

Índice

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	267
5.3.1	Base metodológica de la Programación Por Compromiso.....	267
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	276
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	289
5.4.3	Resultados finales de prioridad a la renovación	299
5.4.4	Enseñanzas y crítica de la propuesta.....	306
5.5	Propuesta de modelo decisional para la prioridad a la renovación de tuberías de saneamiento mediante Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio	307
5.5.1	Base metodológica de la Ponderación De Criterios Estructurales Y De Servicio	307
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	351
6.1	¿En qué consiste el plan básico de actuación para la gestión técnica de redes de transporte de agua?	353
6.2	¿Por qué implementar un plan básico de actuación?	354
6.3	Aportes más relevantes del esquema de plan básico de actuación propuesto.....	355
6.4	Algunas consideraciones económicas indispensables	357
6.5	Módulos del plan básico de actuación propuesto	367
6.5.1	Módulo de planeación	372
6.5.2	Módulo de mantenimiento, evaluación y predicción	394
6.5.3	Módulo de mejora continua	397
6.6	Recursos para la ejecución del plan básico de actuación.....	410
6.6.1	Distribución de funciones según área de la empresa	410

6.6.2	Fuentes de financiación	411
6.7	Propuesta de estructura óptima de una base de datos de un sistema de transporte de agua	412
6.7.1	Hoja de inventario en infraestructura (H1)	412
6.7.2	Hoja de incidencias (H2)	414
6.7.3	Hoja de intervenciones (H3)	416
6.8	Indicadores de desempeño fundamentales	417
6.9	Balances hídricos: enfoque hacia la autorización del consumo y enfoque hacia la medición del consumo	424
6.9.1	Balance hídrico enfocado hacia la autorización del consumo	424
6.9.2	Balance hídrico enfocado hacia la medición del consumo	427

CAPÍTULO 7 SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DE PRIORIDADES DE INTERVENCIÓN MEDIANTE LÓGICA DIFUSA..... 431

7.1	Estructura modular del código informático	433
7.1.1	Módulo de gestión de bases de datos externas [CodODBC]	434
7.1.2	Módulo de Lógica Difusa [CodMatematicaDifusa]	434
7.1.3	Módulo de informe de resultados [CodInforme]	436
7.2	Procedimiento general de uso de la aplicación	437
7.2.1	Captura de datos externos y configuración de una base de datos única de trabajo	437
7.2.2	Conformación de elementos de la Lógica Difusa [FormDtosDifusos]	441
7.2.3	Conformación de matrices de agregación y defuzificación	444
7.2.4	Reporte de resultados	447
7.2.5	Otros formularios	449
7.2.6	Otros productos incluidos en el reporte de resultados	453
7.3	Bondades y desarrollos futuros de la aplicación informática	455
7.3.1	Bondades	455
7.3.2	Desarrollos futuros	456

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES, APORTES Y FUTURAS INVESTIGACIONES... 459

8.1	Conclusiones	461
8.1.1	Aspectos sobre la toma de decisión enfocada a la intervención de redes de abastecimiento o saneamiento	462
8.1.2	Aspectos sobre los criterios influyentes y su forma de evaluación	464
8.1.3	Aspectos sobre las metodologías previas para la determinación de las prioridades de intervención	465
8.1.4	Sobre la Lógica Difusa como metodología finalmente propuesta para la determinación prioridades de intervención	467
8.1.5	Sobre la gestión de bases de datos relacionadas con el patrimonio en infraestructura de la empresa	470
8.1.6	Sobre la sistematización del proceso de toma de decisión	471

8.2	Aportes de esta tesis.....	472
8.3	Investigaciones futuras	473
CAPÍTULO 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		475
CAPÍTULO 10 ANEXOS.....		487
Anexo I Listado de variables de gestión		489
Anexo II Indicadores complementarios basados en el balance enfocado a la medición de consumos		499
II.1	A nivel de la gestión general	499
II.2	A nivel de la red	500
II.3	A nivel de la medida.....	501
II.4	A nivel del control de acometidas.....	502

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)	258

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.....	277
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”	282
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”	284
Tabla 87. Nivel de exceso de fugas en acometidas del sector 1	294
Tabla 88. Nivel de exceso de fugas en tuberías de distribución del sector 1	294
Tabla 89. Calificación por sector según su nivel de exceso de fugas	295
Tabla 90. Tiempo desde la última inspección para el sector 1	295
Tabla 91. Calificación por sector según el tiempo transcurrido desde la última inspección	296
Tabla 92. Calificación asignada a los criterios según su importancia general	296
Tabla 93. Situación socio-ambiental del sector 1	297
Tabla 94. Calificación por sector según su situación socio-ambiental	298
Tabla 95. Matriz que relaciona parejas de criterios	300
Tabla 96. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio NEF	301
Tabla 97. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio SSA	301
Tabla 98. Matriz que relaciona parejas de alternativas según criterio TUI	301
Tabla 99. Matriz que relaciona alternativas individuales y criterios	304
Tabla 100. Nueva calificación asignada a los criterios según su importancia general	305
Tabla 101. Características para la asignación del factor de incertidumbre “a”	311
Tabla 102. Características para la asignación del factor de incertidumbre “b”	312
Tabla 103. Calificación de la condición de la tubería según rangos L/D y material	319
Tabla 104. Calificación de la condición según el registro de fallos	324
Tabla 105. Calificación de la condición según el registro de obstrucciones	326
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.....	380
Tabla 114. Porcentaje de registros descartados por material y época de instalación tras la primera etapa de limpieza.....	380
Tabla 115. Matriz de decisión en una base de conocimiento experto.....	387
Tabla 116. Asignación de funciones en un plan de actuación.....	411
Tabla 117. Campos de la hoja de inventarios.....	413
Tabla 118. Campos de la hoja de incidencias.....	415
Tabla 119. Campos de la hoja de intervenciones.....	416
Tabla 120. Indicadores de desempeño de la IWA comúnmente utilizados para evaluar la disponibilidad y las pérdidas de agua en un sistema de abastecimiento.....	417
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.....	418
Tabla 122. Indicadores ambientales para redes de saneamiento.....	420
Tabla 123. Indicadores físicos y operacionales para redes de saneamiento.....	421
Tabla 124. Indicadores de calidad del servicio para redes de saneamiento.....	422
Tabla 125. Variables de volumen y de balance hídrico de una red de abastecimiento basado en la autorización de consumos.....	489
Tabla 126. Variables del balance hídrico de una red de abastecimiento basado en la medición de consumos.....	490
Tabla 127. Variables de infraestructura, de abonados y de tipo financiero.....	491
Tabla 128. Variables relativas a la operación de una red de abastecimiento.....	492
Tabla 129. Variables ambientales para indicadores de redes de saneamiento.....	493
Tabla 130. Variables de infraestructura para indicadores de redes de saneamiento.....	494
Tabla 131. Variables operacionales para indicadores de redes de saneamiento.....	495
Tabla 132. Variables demográficas para indicadores de redes de saneamiento.....	496
Tabla 133. Variables de calidad del servicio para indicadores de redes de saneamiento ..	496

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.....	280
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.....	281
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.....	283

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.....	285
Figura 86. Estructura básica del Método de las Jerarquías Analíticas	287
Figura 87. Sector 1 del distrito de Gros: Mons, falda del monte Ulía, parte alta del barrio de Intxaurrondo	290
Figura 88. Sector 2 del distrito de Gros: parte alta del barrio de Gros, centro de Intxaurrondo, parte baja del barrio de Ulía.....	291
Figura 89. Sector 3 del distrito de Gros: Barrio de Egía, Gros centro, playa de la Zurriola.	291
Figura 90. Porcentaje de la longitud total de la red según diámetro.....	327
Figura 91. Distribución de longitudes instaladas en cada red por cada tipo de agua	328
Figura 92. Distribución de longitudes instaladas por diámetro. Red secundaria	328
Figura 93. Distribución de longitudes instaladas por diámetro. Colectores e interceptores	329
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	330
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	360
Figura 109. Efecto de la consideración de costos adicionales de renovación y mantenimiento sobre el periodo óptimo de renovación (Cabrera y otros, 2007)	362
Figura 110. Esquema de plan básico de actuación para una empresa de abastecimiento	369
Figura 111. Esquema de plan básico de actuación para una empresa de saneamiento	371
Figura 112. Limpieza de una base de datos de abastecimiento: secuencia de etapas y estadísticos de información descartada	382
Figura 113. Esquema propuesto de base de conocimiento experto para sistemas de transporte de agua	390
Figura 114. Esquema de planeación financiera al interior de un Plan de Actuación.....	409
Figura 115. Puntos de medición, entradas y salidas características del balance hídrico propuesto por la IWA	425
Figura 116. Estructura del balance hídrico enfocado a la autorización de consumos.....	427
Figura 117. Niveles y componentes del balance hídrico de una red de abastecimiento enfocado a la medición de consumos	429
Figura 118. Formulario de datos generales	438
Figura 119. Formulario de introducción de datos básicos para realizar balance hídrico volumétrico.....	439
Figura 120. Formulario para la transferencia de datos desde bases de datos externas.....	440
Figura 121. Formulario de conformación de Lógica Difusa	442
Figura 122. Visualización de la construcción de conjuntos difusos	443
Figura 123. Formulario para la conformación de matrices de agregación por parejas de criterios.....	445
Figura 124. Formulario para la conformación de matrices de agregación donde todos los criterios se relacionan simultáneamente	446
Figura 125. Resultados sobre necesidad de intervención. Resumen de cada sector	448
Figura 126. Resultados sobre necesidad de intervención. Listado por tubería para toda la red.....	448
Figura 127. Resultados sobre necesidad de intervención. Listado por tubería para cada sector	449
Figura 128. Opciones complementarias en la hoja de informe	450
Figura 129. Formulario de introducción de datos para calcular algunos indicadores de desempeño básicos de la IWA	450
Figura 130. Formulario de introducción de datos complementarios para calcular algunos indicadores de desempeño económicos y financieros de la IWA	451
Figura 131. Formulario de introducción de datos complementarios para calcular algunos indicadores de desempeño operativos de la IWA	452
Figura 132. Resultado: árbol de balance hídrico de la red.	453

Figura 133. Algunas de las gráficas que se insertan automáticamente a la hoja informe. .	454
Figura 134. Indicadores de gestión relativos a cada nivel definido en el balance hídrico enfocado a la medición de consumos	504