la vida útil de la tubería, y el costo de la inversión para las conducciones o sectores de la red que resulten con mayor prioridad a la intervención.

Los indicadores de desempeño suelen calcularse con dos finalidades fundamentales: facilitar la comparación del desempeño de un sistema con el de otros similares (benchmarking), y apoyar la toma de decisiones. Esta aplicación informática facilita el cálculo de algunos indicadores con esta última finalidad.

Por ahora, los resultados de indicadores de desempeño que genera la aplicación ayudan a dar contexto a las necesidades de intervención. El siguiente paso estará dirigido a integrarlos directamente en la metodología ya existente que calcula la tendencia a la falla. Una manera para hacerlo, y en la que el autor ya ha avanzado, consiste en conformar uno o varios espacios de decisión adicionales, para luego relacionarlos mediante operadores lógicos.

Otros módulos que involucren la modelación hidráulica de la red deben ser incorporados como etapas previas a la fuzificación: en el caso de los sistemas de abastecimiento, los valores de presión para cada tubería pueden ser tomados automáticamente desde EPANET (de hecho, es lo hasta ahora se hace, manualmente), y actualizados en la base de datos única, para asegurar la disposición de la información más actual. Otras magnitudes que pueden ser obtenidas desde la simulación hidráulica en EPANET también pueden ser implementadas como criterios para conformar el espacio de decisión (por ejemplo, valores de caudales fugados).

Aunque existen paquetes informáticos que incluyen algo similar, ninguno lo hace mediante la implementación de la Lógica Difusa, y tienen como característica común, el requerimiento de información de entrada de difícil consecución. Por esto, los desarrollos que se plantean marcarían una pauta.

El futuro de esta y otras herramientas se ve alimentado por la disposición de cada día más y mejores recursos informáticos. La conexión entre diferentes programas resulta clave para transferir información relevante, en tiempo real.

En este sentido, esta aplicación debe implementar a futuro un módulo para la determinación de la tasa de deterioro particular de cada elemento, o al menos de cada sector, que le permita mediante interacciones con otras herramientas, captar la información que requiere para alimentarse. Este es el problema por el cual todos los desarrollos actuales (empaquetados en programas costosos), que intentan calcular tasas de deterioro, fallan en su grado de aplicabilidad.

Así pues, el módulo propuesto, basado en la determinación de dicha tasa, deberá finalmente estimar la condición futura del elemento. Más que un desarrollo informático, lo dicho constituye un importante avance metodológico pendiente de ejecución.

Por último, se debe finalizar la labor ya comenzada por el autor de este trabajo, tendiente a producir una aplicación con la misma estructura descrita, pero esta vez enfocada a establecer las necesidades de intervención en redes de saneamiento.

Capítulo 8

***Conclusiones, aportes y futuras
investigaciones***

Desde el reconocimiento de la falta de estructuras de decisión que requieran información más común en las bases de datos de las empresas de abastecimiento o saneamiento, esta tesis presenta una serie de aportes cuyo enfoque permite una utilización inmediata, con implementaciones sencillas y útiles.

Las conclusiones que aquí se exponen, dan testimonio del cumplimiento de los diferentes objetivos de esta tesis. Lo hecho se puede resumir en la presentación de un *conjunto de herramientas de soporte a la decisión para la renovación de redes de abastecimiento y saneamiento*, donde resalta lo siguiente:

- Se realizó un repaso profundo (y extenso) al estado actual del conocimiento en materia de caracterización de variables o criterios asociados al proceso de deterioro de una tubería, y así mismo, en relación a los principales protocolos de inspección y modelos para la evaluación del deterioro.
- Se planteó un conjunto de directrices a seguir, para la debida integración de aquellas bases de datos requeridas en el proceso de implementación de una metodología para el establecimiento de prioridades de intervención en la red.
- Se hizo una exposición acompañada de un análisis crítico, de los modelos de decisión (y sus respectivos casos de estudio) en los que el autor participó durante su formación doctoral.
- Se propuso una metodología de decisión basada en lógica difusa para la priorización de tuberías y de sectores a la renovación. Esta metodología se acompañó de un caso de estudio.
- Se presentó un esquema de plan de actuación para la renovación de patrimonio en infraestructura (específicamente, tuberías). En él se propone la implementación de la metodología de decisión propuesta, basada en lógica difusa.
- Se propuso una forma de sistematización de la metodología de decisión basada en lógica difusa mediante la construcción de una aplicación informática.

8.1 Conclusiones

Esta tesis es el compendio de un período de formación y producción en investigación donde se intentó dar respuesta a diversas cuestiones relacionadas con la gestión técnica de sistemas de abastecimiento y saneamiento. Aunque el

pilar de este documento se basa en enfrentar la pregunta de cómo determinar los elementos de la red que se deben intervenir primero, otros aspectos totalmente conexos a la determinación de las necesidades de renovación también han sido abordados en el texto.

8.1.1 Aspectos sobre la toma de decisión enfocada a la intervención de redes de abastecimiento o saneamiento

8.1.1.1 La importancia de los niveles de servicio en los estudios sobre renovación

La realización de esta tesis doctoral ha requerido el estudio minucioso de diversas bases de datos de abastecimiento y saneamiento. Desde estos estudios y sus resultados, y en general, consideradas todas las investigaciones que han hecho parte del proceso de formación doctoral, una conclusión importante se desprende: donde no se haya hecho, se debe dar un cambio de paradigma en la forma en que se enfoca la toma de decisión relativa a necesidades de intervención en las redes.

Estudiados muchos de los enfoques tradicionales para determinar necesidades de intervención, usualmente representados por modelos exclusivamente estructurales (los que abordan solo los fallos del tubo) u operativos (aquellos que se encargan únicamente de caracterizar las obstrucciones, por ejemplo), se evidencia que dichas metodologías no permiten considerar variables que representan lineamientos de gestión técnica relevantes para las organizaciones.

Estas últimas, no en pocas ocasiones, le dan mayor importancia - aún más que a lo estructural u operativo – a los niveles de servicio, que acompañados por los niveles asociados al riesgo y a los costos, definen el panorama bajo el cual se debe hacer, a día de hoy, la gestión del patrimonio en infraestructura.

De hecho, la norma ISO 24512:2007 (ISO, 2007) deja claro, dentro del grupo de objetivos que deben tener en cuenta aquellas empresas gestoras de abastecimiento, que la estrategia no debe encaminarse solamente hacia el aseguramiento del suministro del servicio (aquello por lo que en principio la organización existe), sino también a la satisfacción de las necesidades y expectativas de los usuarios (pilar base de los sistemas de gestión de la calidad), al desarrollo sostenible de la comunidad (tendencia casi de obligatorio cumplimiento

dadas las actuales condiciones de crecimiento demográfico) y a la protección del medio ambiente (aspecto también imperativo, y relacionado directamente con el objetivo anterior), entre otros.

Una acción encaminada a considerar lo realmente importante para la organización, consiste en incluir dentro de los criterios de análisis que conforman el espacio de decisión en los niveles operativo y táctico, a variables que también sean representativas de la planeación en el nivel estratégico. Esto facilita el aprovechamiento de los resultados de los estudios hechos en los dos niveles inferiores, por parte de los actores del nivel superior (personal de administración de la empresa).

Los resultados arrojados tras aplicar la metodología dan cuenta de la importancia de incluir criterios que evalúen el objetivo táctico de “garantizar el cumplimiento de valores presión de servicio en todos los puntos de consumo”. En esta investigación, para evaluar este objetivo se ha utilizado el criterio *adecuación de la presión promedio de servicio*. En el caso de estudio realizado, algunas tuberías con pocos años de operación, pero con una presión de servicio mayor y un número de fallos importante, revisten urgencia de intervención. Por supuesto, la determinación de las funciones matemáticas difusas asociadas a cada criterio condicionan en parte los resultados. En el análisis de sensibilidad de los resultados ante la variación de estas funciones difusas, se identifican variaciones porcentuales importantes en el grupo de tuberías con mayor urgencia de intervención.

Otras variables de este tipo, como lo son los caudales demandados, el número de interrupciones del servicio, y el número y tipo de usuario afectado por dichas interrupciones, hacen parte del abanico de criterios que pueden incluirse en la metodología propuesta, pudiendo conformar en sí mismas un único espacio de decisión asociado a niveles de servicio.

El criterio *ocurrencia de fallos como medida de la adecuación infraestructural* ha sido incluido en el estudio para evaluar el objetivo táctico de “asegurar la sustentabilidad e integridad infraestructural”. La probabilidad de ocurrencia de fallos, junto con las consecuencias de los mismos, constituyen las dos componentes fundamentales para la evaluación del riesgo.

La construcción de las funciones difusas para caracterizar la condición actual sobre ocurrencia de fallos es una herramienta para dar el primer paso en el

establecimiento de niveles de riesgo admisibles para la organización. La estimación de una tasa de crecimiento de fallos mediante agrupación homogénea de tuberías, que permita obtener la probabilidad futura de ocurrencia, así como la generación de un conjunto difuso para caracterizar las consecuencias del fallo, constituyen los pasos faltantes. Así pues, la estructura de la propuesta metodológica mediante *lógica difusa*, en conjunto con la aplicación informática que también se aporta, pueden utilizarse también para caracterizar el riesgo de fallo de la red.

La representación de la *edad* mediante la determinación de funciones difusas permite a los decisores expresar el concepto de vida útil técnica para tuberías de cierto grupo homogéneo (por material, por ejemplo), adaptado a las condiciones locales desde su conocimiento experto.

8.1.1.2 Marco en el que se pueden implementar los productos de esta tesis

Los aportes más relevantes de esta tesis, contenidos principalmente en el capítulo que expone la metodología basada en *lógica difusa*, pueden potencialmente integrar un módulo de la nueva estructura de enfoque holístico enfocada a la toma eficiente de decisiones en el marco de la gestión patrimonial de infraestructuras.

Específicamente para tal estructura, los aportes pueden integrarse en el nivel táctico, en las competencias de ingeniería, y de gestión de la información del inventario de activos, y ellas correlacionadas con las dimensiones del desempeño y del riesgo. Lo anterior, bajo la visión integrada de la *Gestión Patrimonial de Infraestructuras*.

Por supuesto, las herramientas propuestas pueden hacer parte de un plan de actuación ya existente, o de uno nuevo que se plantee, y que vaya encaminado a enfrentar los procesos de renovación en los sistemas de transporte de agua que gestiona la entidad prestadora del servicio.

8.1.2 Aspectos sobre los criterios influyentes y su forma de evaluación

La elección de los criterios incluidos en el caso de estudio de aplicación de la metodología para establecimiento de prioridades de intervención mediante *lógica*

difusa, se intentó realizar de tal forma que representaran las necesidades propias de la red (esto mediante un procedimiento basado en la definición del alcance local para el estudio). Para que los resultados obtenidos tengan validez, los criterios no solo deben atender a la visión integrada que se acaba de mencionar, sino además a su importancia en el contexto local.

En el capítulo de desarrollos previos a la *lógica difusa*, se trabajó sobre la forma de evaluación de cada uno de los criterios incluidos en los estudios. Las funciones matemáticas para calificar a los elementos de la red respecto a cada criterio fueron mejoradas mediante una revisión técnica de la literatura sobre cada criterio, y a través de una inspección previa de los registros de las bases de datos relacionadas.

Como resultado de lo anterior, en el último de los desarrollos expuestos en el capítulo se obtuvieron resultados sobre prioridades a la renovación acordes a los de metodologías de inspección mediante CCTV, o mediante CCTV y otros criterios.

Lo anterior, sin embargo, constituye un tema de discusión abierta, si bien debe reconocerse que las validaciones basadas en inspecciones mediante CCTV resultan de parcial utilidad en un enfoque global e integrado de gestión, pues los resultados de dichas inspecciones no logran contabilizar los efectos de criterios no calificables visualmente.

8.1.3 Aspectos sobre las metodologías previas para la determinación de las prioridades de intervención

Los hallazgos tras el análisis de sensibilidad hecho por el autor a la metodología de *sumas ponderadas*, mediante la introducción de variaciones en los pesos de importancia de los criterios, permiten afirmar que los resultados finales son altamente dependientes de tales valoraciones subjetivas. El estudio del método, sin embargo, dio pie al planteamiento de una serie de cuestiones que mantienen su validez aún para otras metodologías. La pertinencia de los criterios, su forma de evaluación, la información de entrada necesaria para la implementación de un sistema de estas características, el grado de calidad de la información, son algunas de ellas.

Respecto a la metodología basada en la *programación por compromiso*, el uso de la función de desviación relativa permite realizar una cuantificación de la distancia del estado actual de cada elemento al valor ideal para cada criterio. Sin embargo, el establecimiento del valor ideal de cada criterio es complejo, siendo ésta una dificultad importante pues influye en gran medida en el resultado.

El establecimiento del factor de balance P también resulta ser crítico, pues afecta directamente la medida de distancia de cada alternativa (tubería) al valor ideal de cada criterio. Los cambios en los resultados finales, generados desde los análisis de sensibilidad en los cuales se realizaron variaciones al factor de balance, así lo demuestran. El decisor usualmente realiza la elección del factor de balance de manera subjetiva.

La propuesta de aplicación de la teoría de *jerarquías analíticas* evidenció el problema que implícitamente se tiene al asignar valores de importancia para caracterizar relaciones entre parejas de criterios o entre parejas de grupos de criterios.

La asignación de estos valores (y que equivale en el fondo, a asignar pesos de importancia - relativos - a cada criterio) no solo le imprime un alto grado de subjetividad a los resultados, sino que además deja al decisor sin posibilidad de expresar matemáticamente la incertidumbre que tiene sobre una relación entre pares que, más que definirse mediante un número puntual, debería hacerse a través de una función matemática.

Como punto a favor, debe decirse que esta metodología, al requerir la creación de múltiples jerarquías, de manera indirecta ayuda a la agrupación de criterios de naturaleza similar, facilitando el entendimiento del problema de la priorización a la renovación.

En el plano de lo práctico, la consideración de múltiples criterios y múltiples alternativas (aunque en el caso de estudio se incluyeron tres sectores de red, habría que pensar en la aplicación a una red con miles de tuberías) requiere la utilización de paquetes informáticos que aseguren la convergencia a cero de la función de suma de desviaciones positivas y negativas.

Sobre la metodología basada en ponderación de criterios estructurales y de servicio para redes de saneamiento, vale la pena destacar que en ella se realiza un

aporte mediante el planteamiento de sistemas de evaluación más técnicos para cada criterio incluido.

Respecto a esta metodología, y al igual que lo sucedido con el método de las sumas ponderadas, su aplicación involucra la producción de resultados con base en la ponderación mediante pesos de importancia, lo cual induce un alto grado de subjetividad.

8.1.4 Sobre la Lógica Difusa como metodología finalmente propuesta para la determinación prioridades de intervención

Se logró proponer y aplicar a un caso de estudio una forma matemática para incluir el conocimiento experto en la estructura de decisión. La construcción de funciones difusas, que describen el comportamiento de una variable dada, fue probada mediante un ejemplo real basado en una red de abastecimiento del mediterráneo español. Se crearon conjuntos difusos triangulares descriptivos de la edad de la tubería, de la presión de servicio y de la ocurrencia de fallos. Ellos integran un primer espacio de decisión.

Los resultados del caso de estudio fueron en su mayoría los esperados. De los 10 sectores en los que se dividió la muestra de tuberías incluidas, el sector 1 (aquel con la mayor ocurrencia de fallos) es el que aparece con la mayor necesidad de intervención. A nivel de elementos individuales, todas las tuberías que registran las más altas necesidades de intervención pertenecen al sector 1. Estas tuberías llevan poco tiempo en operación y sin embargo presentan un alto número de fallos.

Lo anterior, combinado con altas presiones, ubican estos elementos en la unidad de decisión 3, a la cual la opinión experta le asignó una posibilidad de falla muy significativa (las primeras 5 tuberías obtuvieron una necesidad de intervención por posibilidad de falla de casi el 70%). La tubería con la mayor tasa de fallos de la muestra no es la que mayor urgencia a ser intervenida posee.

En el extremo opuesto, las tuberías con menor prioridad a la renovación presentan edades avanzadas y no registran ningún fallo en su historial. Esto hace que, aun cuando presión a la cual trabajan sea alta, se les asocie una posibilidad de falla "poco significativa". Estos elementos pertenecen a tres sectores diferentes. A

nivel zonal, los que resultan con la menor necesidad de intervención son los sectores 5 y 6.

Como se menciona en el texto, de las 10485 tuberías incluidas en el estudio, las últimas 2528 en la lista de prioridad presentan un valor de posibilidad de falla menor al 20%. Todas tienen registro nulo de fallos, y sus edades superan los 30 años. Son en general conducciones que ya han estabilizado su grado de deterioro.

Mediante tres análisis de sensibilidad (después de introducir variaciones a los conjuntos de funciones difusas de los tres criterios) se determinó que a nivel de sectores ninguno de los tres cambios produjo variaciones importantes en los resultados. A nivel de elementos individuales, la metodología resulta sensible a las variaciones en los conjuntos difusos asociados a la edad y a la ocurrencia de fallos.

El proceso de toma de decisión se ve simplificado al definir unidades de decisión (en este caso, cubos) donde en su interior, los cambios ocurridos en cualquiera de los criterios que los componen, son tan pequeños, que en cualquier caso la decisión sobre intervención sigue siendo la misma. Para el caso de estudio, se definieron 8 unidades de decisión.

Para relacionar adecuadamente los criterios incluidos en la estructura decisional, disminuyendo al máximo la utilización de pesos de importancia, se construyeron 8 matrices de agregación de tres criterios, basadas en reglas con múltiples operadores lógicos de conjunción tipo I, y adoptando la técnica de inferencia de Mamdani para relacionar los conjuntos difusos y calcular los valores de pertenencia de salida. Dichos valores posteriormente se proyectaron en un conjunto difuso de posibilidad de falla compuesto por cuatro funciones trapezoidales. En total se generaron 64 reglas difusas de agregación.

El problema que se tiene para incorporar la incertidumbre que el experto posee al definir inicialmente el comportamiento de cada criterio, y así mismo para transmitir esta incertidumbre hasta los resultados finales, procurando que sean más realistas, se ve debidamente solventado con la construcción de los números difusos y matrices difusas de agregación, y además con el proceso final de defuzificación.

Los resultados del caso de estudio inicial permiten validar que las tuberías con registros más críticos según el diseño de las funciones difusas asociadas a cada criterio, son las que generan mayores necesidades de intervención. En el análisis

de sensibilidad ante variaciones en números difusos del criterio edad, las tuberías más viejas recibieron, como era de esperarse, una mayor prioridad a la intervención.

En el análisis del segundo espacio de decisión planteado (conformado por la longitud, el diámetro, y la carga habitual de tráfico) el sector 8 es el que presenta el valor de posibilidad de falla más alta. También los sectores 6, 7 y 10 arrojan necesidades de intervención importantes. El sector 1, que en análisis del primer espacio de decisión tiene asociada la mayor urgencia de intervención, aparece en el análisis del segundo espacio de decisión con la menor posibilidad de fallo. Dado que en el primer espacio de decisión, uno de los criterios incluidos es la frecuencia de fallos, y que este sector es el que mayor registro de incidencias posee, sus resultados para el primer análisis son los más críticos. En el segundo espacio decisional no existe un criterio tan condicionante, y en consecuencia no urge la intervención para el primer sector.

Para el análisis de este segundo espacio, el rango en el que varían los resultados por sectores es más corto (entre 41.69% y 47.54%) que el rango en el que varían los resultados por sectores del primer espacio (entre 17.62% y 40.35%). Esto constituye un indicativo de la poca diferencia que en el plano global poseen las tuberías de la muestra de estudio al considerar su comportamiento respecto a la necesidad de intervención con base en el estudio del diámetro, la longitud y la carga de tráfico.

Al agregar los espacios de decisión 1 y 2, se logra apreciar que aunque las tuberías del sector 1 resultaron altamente priorizadas en el análisis del primer espacio, el diseño de la matriz para agregar estos dos espacios en la iteración adicional, genera que las tuberías del sector 2 resulten con mayor necesidad global de intervención. Esto pone de manifiesto, de nuevo, la relevancia de una buena conformación de las matrices de agregación, tanto a nivel de análisis de espacios particulares, como en el contexto de la agregación de varios espacios de manera simultánea.

En cualquier caso, se logra comprobar que la metodología resuelve adecuadamente el problema del establecimiento de relaciones entre múltiples criterios (mediante la definición de espacios decisionales) sin necesidad de utilizar pesos de importancia para ponderarlos. La construcción de las funciones matemáticas difusas (números difusos) y de las matrices de agregación, logran

captar el conocimiento experto con mayor grado de detalle y facilitan mucho más la labor decisional, en comparación con el establecimiento tradicional de pesos.

La propuesta de agregación de múltiples espacios, cada uno de ellos con características especiales que pueden caracterizar una dimensión específica de la gestión, y así mismo, la propuesta de definición de varias iteraciones para aplicar la metodología, iteraciones que pueden estar asociadas a diferentes niveles de gestión, resulta propicia en el entorno de la Gestión Patrimonial de Infraestructuras, pues involucra un alto grado de flexibilidad para las entidades gestoras, al permitirles incluir secuencialmente los requerimientos de cada nivel de gestión, y vincular los resultados de un nivel como entradas para el análisis de gestión en el nivel superior.

8.1.5 Sobre la gestión de bases de datos relacionadas con el patrimonio en infraestructura de la empresa

Tras analizar las diferentes bases de datos de redes de abastecimiento y saneamiento utilizadas para el desarrollo de esta tesis, se identificaron problemas relacionados con dispersión de los datos en diferentes fuentes, duplicación de datos, registros incompletos y falta de calidad de la información.

Motivado por esta problemática, en el capítulo 3 se plantea una serie de consideraciones para la debida integración de bases de datos. En dicho apartado se identifican las bases de datos (internas y externas a la empresa) que pueden relacionarse en diversos niveles de interacción. Por último se propone un método sencillo para calificar el grado de gestión general del conjunto de las bases de datos de la empresa, a partir del estado actual de la información respecto a las consideraciones descritas.

Específicamente, los problemas asociados a información incompleta y falta de calidad quedaron evidenciados desde la aplicación de diferentes filtros para validar la información en algunos de los casos de estudio presentados. En particular, en el referido a la estimación de necesidades de intervención mediante lógica difusa, se produjo una imposibilidad de utilización del 66% de los registros iniciales por estas dos razones. Desde lo anterior, se puede concluir que existe una clara necesidad

de adoptar protocolos para el ingreso de información a las bases de datos de forma tal que sean útiles a futuro.

8.1.6 Sobre la sistematización del proceso de toma de decisión

Para aportar a la solución del problema sobre la falta de herramientas de fácil uso, se creó un programa en Visual Basic anidado en una hoja de Excel, que contiene varios módulos enfocados en establecer las prioridades de renovación de elementos individuales y sectores de una red de abastecimiento.

Específicamente, el primer módulo de la aplicación (y los formularios de interfaz de usuario asociados a dicho módulo) gestiona las bases de datos externas, para concatenar en una base de datos única a los campos relevantes en el proceso de toma de decisión sobre intervenciones, que se encuentran dispersos en diferentes fuentes de información.

La aplicación cuenta además con un módulo de lógica difusa y varios formularios de interfaz de usuario asociados. Éste es el más importante de toda la aplicación, y se encarga de sistematizar los tres pasos fundamentales en los cuales se materializa la adaptación de la lógica difusa a la renovación de tuberías (fuzificación, agregación y defuzificación).

Por último, se presenta un tercer módulo de informe de resultados, que genera un reporte en el cual se pueden visualizar aquellos valores sobre prioridad de intervención alcanzados por tuberías y sectores de la red, además de gráficas e indicadores de gestión característicos del sistema, que ayudan a la contextualización de los resultados alcanzados sobre renovación.

Esta aplicación trabaja con la información de entrada que se aporte, y en función de ella genera un reporte con mayor o menor cantidad de resultados. Esta característica hace que sea más aplicable respecto a algunos paquetes informáticos basados en modelos físicos o estadísticos que requieren gran cantidad de información de entrada como condición indispensable para su ejecución.

Al integrar la base matemática de la lógica difusa en la estructura de funcionamiento de la aplicación, y como parte de ello, aportando el desarrollo de una interfaz que le permite al usuario diseñar conjuntos difusos para cada una de los criterios considerados en el proceso de toma de decisión, y además adicionando el desarrollo de otra interfaz que le ayuda al usuario a construir las matrices de decisión, se intentó resolver el problema de las herramientas de computador que no captan el conocimiento experto.

Los resultados del caso de aplicación que se describe en el capítulo de lógica difusa fueron generados a partir del uso de la aplicación. Desde éste y otros ejemplos se definieron algunos aportes futuros basados en nuevos desarrollos y mejoras a los existentes.

8.2 Aportes de esta tesis

El lector puede identificar todo lo expuesto en el capítulo de lógica difusa como el mayor aporte de esta tesis. Si bien esto es evidente, debe tenerse en consideración que otras contribuciones importantes han sido incluidas en los capítulos referidos a modelos decisionales previos, al esquema de actuación general de una empresa que enfrenta un proceso de renovación de sus redes, y a la aplicación informática realizada para incorporar algunas de estas herramientas matemáticas.

- En el capítulo que abarca el modelo decisional para la prioridad a la renovación mediante lógica difusa, no solo la particular adaptación de la estructura matemática a la gestión de redes es un aporte, también lo es la integración a ésta de una forma para definir el espacio de decisión donde se desarrolla todo el proceso. El caso de estudio donde se muestra la forma de aplicación de la metodología, así como los diversos análisis de sensibilidad a diferentes niveles, constituyen también valiosas ayudas para el personal técnico que se interese en adaptar esta propuesta al sistema que gestiona.
- En el capítulo que expone los desarrollos previos a la lógica difusa, se proponen tres adaptaciones a igual número de estructuras matemáticas (sumas ponderadas, programación por compromiso y jerarquías analíticas) con la intención de utilizarlas para definir tuberías o sectores con mayor prioridad a la renovación. Cada adaptación ha sido respaldada con la realización de un caso de estudio que permitió verificar su funcionalidad.
- En el mismo capítulo se incluyen otros aportes interesantes. Uno de ellos lo constituye la forma técnica para evaluar 7 de los criterios más representativos cuando se quiere caracterizar la condición actual de una tubería. Estos aportes se encuentran en la propuesta basada en ponderación de criterios estructurales y de servicio para redes de saneamiento. La comparación de los resultados que arroja la metodología

respecto a los de otras dos metodologías existentes mediante un caso de estudio, permite dar validez a esta forma de evaluación.

- En un apartado de este capítulo también se propone una forma para evaluar el nivel de exceso de fugas en un sector de la red de abastecimiento, y paralelamente, formas para evaluar la situación socio-ambiental que se puede generar en una zona por un fallo de una tubería, y para penalizar el tiempo que ha transcurrido sin que se haya inspeccionado el sector de forma preventiva. El caso de estudio demuestra la forma en que estas propuestas pueden ser aplicadas, si bien se requiere que sean adaptadas a las condiciones locales de cada sistema.
- El capítulo sobre el esquema general de plan de actuación muestra la definición de una serie de pasos que permiten enfrentar un proceso de intervención (sustitución o rehabilitación) de la red. En él se pueden identificar las diferentes fases propuestas, así como la secuencia para que el proceso sea amplio a la vez que eficiente.
- Por último, se incluye una propuesta de herramienta informática simple y adaptable a cualquier empresa, que sirve para captar aquella información relevante para el proceso de toma de decisión sobre necesidades de intervención (que usualmente está atomizada en diferentes bases de datos), y para procesarla en conjunto con la opinión experta hasta producir prioridades de intervención para tuberías y para sectores de la red. Para ello, la aplicación acopla como núcleo matemático fundamental a la lógica difusa.

8.3 Investigaciones futuras

El punto de llegada de esta tesis doctoral, y en general, las necesidades actuales, evidencian que a futuro se requiere:

- Más y mejores modelos holísticos para enfocar las decisiones sobre intervención en la red, y que constituyan una alternativa a los tradicionales modelos estructurales que se preocupan exclusivamente por el elemento.

- En el mismo sentido, avanzar en la construcción de modelos decisionales capaces de evaluar el riesgo en sus componentes básicos (probabilidad de fallo y consecuencia del fallo). Esto debe realizarse en un entorno amplio, que permita integrar sus resultados a los desprendidos desde el análisis de costos y de niveles de servicio.
- Desarrollar mejores formas de validación para modelos holísticos, que complementen a las formas de validación mediante comparación de resultados con los de otras metodologías tradicionales.
- Avanzar en la mejora de aplicaciones informáticas como la propuesta, para que capten en mayor y mejor medida al conocimiento experto, y lo integren a los datos de patrimonio de infraestructura de la organización.
- En la misma línea, avanzar en la mejora de las aplicaciones informáticas de tinte local para que sean capaces de integrar las diferentes bases de datos de una misma empresa de una manera más eficiente.

Capítulo 9

Referencias bibliográficas

- Agencia Europea De Medio Ambiente (AEMA). 2012. *Hacia Un Uso Eficiente De Los Recursos Hídricos En Europa*. Ed. AEMA. ISBN 978-92-9213-275-0.
- Al-Barqawi, H., Zayed, T. 2008. *Infrastructure Management: Integrated AHP/ANN Model To Evaluate Municipal Water Mains' Performance*. ASCE Journal Of Infrastructure Systems 14, 4, 305-318.
- Alegre, H.; Dória, M. 1998. *Develop Decision Criteria To Prioritize Replacement And Rehabilitation Of Mains And Appurtenances – Survey Results*. AWWA Research Foundation AWWARF 459. LNEC, Lisboa.
- Alegre, H., Baptista, J., Cabrera Jr, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., Parena, R. 2006. *Performance Indicators For Water Supply Services*. Second Edition. Manual Of Best Practice Series. IWA Publishing.
- Alegre, H., Covas, D. 2010. *Gestao Patrimonial De Infra-Estructuras De Abastecimento De Agua. Uma Abordagem Centrada Na Rehabilitacao*. Entidade Reguladora Dos Servicos De Aguas E Residuos. Laboratorio Nacional De Engenharia Civil. Instituto Superior Tecnico.
- Almandoz, J. 2002. *Directrices Y Herramientas De Mejora Del Rendimiento Hídrico En Redes De Agua Urbanas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica De Valencia.
- Almandoz, J., Parra, J., Cabrera M. 2005. *Análisis, Diseño, Operación Y Gestión De Redes De Distribución De Agua Con EPANET. Tomo II*. Instituto Tecnológico Del Agua, Valencia. ISBN 84 609 6384 5.
- Anderson, D., Cullen, N. 1982. *Sewer Failures 1981, The Full Year*. WRc External Report 73E.
- Andreou, S., Marks, D., Clark, R. 1987. *A New Methodology For Modelling Break Failure Patterns In Deteriorating Water Distribution Systems: Theory*. Advances In Water Resources 10, 1, 2-10.
- Ariaratnam, S., El-Assaly, A. 2001. *Assessment Of Infrastructure Inspection Needs Using Logistic Models*. ASCE Journal Of Infrastructure Systems 7, 4, 160-165.

- AWWA. 2005. *Risk Management Of Large-Diameter Water Transmission Mains*. AWWA Research Foundation, ISBN 1-58321-400-3.
- Babani, J. 2007. *Development Of An Asset Management Plan For Municipal Water Infrastructure*. Master Of Applied Science Thesis. University Of Toronto.
- Berthold, M. 2003. *Intelligent Data Analysis*. Springer, 321-350.
- Brundtland, G. 1987. *Our Common Future*. Report Of The World Commission On Environment And Development. United Nations.
- Butler, D., May, R., Ackers, J. 2003. *Self-cleansing Sewer Design Based On Sediment Transport Principles*. ASCE Journal Of Hydraulic Engineering 129, 4, 276-282.
- Chughtai, F., Zayed, T. 2008. *Infrastructure Condition Prediction Models For Sustainable Sewer Pipelines*. ASCE Journal Of Performance of Constructed Facilities 22, 5, 333-341.
- Chughtai, F., Zayed, T. 2011. *Integrating WRc And CERIU Condition Assessment Models And Classification Protocols For Sewer Pipelines*. ASCE Journal Of Infrastructure Systems, September, 129-136
- Clark, R., Stafford, Ch., Goodrich, J. 1982. *Water Distribution Systems: A Spatial And Cost Evaluation*. Journal Of The Water Resources Planning And Management Division 108, 3, 243-256.
- Cabrera, E., García-Serra, J. 1997. *Problemática De Los Abastecimientos Urbanos. Necesidad De Su Modernización*. Unidad Docente Mecánica De Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cobacho, R. 2007. *Optimal Scheduling Of Pipe Replacement, Including Opportunity, Social And Environmental Costs*. Proceedings Of Pipelines 2007, 1-11.
- Carino, N. 2001. *The Impact-Echo Method: An Overview*. Proceedings Of The 2001 Structures Congress And Exposition. American Society Of Civil Engineers. Ed. Peter C. Chang.

- Cobacho, R. 2002. *Gestión De La Demanda De Agua Urbana*. III Máster En Gestión Y Uso Eficiente Del Agua. Grupo Mecánica De Fluidos, Universidad Politécnica De valencia. Iniciativa Comunitaria ADAPT-EUROAGUA.
- Cobacho, R. 2006. *Desarrollo De Un Sistema Soporte De Decisión Para Establecer Prioridades Para La Rehabilitación Y Sustitución De Tuberías*. Instituto Tecnológico Del Agua. Universidad Politécnica De valencia.
- Christchurch City Council. 2002. *Water Supply Asset Management Plan*. City Water And Wastewater Unit. May.
- Davies, J., Clarke, B., Whiter, J., Cunningham, R. 2001. *Factors Influencing The Structural Deterioration And Collapse Of Rigid Sewer Pipes*. Urban Water 3, 73-89.
- Dirksen, J., Goldina, A., Veldhuis, J. 2009. *The Role Of Uncertainty In Urban Drainage Decisions: Uncertainty In Inspection Data And Their Impact On Rehabilitation Decisions*. In: *Strategic Asset Management Of Water Supply And Wastewater Infrastructures*. IWA Publishing, 273-286.
- Dubois, D., Prade, H. 1985. *A Review Of Fuzzy Set Aggregation Connectives*. Information Sciences, 85-121.
- AENOR. 2010. *Norma UNE-EN 752:2010 Sistemas De Desagües Y De Alcantarillado Exteriores A Edificios*. Ed. AENOR.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2002. *Programa De Cálculo De Redes Hidráulicas EPANET Versión 2.0*. Water Supply and Water Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory.
- Feingold, H., Ascher, H. 1984. *Repairable Systems: Modelling, Inference, Misconceptions And Their Causes*. M. Dekker, New York.
- Fenner, R., Sweeting, L. 1999. *A Decision Support Model For The Rehabilitation Of Non-critical Sewers*. Water Science And Technology 39, 9, 193-200.

- Finno, R., Molnar, K., Rossow, E. 2003. *Analysis Of Effects Of Deep Braced Excavations On Adjacent Buried Utilities*. Report Of Projects A450 and A464. Northwestern University, Evanston.
- Fishburn, P. 1964. *Decision And Value Theory*. Operations Research 10, 437.
- Fishburn, P. 1970. *Utility Theory For Decision Making*. John Wiley And Sons, Inc.
- Fondo de Población de las Naciones Unidas, 2007: *Estado De La Población Mundial En 2007. Liberar El Potencial De Crecimiento Urbano*. Ed. United Nations, 8. ISBN 978-0-89714-809-2.
- García, V., García-Serra, J. 2004. *Evaluación Y Control De Fugas Mediante Sectorización Y Gestión De La Presión*. Evaluación Y Control De Pérdidas En Redes Urbanas. Tomo II. Instituto Tecnológico Del Agua. ISBN 84 609 1473 9.
- Giertz, S., B.Diekkruger,A. Jaeger andm. Schopp. 2006. *An Interdisciplinary Scenario Analysis To Assess The Water Availability And Water Consumption In The Upper Oum Catchment In Benin*. Advanced Geosciences., 9, 1-11.
- Grigg, N. 2003. *Condition Assessment Of Water Distribution Pipes*. ASCE Journal Of Infrastructure Systems, September, 147-153.
- Hernández, L. 2011. *Modelo Decisional Para La Reposición Y Rehabilitación De Redes De Alcantarillado Del Valle De Aburrá*. Tesis de maestría. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional De Colombia, Medellín.
- Hirner, W. 1998. *Maintenance And Rehabilitation Policies For Urban Water Systems*. Water Management International.
- Instituto De Economía Aplicada A La Empresa (IEAE). 2002. *Aplicación Del Método Delphi En La Elaboración De La Tabla Simétrica De Las Tablas Input-Output 2001 De Catalunya*. Universidad Del País Vasco.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). 2007. *Summary For Policymakers*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution Of Working Group I To The Fourth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning,

- Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor And H.L. Miller Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom And New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). 2012. *Summary For Policymakers*. In: *Managing The Risks Of Extreme Events And Disasters To Advance Climate Change. A Special Report Of Working Groups I And II Of The Intergovernmental Panel On Climate Change*. Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, And P.M. Midgley Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK, And New York, NY, USA
- Instituto Nacional De Estadística (INE). 2003: *Encuesta De Migraciones (30311)*. Inventario De Operaciones De La Administración General Del Estado. Disponible en: <http://www.ine.es/ioe/ioeficha.jsp?Cod=30311>
- Instituto Nacional De Estadística (INE). 2007: *Estadísticas Medioambientales Sobre El Agua. Encuesta Sobre Suministro Y Tratamiento De Agua (30067)*. Inventario De Operaciones De La Administración General Del Estado, disponible en: <http://www.ine.es/ioe/ioeficha.jsp?Cod=30067>
- Instituto Nacional De Estadística (INE). 2012. *Boletín Informativo Del Instituto Nacional De Estadística. Indicadores Del Agua*. Inebase. Disponible en: http://www.ine.es/ss/Satellite?C=Page&cid=1254735116567&pagename=product_osservicios%2fpyslayout&L=es_ES.
- Jones, G. 1984. *The Structural Deterioration Of Sewers*. In: *International Conference On The Planning, Construction, Maintenance And Operation Of Sewerage Systems*. Reading, September.
- Khan, Z., Zayed, T. 2010. *Structural Condition Assessment Of Sewer Pipelines*. ASCE Journal Of Performance Of Constructed Facilities 24, 2, 170–179.
- Kleiner, Y. 2001. *Comprehensive Review Of Structural Deterioration Of Water Mains: Statistical Models*. Urban Water 3, 3, 131-150
- Kleiner, Y. 2005. *Risk Management Of Large-Diameter Water Transmission Mains*. AWWA Research Foundation

- Kleiner, Y., Rajani, B., 2006. *Static And Dynamic Effects In Prioritizing Individual Water Mains For Renewal*. Institute For Research In Construction. National Research Council Of Canada.
- Kottmann, A. 1994. *Pipe Damage Due To Air Pockets In Low Pressure Piping*. Proceedings Of Second International Conference On Water Pipeline Systems, Edinburgh. D. S. Miller, 41-52
- Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen and I.A. Shiklomanov, 2007: *Freshwater Resources And Theirmanagement. Climatechange 2007: Impacts, Adaptation And Vulnerability*. Contribution Of Working Group II To Thefourth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. Van Derlinden And C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- Lambert, A.; Brown, T., Takizawa, M., Weimer, D. 1999. *A Review Of Indicators For Real Losses From Water Supply Systems*. IESA, J Water SRT – Aqua 48. December.
- Lester, J., Farrar, D. 1979. An Examination Of Defects Observed In 6 Km Of Sewers. TRRL Supplementary Report 531.
- Makar, J., Chagnon, N. 1999. *Inspecting Systems For Leaks, Pits, And Corrosion*. AWWA Journal 91, 7, 36-46.
- Mamdani, E., Gaines, R. 1981. *Fuzzy Reasoning And Its Applications*. Academic Press, Londres.
- Matos, R., Cardoso, A., Ashley, R., Duarte, P., Molinari, A., Schulz, A. 2003. *Performance Indicators For Wastewater Services*. Manual Of Best Practice Series. IWA Publishing.
- May, J. 1994. *Pressure-dependent Leakage*. World Water And Environmental Engineering. October.
- National Research Council Of Canada (NRC). 2004. *Municipal Infrastructure Investment Planning (MIIP). An Evaluation Of Condition Assessment Protocols For Sewer Management B-5123.6*. Ottawa.

- National Research Council Of Canada (NRC). 2005. *Risk Management of Large-Diameter Water Transmissions Mains*. American Water Works Association Research Foundation.
- New Zealand Water And Wastes Association. 2006. *Pipe Inspection Manual. Project Max*. Ed. New Zealand Water And Wastes Association.
- O'Reilly, M., Rosbrook, R., Cox, G., mccluskey, A. 1989. *Analysis Of Defects In 180 Km Of Pipe Sewers In Southern Water Authority*. TRRL Research Report 182.
- Organización De Las Naciones Unidas (ONU), 2007. *Estado De La población Mundial 2007. Liberar El Potencial Del Crecimiento Urbano*. Fondo de Población De Las Naciones Unidas.
- Organización De Las Naciones Unidas (ONU), 2012. *Estado De La población Mundial 2012. Sí A La Opción, No Al Azar*. Fondo De Población De Las Naciones Unidas.
- Parra, J. 2006. *Renovación De Redes De Abastecimiento De Agua Mediante Sistemas Soporte A La Toma De Decisiones Multicriterio (SSDM)*. Diploma De Estudios Avanzados (DEA). Universidad Politécnica de Valencia.
- Parra, J., Cobacho, R., Cabrera Jr., E. 2013. *Assessment Of Service And Structural Conditions Of Water Supply And Wastewater Pipes By Fuzzy Logic And Decision Space Analysis*. Proceedings Of 5th IWA International Conference On Benchmarking And Performance Assessment Of Water Services. April.
- Rajani, B., Zhan, C., Kuraoka., S. 1996. *Pipe-Soil Interaction Analysis Of Jointed Water Mains*. Canadian Geotechnical Journal 33, 3, 393-404.
- Rajani, B., Kleiner, Y. 2003. *Protecting Ductile-Iron Water Mains: What Protection Method Works Best For What Soil Condition?.* AWWA Journal 95, 11, 110.
- Rajani, B. 2004. *North American Water Supply Systems : Past, Present And Future*. Proceedings Of The Conference Drinking Water And Environmental Technologies: International Issues, 1-17.
- Rajani, B., Tesfamariam, S. 2007. *Estimating Time To Failure Of Cast-Iron Water Mains*. Water Management 160, 2, 83-88.

- Romero, C., Rehman, T. 1986. *La Programación Multiobjetivo Y La Planificación Agraria. Algunas Consideraciones Teóricas*. Agricultura Y Sociedad 40, Julio-Septiembre.
- Ross, T. 2004. *Fuzzy Logic With Engineering Applications*. Second Edition. John Wiley And Sons Ltd.
- Røstum, J., R. Baur, S. Sægrov, S. Hörold, and W. Schilling. 1999. *Predictive Service-Life Models For Urban Infrastructure Management*. 8th International Conference On Urban Storm Water Drainage. Sydney.
- Ruiz, J., 2007: *Cambio Climático Y Recursos Hídricos*. Seminario Internacional Agua, Energía Y Cambio Climático. Instituto Tecnológico Del Agua. Universidad Politécnica De Valencia
- Rumsey, P. 1982. *Soil Behaviour And Trench Support*. Water Research Centre. Wrc ER 70E. Marlow.
- Saaty, T. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. Mcgraw-Hill New York.
- Shamir, U. Y Howard, C: 1979. *An Analytic Approach To Scheduling Pipe Replacement*. AWWA Journal 71, 5, May.
- Souza, V., Ferreira, F., Almeida, N., Matos, J., Martins, J., Texeira, A. 2009. A Simplified Technical Decision Support Tool For The Asset Management Of Sewer Networks. *Water Asset Management International* 5, 1, March.
- Texeira, S. 2004. *Indicadores De Gestión Mediante Modelos Matemáticos*. En: Mejora De La Gestión Técnica De Abastecimientos. Instituto Tecnológico Del Agua. Universidad Politécnica De Valencia. ISBN 84-609-1474-7
- Tullis, B., Barfuss, S., Christensen, R. 2006. *Changes In Hydraulic Roughness Coefficients For Circumferentially Strained M294 Pipe*. Transportation Research Board Conference.
- United Nations Environment Program, 2004: *Fresh Water In Europe*. UNEP/DEWA-Europe. SADAG Print, 91.

- Vanier, D., Tesfamariam, S., Sadiq, R., Lounis, Z. 2006. *Decision Models To Prioritize Maintenance And Renewal Alternatives*. Proceedings Of Joint International Conference On Computing And Decision Making In Civil And Building Engineering, 2595-2604.
- Verbanck, M., Ashley, R., Bachoc, A. 1994. *A Summary Of Conclusions*. International Workshop On Origin, Occurrence And Behaviour Of Sediments In Sewer Systems. Water Research 28, 1.
- Wang, Y., Zayed, T., Moselhi, O. 2009. *Prediction Models For Annual Break Rates Of Water Mains*. Journal Of Performance Of Constructed Facilities 23, 1, 47-54.
- Wilbanks, T.J., P. Romero Lankao, M. Bao, F. Berkhout, S. Cairncross, J.-P. Ceron, M. Kapshe, R. Muir-Wood and R. Zapata-Marti. 2007. *Industry, Settlement And Society. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation And Vulnerability*. Contribution Of Working Group II To Thefourth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. Van Derlinden And C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 357-390.
- WEF/ASCE. 1994. *Existing Sewer Evaluation And Rehabilitation, 2nd Ed*. WEF Manual Of Practice FD-6/ASCE Manuals And Reports On Engineering Practice 62.
- Water Research Centre (WRc). 2001. *Sewerage Rehabilitation Manual, Fourth Edition*. WRc PLC.
- WSA/FWR. 1991. *A Guide To Sewerage Operational Practices*. Sewers And Water Mains Committee.
- Young, O., O'Reilly, M. 1983. *A Guide To Design Loadings For Buried Rigid Pipes*. TRRL, Department Of Transport.
- Zadeh, L. 1965. *Fuzzy Sets*. Information And Control 8, 338-353
- Zadeh, L. 2002. *From Computing With Numbers To Computing With Words. Form Manipulations Of Measurements To Manipulation Of Perceptions*. International Journal Of Applied Mathematics And Computer Science 12, 3, 307-324

Zhao, J., Mc Donald, S., Kleiner, Y. 2001. *Guidelines For Condition Assessment And Rehabilitation Of Large Sewers*. Institute For Research In Construction. National Research Council Of Canada.

Capítulo 10
Anexos

Anexo I Listado de variables de gestión

Estas variables (las primeras cuatro tablas para abastecimientos, y las restantes para saneamiento) constituyen las entradas para calcular los “Indicadores de desempeño fundamentales”, y además resultan necesarias para calcular los balances expuestos en el apartado “Balances hídricos: enfoque hacia la autorización del consumo y enfoque hacia la medición del consumo”. En primera instancia (Tabla 125) se lista el grupo de variables volumétricas, además de aquellas requeridas para realizar el balance hídrico basado en la autorización de consumos, propuesto por la IWA (Alegre y otros, 2002).

Tabla 125. Variables de volumen y de balance hídrico de una red de abastecimiento basado en la autorización de consumos

Variables volumétricas y de balance hídrico mediante autorización de consumos	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Capacidad de absorción de recursos propios [A1]: volumen máximo de agua que potencialmente puede ser extraída de recursos propios, durante el periodo de evaluación, basándose en la disponibilidad de recursos hídricos y sobre cualquier restricción legal, contractual o concesión	m ³
Concesión de agua importada [A2]: concesión máxima de importación de agua tratada y no tratada, durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen de entrada al sistema [A3]: volumen de agua de entrada al sistema global, durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen de agua no tratada exportada [A5]: volumen total de agua no tratada transferida a otro abastecimiento desde la misma área de abastecimiento, durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen de agua tratada exportada [A7]: volumen total de agua tratada exportada a otro abastecimiento o a otro sistema desde la misma área de abastecimiento, durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen consumido facturado medido [A8]: cantidad total de agua consumida facturada medida autorizada (incluyendo agua exportada), durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen consumido facturado no medido [A9]: cantidad total de agua consumida facturada no medida autorizada (incluyendo agua exportada), durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen consumido facturado autorizado [A10]: cantidad total diaria de agua consumida facturada autorizada (incluyendo agua exportada)	m ³
Volumen consumido no facturado medido [A11]: cantidad total de agua consumida no facturada medida autorizada (incluyendo agua exportada), durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen consumido no facturado no medido [A12]: cantidad total de agua consumida no facturada no medida autorizada (incluyendo agua exportada), durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen consumido no facturado autorizado [A13]: cantidad total diaria de agua	m ³

Variables volumétricas y de balance hídrico mediante autorización de consumos

Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
consumida no facturada autorizada (incluyendo agua exportada)	
Volumen consumido autorizado [A14]: volumen total diario de agua medida y/o no medida que es tomado por abonados registrados, por el propio abastecimiento, o por otros implícita o explícitamente autorizados por el abastecimiento para hacerlo, para propósito residencial, comercial, industrial o público. Dicho volumen incluye el agua exportada	m ³
Volumen correspondiente a pérdidas de agua [A15]: diferencia entre el volumen diario de entrada al sistema y el consumo diario autorizado	m ³
Volumen consumido no autorizado [A16]: cantidad total de agua consumida no autorizada, incluyendo el agua robada, durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen de pérdidas por inexactitudes en la medición [A17]: cantidad total de agua consumida durante el periodo de evaluación, pero no contabilizada debido a inexactitudes en la medición, durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen correspondiente a pérdidas aparentes [A18]: cantidad total diaria de agua no contabilizada debido a consumo no autorizado y a inexactitudes en la medición	m ³
Volumen correspondiente a pérdidas reales [A19]: cantidad total diaria de pérdidas físicas de agua en el sistema presurizado y hasta el punto de medición del usuario	m ³
Volumen de agua que genera ingresos [A20]: cantidad total diaria de agua consumida autorizada facturada (incluyendo agua exportada)	m ³
Volumen de agua que no genera ingresos [A21]: diferencia entre el volumen diario de entrada al sistema y el consumo diario autorizado facturado (incluyendo agua exportada)	m ³
Volumen de agua abastecida reutilizada [A22]: volumen total de agua servida directamente reusada como fuente hídrica durante el periodo de evaluación, después de un tratamiento adecuado, generalmente como complemento de las fuentes hídricas convencionales, durante el periodo de evaluación	m ³

Aquellas variables indispensables para realizar un balance hídrico en la red basado en la medición de los consumos, y propuesto por Almandoz (Almandoz y otros, 2002), se relacionan en la Tabla 126.

Tabla 126. Variables del balance hídrico de una red de abastecimiento basado en la medición de consumos

Variables del balance hídrico mediante medición de consumos

Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Caudal inyectado [Q]: corresponde al volumen que en una determinada unidad de tiempo se inyecta en la red y que resulta conocido a través de las medidas aportadas por caudalímetros en el punto (o puntos) de origen de la distribución	m ³ /día
Caudal registrado [Q _r]: es la suma de todos los caudales medidos por los diferentes contadores de usuario instalados en la red. Se incluye aquí a los usuarios de todo tipo a los cuales se les realice medición de su consumo (residenciales, comerciales, industriales, oficiales, municipales, riego de parques, aseo de calles y aceras)	m ³ /día
Caudal incontrolado [Q _i]: caudal sobre el cual no se tiene un referencia clara de su	m ³ /día

VARIABLES DEL BALANCE HÍDRICO MEDIANTE MEDICIÓN DE CONSUMOS

Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
destino último, y que puede haberse fugado de la red antes de ser consumido o no	
Caudal incontrolado fugado [Q _{if}]: caudal perdido a través de fugas de la red (en los tramos de ella que se ubican antes del contador del usuario)	m ³ /día
Caudal incontrolado consumido [Q _{ic}]: caudal del cual se tiene certeza de haber sido consumido, pero del cual no se tiene control (ya sea porque no se tiene un contador instalado o porque este no funciona adecuadamente)	m ³ /día
Caudal consumido incontrolado por errores de medición [Q _{ice}]: caudal del cual se tiene certeza de haber sido consumido, y del que se cuenta con una medición inadecuada	m ³ /día
Caudal consumido incontrolado por ausencia de contador [Q _{ica}]: caudal del cual se tiene certeza de haber sido consumido, pero del cual no se cuenta con medición pues no se tiene contador instalado	m ³ /día
Caudal consumido incontrolado por ausencia legal de contador [Q _{ical}]: caudal del cual se tiene certeza de haber sido consumido, pero del cual no se cuenta con medición, pues no se prevé (legalmente) tener un contador instalado	m ³ /día
Caudal consumido incontrolado por ausencia ilegal de contador [Q _{icail}]: caudal del cual se tiene certeza de haber sido consumido, pero del cual no se cuenta con medición, pues, aunque debería, no se tiene un contador instalado (acometida ilegalmente instalada)	m ³ /día

Las variables relacionadas con los activos físicos de la red, los usuarios y aquellas de tipo financiero y económico, se listan en la Tabla 127.

Tabla 127. Variables de infraestructura, de abonados y de tipo financiero

VARIABLES DE INFRAESTRUCTURA, DEMOGRÁFICAS Y FINANCIERAS

Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Bombas [C4]: Número total de bombas del sistema	n ^o
Capacidad de las estaciones de bombeo [C6]: potencia nominal total de las bombas del sistema (sin incluir los sistemas de bombeos en la red del usuario) en la fecha de referencia	kW
Longitud de tuberías principales [C8]: longitud total de tuberías de transmisión y distribución (no se incluyen las acometidas de servicio)	km
Caudalímetros del sistema [C10]: número de caudalímetros temporal o permanentemente instalados en el sistema de transmisión y distribución, tales como medidores de control del sistema, medición por distritos y cuantificación de agua importada y exportada (sin incluir medidores de agua a los usuarios -contadores-)	n ^o
Medidores de presión [C12]: número total de medidores de presión disponibles para monitorización temporal o permanente	n ^o
Medidores de nivel de agua [C13]: número total de medidores de nivel de agua disponibles para monitorización temporal o permanente	n ^o
Válvulas principales [C21]: número total de toda clase de válvulas instaladas en las tuberías del sistema de transmisión y distribución (sin contabilizar las válvulas instaladas en las acometidas de servicio)	n ^o
Acometidas de servicio [C24]: número total de acometidas de servicio	n ^o

Variables de infraestructura, demográficas y financieras	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Longitud promedio de acometida de servicio [C25]: longitud desde el punto de entrega al punto de medida	m
Medidores de agua a los usuarios –contadores- [E6]: número total de medidores de agua a los usuarios -contadores-	nº
Costos acumulados de funcionamiento [G5]: costos netos totales de operación y mantenimiento, además de costos netos internos de fuerza de trabajo durante el periodo de evaluación, referidos al servicio de abastecimiento de agua	euros
Ingresos por venta de agua para consumo directo [G36]: ingresos por ventas de agua para consumo directo durante el periodo de evaluación	euros
Tarifa promedio de agua por 1 m ³ para consumo directo [G57]: proporción entre los ingresos diarios por ventas de agua para consumo directo y la cantidad total diaria de agua consumida facturada autorizada (incluyendo agua exportada)	euros
Costo unitario por 1 m ³ atribuido a pérdidas reales [G58]: el más alto de los componentes variables del cargo por 1 m ³ de agua importada o costo marginal a largo plazo (LRMC, por sus siglas en inglés), para fuentes propias	euros

En la Tabla 128 se muestran aquellas variables relacionadas con la operación de la red.

Tabla 128. Variables relativas a la operación de una red de abastecimiento

Variables operacionales	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Inspección a la red [D8]: longitud total de tuberías de transmisión y distribución donde al menos válvulas y otros accesorios fueron inspeccionados, durante el periodo de evaluación	km
Control de fugas [D9]: longitud total de tuberías de transmisión y distribución sujetas a control activo de fugas, durante el periodo de evaluación	km
Fugas reparadas mediante control activo de fugas [D10]: número de fugas detectadas y reparadas mediante control activo de fugas, durante el periodo de evaluación	nº
Calibraciones de caudalímetros del sistema [D12]: número de calibraciones a caudalímetros del sistema realizadas, durante el periodo de evaluación	nº
Calibraciones a medidores de presión [D13]: número de calibraciones a medidores de presión realizadas durante el periodo de evaluación	nº
Calibraciones a medidores de nivel de agua [D14]: número de calibraciones a medidores de nivel de agua realizadas durante el periodo de evaluación	nº
Rehabilitación de tuberías principales [D20]: longitud de tuberías de transmisión y distribución rehabilitadas (puestas en condición de operación) durante el periodo de evaluación (incluye no sólo D21 y D22, sino además la longitud de tuberías principales rehabilitadas mediante otras técnicas)	km
Renovación de tuberías principales [D21]: longitud de tuberías principales renovadas (puestas en condición “como nuevas”) mediante resina epóxica, mortero de cemento	km

Variables operacionales	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
u otros materiales durante el periodo de evaluación	
Reemplazos de tuberías principales [D22]: longitud de tuberías principales reemplazadas durante el periodo de evaluación	km
Reemplazos de válvulas [D23]: número de válvulas principales reemplazadas durante el periodo de evaluación (sin incluir las válvulas instaladas en las acometidas de servicio)	nº
Rehabilitación de acometidas de servicio [D24]: número de acometidas de servicio reemplazadas o renovadas durante el periodo de evaluación	nº
Reemplazo de bombas [D26]: potencia nominal total de las bombas reemplazadas durante el periodo de evaluación (el reemplazo de las bombas se refiere exclusivamente al reemplazo total de la bomba y el motor. La potencia nominal a ser cuantificada debe referirse a la del nuevo equipo. La potencia de pequeñas bombas puede ser excluida si su influencia en términos del grado de confiabilidad global de la variable es despreciable)	kW
Fallos en bombas [D27]: suma, para todas las bombas, del número total de días en los cuales la bomba está fuera de servicio durante el periodo de evaluación	días
Fallos en tuberías principales [D28]: número de fallos en tuberías principales, incluyendo fallos en válvulas y accesorios, durante el periodo de evaluación	nº
Fallos en acometidas de servicio [D29]: número de fallos en acometidas de servicio durante el periodo de evaluación	nº
Presión promedio de operación [D34]: presión promedio de operación en los puntos de entrega cuando el sistema se encuentra presurizado	kPa
Reemplazos de medidores de usuarios –contadores- [D45]: número de medidores de agua a los usuarios reemplazados en el sistema	nº

Para calcular la selección de indicadores de desempeño exclusivos de redes de saneamiento (Matos y otros, 2003) que se presenta en este texto, resulta indispensable evaluar las variables que se detallan a continuación. Ellas se reúnen en la Tabla 129, Tabla 130, Tabla 131, Tabla 132 y Tabla 133.

Tabla 129. Variables ambientales para indicadores de redes de saneamiento

Variables ambientales	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Población equivalente con tratamiento de aguas residuales satisfactorio [wA1]: población equivalente que es atendida por las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa, cumpliendo con los acuerdos de vertido en la fecha de referencia	p.e.
Aguas residuales tratadas [wA2]: aguas residuales tratadas por las plantas gestionadas por la empresa o mediante sistemas en-el-sitio durante el periodo de evaluación	m ³
Aguas residuales tratadas en forma preliminar [wA3]: aguas residuales que sólo reciben tratamiento preliminar en las plantas gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³

VARIABLES AMBIENTALES	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Pico diario de aguas residuales tratadas en forma preliminar [wA4]: volumen máximo diario de aguas residuales que sólo reciben tratamiento preliminar en plantas de tratamiento gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³ /día
Aguas residuales tratadas en forma primaria [wA5]: aguas residuales que sólo reciben tratamiento primario en las plantas gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³
Pico diario de aguas residuales tratadas en forma primaria [wA6]: volumen máximo diario de aguas residuales que sólo reciben tratamiento primario en plantas de tratamiento gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³ /día
Aguas residuales tratadas en forma secundaria [wA7]: aguas residuales que reciben tratamiento secundario en las plantas gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³
Pico diario de aguas residuales tratadas en forma secundaria [wA8]: volumen máximo diario de aguas residuales que reciben tratamiento secundario en plantas de tratamiento gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³ /día
Aguas residuales tratadas en forma terciaria [wA9]: aguas residuales que reciben tratamiento terciario en las plantas gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³
Pico diario de aguas residuales tratadas en forma terciaria [wA10]: volumen máximo diario de aguas residuales que reciben tratamiento terciario en plantas de tratamiento gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	m ³ /día
Aguas residuales tratadas mediante sistemas en-el-sitio [wA11]: volumen de aguas residuales tratadas mediante sistemas en-el-sitio durante el periodo de evaluación	
Fango producido en las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa [wA13]: peso seco de fango producido en las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa durante el periodo de evaluación	ton
Fango manejado [wA14]: peso seco de fango manejado en las instalaciones de la empresa, incluyendo no sólo el producido en las plantas de tratamiento, sino además el proveniente de otras fuentes	ton
Fango utilizado [wA15]: peso seco de fango manejado en las instalaciones de la empresa y utilizado en actividades como agricultura, producción de materiales, sembrado de bosques, etc., durante el periodo de evaluación	ton
Fango dispuesto [wA16]: peso seco de fango manejado en las instalaciones de la empresa y dispuesto ya sea en botaderos, o mediante incineración u otros medios, durante el periodo de evaluación	ton
Sedimentos del sistema de drenaje [wA20]: peso drenado correspondiente a sedimentos provenientes del sistema de alcantarillado durante el periodo de evaluación	ton
Material particulado y arena [wA22]: peso seco de material particulado y arena removido de las plantas de tratamiento y estaciones bombeo durante el periodo de evaluación	ton
Volumen de vertidos rebosados [wA25]: volumen total de vertidos que ha sido rebosados durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen de agua lluvia [wA26]: volumen total de agua lluvia caído en la cuenca de aportación durante el periodo de evaluación	m ³

Tabla 130. Variables de infraestructura para indicadores de redes de saneamiento

Variables de infraestructura	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Longitud total de alcantarillado [wC1]: longitud total de alcantarillado gestionada por la empresa en la fecha de referencia	km
Alcantarillado con sobrecarga en tiempo seco [wC2]: longitud total de alcantarillado sometido a sobrecarga en tiempo seco durante el periodo de evaluación	m
Alcantarillado con sobrecarga en tiempo de lluvias [wC3]: longitud total de alcantarillado sometido a sobrecarga en tiempo de lluvias durante el periodo de evaluación	m
Capacidad diaria de tratamiento preliminar [wC12]: para todas las plantas de tratamiento preliminar, suma de las capacidades de tratamiento máximas diarias (durante el periodo de evaluación)	m ³ /día
Capacidad diaria de tratamiento primario [wC13]: para todas las plantas de tratamiento primario, suma de las capacidades de tratamiento máximas diarias (durante el periodo de evaluación)	m ³ /día
Capacidad diaria de tratamiento secundario [wC14]: para todas las plantas de tratamiento secundario, suma de las capacidades de tratamiento máximas diarias (durante el periodo de evaluación)	m ³ /día
Capacidad diaria de tratamiento terciario [wC15]: para todas las plantas de tratamiento terciario, suma de las capacidades de tratamiento máximas diarias (durante el periodo de evaluación)	m ³ /día
Dispositivos de vertido [wC19]: número de dispositivos de vertido en el sistema de alcantarillado en la fecha de referencia	n ^o
Cámaras de inspección (manholes) [wC21]: número de cámaras de inspección (manholes) en el sistema de alcantarillado en la fecha de referencia	n ^o
Propiedades conectadas [wC28]: número de propiedades conectadas al sistema de alcantarillado gestionado por la empresa en la fecha de referencia	n ^o

Tabla 131. Variables operacionales para indicadores de redes de saneamiento

Variables operacionales	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Limpieza del alcantarillado [wD2]: longitud del alcantarillado que se ha dejado limpio para prevenir obstrucciones y bloqueos durante el periodo de evaluación	km
Inspecciones en cámaras (manholes) [wD3]: número de cámaras inspeccionadas durante el periodo de evaluación	n ^o
Volumen ingresado al sistema inadecuadamente [wD35]: volumen de agua que ingresa al sistema a través de conexiones inapropiadas o equivocadas, y entre las que también se incluyen los casos de escorrentía superficial directa, y la entrada al sistema a través de las tapas de las cámaras de inspección	m ³
Volumen de infiltración [wD36]: volumen de agua que entra al sistema desde el subsuelo durante el periodo de evaluación	m ³
Volumen de pérdidas [wD37]: volumen fugado del sistema de alcantarillado al terreno circundante durante el periodo de evaluación	m ³
Bloqueos en el alcantarillado [wD38]: número de bloqueos ocurridos en el sistema de alcantarillado durante el periodo de evaluación	n ^o
Inundaciones ocasionadas por alcantarillado sanitario [wD41]: número de	n ^o

Variables operacionales	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
inundaciones ocurridas a causa del sistema de alcantarillado sanitario durante el periodo de evaluación	
Colapsos en el alcantarillado [wD44]: número de colapsos ocurridos en el sistema de alcantarillado sanitario durante el periodo de evaluación	nº

Tabla 132. Variables demográficas para indicadores de redes de saneamiento

Variables demográficas	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Población residente [wE1]: población total viviendo permanentemente en el área que compete a la empresa de saneamiento en la fecha de referencia	habitantes
Población residente servida por las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa [wE2]: población residente servida por las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa en la fecha de referencia	habitantes
Población residente conectada al alcantarillado [wE4]: población residente conectada al sistema de alcantarillado gestionado por la empresa en la fecha de referencia	habitantes
Población equivalente servida por las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa [wE5]: población equivalente servida por las plantas de tratamiento gestionadas por la empresa en la fecha de referencia	p.e.
Población residente no servida [wE7]: población residente cuyas aguas residuales no son ni recolectadas ni tratadas por la empresa en la fecha de referencia, incluyendo la población asociada a las aguas residuales importadas y las contribuciones industriales expresadas en población equivalente	habitantes

Tabla 133. Variables de calidad del servicio para indicadores de redes de saneamiento

Variables de calidad del servicio	
Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Aguas servidas recogidas [wF1]: aguas servidas recogidas correspondientes al volumen de entrada residencial, comercial e industrial en el sistema de alcantarillado durante el periodo de evaluación	m ³
Inundaciones en propiedades generadas por alcantarillado sanitario en tiempo seco [wF2]: número de propiedades afectadas por inundaciones ocasionadas por el sistema de alcantarillado sanitario en tiempo seco, durante el periodo de evaluación	nº
Inundaciones en propiedades generadas por alcantarillado sanitario en tiempo de lluvia [wF3]: número de propiedades afectadas por inundaciones ocasionadas por el sistema de alcantarillado sanitario en tiempo de lluvia, durante el periodo de evaluación	nº
Inundaciones en propiedades generadas por alcantarillado combinado en tiempo seco [wF4]: número de propiedades afectadas por inundaciones ocasionadas por el sistema de alcantarillado combinado en tiempo seco, durante el periodo de evaluación	nº

Variables de calidad del servicio

Variable [nomenclatura]: definición	Unidades
Inundaciones en propiedades generadas por alcantarillado combinado en tiempo de lluvia [wF5]: número de propiedades afectadas por inundaciones ocasionadas por el sistema de alcantarillado combinado en tiempo de lluvia, durante el periodo de evaluación	nº
Interrupciones en el servicio de alcantarillado [wF7]: suma, para todo el periodo de evaluación, del número de propiedades afectadas por interrupciones del servicio, multiplicadas por la respectiva duración de la interrupción en horas	horas
Total de quejas [wF12]: número total de quejas relacionadas con el estado del sistema de alcantarillado durante el periodo de evaluación	nº

Anexo II Indicadores complementarios basados en el balance enfocado a la medición de consumos

Desde la estructura arbórea del balance hídrico enfocado a la medición de consumos (Almandoz, 2002), se puede definir una serie de indicadores que miden a diferentes niveles, el grado de afectación en la gestión técnico-administrativa de la red. Estos indicadores son, tanto en su matemática, como en su filosofía, complementarios a los planteados por Almandoz para medir la eficacia de la gestión.

II.1 A nivel de la gestión general

II.1.1 Indicador de afectación global de la gestión, AG

Si el rendimiento del sistema da una idea de qué proporción del volumen inyectado al sistema en un periodo de tiempo ha sido registrado (y considerando que en su definición de rendimiento, este no viene expresado en términos porcentuales), el indicador de afectación global de la gestión, AG, permite saber qué parte del mismo volumen de entrada a la red no ha sido controlado en ese mismo lapso de tiempo, reflejando la ineficacia global del abastecimiento tendiente a lograr dicho control. El rendimiento del sistema, entendido como un indicador más, y el indicador de afectación global de gestión resultan pues complementarios.

$$AG = \frac{Q_i}{Q} \times 100 \quad Ec.138$$

Desde la definición de rendimiento del sistema en función del caudal registrado, y dado que la suma del caudal incontrolado y el caudal registrado constituye el caudal ingresado a la red, el indicador de afectación global de la gestión puede expresarse también como:

$$AG = 100 \cdot (1 - \eta_s) \quad Ec.139$$

II.2 A nivel de la red

II.2.1 Indicador de afectación por pérdidas reales, APR

El objetivo que conlleva a la definición de los dos indicadores que siguen radica en visualizar, con toda claridad, la disgregación de la mala salud de la red, representada en la totalidad del volumen incontrolado en un lapso de tiempo, en las afectaciones parciales que pueden causar cada uno de los dos factores que en ella influyen: las pérdidas reales y las pérdidas aparentes.

El efecto que la pérdida física de agua en la red induce en el total de agua incontrolada se plasma en el primer indicador de estado de la red, aquel que mide el grado de afectación debido a las pérdidas reales (APR).

$$APR = \frac{Q_{if}}{Q_i} \times 100 \quad \text{Ec.140}$$

Este mismo cociente, aunque con un objetivo diferente, lo presenta también Almandoz (Almandoz, 2002). Su enfoque no plantea esta relación como un indicador que dé idea de cuánto ha influido el volumen fugado en un periodo dado en la afectación total de la red. Más bien intenta, a partir de suposiciones sucesivas de este valor, hacer una estimación del caudal incontrolado fugado cuando éste no se conoce con certeza, o cuando no se ha estimado a través de otros métodos (como el control activo de fugas, el método de caudales mínimos nocturnos, entre otros).

II.2.2 Indicador de afectación por pérdidas aparentes, APA

De una forma similar, el grado de mala salud del sistema, atribuible no a las fugas, sino a la inadecuada gestión de la medición, se propone aquí definirlo mediante el segundo indicador de estado de la red, que mide la afectación por pérdidas aparentes (APA).

$$APA = \frac{Q_{ic}}{Q_i} \times 100 \quad \text{Ec.141}$$

Resulta evidente, desde el conocimiento de que todo el monto del caudal incontrolado (Q_i) resulta compuesto exclusivamente por la suma del caudal incontrolado consumido (Q_{ic}) y del caudal incontrolado fugado (Q_{if}), que los indicadores APR y APA son complementarios. Esto es:

$$100\% = APR + APA$$

Desde lo anterior se deduce que el conocimiento de uno implica automáticamente la certeza sobre el otro. Aquí cobra especial importancia la metodología propuesta por Almandoz para estimar el caudal incontrolado fugado mediante iteraciones sucesivas (la denominada metodología del valor X, y que se puede consultar en el texto mencionado).

En ella, tras cierto número de simulaciones hidráulicas se genera un valor que se acepta como suficientemente bueno para Q_{if} , y que implica que la suposición inicial sobre la razón entre Q_{if} y Q_i (y que equivale al indicador APR) es también suficientemente buena, generando automáticamente, como ya se dijo, un valor de APA. Por supuesto, si se parte, no de un valor calculado o medido de APR, sino de una estimación, el valor de APA deducido a partir de la última ecuación expuesta será también una estimación.

II.3 A nivel de la medida

II.3.1 Indicador de afectación en el control de consumo por errores de medición, ACE

Siguiendo con la naturaleza de los tres primeros indicadores propuestos, se plantea la necesidad de conocer qué tanto ha influido, en la mala salud del sistema debida a la falta de control sobre el consumo, los errores llevados a cabo en la medición (generalmente traducidos en sub-medición por mala elección o por deterioro del contador). Esto se logra mediante la evaluación del indicador de afectación en el control de consumo por errores de medición (ACE).

$$ACE = \frac{Q_{ice}}{Q_{ic}} \times 100 \quad Ec.142$$

II.3.2 Indicador de afectación en el control de consumo por ausencia de contador, ACA

Complementariamente, la afectación debida a la falta de control al consumo, ya no por errores atribuibles a la medición, sino directamente porque que no se cuenta con un aparato medidor en el punto de entrega al usuario, se expresa mediante el indicador afectación en el control de consumo por ausencia de contador (ACA).

$$ACA = \frac{Q_{ica}}{Q_{ic}} \times 100 \quad Ec.143$$

Bajo la consideración de los aportes que definen el caudal incontrolado consumido Q_{ic} (y que no son otros que Q_{ice} y Q_{ica}), se llega a la conclusión de la relación complementaria que existe entre ACE y ACA, que es:

$$100\% = ACE + ACA$$

Dicho esto, puede aceptarse que una buena gestión de la base de datos de contadores, desde la cual se establezca un valor estimado del error en el parque, en compañía con la disponibilidad de registros completos de volúmenes facturados, permitirá evaluar el indicador ACE, y tras la expresión anterior, el valor de ACA.

II.4 A nivel del control de acometidas

Por último se definen dos indicadores que evalúan las afectaciones debidas a la falta de control sobre los consumos que no tienen medidores instalados.

II.4.1 Indicador de afectación en el control de consumo por ausencia legal de contador, ACL

El primero de ellos, mide el grado de afectación al caudal consumido pero incontrolado por no tener instalado un contador, aunque de forma premeditada, o legal, y se determina mediante el indicador de afectación en el control de consumo por ausencia de contador, debida específicamente a ausencias legales (ACL)

$$ACL = \frac{Q_{ical}}{Q_{ica}} \times 100 \quad Ec.144$$

II.4.2 Indicador de afectación en el control de consumo por ausencia ilegal de contador, ACI

Complementariamente, el grado de afectación por falta de control al consumo, generado por acometidas legales o ilegales, pero en las cuales se ha suprimido ilegalmente el contador (en ambos casos, ausencia ilegal de contador), se evalúa mediante el indicador de afectación en el control de consumo por ausencia de contador ilegal (ACI).

$$ACI = \frac{Q_{icai}}{Q_{ica}} \times 100 \quad Ec.145$$

Similar a lo planteado para niveles de gestión superiores, desde la definición del caudal consumido e incontrolado por ausencia de medidor (que sólo contempla dos componentes: Q_{ical} y Q_{icai}), se desprende la complementariedad entre los indicadores ACL y ACI. Esto es:

$$100\% = ACL + ACI$$

Similar al árbol mediante el cual se representa el balance hídrico enfocado a la medición de consumos, se puede crear una estructura del mismo tipo (Figura 134)

que contenga, ya no los volúmenes que al agregarse en el mismo periodo de tiempo constituyen los caudales de un nivel superior, sino las aportaciones a la mala salud de la red que sumadas en parejas constituyen afectaciones de niveles también superiores.

Árbol de indicadores de gestión evaluadores de la salud del sistema

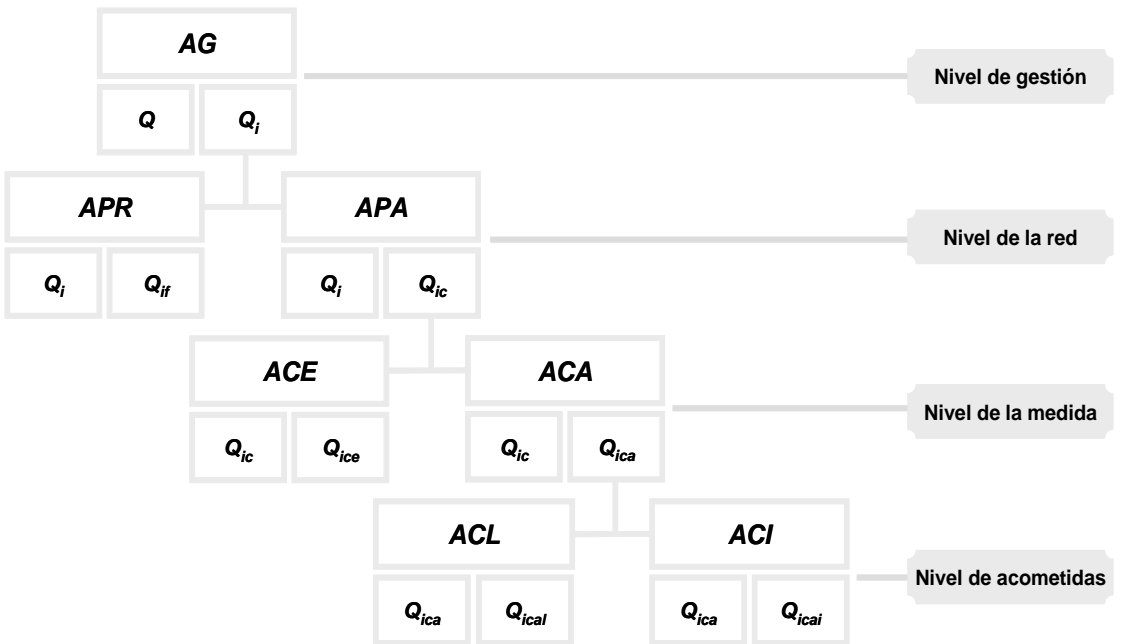


Figura 134. Indicadores de gestión relativos a cada nivel definido en el balance hídrico enfocado a la medición de consumos

