

Trabajo Fin de Máster

ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD DE ROTURA EN ABASTECIMIENTOS URBANOS CON LA AYUDA DE MODELOS ESTADÍSTICOS E HIDRÁULICOS. ESTRATEGIAS DE RENOVACIÓN DE ACTIVOS

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

DAVID JOSÉ MOGOLLÓN RIVAS

Director:

DR. MIGUEL ÁNGEL JIMÉNEZ BELLO

Codirector/es:

JULIO, 2017



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: ESTUDIO DE LA PROBABILIDAD DE ROTURA EN ABASTECIMIENTOS URBANOS CON LA AYUDA DE MODELOS ESTADÍSTICOS E HIDRÁULICOS. ESTRATEGIAS DE RENOVACIÓN DE ACTIVOS

Título del TFM en inglés: STUDY OF THE PROBABILITY OF PIPES BREAKAGE IN URBAN WATER SUPPLIES WITH THE HELP OF STATISTICAL AND HYDRAULIC MODELS. ASSESTS RENEWAL STRATEGIES

Título del TFM en Valenciano: ESTUDI DE LA PROBABILITAT DE RUPTURA EN ABASTIMENTS URBANS AMB L'AJUDA DE MODELS ESTADÍSTICS I HIDRÀULICS. ESTRATÈGIES DE RENOVACIÓ D'ACTIUS

Alumno: DAVID JOSÉ MOGOLLÓN RIVAS

Tutor:

Cotutor/es:

Director experimental:

Fecha de Lectura: JULIO,2017.

Resumen

En español (máximo 5000 caracteres)

La gestión integral y sostenible de los recursos hídricos es una tarea que ha adquirido mayor importancia en las últimas décadas debido al aumento exponencial de la población a nivel mundial, a los efectos causados por el cambio climático y a la escasez de agua dulce. La realización de una gestión eficiente del agua es una labor complicada para las compañías encargadas de distribuir el recurso debido a la cantidad de factores que deben considerarse en todos los procesos de captación, potabilización y distribución del recurso. El control y disminución de pérdidas en las redes de abastecimiento es una de las estrategias más eficientes implementadas en la actualidad para lograr un manejo eficaz del volumen de agua inyectado en la red y entregado a los usuarios.

Principalmente se debe considerar que las redes de distribución están compuestas por elementos que en su gran mayoría se encuentran en estado de deterioro debido a la edad que presentan los mismos, lo que da lugar a la aparición de fugas o en muchos casos roturas frecuentes en las

tuberías. La aparición de fallos en la red puede llegar a impedir que se satisfagan las condiciones de servicio que deben garantizarse a los usuarios, como son la presión de servicio y la calidad del agua. Adicionalmente, dependiendo de la magnitud de las roturas, pueden generarse consecuencias mayores tales como inundaciones y daños en estructuras adyacentes.

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Máster, es desarrollar una metodología que permita describir y determinar la tendencia seguida por la aparición de roturas en las redes de abastecimiento, con el fin de mejorar la gestión de los activos de dichos sistemas. Los casos de estudio seleccionados corresponden a la red de abastecimiento de la población de Algemesí y a dos sectores del sistema de distribución de la ciudad de Valencia, específicamente los sectores Jesús (9-A) y Nazaret (11-C). Cada una de éstas, se encuentran gestionadas por la empresa Aguas de Valencia S.A.

Inicialmente se ha analizado la información recogida por la compañía durante la resolución de incidencias y se ha depurado para contar con una base de datos clara y bien estructurada. Posteriormente, se ha realizado un análisis estadístico del registro de las roturas que se han presentado en la ciudad de Valencia, para determinar la existencia de valores atípicos y los factores que son más significativos o influyentes en la aparición de dichos fenómenos, obteniéndose como variable significativa el tipo de material de la tubería.

Seguidamente, se ha empleado el modelo de predicción de roturas establecido por Shamir y Howard (1979), el cual plantea que el crecimiento de la tasa de fallos de los activos en función de su edad, se da de forma exponencial. Este análisis ha sido aplicado para tuberías de Fibrocemento, Fundición Dúctil, Fundición Gris y Polietileno, los cuales son los tipos de materiales más abundantes dentro de los sistemas estudiados.

Buscando mejorar la extensión y la calidad de las bases de datos manejadas por la compañía gestora, se ha planteado una ficha tipo para la recolección de información durante la resolución de incidencias, basándose tanto en las variables consideradas por algunos modelos probabilísticos y de predicción de fallos consultados en la revisión bibliografía, como en las variables que deben registrarse según la Norma ISO/FDIS 24516 "Pautas para la gestión de activos en sistemas de agua

potable y aguas residuales”.

Por otra parte, con el fin de estudiar la influencia de la variación de presiones en la aparición de roturas y determinar la fiabilidad hidráulica de los elementos de la red, se han desarrollado los modelos hidráulicos respectivos, los cuales han permitido analizar mediante simulaciones, el comportamiento del sistema durante de forma más detallada.

Como resultado, se ha planteado una metodología que permite evaluar la importancia que tienen los activos del sistema en base a factores como el caudal máximo transportado y el número de fallos que pueden ocurrir en dichas tuberías, facilitándose de esta manera la toma de decisiones y el establecimiento un plan de renovación y sustitución de activos.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

La gestió integral i sostenible dels recursos hídrics és una tasca que ha adquirit major importància en les últimes dècades a causa de l'augment exponencial de la població a nivell mundial, als efectes causats pel canvi climàtic i a l'escassetat d'aigua dolça. La realització d'una gestió eficient de l'aigua és una labor complicada per a les companyies encarregades de distribuir el recurs degut a la quantitat de factors que s'han de tindre en consideració en tots els processos de captació, potabilització i distribució del recurs. El control i disminució de pèrdues en les xarxes d'abastiment és una de les estratègies més eficients implementades en l'actualitat per tal d'aconseguir un maneig eficaç del volum d'aigua injectat en la xarxa i entregat als usuaris

Principalment s'ha de considerar que les xarxes de distribució estan compostes per elements que en la seua gran majoria es troben en estat de deteriorament degut a l'edat que presenten els mateixos, la qual cosa dóna lloc a l'aparició de fugues o en molts casos ruptures freqüents en les canonades. L'aparició de fallades en la xarxa pot arribar a impedir que se satisfacen les condicions de servici garantides als usuaris, com són la pressió de servici i la qualitat de l'aigua. Addicionalment, depenent de la magnitud de les ruptures, poden generar-se conseqüències majors com ara inundacions i danys en estructures adjacents.

L'objectiu principal del present Treball de Fi de Màster, és desenvolupar una metodologia que permeta descriure i determinar la tendència seguida per l'aparició de ruptures en les xarxes

d'abastiment, a fi de millorar la gestió dels actius dels sistemes. Els casos d'estudi seleccionats corresponen a la xarxa d'abastiment de la població d'Algemesí i a dos sectors del sistema de distribució de la ciutat de València, específicament els sectors Jesús (9-A) i Natzaret (11-C). Cadascuna d'estes, es troben gestionades per l'empresa Aigües de València S.A.

Inicialment s'ha analitzat la informació arreplegada per la companyia durant la resolució d'incidències i s'ha depurat per a comptar amb una base de dades clares i ben estructurada. Posteriorment, s'ha realitzat una anàlisi estadística del registre de les ruptures que s'han presentat en la ciutat de València, per tal de determinar l'existència de valors atípics i els factors que són més significatius o influents en l'aparició dels esmenats fenòmens, obtenint-se com a variable significativa el tipus de material de la canonada.

A continuació, s'ha empleat el model de predicció de ruptures establert per Shamir i Howard (1979), el qual planteja que el creixement de la taxa de fallades dels actius en funció de la seua edat, es dona de forma exponencial. Esta anàlisi ha sigut aplicada per a canonades de Fibrociment, Fosa Dúctil, Fosa Grisa i Polietilè, els quals són els tipus de materials més abundants dins dels sistemes estudiats. Buscant millorar l'extensió i la qualitat de les bases de dades utilitzades per la companyia gestora, s'ha plantejat una fitxa tipus per a la recol·lecció d'informació durant la resolució d'incidències, basant-se tant en les variables considerades per alguns models probabilístics i de predicció de fallades consultats en la revisió bibliografia, com en les variables que s'han de registrar segons la Norma ISO/FDIS 24516 "Pautes per a la gestió d'actius en sistemes d'aigua potable i aigües residuals".

D'altra banda, a fi d'estudiar la influència de la variació de pressions en l'aparició de ruptures i determinar la fiabilitat hidràulica dels elements de la xarxa, s'han desenvolupat els models hidràulics respectius, els quals han permès analitzar per mitjà de simulacions, el comportament del sistema durant de forma més detallada.

Com resultat, s'ha plantejat una metodologia que permet avaluar la importància que tenen els actius del sistema basant-se en factors com el cabal màxim transportat i el nombre de fallades que poden ocórrer en les dites canonades, facilitant-se d'esta manera la presa de decisions i

l'establiment un pla de renovació i substitució d'actius.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

The integrated and sustainable management of water resources is a task that has become more important in recent decades due to the exponential increase of the worldwide population, the effects caused by climate change and the shortage of fresh water. To accomplish an efficient water management is complicated for the companies responsible for distributing the resource due to the number of factors that must be considered in the processes of collection, purification and distribution of the resource. The control and reduction of leaks in the supply networks is one of the most efficient strategies implemented today to achieve an effective management of the volume of water injected into the network and delivered to users.

Mainly, it must be considered that most of the elements of a distribution networks are in a state of deterioration due to aging, which in many cases leads to the appearance of leakage or pipe breaks. These ones may prevent the fulfillment of the service conditions that must be guaranteed to users, such as an adequate pressure of service and the water quality. Additionally, depending on the breaks importance, major consequences could happen such as floods and damage to adjacent structures.

The main objective of the present Master thesis is to develop a methodology that allows describing and determining the trend followed by the appearance of breaks in supply networks, in order to improve the management of assets on such systems. Selected case studies correspond to water supply system of Algemesí and two areas of the distribution system of the city of Valencia, specifically Jesus (9-A) and Nazareth (11 C) sectors. Each one of these, are managed by the company Aguas de Valencia S.A.

Initially the information collected by the company during the resolution of incidents has been analyzed and refined to have a clear and well-structured database. Subsequently, a statistical analysis of the register of the breaks that have been registered in the city of Valencia was done, to determine the existence of outliers within the database and determine the factors that are significant or influential in the occurrence of such phenomena, obtaining as a significant variable

pipe material type.

Then, the prediction model implemented by Shamir and Howard (1979) was implemented, This model states that the growth of the rate of failure of assets depending on their age, occurs exponentially. This analysis has been applied to pipes of asbestos cement, ductile cast iron, grey cast iron and polyethylene, which are the most abundant materials in the systems studied types.

Looking to improve the extent and quality of data bases used by the management company, data collection form has been created to the collection of information during the resolution of incidents, based on the variables considered by some probabilistic models and failure prediction model consulted in the literature review, as in the variables that must be registered according to the standard ISO/FDIS 24516 "Guidelines for the management of assets in drinking water systems and water waste".

On the other hand, in order to study the influence of the variation of pressure in the appearance of breaks and determine the hydraulic reliability of the network elements, hydraulic models have been developed. The use of this models allowed to analyze through simulations, the behavior of the system in more detail.

As a result, a methodology that allows the evaluation of assets' importance, based on factors such as the maximum flow of transported and the number of failures that can occur in such pipes has been developed, facilitating in this way the decision-making and the establishment a plan for renewal and replacement of assets.

Palabras clave español (máximo 5): PREDICCIÓN DE ROTURAS, MODELOS HIDRÁULICOS, MODELOS ESTADÍSTICOS, FALLOS, PRESIÓN DE SERVICIO

Palabras clave valenciano (máximo 5): PREDICCIÓ DE RUPTURES, MODELS HIDRÀULICS, MODELS ESTADÍSTICS, FALLADES, PRESSIÓ DE SERVICI

Palabras clave inglés (máximo 5): BREAKAGE PREDICTION, HYDRAULICS MODELS, STATITISCAL MODELS, FAILURES, OPERATING PRESSURE

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	PROBLEMÁTICA EN LAS REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	1
1.2	GESTIÓN ACTUAL EN REDES DE AGUA POTABLE	4
1.2.1	CONTROL ACTIVO DE FUGAS.....	5
1.2.2	GESTIÓN DE LA PRESIÓN	6
1.2.3	GESTIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA	9
1.2.4	EFICIENCIA Y RAPIDEZ EN LAS REPARACIONES	13
1.3	FACTORES INFLUYENTES EN EL FALLO DE LAS TUBERÍAS.....	17
1.4	OBJETIVO DEL PRESENTE TRABAJO	30
2	ESTUDIOS PREVIOS	32
2.1	MODELOS DETERMINÍSTICOS.....	32
2.2	MODELOS ESTADÍSTICOS.....	33
2.3	MODELOS PROBABILÍSTICOS	35
2.4	MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	37
3	DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO	39
3.1	RED DE ALGEMESÍ.....	39
3.2	RED DE VALENCIA	49
3.2.1	SECTOR JESÚS (9-A)	51
3.2.2	SECTOR NAZARET (11-C).....	57
4	METODOLOGÍA.....	64
4.1	PLANTEAMIENTO DE FICHA MODELO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	64
4.2	MODELIZACIÓN DE LAS REDES	64
4.2.1	DEMANDA DE LOS NUDOS DE CONSUMO	65
4.2.2	DIÁMETRO DE LAS ACOMETIDAS Y TUBERÍAS PRINCIPALES DE LA RED	66
4.2.3	MATERIAL Y RUGOSIDAD DE LAS ACOMETIDAS Y TUBERÍAS PRINCIPALES DE LA RED	67

4.2.4	COTAS DE LOS NUDOS DE LA RED	72
4.2.5	VERIFICACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE LA RED.....	73
4.2.6	PATRONES DE CONSUMO.....	75
4.2.7	BONDAD OFRECIDA POR LOS MODELOS.....	76
4.3	ANÁLISIS DEL REGISTRO DE ROTURAS DE LA CIUDAD DE VALENCIA	76
4.4	ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS INCIDENCIAS REGISTRADAS EN LA RED	77
4.5	BÚSQUEDA DE VALORES ATÍPICOS.....	77
4.6	ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LOS FACTORES PREDICTIVOS	79
4.7	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE PROBABILIDAD DE ROTURA DE SHAMIR Y HOWARD (1979) AL CASO DE ESTUDIO.....	79
4.8	DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE COSTOS DE LOS ACTIVOS y EL TIEMPO ÓPTIMO DE SUSTITUCIÓN DE LOS MISMOS.	83
4.9	DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE IMPORTANCIA DE LOS ACTIVOS DE LAS REDES ESTUDIADAS.	84
4.10	VERIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN EL FALLO DE TUBERÍAS MEDIANTE EL USO DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS.....	85
5	RESULTADOS.....	87
5.1	PLANTEAMIENTO DE FICHA MODELO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	87
5.2	ANÁLISIS DEL REGISTRO DE ROTURAS.....	96
5.3	ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS INCIDENCIAS REGISTRADAS EN LA RED	99
5.3.1	BÚSQUEDA DE VALORES ATÍPICOS.....	100
5.3.2	ANÁLISIS DE LA VARIANZA.....	101
5.4	PREDICCIÓN DE ROTURAS MEDIANTE EL MODELO DE SHAMIR Y HOWARD	102
5.4.1	FIBROCEMENTO.....	102
5.4.2	FUNDICIÓN DÚCTIL.....	103
5.4.3	FUNDICIÓN GRIS.....	105
5.4.4	POLIETILENO	107
5.4.5	RESUMEN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE SHAMIR Y HOWARD (1979)	109
5.5	CURVAS DE COSTES Y TIEMPO ÓPTIMO DE RENOVACIÓN	110

5.6	MODELOS HIDRÁULICOS	111
5.7	NIVEL DE IMPORTANCIA DE LOS ACTIVOS DE LAS REDES ESTUDIADAS	113
5.7.1	RESUMEN DEL NIVEL DE IMPORTANCIA DE LOS ACTIVOS EN LAS REDES ESTUDIADAS	115
5.8	VERIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN EL FALLO DE TUBERÍAS MEDIANTE EL USO DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS.....	116
5.8.1	RED DEL SECTOR JESÚS (9-A).....	116
5.8.2	RED DEL SECTOR NAZARET (11-C)	118
6	CONCLUSIONES.....	120
7	REFERENCIAS	121
8	ANEXOS.....	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pérdidas de agua en redes de abastecimiento de diferentes ciudades del mundo. (Fuente: Statista, 2012).	2
Figura 2. Evolución de las pérdidas de agua en redes de abastecimiento de España entre los años 1996 y 2010. (Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE), 2012).	3
Figura 3. Plan de gestión en redes de abastecimiento propuesto por la Asociación Internacional del Agua (IWA). (Fuente: IWA, 1999).	5
Figura 4. Pasos a seguir para la gestión de activos. (Fuente: McDonald y Zhao, 2001).	10
Figura 5. Duración de una rotura en función de la tasa de flujo que presenta la misma. (Fuente: Morrison, 2004).	15
Figura 6. Cambios observados en los caudales inyectados en la red de abastecimiento por la aparición de fugas. (Fuente: Morrison, 2004).	16
Figura 7. Frecuencia de la inclusión de parámetros en modelos de predicción de roturas. (Fuente: Farzad, 2015).	19
Figura 8. Ubicación geográfica de la población de Algemés. (Fuente: Wikipedia, Google Maps).	39
Figura 9. Topología de la red de abastecimiento de agua potable de Algemés. (Fuente: Aguas de Valencia S.A.)	40
Figura 10. Sectorización de la red de abastecimiento de Algemés.	43
Figura 11. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al tipo de material en la red de Algemés.	45
Figura 12. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al emplazamiento de los activos en la red de Algemés.	46
Figura 13. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al diámetro de los activos en la red de Algemés.	47
Figura 14. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según las edades de los activos en la red de Algemés.	48

Figura 15. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según el tipo de red que conforma el sistema de abastecimiento de Alghemesí.....	49
Figura 16. Ubicación geográfica de la ciudad de Valencia. (Fuente: Wikipedia, Google Maps).....	50
Figura 17. Ubicación geográfica del sector Jesús (9A) dentro de la ciudad de Valencia.	51
Figura 18. Topología de la red de abastecimiento de agua potable del sector Jesús (9-A).	52
Figura 19. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al tipo de material en el sector Jesús (9-A) de la red de Valencia.....	53
Figura 20. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al emplazamiento de los activos en la red del sector Jesús (9-A).....	54
Figura 21. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al diámetro de los activos en la red del sector Jesús (9-A).....	55
Figura 22. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según las edades de los activos en la red del sector Jesús (9-A).	56
Figura 23. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según el tipo de red que conforma el sistema de abastecimiento del sector Jesús (9-A).....	57
Figura 24. Topología de la red de abastecimiento de agua potable del sector Nazaret (11-C).....	58
Figura 25. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al tipo de material en el sector Nazaret (11-C) de la red de Valencia.....	59
Figura 26. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al emplazamiento de los activos en la red del sector Nazaret (11-C).....	60
Figura 27. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al diámetro de los activos en la red del sector Nazaret (11-C).....	61
Figura 28. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según las edades de los activos en la red del sector Nazaret (11-C).	62
Figura 29. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según el tipo de red que conforma el sistema de abastecimiento del sector Nazaret (11-C).....	63

Figura 30. Proporción porcentual de acometidas con diámetros de tubería asignados y sin asignar para las redes estudiadas.....	67
Figura 31. Proporción porcentual de acometidas con tipo de material asignado y sin asignar para las redes estudiadas.....	68
Figura 32. Modelo digital de elevaciones de la ciudad de Valencia.....	72
Figura 33. Datos solicitados por GisRed 2.0 para la importación de una red de abastecimiento.	73
Figura 34. Ejemplo de conectividad en el programa GISRed 2.0.	74
Figura 35. Variación de la probabilidad de fallos respecto al tiempo en una red de distribución de agua potable. (Fuente: Watson et al., 2004).....	82
Figura 36. Extracto de la ficha de AVALON utilizada durante la reparación de roturas.	89
Figura 37. Extracto de la ficha de AVALON utilizada durante la sustitución de tuberías o tramos de tuberías.	89
Figura 38. Proceso de gestión integrada de redes de abastecimiento de agua potable.	91
Figura 39. Roturas por kilómetro para cada tipo de material.....	96
Figura 40. Variación temporal del número de roturas en la red de Valencia.	98
Figura 41. Relación entre las Fugas por kilómetro y el diámetro de las tuberías.	99
Figura 42. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Fibrocemento.	102
Figura 43. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Fibrocemento.	103
Figura 44. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Fundición Dúctil.	104
Figura 45. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Fundición Dúctil.	105
Figura 46. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Fundición Gris.	106
Figura 47. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Fundición Gris.	106

Figura 48. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Polietileno.....	107
Figura 49. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Polietileno.....	108
Figura 50. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Polietileno con edades menores a 35 años.....	109
Figura 51. Curvas de costes obtenidas para diferentes tipos de materiales para $t_0 = 1990$, $R=10\%$, y $L = 1$ Km.....	111
Figura 52. Ejemplos de simulación en los modelos desarrollados. (a) Algemés, (b) Jesús (9-A), (c) Nazaret (11-C).	112
Figura 53. Grupos de prioridad para la renovación y rehabilitación de activos.	113
Figura 54. Gráficos de dispersión para las tuberías de la Red de Algemés según el tipo de material.....	114
Figura 55. Gráficos de dispersión para las tuberías de la Red del Sector Jesús (9-A) según el tipo de material.	114
Figura 56. Gráficos de dispersión para las tuberías de la Red del Sector Nazaret (11-C) según el tipo de material.....	115
Figura 57. Evolución de las presiones en el Nudo J598 en los 30 días previos al registro de la rotura.	119
Figura 58. Evolución de las presiones en el Nudo J572 en los 30 días previos al registro de la rotura.	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Medidas de gestión implementadas en diferentes países del mundo. (Fuente: Lambert, 2002)	8
Tabla 2. Gestión de infraestructuras en diversas partes del mundo. (Fuente: Lambert, 2002).....	12
Tabla 3. Factores que afectan el deterioro estructural de las tuberías de agua potable. (Fuente: Rostum, 1997)	18
Tabla 4. Características del depósito de alimentación de la población de Algemesí.	41
Tabla 5. Características de la estación de bombeo de la población de Algemesí.....	41
Tabla 6. Sectores hidráulicos de la red de abastecimiento de Algemesí.	42
Tabla 7. Longitudes y número de tuberías según el tipo de material en la red de Algemesí.	44
Tabla 8. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al emplazamiento de los activos de la red.....	45
Tabla 9. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al diámetro de los activos de la red	46
Tabla 10. Longitudes y número de tuberías según la edad de los activos de la red.....	47
Tabla 11. Longitudes y número de tuberías según el tipo de red.....	48
Tabla 12. Longitudes y número de tuberías según el tipo de material en el sector Jesús (9-A) de la red de Valencia.....	53
Tabla 13. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al emplazamiento de los activos de la red del sector Jesús (9-A).....	54
Tabla 14. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al diámetro de los activos de la red del sector Jesús (9-A).....	55
Tabla 15. Longitudes y número de tuberías según la edad de los activos de la red del sector Jesús (9-A).....	56
Tabla 16. Longitudes y número de tuberías según el tipo de red del sector Jesús (9-A).....	57
Tabla 17. Longitudes y número de tuberías según el tipo de material en el sector Nazaret (11-C) de la red de Valencia.....	59

Tabla 18. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al emplazamiento de los activos de la red del sector Nazaret (11-C).....	60
Tabla 19. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al diámetro de los activos de la red del sector Nazaret (11-C).....	61
Tabla 20. Longitudes y número de tuberías según la edad de los activos de la red del sector Nazaret (11-C).....	62
Tabla 21. Longitudes y número de tuberías según el tipo de red del sector Nazaret (11-C).	63
Tabla 22. Resumen estadístico de los nodos de las redes estudiadas.	65
Tabla 23. Número de acometidas con diámetros de tubería asignados y sin asignar para las redes estudiadas.....	66
Tabla 24. Diámetros existentes en las acometidas de las redes estudiadas.....	67
Tabla 25. Número de acometidas con tipo de material asignado y sin asignar para las redes estudiadas.....	68
Tabla 26. Clasificación de los diámetros de las tuberías existentes en las redes estudiadas según el tipo de material.....	69
Tabla 27. Rugosidades para los materiales existentes en las redes de abastecimiento estudiadas.....	70
Tabla 28. Coeficientes para la fórmula de Genijew.....	71
Tabla 29. Modelos probabilísticos. Adaptado (Kleiner & Rajani, 2001).....	87
Tabla 30. Datos considerados por los modelos presentados en la Tabla 29.	87
Tabla 31. Modelos determinísticos. Adaptado (Kleiner & Rajani, 2001)	88
Tabla 32. Datos considerados por los modelos presentados en la Tabla 31.	88
Tabla 33. Datos del inventario de la red de abastecimiento. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).....	92
Tabla 34. Datos a recolectar durante la reparación de roturas. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).....	93
Tabla 35. Datos a recolectar para conocer el estado general de la red de abastecimiento. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).	93

Tabla 36. Datos de las inmediaciones de los activos de la red. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).....	94
Tabla 37. Datos a incluir en la ficha modelo.....	95
Tabla 38. Roturas registradas en la red de la ciudad de Valencia según el tipo de material.	96
Tabla 39. Distribución temporal de los fallos registrados en la red de Valencia.	97
Tabla 40. Roturas registradas en la red de la ciudad de Valencia según el diámetro de la tubería.	99
Tabla 41. Clasificación según el número de roturas que han sufrido las tuberías incluidas en el registro de fallos.	100
Tabla 42. Resultados obtenidos al eliminar los valores atípicos existentes en la muestra.	101
Tabla 43. Análisis de la varianza para el registro de roturas de la ciudad de Valencia.....	101
Tabla 44. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Fibrocemento.	102
Tabla 45. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Fundición Dúctil.	104
Tabla 46. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Fundición Gris.	105
Tabla 47. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Polietileno.	107
Tabla 48. Factores de la ecuación planteada por Shamir y Howard obtenidos en la ciudad de Valencia para diferentes tipos de materiales.....	109
Tabla 49. Costes medios de reparación de una rotura para distintos materiales.	110
Tabla 50. Costes de sustitución para un metro de tubería según el diámetro de la misma.	110
Tabla 51. Bondad ofrecida por cada uno de los modelos desarrollados.	112
Tabla 52. Resumen de los grupos de jerarquización establecidos para la renovación de activos.....	115
Tabla 53. Roturas registradas en el sector Jesús (9-A).....	117

Tabla 54. Roturas registradas en el sector Nazaret (11-C).....	118
Tabla 55. Variación de presiones para las roturas analizadas en el Sector Nazaret (11-C).	118

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMÁTICA EN LAS REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

En la actualidad las compañías encargadas de la administración y distribución del agua buscan la implementación de herramientas que permitan optimizar las tareas llevadas a cabo de manera diaria, como pueden ser la reparación y sustitución de elementos en la red para de esta manera disminuir fugas o roturas y por ende las pérdidas de agua que se estén presentando dentro del sistema. La existencia de dichos fenómenos acarrea consigo pérdidas económicas para el organismo gestor debido al aumento de los costes de operación y disminuye la eficiencia con la que trabaja la red al presentarse interrupciones en el servicio.

La detección de fugas tiende a ser una tarea complicada ya que estas se generan comúnmente a varios metros de profundidad manifestándose de forma tardía en la superficie o en ciertos casos no manifestándose en lo absoluto. Por esta razón se necesitan generalmente instrumentos o procedimientos que faciliten la localización de las mismas en la red.

Las roturas suelen presentarse generalmente en las zonas más susceptibles de la red como son uniones, cruces, válvulas, aunque también pueden presentarse en tuberías por agrietamientos ya sean longitudinales o transversales, por aplastamiento e incluso por corrosión. Adicionalmente existen otros factores relacionados con el funcionamiento de la red o con su entorno que se han asociado a las roturas en tuberías como son la variación de presiones y las condiciones del suelo.

A pesar de que las fugas se consideren como un inconveniente en las redes de abastecimiento, la presencia de las mismas en sistemas que funcionan a presión no puede evitarse, por lo que se suele considerar una pérdida admisible de agua por fugas. Este valor es el volumen de agua perdida cuyo costo es menor al costo de llevar a cabo la reparación de la fuga. Por lo general una pérdida admisible se ubica entre el 15% y 20% del volumen total inyectado en la red, aunque existen países con redes de abastecimiento que pueden

llegar a presentar pérdidas de hasta el 50% del volumen total demandado por los usuarios. Según lo establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2012), entre 250 y 500 millones de m³ de agua potable se pierden en muchas ciudades del mundo cada año. De evitarse estas pérdidas se podría abastecer con agua potable entre 10 y 20 millones de personas más en cada gran ciudad. En países como es el caso de España en donde la disponibilidad de recursos hídricos es escasa es de suma importancia que exista un control exhaustivo en las redes de abastecimiento para disminuir lo máximo posible las pérdidas de agua. En la Figura 1 se pueden observar las pérdidas existentes en algunas ciudades del mundo para el año 2012, mientras que en la Figura 2 se muestra la variación en las pérdidas de agua en España entre los años 1996 y 2010.

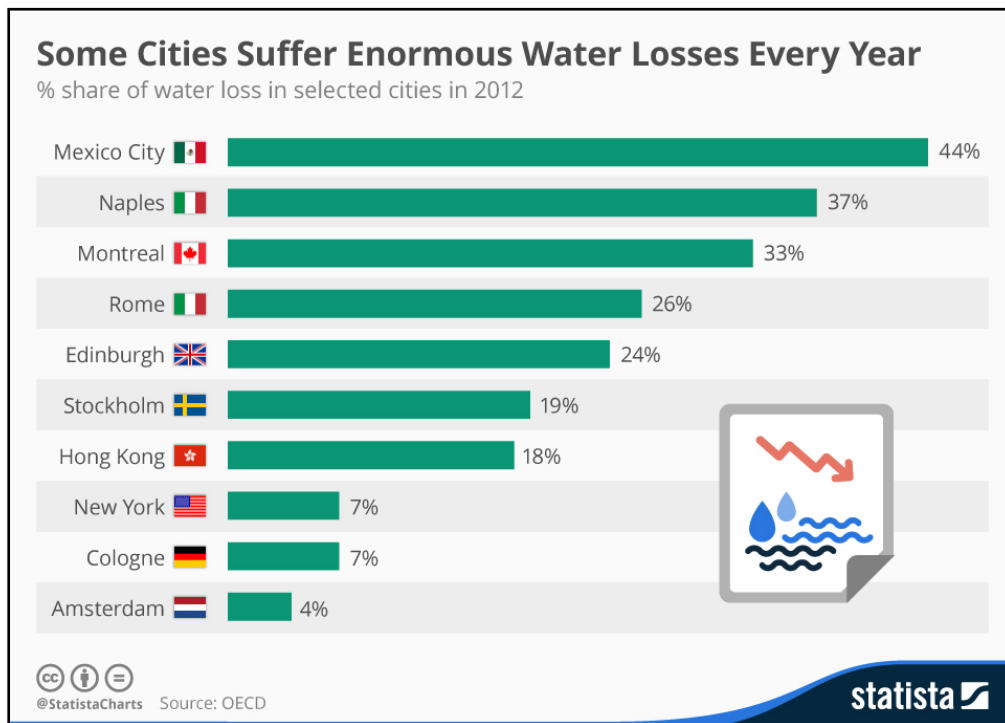


Figura 1. Pérdidas de agua en redes de abastecimiento de diferentes ciudades del mundo. (Fuente: Statista, 2012).

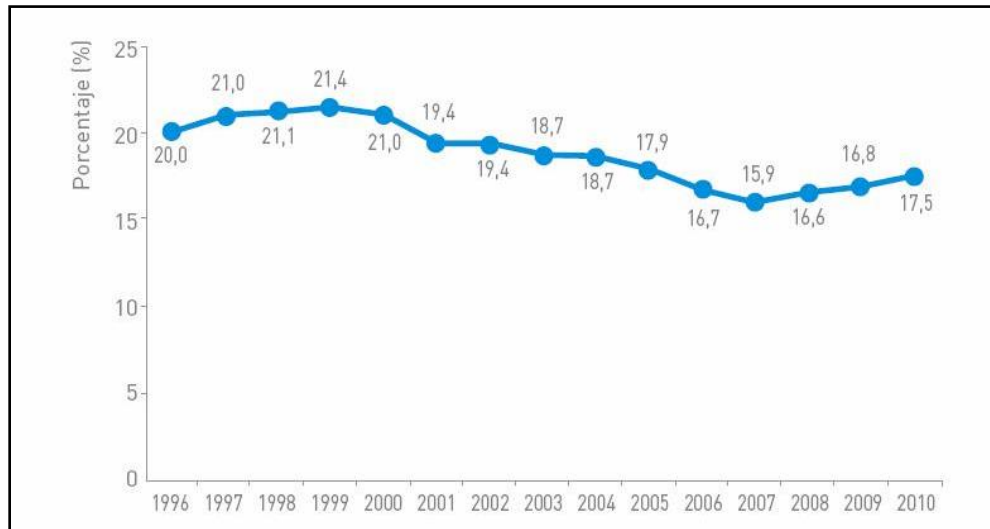


Figura 2. Evolución de las pérdidas de agua en redes de abastecimiento de España entre los años 1996 y 2010. (Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE), 2012).

Para poder lograr de forma exitosa una disminución en las pérdidas de agua debe establecerse un plan de rehabilitación y renovación de activos que plantee ciertas prioridades al momento de llevar a cabo dichas tareas. Este plan está directamente influenciado por las limitaciones financieras que suelen existir dentro de una compañía gestora, por lo que se hace necesario conocer de forma certera los activos de la red sobre los cuales debe realizarse una inversión para maximizar los beneficios a obtener sobre el sistema. Adicionalmente es importante la realización de trabajos de mantenimiento que mediante inspecciones periódicas permitan conocer el estado en el que se encuentra la red y tener de esta manera un mejor control sobre su funcionamiento. Durante las inspecciones y las reparaciones o incluso los reemplazos se presenta la oportunidad para llevar a cabo un registro apropiado de los factores que se puedan observar tanto en los componentes de la red (diámetro, material, emplazamiento, corrosión, tipo de unión, etc.), como en sus inmediaciones (condiciones del suelo, nivel del tráfico, etc.) los cuales pueden ser de utilidad al momento de aplicar herramientas o procesos que permitan determinar la probabilidad de fallo de los activos de la red.

1.2 GESTIÓN ACTUAL EN REDES DE AGUA POTABLE

La gestión integral y sostenible del agua es uno de los temas más importantes y complicados para las empresas encargadas de la distribución del recurso. En la actualidad, en las redes de abastecimiento se busca llevar a cabo la planificación, control y organización del sistema de distribución considerando todos los elementos que lo componen, incluyendo las infraestructuras e instalaciones como son las plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento, tuberías, bombas, válvulas, etc., para lograr en la medida de lo posible que el volumen de agua inyectado en la red sea aprovechado al máximo, minimizando así las pérdidas de agua en la red.

Según establecen Durán y Moral (2015), dentro de las estrategias que más se manejan hoy en día se encuentra el control del Agua No Registrada (ANR), que tal como su nombre lo indica es la diferencia entre el volumen de agua suministrada al sistema y el volumen de agua contabilizado en los medidores de los consumidores. El ANR puede deberse a pérdidas reales en la red, es decir, fugas y roturas o por la existencia de pérdidas aparentes como son inexactitudes en la medición o errores en el manejo de datos, así como consumos no autorizados o uso ilegal de la red. Según el Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE), el volumen de Agua No Registrada (ANR) en los últimos años ha sido 25.9% del agua suministrada a las redes de abastecimiento públicas, de las cuales, el 17.5% fueron pérdidas reales, mientras que el 8.4% correspondió a pérdidas aparentes.

Par poder lograr un control adecuado del ANR se debe realizar un buen mantenimiento de la red de abastecimiento y es de suma importancia contar con una red sectorizada que permita realizar un análisis más enfocado y reducido del sistema para la detección de fugas. Adicionalmente al contar con una red sectorizada se tiene un mejor control sobre la distribución de caudales, las presiones en la red y las pérdidas aparentes como los consumos no autorizados. Adicionalmente es imprescindible contar con sistemas de medición que trabajen correctamente y arrojen valores precisos tanto a la entrada como a la salida de cada uno de los sectores para así obtener datos fiables que faciliten la localización de incidencias.

Durante los últimos años la Asociación Internacional del Agua (IWA) ha desarrollado una propuesta para la gestión de las pérdidas de agua en redes de distribución de agua potable, la cual se muestra en la Figura 3. En dicha figura el cuadro central representa el volumen mínimo de fugas que se da en un sistema en condiciones óptimas de operación y mantenimiento, lo cual podría lograrse mediante la realización de las cuatro actividades que se presentan.

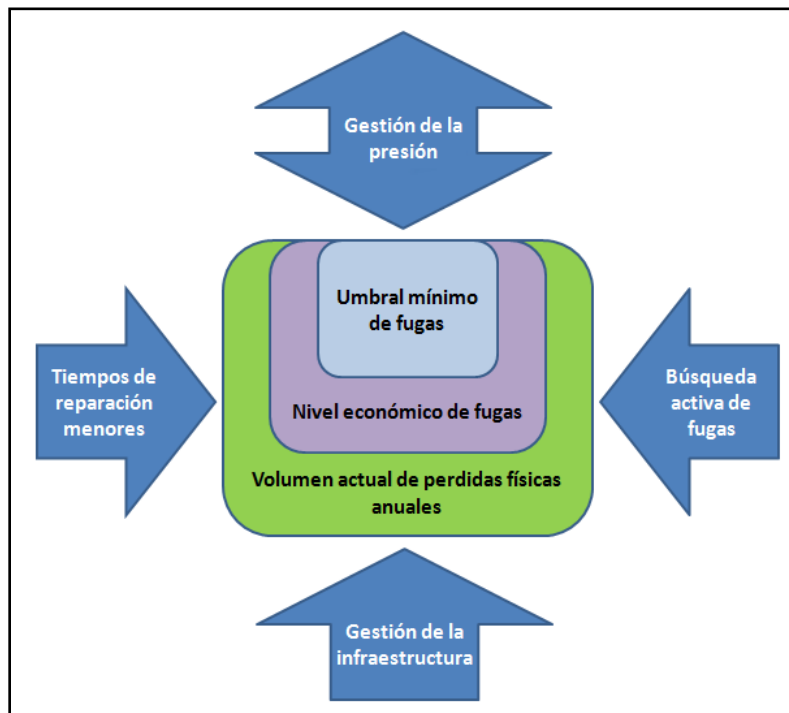


Figura 3. Plan de gestión en redes de abastecimiento propuesto por la Asociación Internacional del Agua (IWA). (Fuente: IWA, 1999).

1.2.1 CONTROL ACTIVO DE FUGAS

El control activo de las fugas consiste en emprender una serie de acciones sobre el sistema con el fin de localizar y reparar fugas que pueden ser detectadas pero que no han sido reportadas. Existen diversos métodos utilizados para llevar a cabo un control activo de las fugas, los cuales se ven favorecidos si se cuenta con una red apropiadamente sectorizada. El uso de una u otra de las metodologías mencionadas a continuación estará predeterminado por las dimensiones de la red de distribución y el estado en el que se encuentre la misma:

- Inspecciones regulares en conexiones con accesorios e instrumentos de medición.
- Mediciones diarias, semanales o mensuales de los caudales que se inyectan en la red de distribución y en cada uno de los sectores.
- Mediciones continuas o intermitentes de los caudales nocturnos en la red para detectar anomalías en los patrones de consumo.
- Implementación temporal de detectores sonoros de fugas en zonas donde existan sospechas de pérdidas de agua o en donde se observen cambios en los patrones. Cabe destacar que a presiones mayores de 20 - 30 m.c.a. la localización de las fugas se dificulta.

Generalmente el control activo de fugas representa la realización de trabajos que no se han llevado a cabo con el pasar de los años, por lo que una vez alcanzados los objetivos planteados al aplicar este tipo de medidas se requerirá de una inversión considerable para detectar y reparar aquellas fugas que son poco evidentes.

1.2.2 GESTIÓN DE LA PRESIÓN

Otro factor a considerar durante la gestión de redes de abastecimiento es la presión de operación del sistema, ya que esta influye de forma directa en la tasa de flujo de las fugas, es decir el volumen de agua perdido por unidad de tiempo. Al variar la presión de operación se puede reducir la velocidad de flujo de la fuga, por lo que esta medida podría llevar a una disminución considerable de la tasa de flujo en aquellas fugas difíciles de detectar o aquellas fugas cuyo costo de reparación requiera de grandes inversiones monetarias.

El manejo de la presión cobra mayor importancia durante las noches cuando se tienen mayores presiones y menores caudales, pudiéndose reducir las pérdidas al disminuir las presiones dentro de la red. Según Lambert (1998), reduciendo la presión en un 10% en grandes redes de distribución, la disminución de las tasas de flujo de fugas de manera instantánea es de 11.5%, mientras que en pequeñas poblaciones las tasas varían entre el 5% y el 25%.

Adicionalmente Lambert (2002) señala que probablemente el aspecto más importante de la gestión de presiones, sin considerar la disminución de la tasa de flujo de las fugas, es el control en los aumentos y caídas inesperados de la presión en la red. Estos efectos suelen presentarse en mayor grado en los sistemas que presentan un suministro intermitente o con bombeo directo a la red, y tienden a presentar nuevas fugas con mayor frecuencia. Dentro de otros beneficios que se obtienen al regular las presiones según Lambert, se encuentran los siguientes:

- Ampliación de la vida útil del sistema de distribución.
- Reducción en la frecuencia de aparición de nuevas roturas en las tuberías de distribución y conexiones de servicio.
- Reducción de las tasas de flujo de las fugas existentes en la red.
- Reducción en la aparición de nuevas fugas en instalaciones interiores y desbordamientos en tanques de almacenamiento privados.
- Reducción de consumo de algunos componentes relacionados directamente con la presión de la red.

Al hablar de gestión de la presión es importante tener claros los aspectos técnicos relacionados con las medidas a adoptar y conocer los ahorros en pérdidas que se obtendrán con dicho proceso, ya que cada red es un caso particular que requiere su propio análisis para la obtención de una buena relación coste/beneficio sin afectar otros factores en el sistema como son el cumplimiento de los requerimientos establecidos para los sistemas contra incendio y el cumplimiento de las presiones mínimas de servicio para garantizar el consumo a los usuarios.

Esta medida ha sido aplicada con éxito en muchos países como Brasil, Dinamarca, Chipre, Hong Kong, Israel, Japón, Malasia, Malta, Suráfrica, España, Taiwán y el Reino Unido, mientras que en otros países como Australia, Italia, Noruega, Nueva Zelanda, Portugal Rumania, Tailandia y Estados Unidos existen pocos proyectos en marcha para aplicar dicha medida a pesar de conocer con certeza el gran potencial que tiene este tipo de gestión para

conseguir beneficios. En la Tabla 1 se muestran las prácticas implementadas por diferentes países en la gestión de sus redes de abastecimiento.

Tabla 1. Medidas de gestión implementadas en diferentes países del mundo. (Fuente: Lambert, 2002)

PAÍS	MEDIDA IMPLEMENTADA PARA GESTIONAR LA PRESIÓN
Malasia	Se utilizan tanques de rotura de carga y válvulas reductoras de presión para controlar las fluctuaciones que se dan en la red. Las fugas en el sistema de distribución son proporcionales a la presión del agua en la red.
Italia	Se identifican las presiones en la red para proteger materiales y equipos que se encuentran bajo uso constante.
Corea	No se menciona específicamente.
Finlandia	No se utiliza la gestión de presiones para disminuir las fugas en la red.
Francia	No se menciona específicamente.
Polonia	Las pérdidas reales están influenciadas por la presión existente al final del sistema de abastecimiento.
Rumania	Se están desarrollando procedimientos para controlar la presión en las redes de distribución.
Hong Kong	En zonas en donde la presión es inusualmente alta se han instalado válvulas limitadoras de caudal para controlar la presión.
Portugal	Uso de telemetría para el control de caudales y presiones en el sistema.
España	La gestión de presiones es por preferencia el método a implementar para la reducción de fugas en las redes de abastecimiento.
Noruega	Las fugas son claramente dependientes de la presión, por lo que existen zonas en donde se gestionan las presiones, con la posibilidad de adicionar nuevas zonas e implementar válvulas reductoras de presión.
Japón	Durante años la gestión de presiones ha sido parte importante en el control de fugas.
Dinamarca	Existen zonas en donde se controlan los valores de presión. Se busca que las alturas de bombeo se mantengan lo más bajo posible.
Tailandia	Se emplea la sectorización de las redes para el control de caudales y presiones.
Australia	Los sistemas de abastecimiento trabajan generalmente con altas presiones, aunque se están desarrollando estudios en la gestión de presiones.

PAÍS	MEDIDA IMPLEMENTADA PARA GESTIONAR LA PRESIÓN
Marruecos	Altas presiones de operación en las redes de abastecimiento.
Suráfrica	En los últimos años se ha visto un aumento en el interés de aplicar la gestión de presiones. Se han llevado a cabo y finalizado varios proyectos en grandes ciudades como es el caso de Johannesburgo.
Alemania	No se utiliza comúnmente la gestión de presiones para reducir las fugas en la red a pesar de que las tasas de flujo en las fugas son altamente sensibles a los cambios de presión.
Hungría	No se menciona específicamente.
Estados Unidos	No es común la práctica de la gestión de la presión, aunque se ha recomendado profundizar el estudio de dicho proceso para realizar comparaciones en los rendimientos de los sistemas.
Taiwán	No se menciona específicamente.
Reino Unido	Durante años la gestión de presiones ha sido parte importante en el control de fugas.

1.2.3 GESTIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA

Tal como se ha mencionado anteriormente una forma de realizar una gestión adecuada de la infraestructura es el mantenimiento y renovación periódica de los activos de la red de abastecimiento. Como es de esperarse con el paso del tiempo la infraestructura se va deteriorando y debido a los altos costos involucrados con la rehabilitación y reemplazo de los elementos de la red, generalmente la renovación del sistema no se da a un ritmo lo suficientemente rápido como para que se vean mejoras significativas en cuanto a las pérdidas de agua existentes.

En España a partir de 1960 se llevaron a cabo grandes desarrollos urbanos, lo que quiere decir que una gran parte de las redes de abastecimiento existentes tienen aproximadamente entre 50 y 60 años de antigüedad, valor que suele ser referente para plantearse la sustitución de las tuberías de un sistema de abastecimiento. La importancia de contar con un plan de renovación de activos radica en evitar el desembolso de grandes sumas de dinero repentinamente al llevar a cabo un mantenimiento en el sistema, es decir, tomar acciones solo cuando se presenta un problema, en este caso fugas en la red, lo cual

termina siendo una medida antieconómica para la compañía gestora. Debido a esto son muchas las empresas que optan por llevar a cabo un mantenimiento preventivo del sistema, es decir anualmente realizan la renovación de un porcentaje de las tuberías que componen la red de distribución. El tamaño que posee la red es un factor importante al momento de considerar la implementación de un plan de renovación, ya que no es tarea fácil determinar las tuberías que deben ser reemplazadas para obtener una mejora significativa a corto plazo en el caudal fugado, por lo que es recomendable la realización de trabajos de detección de fugas que complementen el plan de renovación de acción para así establecer cierta jerarquización dentro del sistema. En la Figura 4 se muestran los pasos a seguir propuestos por McDonald y Zhao (2001) para poner en marcha un plan para la gestión de activos.

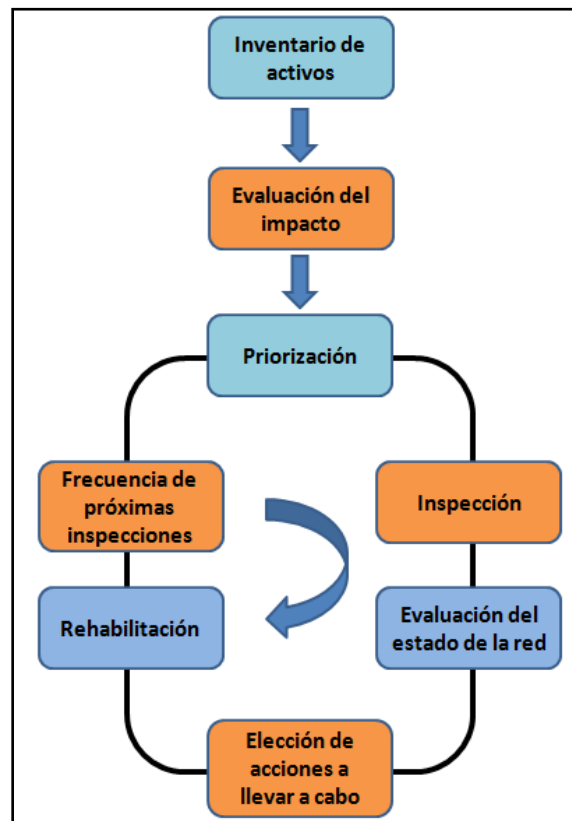


Figura 4. Pasos a seguir para la gestión de activos. (Fuente: McDonald y Zhao, 2001).

El establecimiento de prioridades dentro de un plan de gestión de activos es imprescindible debido al gran número de tuberías que componen por lo general un sistema de abastecimiento de agua potable. Para plantear una jerarquización adecuada se suele

considerar el riesgo que conlleva consigo el fallo de la tubería en cuestión, es decir, se consideran las consecuencias que podrían surgir de presentarse dicho problema. La dimensión de las tuberías es un factor significativo dentro de la evaluación del riesgo, ya que tienden a tener mucha mayor importancia aquellas tuberías de grandes diámetros, debido a que transportan más caudal y prestan servicio a una mayor cantidad de usuarios que las tuberías de menor diámetro. Adicionalmente suelen considerarse como prioritarias aquellas tuberías que abastecen edificaciones esenciales como son los hospitales y centros de salud.

La Asociación Internacional del Agua (IWA) promueve la gestión patrimonial de las infraestructuras hidráulicas urbanas para lograr garantizar un suministro de calidad de agua potable a la población y cumplir con el desarrollo sostenible. Para facilitar dicha tarea se emplea el uso de indicadores que permiten determinar el estado de la red y su funcionamiento considerando una serie de factores como son el material de las tuberías, su antigüedad, el número de reparaciones o rehabilitaciones, la calidad del servicio, etc. Cada uno de estos indicadores posee una tolerancia o límite que debe ser cumplido para que se garantice un servicio sostenible, en caso contrario el incumplimiento del límite establecido indicaría que el elemento de la red evaluado debe ser sustituido.

Es importante contar en la red de abastecimiento con equipos que garanticen la medición de valores tales como caudal y presión de forma precisa, ya que mediante un análisis de estos datos se podría facilitar la toma de decisiones en la gestión de infraestructuras. Actualmente una herramienta que es de gran utilidad en las redes de abastecimiento son los equipos de telecontrol y teled medida que permiten conocer el funcionamiento de las instalaciones en tiempo real y por ende facilitan la localización de fugas de agua y permiten disminuir consumos energéticos en bombeos por regulación de velocidad. Adicionalmente este tipo de instrumentos podrían llegar a detectar conexiones clandestinas en la red. En la Tabla 2 se pueden observar las acciones que son llevadas a cabo por diferentes países para gestionar la infraestructura de las redes de abastecimiento según los reportes nacionales recolectados por Lambert (2002).

Tabla 2. Gestión de infraestructuras en diversas partes del mundo. (Fuente: Lambert, 2002)

PAÍS	MEDIDA IMPLEMENTADA PARA GESTIONAR LA INFRAESTRUCTURA
Malasia	Programa a gran escala de reemplazo de tuberías de asbesto cemento.
Italia	Se estudia la aplicación de estrategias. Se presentan más fallos en acometidas que en tuberías principales.
Corea	Cambio de tuberías de distribución antiguas.
Japón	Rehabilitación de tuberías y acometidas como medida preventiva. Roturas reiteradas en tuberías de asbesto cemento. En su mayoría las tuberías son de fundición dúctil mientras que las acometidas son de Polietileno, PVC y Acero.
Finlandia	Renovación de la red, especialmente reemplazo de tuberías de acero con altos niveles de corrosión. Las acometidas son propiedad privada.
Francia	No se menciona específicamente.
Polonia	Instalación de tuberías de fundición dúctil en las líneas principales. Aumento en el uso de tuberías plásticas.
Rumania	Tuberías existentes entre 30-40 años, un 46% de la red es de asbesto cemento, 30% de fundición y 21% de hierro fundido. Uso de materiales y técnicas de alta calidad para la reparación, reemplazo y renovación de la red.
Hong Kong	Renovación de tuberías con corrosión y en zonas con alta frecuencia de roturas. Se cuenta con un plan de reemplazo del 53% de la red en 20 años.
Portugal	Edad, corrosión y deficiencias en la construcción ligadas con la alta tasa de fugas existente.
España	No se menciona específicamente las medidas aplicadas en líneas de distribución. Conexiones defectuosas.
Noruega	No se menciona específicamente las medidas aplicadas en líneas de distribución. Existencia de fugas antes de los contadores domésticos.
Dinamarca	Plan de renovación del 0,8% de la red por año. Gran número de acometidas en mal estado.
Reino Unido	Reparación sin coste o subsidiada de fugas en tuberías acometidas. Con esta medida se han logrado disminuir las fugas reales a 18 litros/conexión/día.
Bangkok	Se busca reemplazar un 4% de la red anualmente. El 30% de las tuberías tiene más de 25 años de antigüedad.
Australia	No se menciona específicamente.
Marruecos	Red de abastecimiento deteriorada y antigua con defectos de construcción.

PAÍS	MEDIDA IMPLEMENTADA PARA GESTIONAR LA INFRAESTRUCTURA
Suráfrica	Mantenimiento y reemplazo de la red por debajo del óptimo. La infraestructura hidráulica se deteriora gradualmente.
Alemania	Valores estadísticos a considerar en las tasas de fallo en tuberías, conexiones y acometidas.
Hungría	Reemplazo de tuberías mal instaladas con edades que sobrepasan los 45 años. El plan de gestión incluye la renovación de las acometidas.
Estados Unidos	Envejecimiento de la infraestructura es zonas urbanas de la costa este.
Taiwán	No se menciona específicamente.

Adicionalmente Lambert hace referencia a algunos puntos de interés en cuanto a la gestión de las infraestructuras:

- En muchos países parte de la acometida derivada de la tubería de distribución principal se encuentra en propiedad privada, lo que lleva a retrasos en las reparaciones de fugas, y por ende aumenta el volumen de pérdidas reales.
- Los planes de gestión de infraestructuras deberían incluir la reparación de acometidas independientemente de encontrarse en propiedad privada.
- Un enfoque proactivo para ayudar a los usuarios a disminuir las fugas en las conexiones y tuberías privadas puede ser una opción racional y económicamente justificable, ya que esto conduciría a un ahorro energético dentro de la red.

1.2.4 EFICIENCIA Y RAPIDEZ EN LAS REPARACIONES

Cuando se trata de fugas, la calidad de las reparaciones y la rapidez con que son atendidos estos problemas son factores esenciales en la gestión de redes de abastecimiento, por lo que una compañía que cuente con un plan de reparaciones adecuado podría reducir considerablemente el volumen de agua perdido anualmente. La duración de una rotura comprende el tiempo que se tarda para localizar la fuga desde que esta se produjo y el tiempo que se requiere para reparar la rotura. En general la reparación de fugas conlleva

consigo la interrupción temporal del suministro de agua potable y dependiendo de su localización puede requerir del cierre de calles e impedir el tránsito libre tanto de vehículos como de peatones causando molestias a usuarios y terceras personas, por lo que es imperante la realización de los trabajos lo más rápido posible, sin llegar a comprometer la calidad de los mismos. Algunos beneficios (adicionales a los mencionados anteriormente) que se pueden obtener al localizar y reparar fugas eficientemente son:

- Mejora en las relaciones públicas entre la compañía y los usuarios.
- Poseer mayor conocimiento sobre el sistema de distribución, el cual puede utilizarse para responder más rápidamente a las emergencias y establecer prioridades en los programas de rehabilitación o reemplazo.
- Uso más eficiente de los suministros existentes y retraso en la expansión de la capacidad de la red.
- Aumento en la capacidad de extinción de incendios.

La reparación de roturas abre la posibilidad a la realización de otras actividades importantes en el sistema de distribución:

- Inspección de hidrantes, válvulas y tuberías.
- Actualización de mapas e información de la red de abastecimiento.
- Actualización de equipos de medida y tecnologías utilizadas en el sistema como es el uso de la telemetría.
- Labores de mantenimiento como son la limpieza y revestimiento de tuberías que permitan mejorar el funcionamiento de la red.

Está claro que el tiempo en que una rotura es detectada puede variar dependiendo de la magnitud que tenga la misma. En la Figura 5 planteada por Morrison (2004), se puede observar la variación del tiempo de concienciación de la rotura en función del caudal fugado. El tiempo de concienciación viene a ser el tiempo que ha transcurrido desde que se produjo la rotura en la tubería hasta el momento en que esta se manifiesta y es registrada por la compañía. Según Morrison (2004), para caudales elevados se tiene que el tiempo de

concienciación de la rotura puede llegar a ser de hasta 3 días (72 horas) aproximadamente, mientras que para roturas con caudales pequeños el tiempo de concienciación puede ser de 60 días (1440 horas).

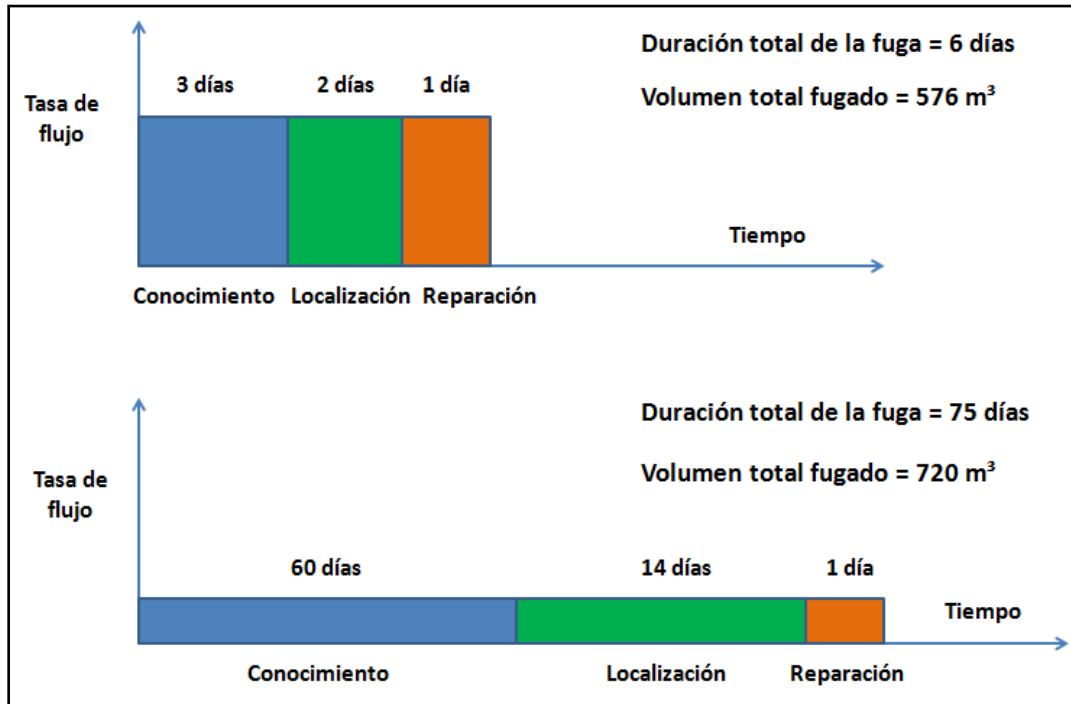


Figura 5. Duración de una rotura en función de la tasa de flujo que presenta la misma. (Fuente: Morrison, 2004).

Muchas veces dependiendo de la extensión que tenga la rotura se pueden llegar a presentar cambios aparentes en los patrones de consumo del sistema o en el caudal inyectado a la red. En la Figura 6 se muestran dos casos que se distinguen claramente. En el primer caso se tiene una fuga con un tiempo de concienciación, localización y reparación relativamente corto, aunque con una tasa de flujo bastante grande, mientras que en el segundo caso se tiene una fuga con una tasa de flujo más pequeña, pero con un tiempo de concienciación, localización y reparación mucho mayor. Adicionalmente se podría decir que a pesar de que el segundo caso se trate de una fuga más pequeña, el volumen de agua perdido fue mayor al del primer caso. Dicha figura representa de forma evidente la importancia de localizar y reparar con rapidez las roturas.

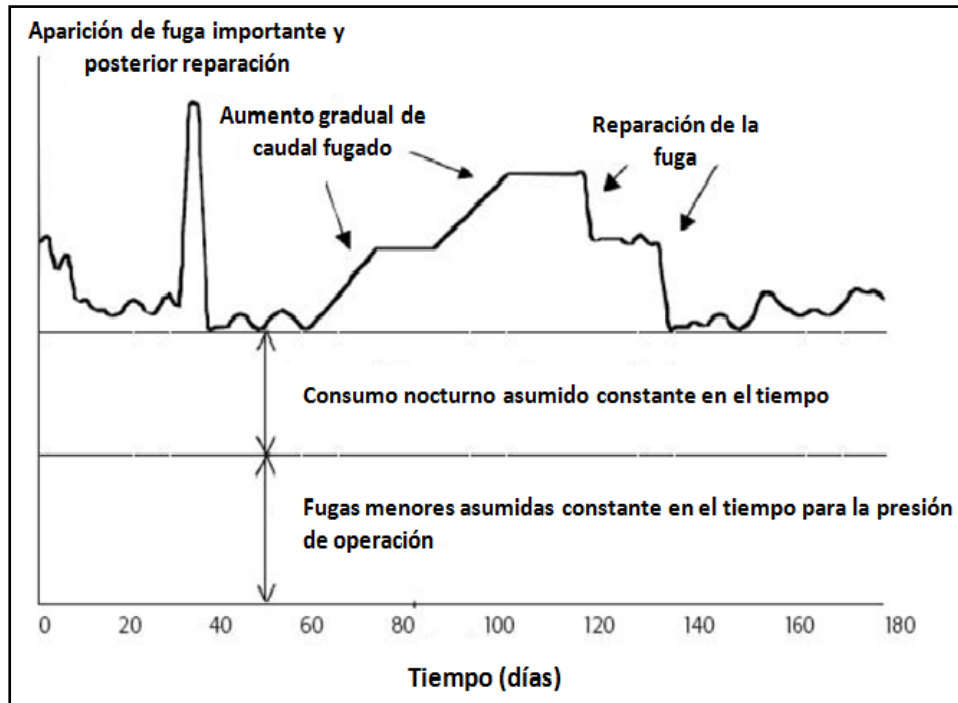


Figura 6. Cambios observados en los caudales inyectados en la red de abastecimiento por la aparición de fugas. (Fuente: Morrison, 2004).

Otro factor imprescindible a considerar es la calidad de los trabajos realizados en la reparación de las fugas. Reparaciones con calidad deficiente pueden llevar a que la fuga reaparezca en un tiempo relativamente corto, lo que habrá significado una pérdida tanto de recursos económicos como de tiempo que pudo ser invertido en la resolución de otra incidencia. En este tipo de situaciones juega un papel importante tanto la experiencia y el nivel de preparación que posea la mano de obra que lleve a cabo los trabajos en cuestión, como las técnicas empleadas y la calidad de los materiales utilizados en la reparación de la fuga.

La mayoría de las fugas que se dan en la red suelen ser eventos reportados por los usuarios, debido a la existencia de fallos en el suministro, baja presión de servicio o por la aparición de agua en la superficie. Generalmente las fugas reportadas son atendidas en un periodo de tiempo corto, mientras que las fugas no reportadas, al tener que ser localizadas por algún método de control activo de fugas requieren de la inversión de mayor tiempo para su

resolución. Por esto el control activo de fugas representa un pilar fundamental en la gestión de la duración de las fugas.

1.3 FACTORES INFLUYENTES EN EL FALLO DE LAS TUBERÍAS

Las causas por las que se producen roturas en las tuberías pueden ser muy variadas y muchas veces conocer con certeza la razón de fallo no suele ser una tarea sencilla e incluso existen ocasiones en que las causas de roturas en redes de distribución no se pueden identificar en lo absoluto.

Este tema ha sido abordado por una gran variedad de autores, cada uno teniendo sus criterios y clasificaciones, pero siempre existiendo similitudes entre los trabajos planteados. De forma general Rostum (1997) estableció que los factores que influyen en el deterioro estructural de las redes de abastecimiento se pueden agrupar principalmente en cuatro (4) categorías:

- Factores físicos o estructurales.
- Factores medioambientales o externos.
- Factores hidráulicos o internos.
- Factores relacionados con el mantenimiento.

De igual manera, Kleiner (2001) ha clasificado el deterioro que se produce en las tuberías en dos categorías:

- 1) Deterioro estructural, el cual lleva a la disminución de la resistencia estructural de la tubería y por ende su capacidad para soportar los distintos tipos de cargas impuestas sobre ella.
- 2) Deterioro de la superficie interna del tubo, el cual causa una reducción de la capacidad hidráulica de la tubería y conduce a la degradación de la calidad del agua. Adicionalmente se ve reducida la resistencia estructural del elemento en aquellos casos donde existe una severa corrosión interna.

Las roturas en tuberías, con la excepción de aquellas situaciones en donde estas son causadas por la intervención de terceros, suelen ocurrir cuando las cargas ejercidas tanto por tareas operacionales como por el medio envolvente, actúan sobre tuberías cuya integridad estructural se ha visto afectada por la corrosión, degradación, instalación inadecuada o defectos de fabricación.

En la Tabla 3 se muestran los factores que pueden tener influencia sobre las roturas de tuberías según la clasificación realizada por Rostum. Cabe destacar que la mayoría de estas variables son constantes en el tiempo, aunque existen algunas excepciones.

Tabla 3. Factores que afectan el deterioro estructural de las tuberías de agua potable. (Fuente: Rostum, 1997)

Factores Estructurales	Factores Medioambientales	Factores Hidráulicos	Factores de Mantenimiento
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ubicación de la tubería ▪ Diámetro ▪ Longitud ▪ Año de instalación ▪ Material ▪ Tipo de junta ▪ Revestimiento interno ▪ Revestimiento externo ▪ Timbrado ▪ Espesor de las paredes ▪ Profundidad ▪ Condición de la capa de apoyo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de suelo ▪ Cargas ▪ Nivel freático ▪ Corrientes parásitas ▪ Condición de la capa de apoyo ▪ Índice de fugas ▪ Temperatura ▪ Corrosión externa ▪ Existencia de otras redes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velocidad del agua ▪ Presión interna ▪ Calidad del agua ▪ Fenómenos transitorios ▪ Corrosión interna 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fecha de ocurrencia del fallo ▪ Fecha de reparación del fallo ▪ Ubicación del fallo ▪ Tipo de fallo ▪ Historial de fallos

Actualmente la mayor parte de los estudios existentes se han llevado a cabo sobre los fallos que han presentado las tuberías de fundición dúctil y fundición gris ya que fueron las tuberías más empleadas durante la década de los 60 y hoy en día están cumpliendo su vida útil y por ende son las tuberías que poseen un historial de roturas más extenso. En un futuro se espera que se desarrollen más estudios en tuberías de materiales plásticos como Polietileno y PVC que han visto un aumento en su uso recientemente.

Generalmente los autores que han abarcado el tema de roturas en tuberías consideran las variables que influyen en estos fenómenos para implementar o desarrollar un modelo que permita predecir la tasa de roturas dentro de una red de abastecimiento específica. Cada uno de los modelos plantea comúnmente su clasificación particular y considera las variables que sean pertinentes según el caso en cuestión. En la Figura 7 se presenta un gráfico obtenido durante un estudio realizado en la Universidad Concordia en Montreal en donde se observa la frecuencia con la que han sido considerados diferentes variables dentro del desarrollo de modelos de predicción de roturas.

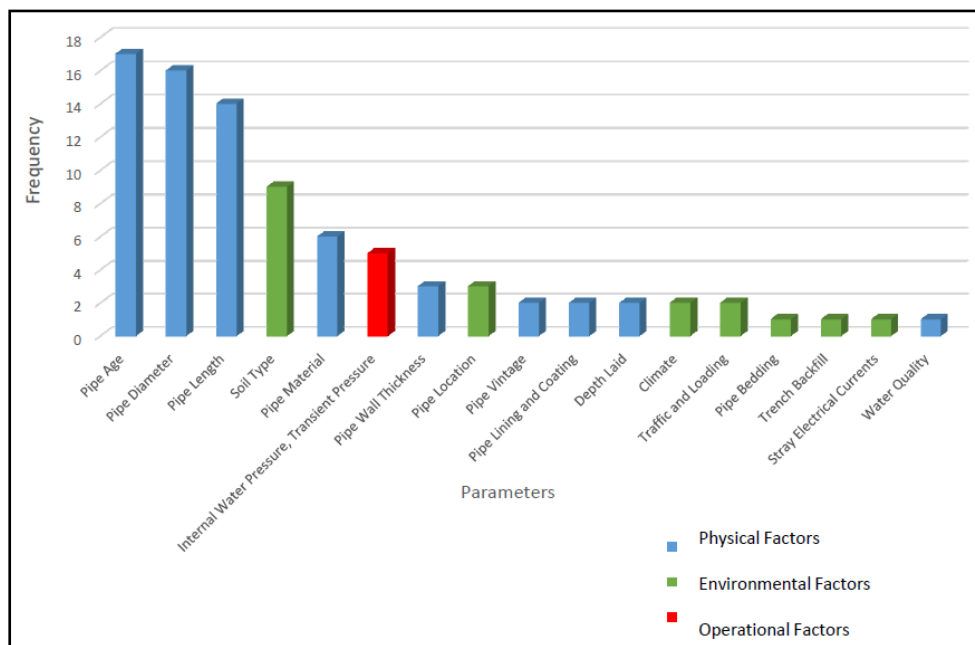


Figura 7. Frecuencia de la inclusión de parámetros en modelos de predicción de roturas. (Fuente: Farzad, 2015).

A continuación, se describirán los factores que son más comúnmente asumidos como los causantes principales de roturas en tuberías.

Edad y periodo de instalación

Las características de los fallos que se generan en el sistema varían de acuerdo a la edad de las tuberías, aunque dichas características dependen más de la práctica constructiva implementada durante el periodo de instalación de la red, que del tiempo transcurrido desde su instalación. Según Andreou et al. (1987) y Mosevoll (1994) las tasas de rotura en las tuberías varían de acuerdo al periodo de instalación de las tuberías. En algunos casos, como es el de las tuberías de fundición gris las tuberías de mayor edad son más resistentes al fallo que las tuberías de menor edad, lo cual podría explicarse por la reducción del espesor de las paredes de la tubería conseguida con los nuevos métodos de fabricación, llevando a que la corrosión y cargas tengan mayor efecto sobre las tuberías.

Es importante considerar adicionalmente que las prácticas constructivas han mejorado con el pasar de los años, como es el caso de las técnicas empleadas para la unión de tuberías, las cuales hoy en día proporcionan mayor fiabilidad al sistema de abastecimiento. Existen otros factores que pueden influir en la tasa de fallos de las tuberías. Tal es el caso de la calidad del relleno empleado en la zanja, el cual juega un papel importante en el tiempo de vida útil de la tubería. Según Wengström (1993) las estrategias de reparación utilizadas pueden llegar a distorsionar la relación real existente entre la edad y la tasa de fallos, ya que los registros de roturas analizados en dicho estudio no evidencian la dependencia de la edad con los fallos.

La mayor parte de modelos de rehabilitación están centrados en el envejecimiento de las tuberías, de tal modo que a mayor edad se presupone que estas necesitarán más mantenimiento y un mayor número de reparaciones, por lo cual muchos planes de rehabilitación y renovación basan su ejecución exclusivamente en la edad de las tuberías en la red, decisión que podría no ser tan certera de acuerdo a Boxall et al (2001) quien sugiere que la edad de la tubería es un indicador endeble, si se considera de forma exclusiva, para llevar a cabo el reemplazo o rehabilitación de la tubería.

Diversas investigaciones realizadas en Estados Unidos y en Europa demuestran que la edad de la tubería es un factor significativo más no exclusivo en la tasa de fallos de las tuberías, ya que muchas veces otros factores como las condiciones ambientales, el diámetro y la localización de las tuberías contribuyen notablemente en la aparición de roturas. De forma contraria también existen otros estudios como los llevados a cabo por O'Day et al. (1982) y Ciottoni (1983) que indican una baja correlación entre la presencia de fallos en las tuberías y su edad. Otros autores como Goulter y Kazemi (1988) también concluyen que la edad no debe ser el único parámetro utilizado para evaluar la condición de tuberías. Herbert (1994) valoró la utilidad de la edad como una medida indicativa de la necesidad de rehabilitación, pero concluyó que, para poder realizar una evaluación precisa, este factor debe ser utilizado en combinación con el conocimiento de la condición actual de la red y sus puntos más vulnerables.

A pesar de que muchas tuberías con edades avanzadas suelen presentar fallos, también es común encontrar tuberías que han cumplido con creces su ciclo de vida útil y, sin embargo, siguen brindando un servicio satisfactorio. Algunos estudios como el realizado por Kettler y Goulter (1985) muestran que existe una relación directa entre la edad y la tasa de fallo en las tuberías de amianto-cemento, mientras que Pascal y Revol (1994) concluyen en su estudio que para las tuberías de fundición la tasa de roturas se incrementa con la edad de las mismas, lo que permite concluir que el tipo de material tiene relación directa con el comportamiento que tendrá la tubería cuando se acerque al cumplimiento de su vida útil.

Número de roturas previas

Existen numerosos estudios que determinan que el historial de roturas y reparaciones de una tubería es un factor importante para la predicción de fallos futuros. Por ejemplo, Andreou (1986) estudió las roturas en las tuberías de una red de distribución mediante un modelo de riesgos proporcionales y concluyó que, tras cada rotura, la tasa de fallos de una tubería se incrementa hasta la tercera rotura, tras la cual, la tasa de fallos tiende a permanecer constante, aunque con un valor ya bastante elevado.

Autores como Goulter y Kanzemi (1988) realizaron una agrupación temporal y espacial de las roturas que se presentaron en una red de distribución de agua, y observaron que un incremento previo en las roturas aumenta la probabilidad de que aparezcan nuevos fallos en los alrededores, sugiriendo que las apariciones de estos se deben a efectos colaterales causados durante los trabajos de reparación. Aproximadamente el 60% de las roturas subsecuentes ocurren dentro de los tres meses siguientes luego de reparar los fallos previos.

Las condiciones iniciales estructurales de las tuberías pueden ser representadas por el número previo de roturas, aunque cabe destacar que las tuberías que comparten una localización geográfica o espacial similar frecuentemente tienen la misma edad y los mismos materiales, y han sido instaladas con el mismo método constructivo. También es probable que las tuberías ubicadas en zonas adyacentes se encuentren expuestas a las mismas condiciones de corrosión interna y externa. Por esto las reparaciones de roturas pueden no ser las únicas responsables de la concentración de roturas que se dan en algunas zonas de la red de abastecimiento.

Algunas investigaciones como las realizadas por Eisenbeis (1994) y Gustafson y Clancy (1999) han mostrado que el patrón de roturas que presente una tubería depende del número previo de fallos que haya experimentado la misma. Adicionalmente un estudio llevado a cabo por Clark et al. (1999) mostró que generalmente cada vez que una tubería es reparada, el tiempo en que es requerida otra reparación es cada vez más corto, además mediante un análisis de regresión logro demostrar que después de que se produce el primer fallo, el número de roturas se incrementa de forma exponencial con el tiempo. Andreou y Marks (1986) realizaron un estudio enfocado a tuberías de diámetros grandes mayores de 200 mm en donde obtuvieron resultados similares, concluyendo que el tiempo que tarda en surgir la próxima rotura decrece después de cada rotura ocurrida.

Corrosión

La corrosión interna de las tuberías es un proceso que depende de las características que posee el agua transportada mientras que la corrosión externa depende del entorno que

rodea a la tubería, es decir, esencialmente depende de las características del suelo envolvente. Las aguas que presentan las siguientes características tenderán a ser más corrosivas:

- Aguas muy blandas.
- Aguas con bajo pH (< 6.0) y baja alcalinidad. La adición de calcio y productos químicos para ajustar el pH en aguas tratadas ha resultado eficaz para disminuir el potencial corrosivo de este tipo de aguas.
- Aguas con altos contenidos de cloruros o sulfatos (>150 mg/l).
- Aguas que contengan cantidades apreciables de oxígeno disuelto.
- Aguas con baja intensidad de amortiguación. Estas aguas tienden a ser más corrosivas, pues la falta de intensidad de amortiguación no permite contrarrestar la producción local de ácido en la celda de corrosión y mantener un pH neutral.
- Aguas con conductividad electrolítica alta (>500 mS/cm).
- La presencia de cloro libre (>1 mg/l) y de cloramina (>2 mg/l).
- La presencia de sólidos suspendidos. Estos sólidos tienden a incrementar las tendencias a la corrosión por cavitación de un agua.

Autores como Makar et al. (2001) y Rajani y Kleiner (2001) plantean que está bastante comprobado que el principal mecanismo de deterioro en el exterior de las tuberías de fundición gris, acero y fundición dúctil es la corrosión electro química. Por otro lado, Raestad (1995) afirma que la corrosión es una de las principales razones para el reemplazo de las tuberías. Cualquier tipo de deterioro estructural que se dé en tuberías metálicas por corrosión crecerá con el tiempo y eventualmente conducirá a la rotura de la tubería.

Tuberías de otros materiales como son plástico y hormigón también pueden sufrir degradación química. En el caso de las tuberías de asbesto-cemento y hormigón, estas se encuentran sujetas a sufrir deterioro por diversos procesos químicos que lixivian el material cementante o penetran el hormigón formando productos que pueden llegar a debilitar la matriz de cemento.

El ambiente físico que rodea la tubería tiene un impacto significativo en la tasa de deterioro que actúa sobre la misma. Kaara (1984) argumentó que la corrosión externa es un factor importante que se debe incorporar en los modelos de predicción, ya que la intensidad que presenta este proceso a diferencia de la corrosión interna variará dependiendo del tipo de suelo, siendo diferente para cada tubería del sistema.

Diámetro

Autores como Clark et al. (1982) y Berardi et al (2008) identifican el diámetro de las tuberías como uno de los factores clave que afectan a las tasas de roturas de estos elementos. Adicionalmente Andreou (1986) y Eisenbeis (1994) acordaron que el mayor número de fallos se encuentran en las tuberías con diámetros pequeños, especialmente en tuberías con diámetros inferiores o iguales a 200 mm. El índice de riesgo asociado a tuberías de diámetros medianos y grandes se mantuvo bastante constante con el tiempo mientras que en aquellas tuberías de diámetros pequeños se observó un índice de riesgo creciente (Christodoulou, 2012).

La principal razón por la que se dan con mayor frecuencia las roturas en tuberías de diámetro pequeño se atribuye a la disminución de la resistencia estructural de las tuberías por poseer espesores de pared reducidos respecto a las tuberías de grandes diámetros, Adicionalmente las tuberías pequeñas presentan diferentes normas de construcción y unión, lo cual las hace menos fiables. Las tuberías pequeñas con paredes más delgadas tienen un menor segundo momento de área por lo que presentan una capacidad reducida para resistir las cargas y esfuerzos de flexión.

Otra razón que podría atribuirse a la existencia de más roturas en tuberías de diámetros pequeños, es el asentamiento de los materiales en suspensión existentes en el agua (en tuberías por las que circulan caudales pequeños), creando un entorno ideal para el crecimiento bacteriano que puede comprometer la integridad de la tubería a largo plazo.

Longitud de la tubería

La longitud de las tuberías es uno de los parámetros más variables dentro de una red de abastecimiento, ya que esta es diferente para cada tubería. Para tuberías con muchos metros de longitud (mayores de 1000 m) las condiciones externas como son las características del suelo y el nivel de tráfico pueden variar a lo largo de la tubería. Rostum et al. (1997) recomendó que las longitudes de las tuberías no deberían superar los 100 metros con el fin de evitar que la misma tubería se encuentra expuesta a diferentes condiciones. Andreou (1986) determinó que la función de riesgo es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la longitud. Otros autores como Eisenbeis (1994, 1997), y Lei (1997) obtuvieron resultados similares.

Material de la tubería

Los materiales de tuberías más comunes en un sistema de distribución de agua potable son fundición gris, fundición dúctil, PVC, polietileno de alta densidad (PE), asbesto cemento (AC), acero y hormigón. El tipo de material de las tuberías por lo general se considera como un factor de riesgo alto, ya que este puede tener impacto sobre la calidad del agua. Roberts y Broadbent (2011) destacaron que las tuberías de fundición gris sin ningún tipo de recubrimiento interno tienen a presentar la formación de tubérculos y de biofilms que pueden disminuir la concentración del desinfectante utilizado en la red. Las tuberías de fundición gris y asbesto-cemento, han demostrado presentar una mayor amenaza para afectar la calidad del agua que los otros materiales. Las propiedades que posee originalmente el material de la tubería pueden verse afectadas por factores externos (por ejemplo, corrosión), factores internos (por ejemplo, fenómenos transitorios) y a condiciones ambientales (radiación y temperatura). Si las propiedades físicas de una tubería cambian después de que se ha instalado, la resistencia estructural y la vida útil de dicha tubería también cambiarán. Contrario a lo que se podría creer las tuberías de PVC y polietileno de alta densidad no son más susceptibles a estos efectos.

El material de la tubería se utiliza generalmente como un factor referente para conocer la época de instalación de la misma, debido a que el uso de cada tipo de materiales se puede

asignar a un período temporal distinto según su evolución. Dicha asociación según la Federación Municipal Canadiense (2003) sería la siguiente:

- Finales del siglo XIX - principios del siglo XX. Tuberías de acero, asbesto-cemento y fundición gris.
- Mediados del siglo XX. Tuberías de hormigón y fundición dúctil.
- Finales del siglo XX. Tuberías de PVC y polietileno de alta densidad (PE).

Adicionalmente el material de la tubería también puede utilizarse como factor referente para determinar la práctica constructiva empleada, el método de fabricación, mecanismos de falla, causas y fallos en juntas (Wood y Lence 2006).

Las tuberías que presentan mayores registros de fallos son las tuberías de fundición gris y fundición dúctil, aunque cabe destacar que muchos investigadores han centrado sus estudios en tuberías de estos tipos de material. Esto se debe a que son las tuberías más comunes y más antiguas encontradas en las redes de distribución. En tiempos más recientes, los materiales como el PVC y PE han visto un aumento a gran escala en su implementación dentro de las redes de abastecimiento de agua potable. En general los materiales que conforman estas tuberías tienen características muy diferentes, por lo que es imprescindible que se analicen por separado. Debido al auge que ha tenido el uso de las tuberías de materiales plásticos, el análisis estadístico en elementos de PVC y Polietileno es el centro de estudios recientes. En un estudio llevado a cabo por Sundahl (1996) en Suecia, el índice de rotura más alto se observó en las tuberías de fundición gris y tuberías de PVC.

Variaciones estacionales

Es común que en muchas redes de distribución de agua se observe durante el invierno un mayor número de fallos según autores como Eisenbeis (1994) y Saegrov et al. (1999). Andreou (1986) determinó que las tuberías de diámetro menores de 200 mm tienen mayores tasas de rotura en invierno. Sundahl (1996) al llevar a cabo un estudio sobre cinco redes de abastecimiento de agua distintas en Suecia, encontró cierta correlación entre el número de roturas y la temperatura del aire, aunque no se observó ninguna relación con la

precipitación y el grosor o altura de la capa de nieve sobre la superficie. Rostum (1997) resalta que por el contrario existen ciudades como es el caso de Trondheim, en Noruega donde la mayoría de las roturas se presentan en la temporada de verano, a pesar de las cargas por nevadas esperadas durante el invierno debido al clima. La explicación a esto yace en que durante la temporada de verano se lleva a cabo un intenso programa de control de fugas, llevando a la detección de un gran número de incidencias de corrosión externa en tuberías de fundición dúctil sin ningún tipo de recubrimiento protector. Wengström (1993) estudió un sistema de abastecimiento en Suecia y observó un alto índice de roturas en las tuberías de fundición dúctil durante el verano, mientras que durante el invierno observó un alto índice de roturas para tuberías de fundición gris. A partir de los resultados se llegó a la conclusión de que a medida que más tuberías de fundición dúctil sean utilizadas las tasas de roturas estacionales se verán modificadas.

Saegrov et al. (1999) observó índices de roturas punta tanto en invierno como en verano en el Reino Unido. El índice de roturas durante el verano se atribuyó posiblemente a la deshidratación y posterior contracción de los suelos de arcilla, mientras que en el registro máximo de roturas durante el invierno pudo deberse a las cargas ejercidas por la acumulación de capas de nieve o a los efectos causados por la contracción térmica de las tuberías. Adicionalmente, la tasa anual de roturas a lo largo de un período de diez años se consideró relacionada directamente con la media anual de las temperaturas diarias e inversamente proporcional al total de precipitaciones anuales.

Los efectos climáticos pueden ser utilizados en una etapa preliminar para determinar las causas de los fallos en las tuberías, sin embargo, para la predicción futura de roturas no es fácil incluir los efectos climáticos como una variable del modelo ya que la evolución de estos factores con el tiempo es desconocida. Desde el punto de vista de la compañía gestora, la existencia de variaciones estacionales en los fallos de las tuberías podría ser útil para la planificación y organización diaria de la gestión a implementar en la red de abastecimiento. Sin embargo, al determinar las necesidades futuras para la rehabilitación y la priorización entre tuberías es menos útil conocer la fecha exacta en que se produjo la rotura.

Condiciones del suelo

Las condiciones del suelo afectan directamente los índices de corrosión externa, y desempeñan un papel importante en la degradación de la tubería. Clark et al. (1982) ha incluido la presencia de suelos corrosivos en sus análisis de fallos en las tuberías, pero encontró una baja correlación entre la longitud de la tubería instalada en ambientes corrosivos y las roturas. Malandain (1998) implementó los sistemas de información geográfica para relacionar las condiciones del suelo con el índice de rotura en la red de distribución de agua de la ciudad de Lyon, Francia. Por otra parte, Eisenbeis (1994) utilizó la condición del terreno (presencia o ausencia de suelos corrosivos) como una variable explicativa en el análisis de fallos de tuberías.

Otras propiedades del suelo como son la expansión y contracción se consideran como unas de las principales causas de las tensiones que actúan sobre tuberías enterradas bajo condiciones climáticas particulares (Pratt et al 2011). La compactación e hinchamiento de los suelos junto con las nevadas pueden aumentar las cargas que actúan sobre la tubería. Las arcillas y limos son un ejemplo de suelos altamente susceptibles a estos procesos.

Un aspecto importante a considerar es el uso frecuente de materiales inapropiados para el relleno de zanjas. En algunos trabajos es común la utilización de suelos nativos como relleno sin ningún tipo de tamizado para eliminar rocas u otro tipo de objetos (Wood y Lence, 2006). Esta práctica de construcción se considera deficiente ya que resulta en un lecho de apoyo irregular que genera tensiones sobre las tuberías. Según Wood y Lance (2006) el tipo de suelo puede implementarse como un factor sustitutivo para el nivel corrosivo del suelo, nivel de protección de las tuberías, las prácticas de construcción, el tipo relleno y el lecho de apoyo.

Trabajos o excavaciones cercanas

Las excavaciones en las proximidades de redes de abastecimiento pueden llegar a afectar las condiciones del lecho de apoyo, resultando en el fallo de las tuberías. Una investigación

realizada en el Reino Unido (CMR, 1998) muestra que los trabajos en servicios adyacentes (por ejemplo, gas, electricidad, etc.) pueden causar la rotura de tuberías cercanas.

Presión

La presión estática del agua y las variaciones repentinas y bruscas de la presión en un sistema de distribución pueden influir en la rotura de las tuberías. Los aumentos inesperados de presión pueden ocurrir cuando las válvulas se abren y se cierran durante las operaciones en la red de distribución de agua o cuando se produce el paro o arranque de las estaciones de bombeo. Andreou (1986) observó que la presión estática es un factor influyente cuando se lleva a cabo la modelación de fallos, pero la importancia de dicha variable se consideró baja. Por otro lado, Clark et al. (1982) utilizó tanto la presión absoluta y la presión diferencial (aumentos y variaciones) en el modelado del tiempo de ocurrencia del primer fallo.

Uso del suelo

El uso que tiene la superficie que se encuentra sobre la tubería puede ayudar a determinar el tipo de cargas externas a las que se encuentran sometidos los elementos de la red (por ejemplo, vías de tránsito vehicular, zonas residenciales y áreas comerciales, etc.). Algunos modelos de rotura como es el planteado por Eisenbeis (1994, 1997) incluye el uso del suelo sobre la tubería como una variable importante.

Defectos de producción

La porosidad es uno de los defectos de fabricación más comunes en tuberías de fundición. La presencia de inclusiones lleva a una discontinuidad del material de la tubería y puede actuar sobre puntos débiles para la formación de grietas. La variación en los espesores de las paredes de la tubería puede conducir a una situación en donde una parte de la tubería no posea un espesor de pared suficiente para aguantar las presiones máximas previstas. Otro defecto de fabricación que suele presentarse es la presencia de fosfuro de hierro (FeP) en el metal de la tubería. El Fósforo se añade para reducir los costos de producción. Sin embargo, el fosfuro de hierro (FeP) es un compuesto frágil que debilita la tubería.

Error humano

Empezando con un diseño incorrecto, existen varias prácticas durante y después de la construcción que pueden contribuir al fallo de las tuberías. Técnicas pobres de transporte, manipulación e instalación pueden promover la corrosión seguida por la rotura de la tubería. La remoción accidental de la capa protectora durante los trabajos de instalación expondrá la tubería a sufrir una extensa corrosión. Otra causa posible del fallo de las tuberías es el daño causado por terceros a la instalación, tal como el causado durante los trabajos de excavación en las cercanías del sistema.

1.4 OBJETIVO DEL PRESENTE TRABAJO

El presente trabajo tiene como objetivo principal determinar la probabilidad de rotura que tienen las tuberías de la redes de abastecimiento de algunas poblaciones de la Comunidad Valenciana (España), mediante la implementación de los modelos probabilísticos o determinísticos que mejor se adapten, considerando algunos factores como son el material de las tuberías, su diámetro y su edad, con la finalidad de poder establecer ciertas prioridades al momento de implementar un plan de mantenimiento, renovación y reparación de activos.

Para conseguir el objetivo global planteado se procederá a la clasificación y sistematización de la información con la que se cuenta, con el fin de optimizar la toma de datos y mejorar las condiciones de funcionamiento de la red, especialmente el aspecto relacionado con las fugas. Los objetivos específicos a cumplir se muestran a continuación:

- Realizar un análisis de la información disponible, además de identificar y medir la calidad de los datos con los que se cuentan. Se realizará una exploración a fondo de la información existente, se depurará y se transformará en una estructura comprensible para su posterior uso. Para llevar a cabo este objetivo se seguirán una serie de pasos:
 - Análisis de la estructura, cantidad y calidad de la información.

- Determinación de acciones y medidas que permitan uniformizar la recolección y organización de los datos disponibles.
- Investigación de procedimientos que puedan ser empleados para determinar la calidad de los datos en cuestión.
- Búsqueda e implementación de procedimientos mediante los cuales se pueda aumentar la fiabilidad y calidad de los datos existentes.
- En base a los factores que pueden tener cierta importancia en los fenómenos de rotura de tuberías como son el tipo de material, su diámetro, edad de la instalación, condiciones del suelo, etc., se definirá una ficha tipo para la recolección de información durante la resolución de incidencias que pueda ser implementada por las compañías gestoras para mejorar sus bases de datos.
- Desarrollo de los modelos hidráulicos de las redes estudiadas y comparación de los resultados arrojados por los mismos con los valores medidos en el sistema real.
- Se realizará un análisis estadístico del historial de roturas existentes. Adicionalmente se llevará a cabo un estudio de sensibilidad para conocer qué factores tienen mayor influencia en los fallos de las tuberías.
- Con el uso de los modelos hidráulicos se determinará la fiabilidad de cada una de las redes de abastecimiento analizadas y se buscará si existe alguna influencia directa de la presión en las roturas que se han dado dentro del sistema.
- En base tanto al tipo de datos con los que se cuente como a la cantidad de los mismos se analizará que clase de modelo probabilístico existente puede aplicarse de manera factible a las redes estudiadas para determinar la probabilidad de rotura. Adicionalmente la aplicación de esta metodología permitirá definir de forma estimada la vida útil de los elementos que conforman el sistema. Los resultados arrojados por el modelo escogido permitirán establecer una jerarquía en la importancia de las tuberías, lo que facilitará la gestión llevada a cabo en los sistemas de abastecimiento de agua potable.

2 ESTUDIOS PREVIOS

La creciente necesidad que tienen las compañías gestoras del agua de conocer cuantitativamente la probabilidad de rotura de los activos de la red ha llevado a que, durante las últimas décadas, varios investigadores hayan desarrollado diferentes tipos de modelos para predecir la tasa de roturas de las tuberías en sistemas de agua potable, para de esta manera poder implementar una gestión de la infraestructura que brinde un alto nivel de confiabilidad. Estos modelos de predicción de roturas pueden clasificarse en cuatro categorías:

- Modelos determinísticos.
- Modelos estadísticos.
- Modelos probabilísticos.
- Modelos de inteligencia artificial tales como las redes neuronales artificiales.

2.1 MODELOS DETERMINÍSTICOS

Este tipo de modelos se utilizan generalmente en casos donde es evidente la relación existente entre los datos de entrada y los resultados obtenidos. De forma más puntualizada, los modelos determinísticos contemplan los modelos lineales y los modelos exponenciales. Estos modelos pueden aplicarse utilizando dos enfoques diferentes: empírico y mecánico. El enfoque empírico busca encontrar la relación entre las tasas de rotura (datos de salida) y las características y atributos de un grupo uniforme y homogéneo de tuberías (datos de entrada). Generalmente la agrupación de los de activos se realiza considerando factores como la edad de las tuberías, tipo de material, condiciones medioambientales, etc. Por otra parte, el enfoque mecánico puede predecir la vida útil restante de un activo de forma individual, es decir solo una tubería. Clair y Sinha (2012) establecen que el principal problema que sufren estos modelos radica en que solo pueden aplicarse a una ubicación específica.

El primer modelo determinístico conocido e implementado para la prevención de roturas es el desarrollado por Shamir y Howard (1979), el cual es un modelo que mediante el uso

de análisis de regresión determinó la existencia de una relación exponencial entre las variables usadas. Dicho modelo se caracteriza por la siguiente expresión:

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t-t_0)} \quad (1)$$

Donde $N(t)$ es el número de roturas por unidad de longitud esperadas en el año t , $N(t_0)$ es el número de roturas por unidad de longitud que se tienen en año base del análisis t_0 y A es el parámetro de regresión o coeficiente de crecimiento, cuyas unidades son años⁻¹. Este modelo se aplica a tuberías que presentan características internas y externas similares, sin embargo, no tiene en consideración otros factores que influyen en el deterioro de las tuberías como la presión, condiciones del suelo, etc.

2.2 MODELOS ESTADÍSTICOS

Los modelos estadísticos se aplican a grupos homogéneos de tuberías u a otros activos que formen parte de la infraestructura y requieren del registro de fallos o datos que reflejen la condición del activo. Este tipo de modelos se utilizan típicamente para predecir la vida útil o el tiempo hasta el fallo de los activos de la red (Lawless, 1983). Adicionalmente Clair y Sinha (2012) establecen que para poder desarrollar un modelo estadístico prometedor se necesita de una base de datos histórica considerable que contenga varios puntos de muestreo. Los métodos estadísticos basándose en los datos históricos relacionados con las roturas buscan lograr identificar patrones determinados, que se supone continuarán repitiéndose en el futuro.

En los modelos estadísticos la regresión se utiliza para construir un modelo basado en los datos históricos que pueden predecir la rotura o la condición de los activos del sistema. Para alcanzar esto, la variable dependiente debe estar relacionada con al menos una de las variables independientes.

Durante los últimos años ha habido un crecimiento en los estudios que buscan desarrollar un modelo de predicción de las tasas de fallo mediante el método estadístico. Berardi et al (2008) planteó un modelo de deterioro de tuberías utilizando una regresión polinomial evolutiva (EPR por sus siglas en inglés). Dicho modelo utiliza un conjunto de datos

clasificados en grupos homogéneos según la edad y el diámetro de las tuberías. El modelo desarrollado puede predecir el número de roturas para cada uno de estos grupos. Por último, para poder predecir la tasa de fallo de cada tubería, se desarrolló un modelo de deterioro estructural basado en un modelo agregado de regresión polinomial evolutiva.

Por otro lado, Wang et al. (2009) utilizaron cinco modelos de regresión múltiple para diferentes tipos de materiales (fundición gris, fundición dúctil sin revestimiento, fundición dúctil con revestimiento, PVC y Hormigón) para predecir la tasa anual de rotura de tuberías independientes en lugar de un grupo homogéneo. En dicho modelo se evaluó tanto la robustez del mismo como la significancia de cada variable independiente. Basándose en los resultados de su modelo, Wang et al. (2010) concluyeron que la edad de la tubería es la variable más crítica, mientras que el modelo no presento sensibilidad a algunos factores como la profundidad de emplazamiento y la presencia de carreteras o vías de tránsito vehicular.

Xu et al. (2011) desarrollaron dos modelos de predicción de fallos utilizando regresión polinomial evolutiva y programación genética, y luego compararon los resultados de ambos modelos basándose en:

- El error existente entre los datos predichos y los reales,
- Simplicidad de la ecuación obtenida.
- Capacidad para justificar las ecuaciones obtenidas en base al conocimiento ingenieril.

Los resultados arrojaron que la regresión polinomial evolutiva tiene algunas ventajas sobre la programación genética en cuanto a la estimación de parámetros y la uniformidad de la ecuación, mientras que la programación genética es mejor para encontrar las relaciones complejas existentes.

Arsénio et al., (2014) plantean que los esfuerzos sobre las tuberías enterradas ocasionados por los movimientos del suelo aumentan la probabilidad de fallo de las tuberías. Estos han estimado el movimiento del suelo usando datos obtenidos por satélite y radar e

investigaron el número de roturas en tres tipos de tubería: asbesto-cemento, PVC y fundición dúctil.

Más recientemente, Kimutai et al. (2015) estudiaron el efecto de diferentes variables independientes sobre la predicción de la tasa de roturas de tuberías usando tres modelos estadísticos: el Modelo de Riesgos Proporcionales de Weibull, el Modelo de Riesgos Proporcionales de Cox y el Modelo de Poisson. Adicionalmente, utilizaron técnicas de curvas de ajuste para estimar una ecuación de la función del riesgo para el Modelo de Riesgos Proporcionales de Cox para aplicarla sobre un conjunto de datos de la ciudad de Calgary. Las roturas predichas y los fallos reales se compararon mediante el cálculo del error cuadrático, error absoluto, error cuadrático relativo y error absoluto relativo.

2.3 MODELOS PROBABILÍSTICOS

Los modelos probabilísticos analizan de forma general la probabilidad de ocurrencia de un evento particular. Según Kleiner & Rajani (2001) este tipo de modelos último pueden dividirse en modelos probabilísticos multivariados y probabilísticos univariados. El resultado o variable dependiente de estos modelos sería un rango de valores en lugar de un número específico. Estos modelos necesitan de datos extensos que informen sobre las condiciones de los activos y sus atributos. Es importante destacar que según Moglia (2007) un enfoque probabilístico comúnmente aumenta la complejidad computacional de los modelos.

Los modelos probabilísticos multivariados tienen en cuenta un conjunto elevado de variables, lo que evita la necesidad de realizar grupos homogéneos de tuberías. El tipo de variables a considerar en los modelos dependen tanto del tipo de tubería como de las condiciones de la red de abastecimiento a estudiar. Por otra parte, los datos necesarios para desarrollar un modelo probabilístico multivariado pueden ser complicados de obtener, lo que restringe en cierto grado su aplicación.

En cuanto a los modelos probabilísticos univariados, éstos buscan de determinar la esperanza de vida de las tuberías y la probabilidad de fallo de las mismas en función de una

única variable o en base a un criterio de agrupación por características similares de los activos.

Moglia et al. (2007) desarrollaron un modelo probabilístico de predicción de fallo físico basándose en la mecánica de fractura de tuberías de fundición. Se incorporaron al azar variables independientes como datos de entrada, y luego se aplicó la técnica de simulación Monte-Carlo para lidiar con la complejidad computacional del modelo. El modelo desarrollado sin ningún tipo de datos de rotura, degradación y esfuerzos, no fue capaz de estimar las tasas de fallo de las tuberías, mientras que el modelo que incorpora esta información puede predecir las tasas de rotura con muy buena precisión.

Por otro lado, Kabir et al. (2014), evaluaron el riesgo de fallo de tuberías metálicas mediante una Red Bayesiana, la cual representa un conjunto de variables aleatorias y sus dependencias condicionales a través de un grafo acíclico dirigido. Este tipo de modelo reconoce los segmentos de tubería más vulnerables y sensibles de la red de abastecimiento, aunque solo arroja buenos resultados cuando se trata de sistemas pequeños y medianos con datos limitados. Jenkins et al., (2014) trataron de resolver el problema generado por la existencia de datos limitados, incompletos o inciertos. Dos modificaciones principales fueron agregadas a los modelos de Riesgo de Weibull para mejorar el rendimiento de los modelos de predicción: los informes técnicos y el análisis espacial, aunque estas dos modificaciones no fueron probadas luego en otros sistemas de abastecimiento.

Francis et al. (2014) también implementaron Redes Bayesianas para analizar sistemas de distribución de agua potable. Estos recalcaron que evaluar la red de tuberías no sólo es importante para el modelo de predicción de roturas sino también es crucial para evitar la degradación de la calidad del agua y las pérdidas por fugas.

Kabir et al. (2015b) afirmaron que la incertidumbre en cuanto a la calidad y cantidad de datos se convirtió en una preocupación importante para el desarrollo de modelos de predicción roturas de activos. Por esta razón se buscó reducir estas incertidumbres desarrollando un modelo de predicción de fallos mediante la implementación de una nueva Red Bayesiana basada en la fusión de datos. El modelo propuesto puede identificar la

tubería más vulnerable y sensible de la red, así como el número total de tuberías que requieren de acciones inmediatas y apropiadas como mantenimiento, rehabilitación y reemplazo.

2.4 MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Las redes neuronales artificiales son un método que puede predecir el fallo de tuberías enterradas y el deterioro de la infraestructura. Las redes neuronales son capaces de procesar información incluso cuando se trata de ambientes grandes, complejos e inciertos. En este tipo de técnica es necesario contar con una base de datos de alta calidad para proporcionarle una lección de aprendizaje confiable a la red neuronal y predecir correctamente las condiciones futuras de los activos. Adicionalmente, las redes neuronales no son capaces de proporcionar información acerca de la relación existente entre las variables dependientes e independientes.

Jafar et al. (2010) emplearon redes neuronales para analizar redes de distribución urbana. Seis modelos de redes neuronales fueron desarrollados para predecir el porcentaje de roturas de tuberías en una ciudad en Francia. Adicionalmente intentaron estimar el tiempo óptimo de rehabilitación/reemplazo de la misma red de abastecimiento.

Asnaashari et al. (2013) utilizaron tanto un modelo de Regresión Lineal Múltiple y como un modelo de Redes Neuronales para determinar la probabilidad de rotura de los activos del sistema. Al comparar los resultados observaron que el modelo de la Red Neuronal es bastante prometedor al predecir con mayor precisión el fallo de las tuberías, mientras que la técnica de Regresión Lineal Múltiple solo puede implementarse para realizar una evaluación preliminar.

Por otra parte, Shirzad et al. (2014) establecieron una comparación entre el desempeño predictivo de las Red Neuronales y otras técnicas de regresión. Adicionalmente, investigaron el efecto de la presión hidráulica (valores medios y máximos) en la precisión de la predicción de la tasa de roturas de las tuberías. Los resultados mostraron que el modelo de Redes Neuronales es más preciso, pero no es conveniente para propósitos de

generalización, por lo que, para tareas de gestión, los modelos de regresión son más apropiados.

Recientemente Kutylowska (2014) implemento las Redes Neuronales para determinar la tasa de rotura de los activos. En dicho estudio Las conexiones domiciliarias y tuberías de distribución se consideran como dos secciones diferentes en la base de datos, y los resultados de ambos son aceptables. Según el autor, la simplicidad es la ventaja de este modelo.

3 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

3.1 RED DE ALGEMESÍ

La población de Algemesí es un municipio de la Comunidad Valenciana en España, situado en la comarca de la Ribera Alta. Esta se ubica al este de la península ibérica, en la llanura litoral valenciana, junto a la desembocadura del río Magro en el río Júcar (Figura 8). Según el Instituto Nacional de Estadística para el año 2016 se contaba con una población de 27.607 habitantes en dicho municipio.



Figura 8. Ubicación geográfica de la población de Algemesí. (Fuente: Wikipedia, Google Maps).

La red de abastecimiento de Algemesí se encuentra gestionada por la compañía Aguas de Valencia S.A. Se trata de una red que se encuentra sectorizada, en donde se distinguen fácilmente dos zonas o núcleos de población. La primera se ubica al sur del municipio y

consta principalmente de zonas residenciales, mientras que la segunda se encuentra ubicada al norte, y se encuentra compuesta por polígonos industriales. Ambas zonas están conectadas entre sí por la red de aducción, la cual se encarga de transportar el agua a cada uno de los sectores. Cabe destacar que el sistema en cuestión se considera una red de abastecimiento relativamente pequeña. En la Figura 9 muestra sobre la ortofoto de la zona, la topología de la red de abastecimiento de agua potable de Algemesí. En dicha figura, se observan claramente tanto el núcleo residencial como el núcleo industrial que conforman esta población.

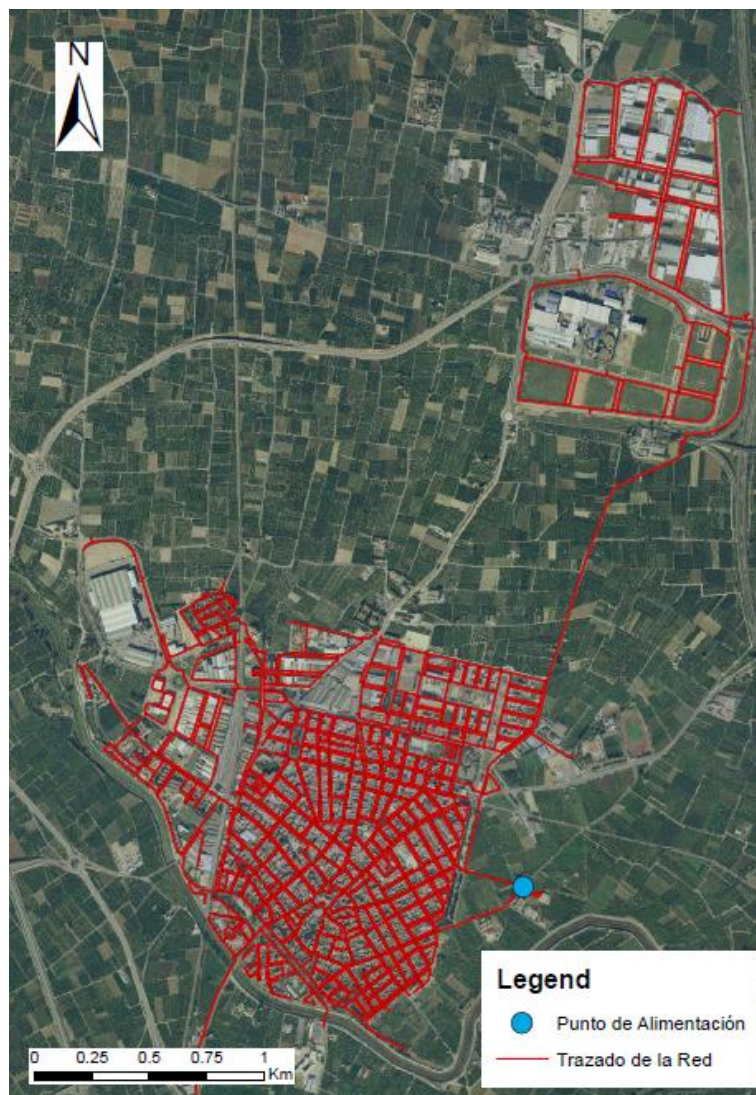


Figura 9. Topología de la red de abastecimiento de agua potable de Algemesí. (Fuente: Aguas de Valencia S.A.)

La alimentación a la red de Algemesí se lleva a cabo mediante la utilización de un depósito de almacenamiento junto con una estación de bombeo, ambos ubicados al este de la población, específicamente en el punto azul señalado dentro de la Figura 9.

El sistema de bombeo consta de cuatro (4) bombas en total, aunque la estación funciona solo con dos (2) bombas simultáneamente, ambas con variadores de frecuencia que permiten modificar la velocidad de giro de las mismas. Las bombas restantes se ponen en funcionamiento en caso de que las bombas que trabajan habitualmente sufran averías o requieran de trabajos de mantenimiento. En la Tabla 4 y Tabla 5 se muestran de forma resumida los datos de interés correspondientes al depósito y la estación de bombeo de la población de Algemesí.

Tabla 4. Características del depósito de alimentación de la población de Algemesí.

Deposito Algemesí	
Volumen (m ³)	5000
Nº de celdas	1
Función	Cabecera
Tipo	Cilíndrico
Cota de solera (m.s.n.m)	18
Altura lámina de agua (m)	4

Tabla 5. Características de la estación de bombeo de la población de Algemesí.

Grupo de bombeo Algemesí	
Nº de bombas	4
Marca	IDEAL
Modelo	RNI 125-40
Rodete (mm)	DN 383
Potencia (CV)	60
Caudal (m ³ /h)	244.8
Altura (m)	43

La estación de bombeo se encuentra regulada de tal forma que se tienen dos consignas que varían de acuerdo a la hora del día. Estos valores se han fijado para cumplir con las presiones

mínimas de servicio establecidos por la normativa en los puntos más alejados y elevados de la red de abastecimiento. Adicionalmente estas consignas podrían variarse para disminuir y regular las tasas de fugas del sistema, principalmente durante el horario nocturno. A continuación, se muestran los horarios y consignas establecidos:

- Horario diario: 6:00 a 23:30
 - Consigna: 31 m.c.a.
- Horario nocturno: 23:30 a 6:00
 - Consigna: 27 m.c.a.

La red de abastecimiento se encuentra subdividida en quince (15) sectores los cuales se encuentran independizados mediante el uso de válvulas de seccionamiento que impiden el paso del agua entre un sector y otro. Esta sectorización permite tener un conocimiento continuo sobre los caudales que ingresan a cada sector, brindando de esta forma un mayor control sobre la gestión implementada en el sistema. En la Tabla 6 se muestran cada uno de los sectores de la red con sus respectivos nombres y códigos de identificación, mientras que en la Figura 10 se encuentra la ubicación geográfica de cada uno de estos sectores dentro del sistema de abastecimiento.

Tabla 6. Sectores hidráulicos de la red de abastecimiento de Algemesí.

Numero	Código	Nombre
1	1475	ALGEMESÍ - SECTOR 1
2	1346	ALGEMESÍ - SECTOR 2
3	1347	ALGEMESÍ - SECTOR 3
4	1476	ALGEMESÍ - SECTOR 4
5	1349	ALGEMESÍ - SECTOR 5
6	1477	ALGEMESÍ - SECTOR 6
7	1478	ALGEMESÍ - SECTOR 7
8	1479	ALGEMESÍ - SECTOR 8
9	1480	ALGEMESÍ - SECTOR 9A
10	1483	ALGEMESÍ - SECTOR 9B
11	1481	ALGEMESÍ - SECTOR 10
12	1482	ALGEMESÍ - SECTOR 11
13	1356	ALGEMESÍ - SECTOR 12
14	388	ALGEMESÍ-POLÍGONO INDUSTRIAL COTES
15	1046	ALGEMESÍ-POLÍGONO INDUSTRIAL PEPE MIQUEL
16	1180	ALGEMESÍ FICTICIO

Al analizar de forma general la sectorización existente en la red se podría decir que se han aplicado ciertos criterios, como son: la topografía del terreno, la localización e influencia del depósito de cabecera y la estación de bombeo, existencia de calles y avenidas, así como la geometría de la red. Adicionalmente, de forma clara, se han considerado aspectos como el número de acometidas, el número de abonados, las demandas y la longitud de la red. Es importante destacar que no siempre los criterios de sectorización se basan en motivos puramente hidráulicos, algunos criterios suelen basarse en razones meramente económicas, como es la inversión de capital.

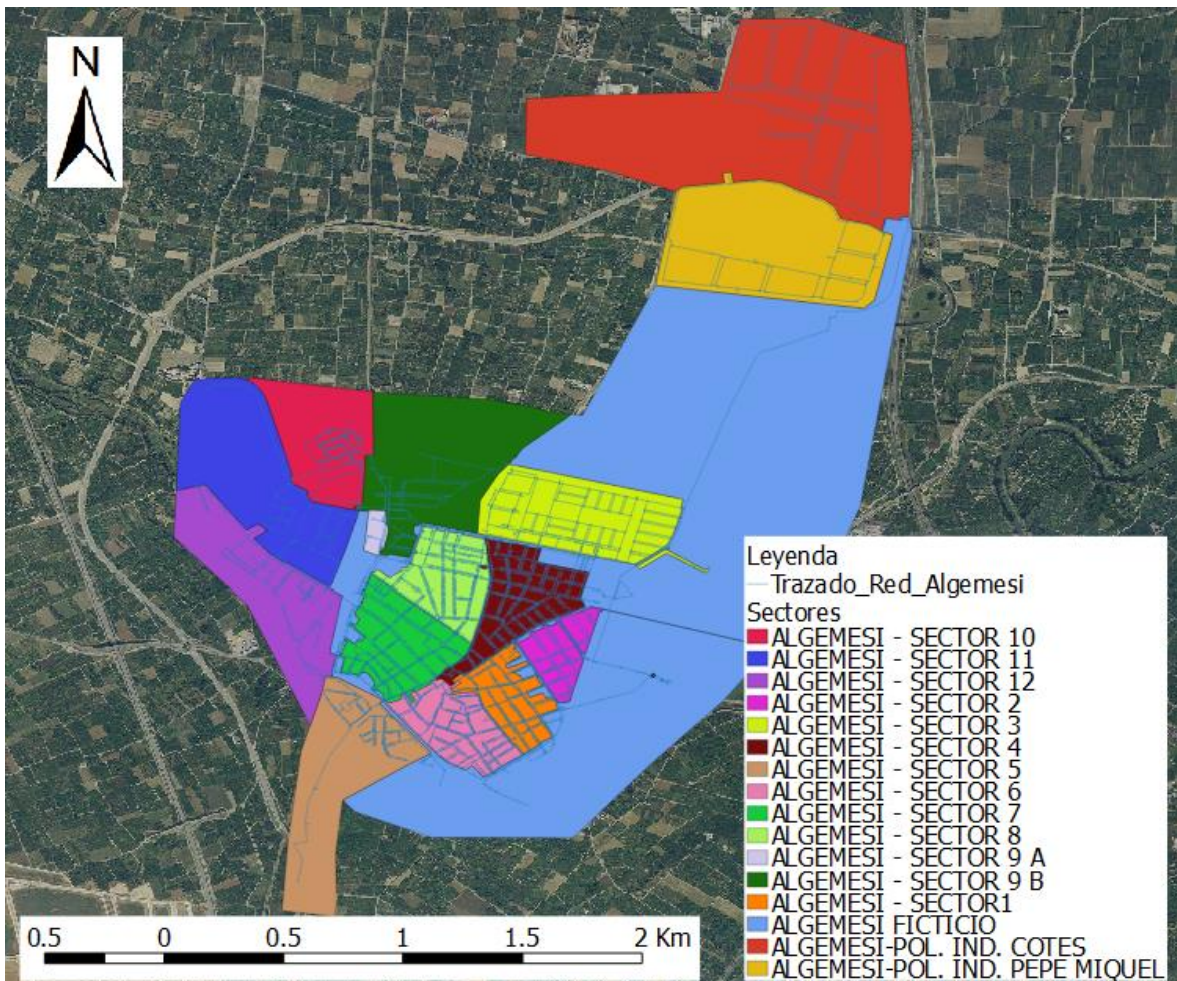


Figura 10. Sectorización de la red de abastecimiento de Algemesí.

Una red de abastecimiento que se encuentre sectorizada de forma inadecuada puede acarrear problemas de abastecimiento y de calidad del agua, es por ello que la sectorización

final es específica para las condiciones hidráulicas y de calidad de cada sistema por separado. Es importante tener esto en consideración, ya que sectorizar una red significa realizar una fuerte inversión, por lo que no se trata únicamente de instalar válvulas y caudalímetros en determinados puntos del sistema, sino que muchas veces es necesario reforzar ciertos tramos de tubería para garantizar la presión de servicio a los usuarios. Por otra parte, es recomendable que cada uno de los sectores de la red esté preparado para sobrellevar averías en los puntos de suministro, es decir se debe contar con entradas alternativas (que en condiciones de funcionamiento normal se encuentran cerradas), para alimentar al sector perjudicado, manteniendo así la garantía de suministro.

La población de Algemesí se encuentra abastecida por una red que cuenta con aproximadamente 110 Km de tubería distribuidos entre siete (7) tipos de materiales distintos. Esta longitud de red corresponde a un total de 3620 tuberías. En la Tabla 7 se muestran tanto la repartición del número de tuberías existentes como los metros de tubería correspondientes a cada tipo de material y el porcentaje que estos representan. Adicionalmente en la Figura 11 se observa este porcentaje representado de forma gráfica.

Tabla 7. Longitudes y número de tuberías según el tipo de material en la red de Algemesí.

Materiales	Número de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje
Fibrocemento	2219	59425	54.16
Fundición Dúctil	127	7535	6.87
Fundición Gris	18	449	0.41
Hormigón	10	289	0.26
Plomo	61	1335	1.22
Polietileno	1145	40097	36.54
PVC	15	215	0.20
Sin Determinar	25	381	0.35
TOTAL	3620	109725	100.00

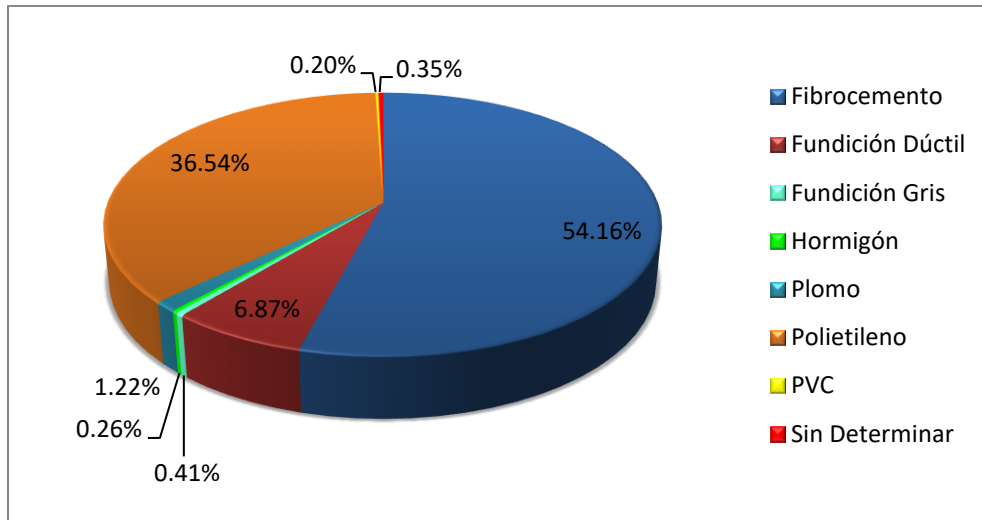


Figura 11. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al tipo de material en la red de Algemés.

Se observa que se tiene una mayor cantidad de tuberías de Fibrocemento, Polietileno y Fundición Dúctil en ese respectivo orden dentro de la red de abastecimiento, estando más del 50% de la longitud total de la red conformada por tuberías de Fibrocemento, mientras que un tercio de la misma está compuesta por tuberías de Polietileno. Adicionalmente se puede observar que 381 metros de red correspondientes a 25 tuberías no poseen un tipo de material asignado.

Por otra parte en la Tabla 8 y la Figura 12 se muestra el número de tuberías y la longitud de red correspondiente de acuerdo al emplazamiento que poseen los activos de la red, así como su representación porcentual gráfica.

Tabla 8. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al emplazamiento de los activos de la red.

Emplazamiento	Número de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Acera	3031	94892	86.48
Calzada	546	10654	9.71
Campo	6	290	0.26
Sin Determinar	37	3888	3.54
TOTAL	3620	109725	100.00

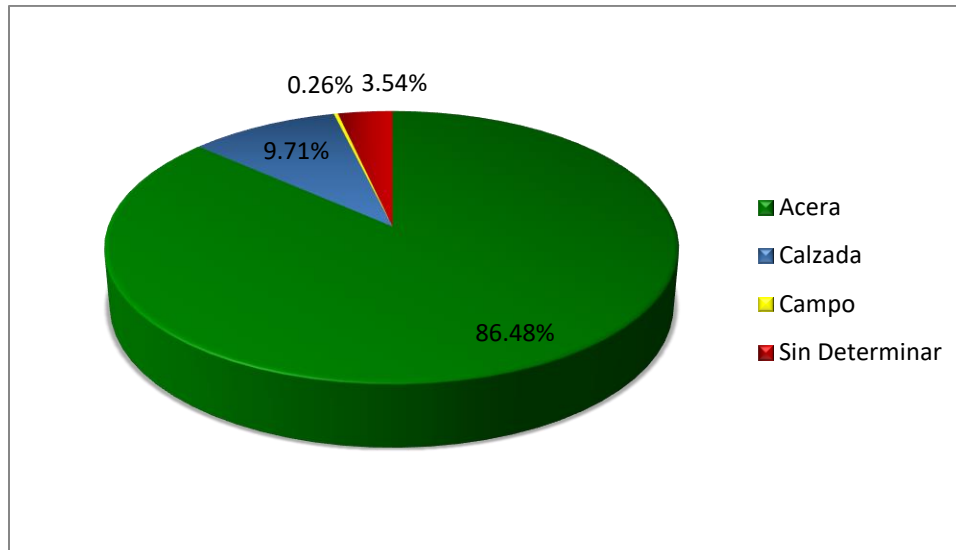


Figura 12. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al emplazamiento de los activos en la red de Algemésí.

Se puede resaltar que casi el 90% de la red de abastecimiento se encuentra emplazada en las aceras de la población, lo cual evitaría la creación de molestias causadas por la interrupción del paso vehicular durante la resolución de averías o trabajos de rehabilitación. Adicionalmente se observa que en aproximadamente 4 Km de red no se conoce el emplazamiento exacto de las tuberías.

En la Tabla 9 se realizó la clasificación del número de tuberías y la longitud que tienen las mismas dentro del sistema en función del diámetro que tienen los elementos. De igual forma se elaboró un gráfico donde se observan los porcentajes representativos para estos valores en la Figura 13.

Tabla 9. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al diámetro de los activos de la red

Diámetro	Número de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
0 -50 mm	242	6213	5.66
50 - 100 mm	1873	47144	42.97
100 - 150 mm	783	26480	24.13
150 - 200 mm	468	19623	17.88
200 - 300 mm	224	6810	6.21
300 - 400 mm	27	3449	3.14
Sin Determinar	3	5	0.01
TOTAL	3620	109725	100

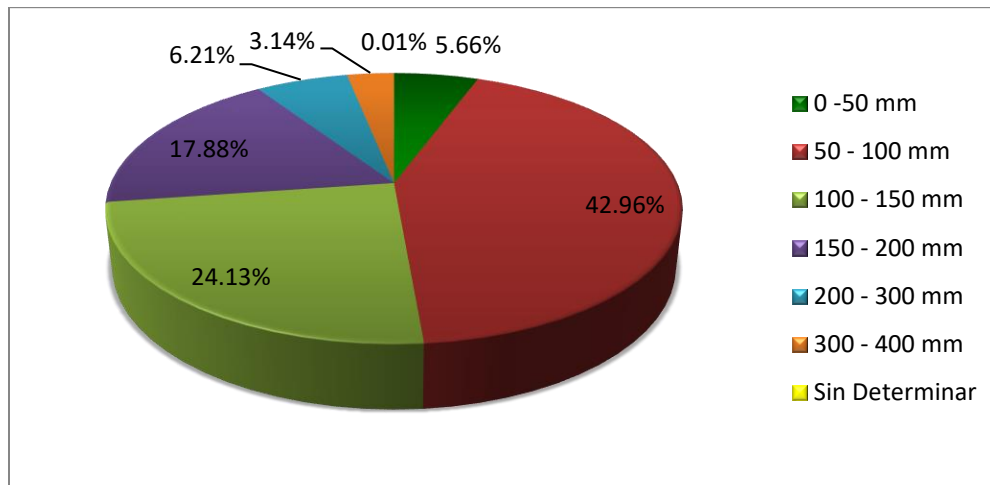


Figura 13. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al diámetro de los activos en la red de Algemésí.

En este caso se observa que el 90% de la red está formada por tuberías con diámetros menores a 200 mm, las cuales suelen ser más propensas a presentar fallos como se mencionó anteriormente. Por otra parte, aproximadamente el 50% de la red está compuesta por tuberías con diámetros que varían entre los 50 mm y 100 mm, por lo tanto 50% del sistema posee un riesgo de rotura mayor que el resto de la red.

Seguidamente dentro de la Tabla 10 se muestra la clasificación de las tuberías de acuerdo a su edad, mientras que en la Figura 14 se presenta el gráfico correspondiente.

Tabla 10. Longitudes y número de tuberías según la edad de los activos de la red.

Edad	Número de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
0 - 10 años	646	23562	21.47
10 - 20 años	736	25662	23.39
20 - 30 años	726	19030	17.34
30 - 40 años	588	12410	11.31
40 - 50 años	471	14122	12.87
50 - 60 años	237	8303	7.57
60 - 70 años	11	463	0.42
Sin Determinar	205	6173.5	5.63
TOTAL	3620	109725	100.00

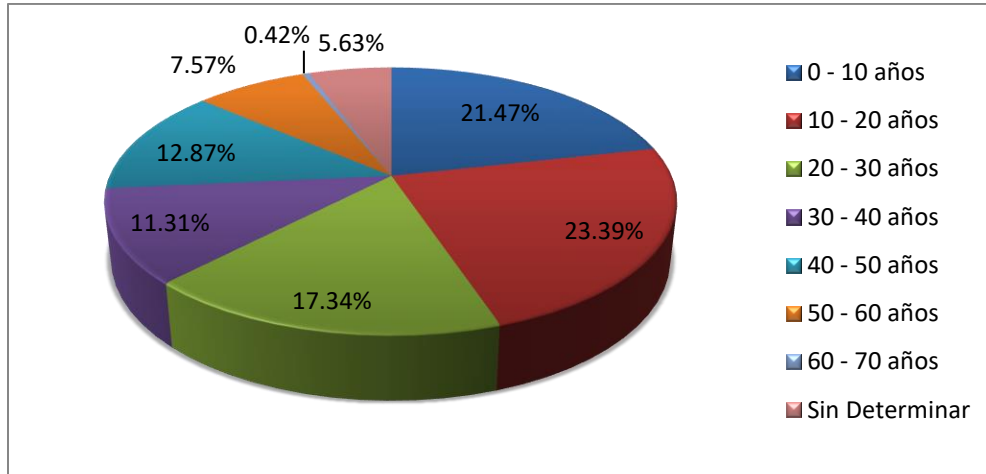


Figura 14. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según las edades de los activos en la red de Algemés.

Según los datos proporcionados más del 50% de la red tiene menos de 30 años desde su instalación, por lo que de establecerse un plan de rehabilitación y reemplazo adecuado se podría tener un sistema completamente renovado en un tiempo relativamente corto. Por otro lado, es probable que las fechas de instalación del 6% de la red de la cual se desconoce su edad sean previas a las del resto del sistema.

Por último en la Tabla 11 y Figura 15 se presentan las proporciones que se tienen dentro del sistema de abastecimiento para cada tipo de red y la representación gráfica correspondiente.

Tabla 11. Longitudes y número de tuberías según el tipo de red.

Tipo de Red	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Red Arterial	546	16377	14.93
Red Distribución	3006	90654	82.62
Red Traídas	68	2694	2.46
TOTAL	3620	109725	100.00

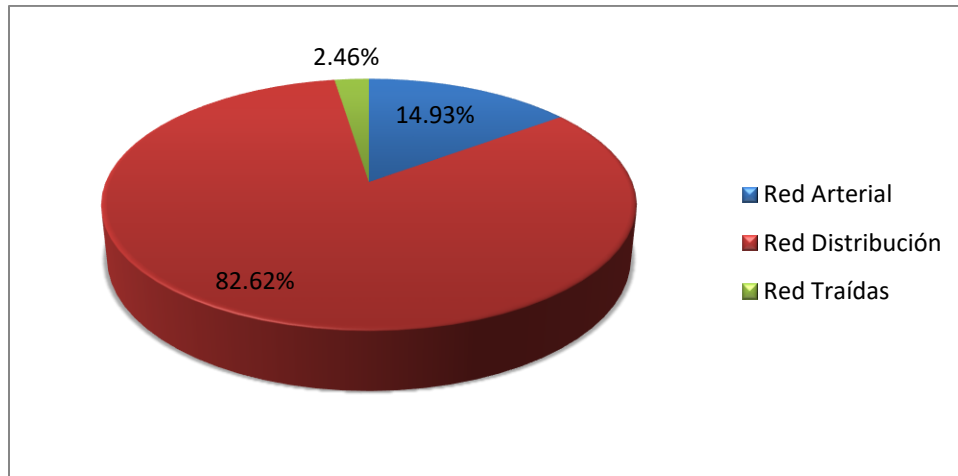


Figura 15. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según el tipo de red que conforma el sistema de abastecimiento de Algemesí.

Se puede observar que aproximadamente 16 Km de las tuberías que conforman el sistema son parte de la red de arterial o de aducción, dato que es importante considerar, ya que si alguno de estos elementos sufre una avería se pueden ver afectados uno o varios sectores del sistema, pudiéndose verse afectado tanto el suministro como las presiones de servicio.

3.2 RED DE VALENCIA

La ciudad de Valencia es un municipio ubicado a orillas del río Turia, en la costa levantina de la península ibérica, justo en el centro del golfo de Valencia (Figura 16). Es la ciudad capital tanto de la Comunidad Valencia como de la provincia homónima y para el año 2016 contaba con 790.201 habitantes según el Instituto Nacional de Estadística, siendo así la tercera ciudad y área metropolitana más poblada de España, por detrás de Madrid y Barcelona.



Figura 16. Ubicación geográfica de la ciudad de Valencia. (Fuente: Wikipedia, Google Maps).

La red de abastecimiento de agua potable de Valencia es manejada por la compañía Aguas de Valencia S.A. Es una red que se encuentra parcialmente sectorizada, ya que existen zonas de la red como es el caso del casco histórico el cual no pertenece a ningún sector, debido a la antigüedad del sistema y su topología en dicha zona.

La red de abastecimiento está constituida por 36 sectores, cuya disposición se puede observar en el plano dispuesto en el Anexo 1. La sectorización de la red ha permitido llevar a cabo la implementación de técnicas avanzadas por medio del telemando y el telecontrol. Este tipo de tecnología puede mejorar considerablemente la gestión de las instalaciones, ya que permite conocer el estado de funcionamiento de los elementos y equipos integrados dentro del sistema como las bombas y las válvulas. Adicionalmente el conocimiento de variables de interés como caudales, presiones, concentraciones de cloro libre, etc.; que proporcionadas por la instrumentación adecuada aumenta la fiabilidad de la red.

Para el estudio planteado en el presente trabajo se utilizarán 2 de los 36 sectores de la ciudad de Valencia. Más concretamente se tratarán los sectores Jesús (9-A) y Nazaret (11-C). En la Figura 17 se muestra la ubicación geográfica de ambos sectores y a continuación se analizarán cada uno de ellos por separado.

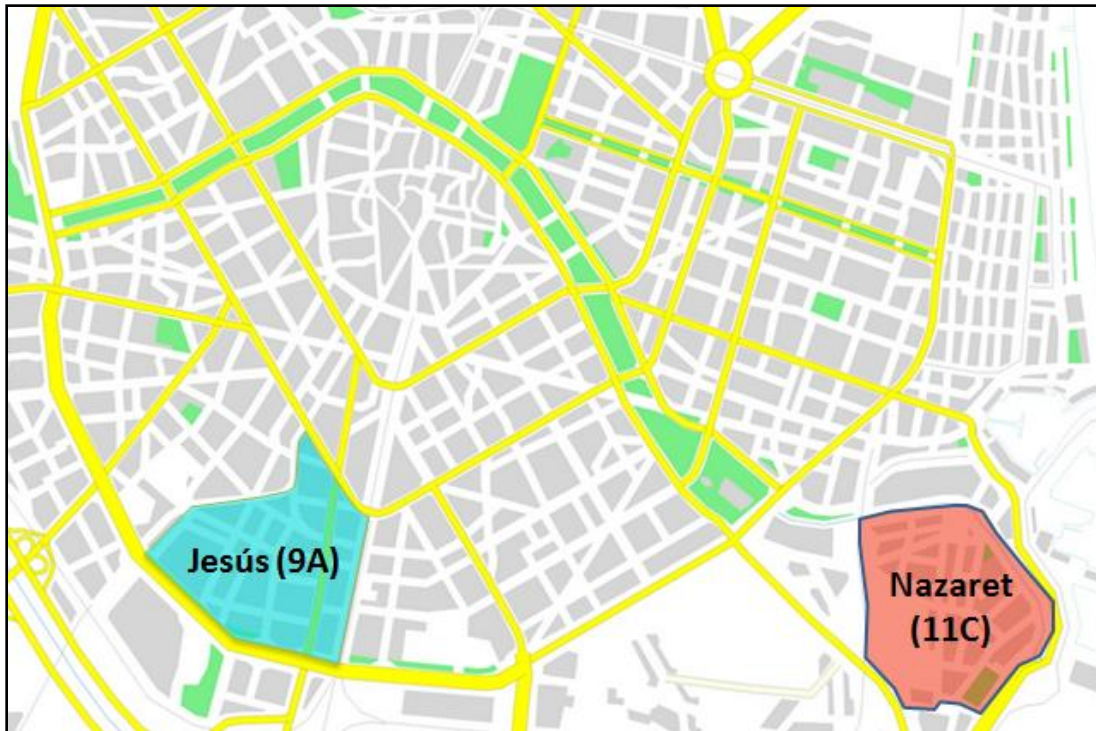


Figura 17. Ubicación geográfica del sector Jesús (9A) dentro de la ciudad de Valencia.

3.2.1 SECTOR JESÚS (9-A)

Este sector se encuentra ubicado en la zona sur de la ciudad de Valencia, entre el casco histórico y el nuevo cauce del río Turia tal como se observa en la Figura 17. Por otro lado, en la Figura 18 se muestra la ortofoto del sector junto con la topología de la red de distribución, en donde se muestra con mayor detalle la distribución espacial de calles y edificaciones existentes.

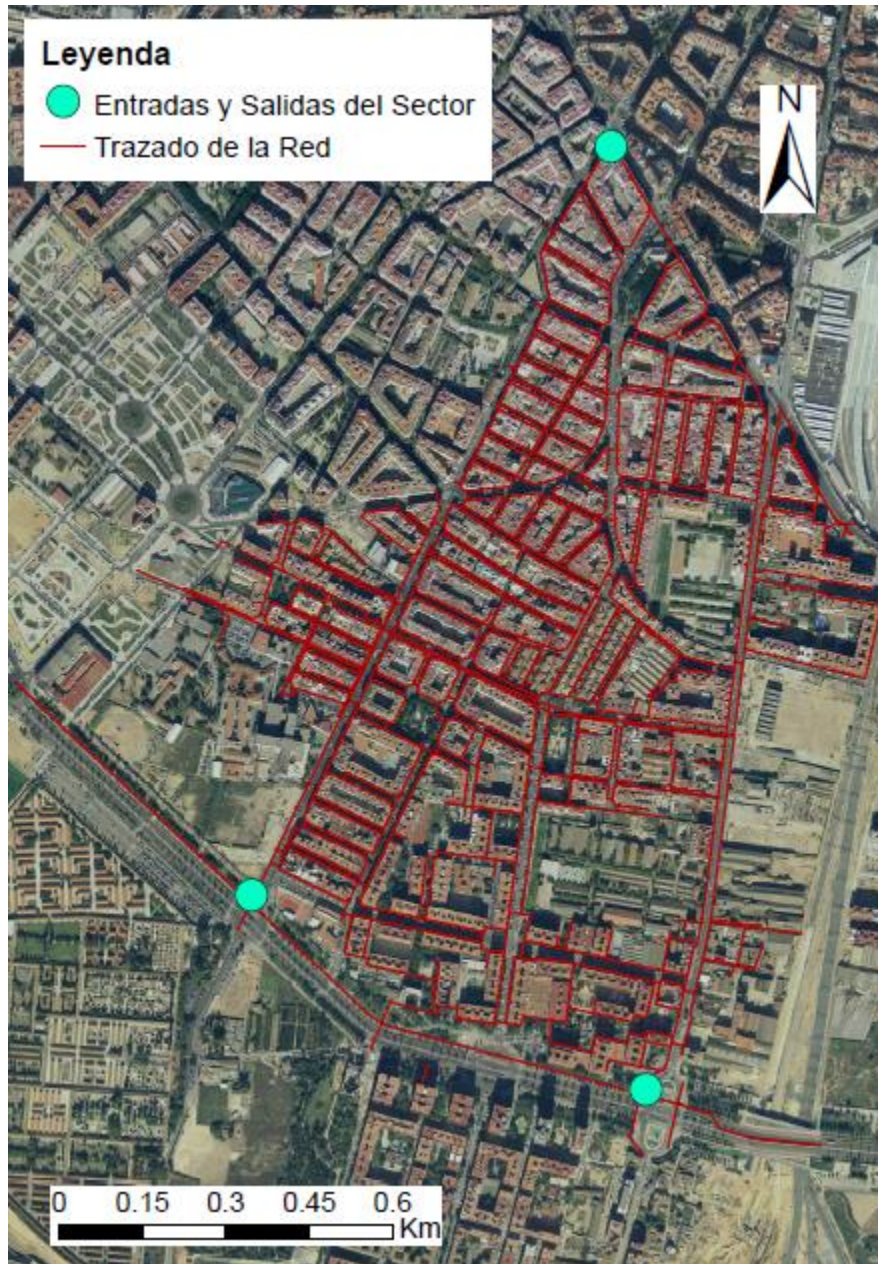


Figura 18. Topología de la red de abastecimiento de agua potable del sector Jesús (9-A).

La alimentación del sector se lleva a cabo mediante 2 entradas (señaladas con puntos azules en la Figura 18), las cuales se encuentran dispuestas al oeste del sector, teniéndose una por la zona suroeste y otra por la zona norte. Dicho sector cuenta con aproximadamente 41 Km de red compuestos por 1877 tuberías y repartidos entre 6 tipos de materiales distintos. Para garantizar el aislamiento del sector y tener un mejor control sobre este, se utilizan válvulas

de seccionamiento. En la Tabla 12 y la Figura 19 se muestra la clasificación de la red según el tipo de material y su representación gráfica respectiva.

Tabla 12. Longitudes y número de tuberías según el tipo de material en el sector Jesús (9-A) de la red de Valencia.

Materiales	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Acero	2	265	0.65
Fibrocemento	697	18446	45.21
Fundición Dúctil	401	5147	12.61
Fundición Gris	435	10645	26.09
Plomo	5	54	0.13
Polietileno	334	6241	15.30
Sin Determinar	3	6	0.02
TOTAL	1877	40806	100.00

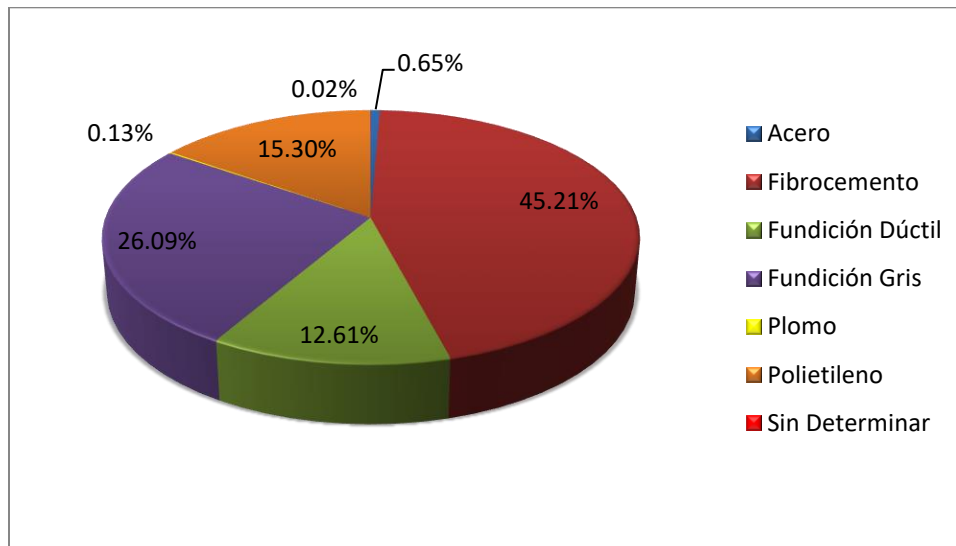


Figura 19. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al tipo de material en el sector Jesús (9-A) de la red de Valencia.

Se observa que dentro del sector predominan las tuberías de Fibrocemento, Fundición Gris y Polietileno, siendo prácticamente el 50% de la longitud total de la red de Fibrocemento. Por otra parte, al analizar la proporción para cada material se podría decir que la proporción de tuberías plásticas en el sistema es relativamente baja, ya que solo un 15% de la red está compuesta por tuberías de Polietileno. Adicionalmente se puede observar que se desconoce el material de 3 elementos.

De igual forma en la Tabla 14 se muestra la clasificación de los activos de la red de abastecimiento según su emplazamiento, mientras que en la Figura 20 se presenta el gráfico correspondiente.

Tabla 13. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al emplazamiento de los activos de la red del sector Jesús (9-A).

Emplazamiento	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Acera	97	1830	4.48
Calzada	72	1560	3.82
Sin Determinar	1708	37416	91.69
TOTAL	1877	40806	100.00

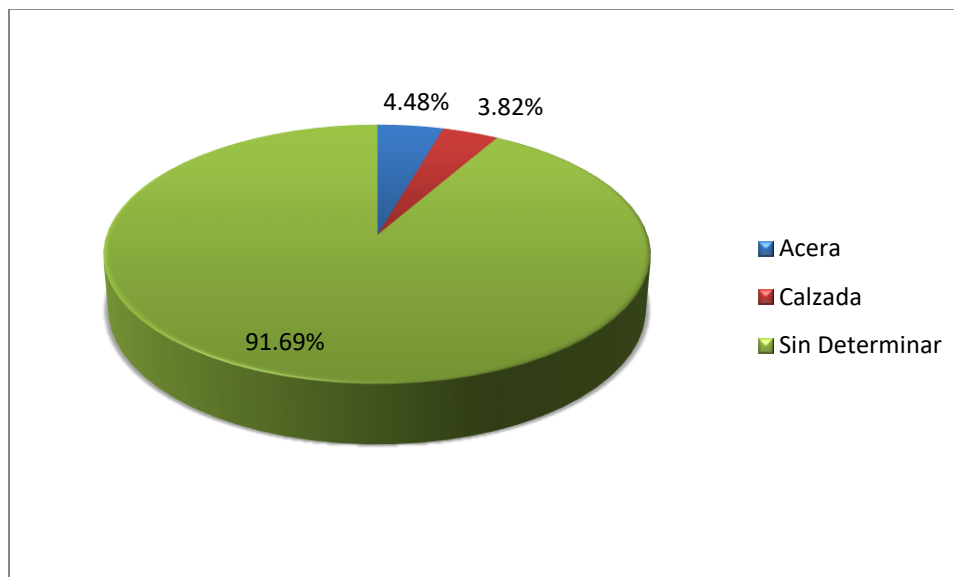


Figura 20. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al emplazamiento de los activos en la red del sector Jesús (9-A).

Se puede ver que el emplazamiento del 90% del sistema no ha sido incorporado a la base de datos, aunque para la finalidad que se tiene en la presente investigación, la disposición de dicha información no es particularmente fundamental.

Seguidamente dentro de la Tabla 14 se presentan el número de tuberías y la longitud de red de acuerdo al diámetro de los activos, con su representación porcentual mostrada en la Figura 21.

Tabla 14. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al diámetro de los activos de la red del sector Jesús (9-A).

Diámetro	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
0 -50 mm	102	702	1.72
50 - 100 mm	1010	20748	50.85
100 - 150 mm	462	10087	24.72
150 - 200 mm	205	4763	11.67
200 - 300 mm	78	2631	6.45
300 - 500 mm	15	1598	3.92
500 - 700 mm	5	277	0.68
Sin Determinar	0	0	0.00
TOTAL	1877	40806	100.00

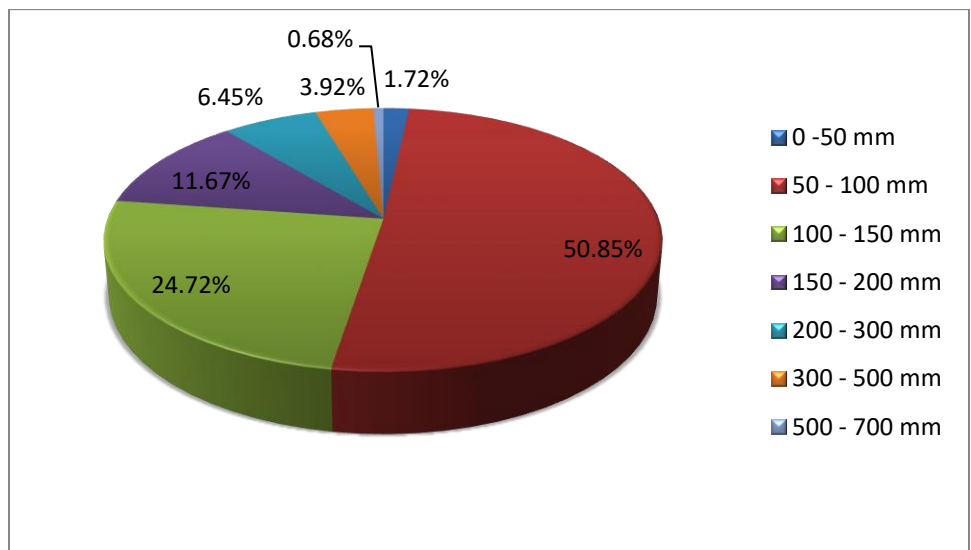


Figura 21. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al diámetro de los activos en la red del sector Jesús (9-A).

Al estudiar la Figura 21 se observa que prácticamente el 90% de la red consta de tuberías con diámetros que varían entre los 50 mm y los 200 mm, mientras que solo un 0,7% de la red sobrepasa los 500 mm diámetro. Estos porcentajes son importantes de considerar para la gestión del sistema.

Por otra parte, en la Figura 22 y la Tabla 15 se clasificaron las tuberías de acuerdo a su edad, considerando la fecha de instalación de las mismas dentro del sistema.

Tabla 15. Longitudes y número de tuberías según la edad de los activos de la red del sector Jesús (9-A).

Edad	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
0 - 10 años	307	4819	11.81
10 - 20 años	244	5071	12.43
20 - 30 años	151	3179	7.79
30 - 40 años	308	7593	18.61
40 - 50 años	524	11306	27.71
50 - 60 años	245	6283	15.40
60 - 70 años	79	1793	4.39
70 - 80 años	10	363	0.89
80 - 90 años	9	397	0.97
Sin Determinar	0	0	0.00
TOTAL	1877	40806	100.00

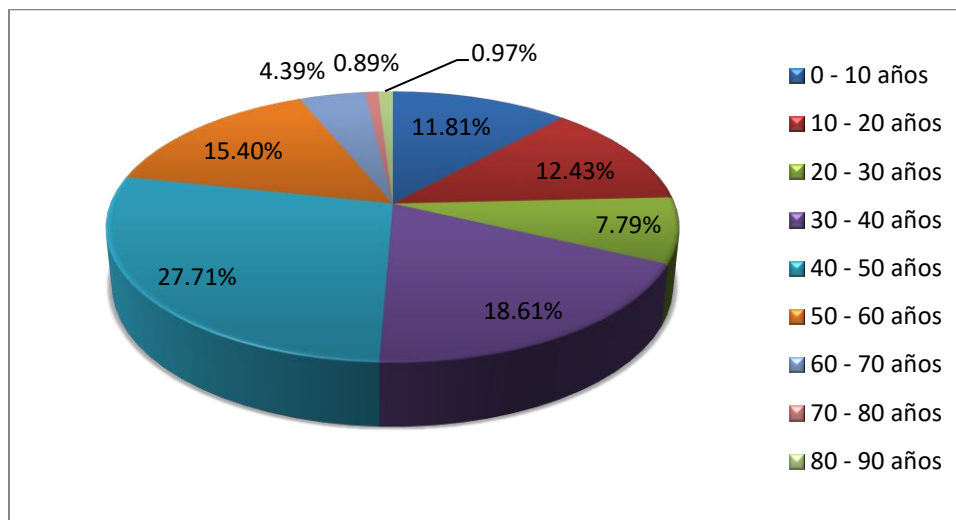


Figura 22. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según las edades de los activos en la red del sector Jesús (9-A).

Se observa que aproximadamente solo un 20% del sistema sobrepasa los 50 años de edad, mientras que otro 20% de la red ha sido instalada o renovada en las últimas 2 décadas. Como se ha mencionado con anterioridad este factor es importante más no exclusivo para establecer un plan de rehabilitación y reemplazo.

Finalmente en la Tabla 16 y la Figura 23 se presentan para cada tipo de red la longitud y el número correspondiente de tuberías, así como la representación gráfica porcentual.

Tabla 16. Longitudes y número de tuberías según el tipo de red del sector Jesús (9-A).

Tipo de Red	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Red Distribución Primaria	111	4563	11.18
Red Distribución Secundaria	1766	36243	88.82
TOTAL	1877	40806	100.00

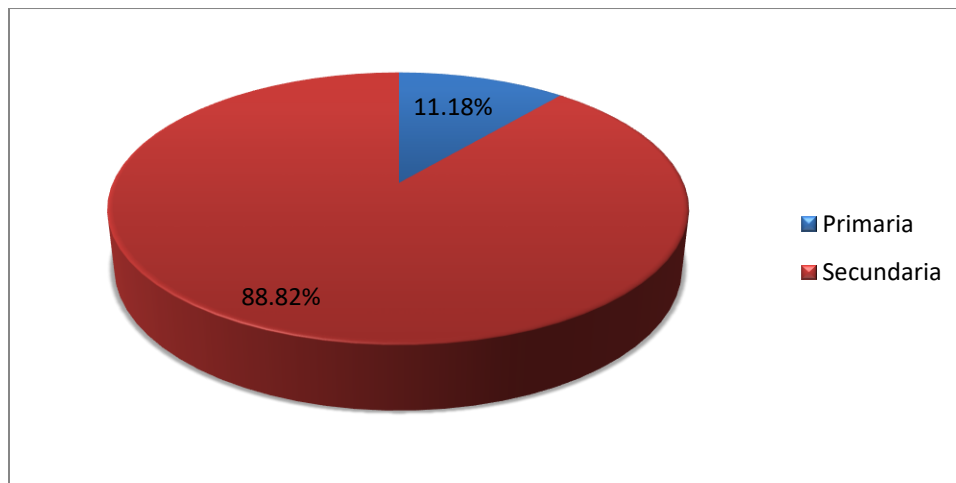


Figura 23. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según el tipo de red que conforma el sistema de abastecimiento del sector Jesús (9-A).

En este caso particular todas las tuberías que componen el sistema del sector forman parte de la red distribución, aunque el 11% de la red se considera como red de distribución primaria, por lo que los 4.5 Km de tuberías que forman parte de este grupo deben ser considerados prioritarios al momento de realizar la renovación y rehabilitación de activos.

3.2.2 SECTOR NAZARET (11-C)

El sector Nazaret se encuentra ubicado en la zona suroeste de Valencia, específicamente junto al tramo final del parque Rio Turia y al puerto de la ciudad tal como se observa en la Figura 17. Adicionalmente se presenta un plano cartográfico de la zona en la Figura 24, en donde se puede observar con mayor detalle la composición del sector, resaltando la existencia de zonas verdes y pequeños polígonos industriales, además de algunas zonas residenciales.

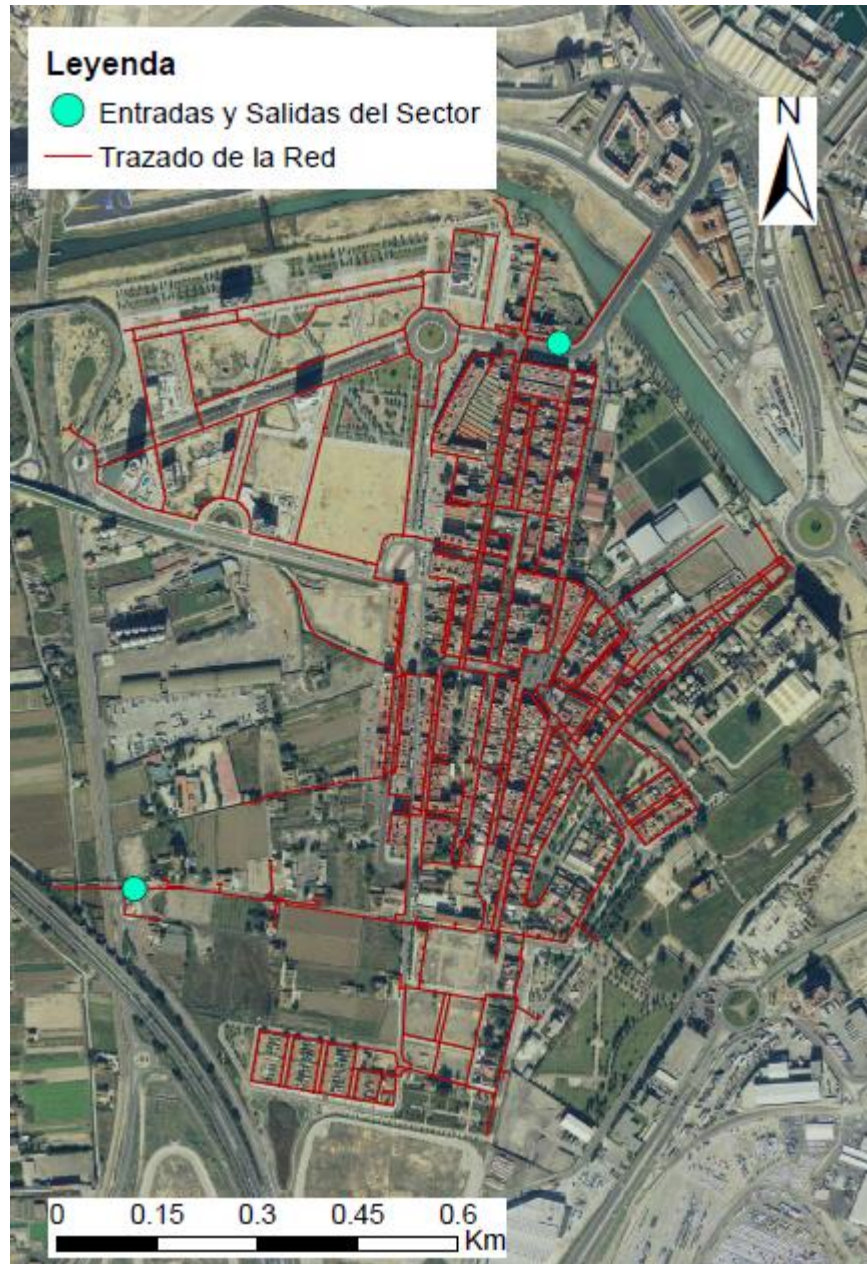


Figura 24. Topología de la red de abastecimiento de agua potable del sector Nazaret (11-C).

Adicionalmente en la Figura 24 se muestra la topología de la red de abastecimiento del sector y de igual forma se señalan los dos puntos de alimentación que posee el mismo, ubicándose el primero al norte del sector y el segundo hacia el oeste. El sector Nazaret está compuesto aproximadamente por 24 Km de red correspondientes a 951 tuberías repartidas entre ocho tipos de materiales diferentes. Dicha distribución se muestra en la Tabla 17,

mientras que en la Figura 25 se presentan gráficamente los valores porcentuales correspondientes.

Tabla 17. Longitudes y número de tuberías según el tipo de material en el sector Nazaret (11-C) de la red de Valencia.

Materiales	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Acero	2	10	0.04
Fibrocemento	63	1624	6.86
Fundición Dúctil	208	3890	16.42
Fundición Gris	149	3638	15.36
Hormigón	2	22	0.09
Plomo	5	5	0.02
Polietileno	502	13676	57.74
PVC	20	821	3.47
Sin Determinar	0	0	0.00
TOTAL	951	23686	100.00

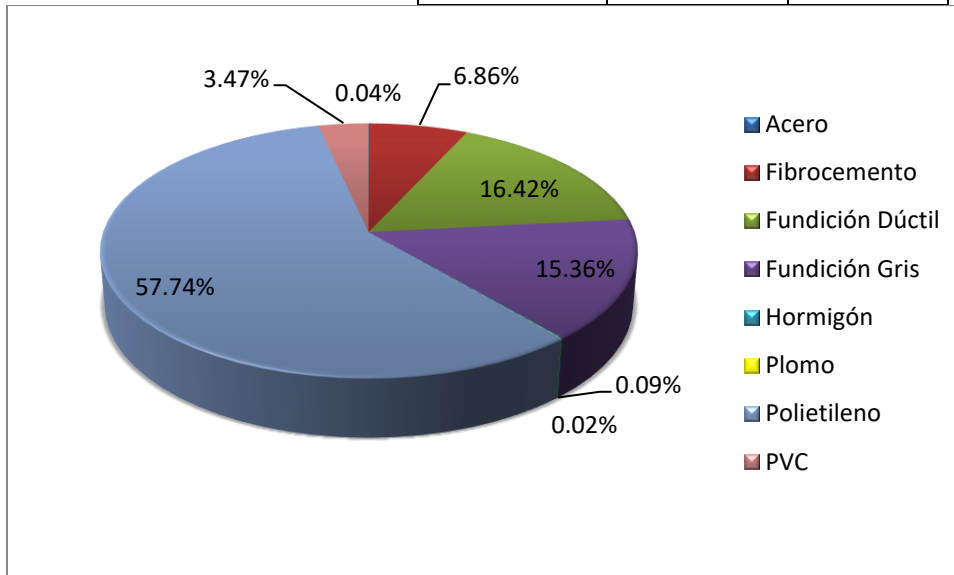


Figura 25. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al tipo de material en el sector Nazaret (11-C) de la red de Valencia.

Se puede observar que contrario al caso del sector Jesús (9-A), en el sector Nazaret (11-C) prácticamente el 60% de la red está compuesta por tuberías de materiales plásticos como son el PVC y el Polietileno, lo cual es un indicador de que dicha zona de la red es relativamente nueva, lo cual se muestra en la Tabla 20. Por otro lado, se puede destacar

que el Fibrocemento, material predominante en los otros casos de estudio, solo representa un 7% de la red del sector Nazaret (11-C).

A continuación, en la Tabla 18 y la Figura 26 se presentan las longitudes de la red y el porcentaje representativo según su emplazamiento.

Tabla 18. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al emplazamiento de los activos de la red del sector Nazaret (11-C).

Emplazamiento	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Acera	113	3275	13.83
Calzada	22	271	1.15
Sin Determinar	816	20140	85.03
TOTAL	951	23686	100.00

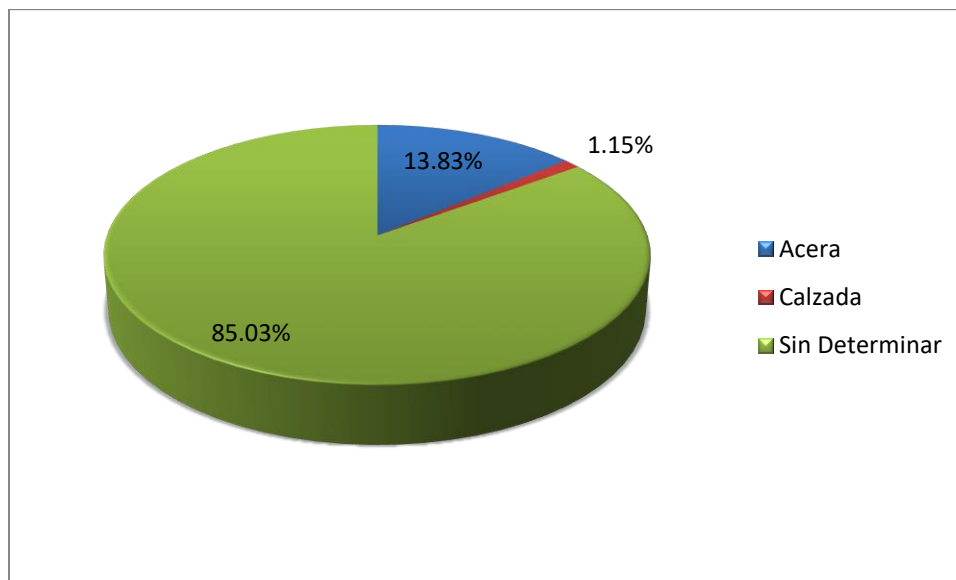


Figura 26. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al emplazamiento de los activos en la red del sector Nazaret (11-C).

Al analizar la clasificación de los activos según sus diámetros presentada en la Tabla 19 junto con su gráfico correspondiente en la Figura 27 se puede observar que, en comparación a los casos anteriores la proporción de tuberías por debajo de 200 mm de diámetro es un poco menor, siendo esta de un 80%. Por otra parte, solo un 30% de la red posee diámetros

que oscilan entre 50 mm y 100 mm, valor que para los otros casos de estudio alcanzaba el 50%. Esto podría deberse al nivel de demandas que posee el sector.

Tabla 19. Longitudes y número de tuberías de acuerdo al diámetro de los activos de la red del sector Nazaret (11-C).

Diámetro	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
0 -50 mm	83	987	4.17
50 - 100 mm	352	7202	30.41
100 - 150 mm	211	4791	20.23
150 - 200 mm	235	7903	33.37
200 - 300 mm	33	1135	4.79
300 - 500 mm	37	1667	7.04
Sin Determinar	0	0	0.00
TOTAL	951	23686	100.00

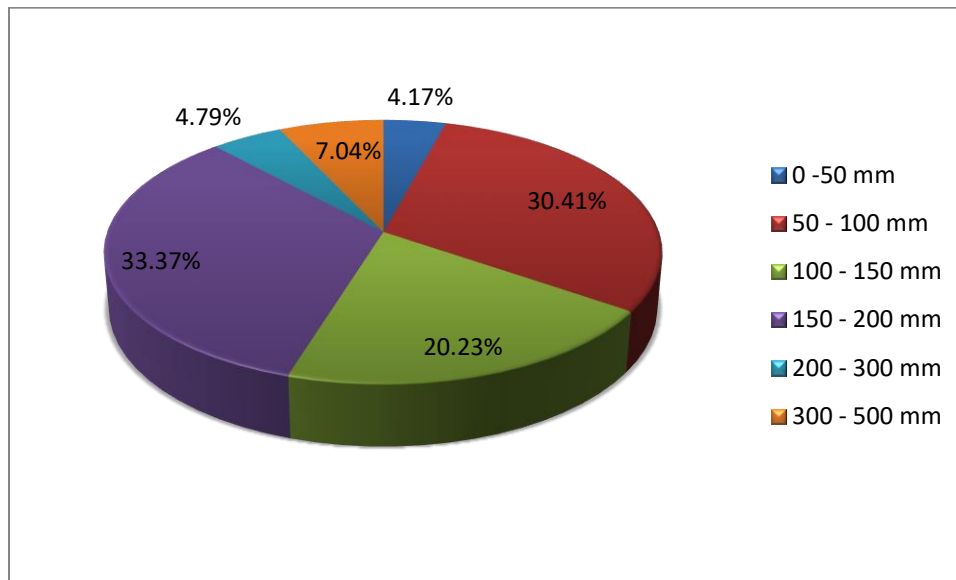


Figura 27. Distribución porcentual de las longitudes de tubería de acuerdo al diámetro de los activos en la red del sector Nazaret (11-C).

Seguidamente en la Tabla 20 y la Figura 28 se muestra la clasificación de los activos según su edad. Se puede corroborar lo mencionado con anterioridad, aproximadamente un 70% de la red de abastecimiento del sector Nazaret (11-C) tiene menos de 20 años desde su

instalación, mientras que solo unos 4,5 Km de red sobrepasan los 40 años de edad. Por esta razón, en teoría, el plan de renovación en dicho sector podría no ser prioritario.

Tabla 20. Longitudes y número de tuberías según la edad de los activos de la red del sector Nazaret (11-C).

Edad	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
0 - 10 años	236	7489	31.62
10 - 20 años	408	8861	37.41
20 - 30 años	59	971	4.10
30 - 40 años	55	1669	7.05
40 - 50 años	45	1015	4.28
50 - 60 años	144	3578	15.11
60 - 70 años	0	0	0.00
70 - 80 años	4	103	0.43
Sin Determinar	0	0	0.00
TOTAL	951	23686	100.00

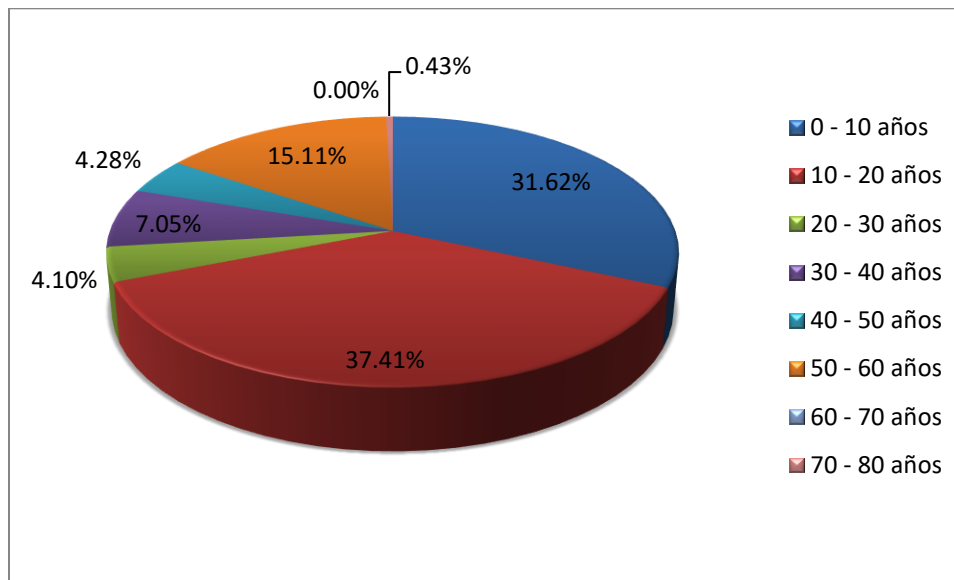


Figura 28. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según las edades de los activos en la red del sector Nazaret (11-C).

Finalmente en la Tabla 21 y Figura 29 se muestra la clasificación de las tuberías del sistema según el tipo de red de la cual forman parte. Al igual que en el caso del sector Jesús (9-A) prácticamente el 100% del sector pertenece a la red de distribución de Valencia, siendo un

91% parte de la red de distribución secundaria. Por otro lado, en comparación al sector Jesús (9-A) solo 2 Km de tuberías del sector Nazaret (11-C) forman parte del sistema de distribución primario, aunque esto es lógico ya que el primero posee una mayor longitud de red.

Tabla 21. Longitudes y número de tuberías según el tipo de red del sector Nazaret (11-C).

Tipo de Red	Numero de tuberías	Longitud de tubería (m)	Porcentaje (%)
Red Arterial	1	14	0.06
Red Distribución Primaria	65	2119	8.95
Red Distribución Secundaria	885	21553	91.00
TOTAL	951	23686	9.00

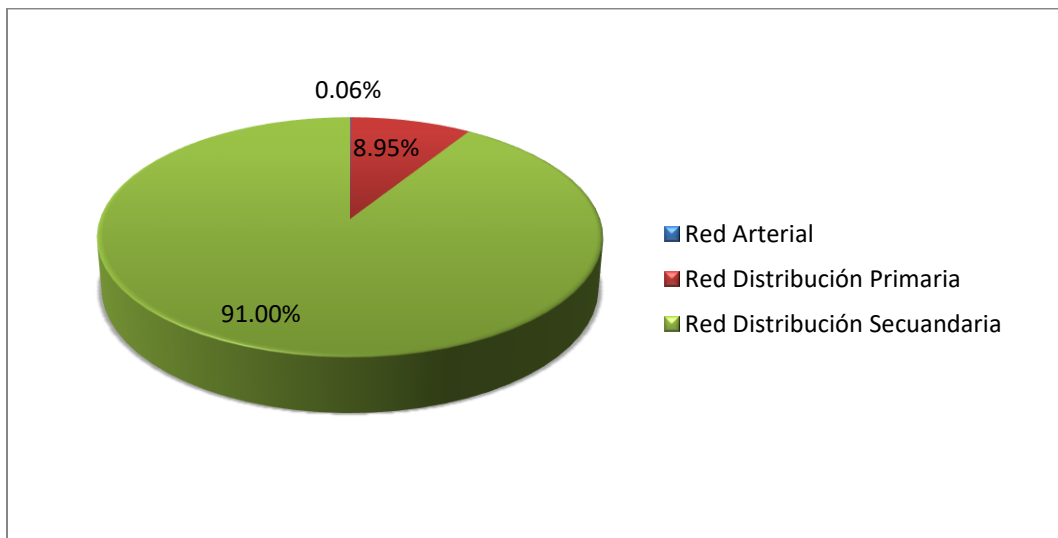


Figura 29. Distribución porcentual de las longitudes de tubería según el tipo de red que conforma el sistema de abastecimiento del sector Nazaret (11-C).

4 METODOLOGÍA

4.1 PLANTEAMIENTO DE FICHA MODELO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Con la finalidad de mejorar tanto la calidad como la cantidad de la información correspondiente a los activos de la red de abastecimiento, se ha diseñado una ficha tipo que será empleada por la empresa Aguas de Valencia S.A. durante la resolución de incidencias (como son la reparación de fugas y roturas en la red) y las tareas de renovación y rehabilitación, para así recoger los datos que sean de interés.

Para llevar a cabo dicha tarea se ha decidido realizar una comparación entre aquellos factores que han sido considerados en algunos de los modelos de predicción de fallos desarrollados en las últimas décadas, la ficha aplicada actualmente por la compañía y las directrices establecidas por la norma ISO/FDIS 24516, la cual trata las “Pautas para la gestión de activos en sistemas de agua potable y aguas residuales”. En este caso particular solo se tomó en cuenta la primera parte de dicha norma que abarca específicamente las “Redes de distribución de agua potable”.

Es importante destacar que se ha tenido en consideración que los datos a recolectar puedan ser medidos u observados en campo con cierta facilidad, para así garantizar que la información se registre correctamente, ya que esta será recogida e introducida en la base de datos de la empresa por el personal de mantenimiento encargado de llevar a cabo las actuaciones correspondientes. En principio dicha condición permite descartar algunos de los modelos que incluyan factores cuya determinación puede requerir de procesos adicionales como son ensayos en laboratorio o investigaciones adicionales, complicando la eficacia con la que se quiere lograr la toma de datos.

4.2 MODELIZACIÓN DE LAS REDES

Inicialmente para realizar los modelos hidráulicos de los sistemas de distribución objeto de estudio se requiere de una serie de datos, como son:

- Archivos SIG (Sistemas de Información Geográfica) que contengan la topología de la red y los datos de interés como son diámetro, material, longitud de las tuberías y cotas de los puntos de interés.
- Consumos de los usuarios existentes en el sistema.
- Ubicación de los sensores encargados de medir la presión y caudal en los puntos de interés de la red.
- Curvas de modulación de los depósitos existentes y su función dentro del sistema. Adicionalmente se deben conocer las dimensiones de dichos elementos y su capacidad de almacenamiento.
- Régimen de funcionamiento de los grupos de bombeo presentes en el sistema y su ubicación dentro de la red de abastecimiento.

Seguidamente se buscó reducir la incertidumbre y los errores de este conjunto de datos mediante la filtración y depuración de los mismos. El procedimiento a seguir dependerá del tipo de información con la que se esté tratando.

4.2.1 DEMANDA DE LOS NUDOS DE CONSUMO

Según el caso de estudio, el consumo de los nodos de la red se presenta de forma bimensual o trimestral, aunque para aquellos nodos donde se tiene una demanda elevada, el consumo se factura mensualmente. En la Tabla 22 se presenta un resumen estadístico de los nodos de consumo y las demandas existentes en cada una de las redes estudiadas.

Tabla 22. Resumen estadístico de los nodos de las redes estudiadas.

Red de abastecimiento	Año	Nodos de consumo	Tipo de medición	Consumo promedio (m ³)
Algemesí	2015	5102	Trimestral	40.81
Sector Jesús (9-A)	2016-2017	1654	Bimensual	193.84
Sector Nazaret (11-C)	2016-2017	811	Bimensual	62.22

Se ha buscado la presencia de consumos desproporcionados e irracionales dentro de la base de datos, y estos fueron corregidos sistemáticamente. Una vez se encontró depurada la información, a cada uno de los nodos del sistema se le asignó su demanda promedio correspondiente utilizando como referencia el número identificativo (ID) que representa a cada punto de consumo de forma individual.

4.2.2 DIÁMETRO DE LAS ACOMETIDAS Y TUBERÍAS PRINCIPALES DE LA RED

Tal como se mencionó en apartados anteriores, solo dentro de la red de Algemesí, existen muy pocos elementos de distribución o aducción que no poseen un diámetro asignado. Esta carencia de datos, por otro lado, se observa mucho más acentuada en las acometidas de todos los sistemas analizados. En la Tabla 23 y la Figura 30 se muestran las proporciones de acometidas con diámetros asignados y sin asignar para cada una de las redes estudiadas.

Tabla 23. Número de acometidas con diámetros de tubería asignados y sin asignar para las redes estudiadas.

Red de abastecimiento	Acometidas con diámetro asignado	Acometidas con diámetro sin asignar
Algemesí	664	4439
Jesús (9-A)	1697	51
Nazaret (11-C)	887	13

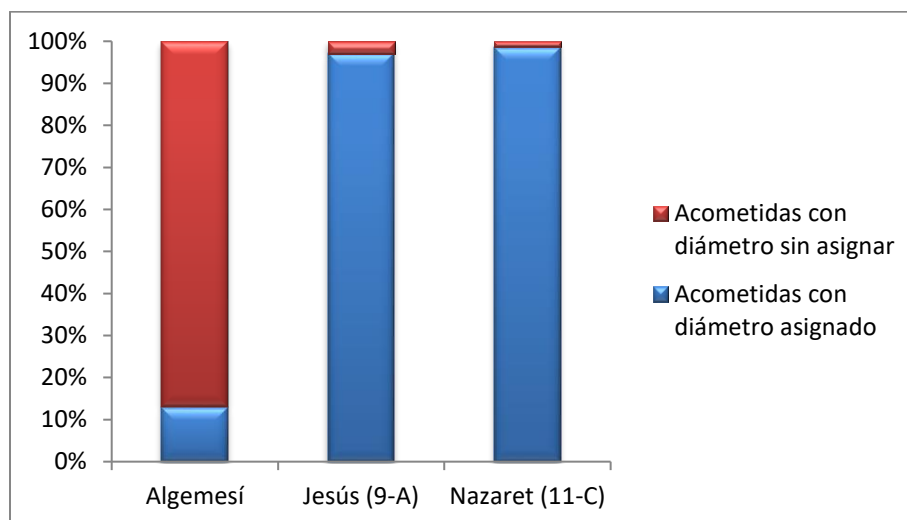


Figura 30. Proporción porcentual de acometidas con diámetros de tubería asignados y sin asignar para las redes estudiadas.

Se puede observar que en el caso de Algemesí aproximadamente el 85% de las acometidas de la red tenían asignado un diámetro de 3 mm, lo cual es indicativo de que en dichas acometidas no se conoce el valor real del diámetro de la tubería. Para los sectores Jesús (9-A) y Nazaret (11-C) de la red de la ciudad de Valencia se observa que este valor se encuentra por debajo de 5%.

Este problema se ha solventado estableciendo una relación entre el consumo medio de los nodos y el diámetro de aquellas acometidas cuya dimensión se conoce con certeza. A través de una regresión lineal se determinó la ecuación que predice de forma estimada la relación existente entre ambos parámetros. Seguidamente mediante dicha ecuación se calculó el diámetro correspondiente a cada una de las acometidas que carecen de dicho dato. Por último, en función de los diferentes diámetros existentes en la base de datos (Tabla 24), se ha redondeado el valor calculado al diámetro real más cercano.

Tabla 24. Diámetros existentes en las acometidas de las redes estudiadas.

	Diámetro de las acometidas (mm)													
Algemesí	-	-	-	-	75	63	60	50	40	32	30	25	20	15
Jesús (9-A)	150	100	-	80	75	63	60	50	40	32	30	25	20	15
Nazaret (11-C)	-	-	90	80	75	63	60	50	40	32	30	25	20	15

4.2.3 MATERIAL Y RUGOSIDAD DE LAS ACOMETIDAS Y TUBERÍAS PRINCIPALES DE LA RED

De la misma manera que se observó en el Apartado 3, se puede destacar que un porcentaje muy bajo de las tuberías principales que conforman las redes analizadas carecen de la asignación del tipo de material. Estos valores son de 0.35% y 0.02%, para Algemesí y el sector Jesús (9-A) respectivamente, mientras que para el sector Nazaret (11-C) se conoce dicha característica para la totalidad de los elementos del sistema. Sin embargo, como

ocurre en el caso de los diámetros, esta falta de información aumenta en el caso de las acometidas de la red. En la Tabla 25 y la Figura 31 se muestra el número de acometidas con material asignado y sin asignar y su proporción porcentual respectiva según el caso en cuestión.

Tabla 25. Número de acometidas con tipo de material asignado y sin asignar para las redes estudiadas.

Red de abastecimiento	Acometidas con material asignado	Acometidas con material sin asignar
Algemesí	21	5082
Jesús (9-A)	1672	76
Nazaret (11-C)	885	15

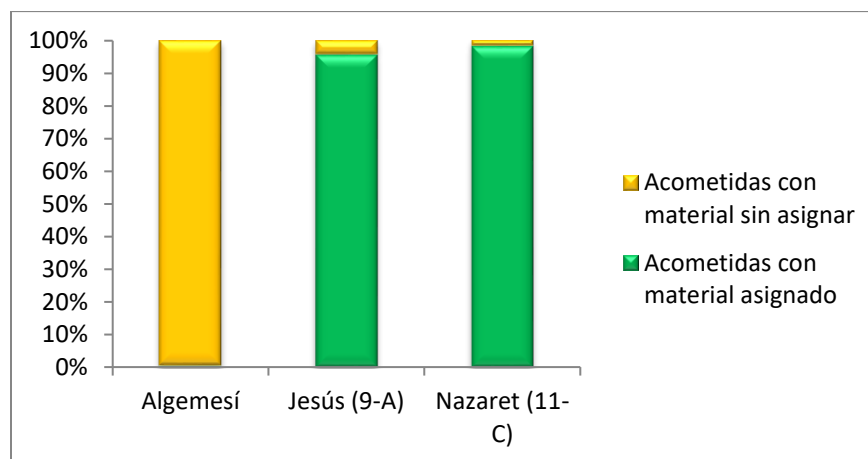


Figura 31. Proporción porcentual de acometidas con tipo de material asignado y sin asignar para las redes estudiadas.

Se puede observar que para el caso de la red de Algemesí prácticamente para el 100% de las acometidas se desconoce el tipo de material, mientras que para los sectores de la red de la ciudad de la Valencia no más de un 5% de las acometidas carece de este atributo. La razón de esta diferencia podría radicar en la magnitud de los abastecimientos estudiados. En el caso de los sectores de Valencia, estos pertenecen a un sistema de distribución bastante grande, en donde generalmente suele existir un mayor control sobre la información con la que se cuenta, mientras que la red de la población de Algemesí, es un sistema modesto en comparación al de la ciudad capital de la Comunidad Valenciana. Es

muy común que en redes pequeñas y aisladas exista una mayor incertidumbre respecto a la información manejada, principalmente debido a las diferencias presupuestarias con las que cuenta cada sistema.

Para solventar la falta de asignación del tipo de material, se han utilizado como referencia los diámetros de las tuberías y acometidas cuyo material es conocido, es decir, se realizó una clasificación según el tipo de material y los diámetros disponibles comercialmente para cada uno de estos dentro de la base de datos de cada sistema. Esta clasificación se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26. Clasificación de los diámetros de las tuberías existentes en las redes estudiadas según el tipo de material.

	Materiales				
	Fibro cemento	Fundición Dúctil	Fundición Gris	Plomo	Polietileno
Diámetros posibles (mm)	-	450	450	-	-
	-	400	400	-	-
	-	350	350	-	-
	-	-	-	-	315
	300	300	300	-	-
	250	250	250	-	250
	200	200	200	-	200
	-	-	-	-	160
	150	150	150	-	-
	125	125	125	-	-
	-	-	-	-	110
	100	100	100	-	-
	-	-	-	-	90
	80	80	80	-	-
	-	-	-	-	75
	-	-	-	-	63
	60	60	60	-	-
	50	-	-	50	50
	-	40	40	40	40
	-	-	-	-	32
	-	-	-	30	-
	-	-	-	25	25
	-	-	-	20	20
-	-	-	15	-	
-	-	-	10	-	

En el caso de tener más de un tipo de material para un mismo diámetro, para las acometidas este se asignó en función del material más repetido para dicho valor y en función de las tuberías adyacentes o cercanas para los elementos de distribución y aducción.

Una vez finalizada la corrección y asignación de materiales para cada uno de los elementos de la red de abastecimiento se procedió a asignar la rugosidad a las tuberías. Este valor viene dado directamente para cada tipo de material, y puede variar según la bibliografía consultada. Cabe destacar que los valores de rugosidades supuestos inicialmente corresponden a tuberías nuevas, sin ningún tipo de uso, por lo que estos deberán de corregirse en función de los años de servicio que tenga el elemento. En la Tabla 27 se presentan las rugosidades consideradas para los casos de estudio.

Tabla 27. Rugosidades para los materiales existentes en las redes de abastecimiento estudiadas.

Material	Rugosidad (mm)
Acero	0.03
Fibro cemento	0.025
Fundición Dúctil	0.06
Fundición Gris	0.25
Hormigón con Camisa de Chapa	0.1
Hormigón sin Camisa de Chapa	0.5
Plomo	0.0015
Polietileno	0.002
PVC	0.007

Con el paso del tiempo la capacidad hidráulica de las tuberías disminuye por diversos factores como pueden ser las deposiciones progresivas de sustancias contenidas en el agua, lo cual lleva a la formación de incrustaciones en las tuberías, cambiando así el diámetro útil que presentan las mismas. La variación de la rugosidad de las tuberías en función de los años de servicio puede calcularse aplicando la fórmula de Genijew:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \alpha * t \quad (2)$$

Donde:

- ε_t = Rugosidad de la tubería después de t años de servicio en mm.
- ε_0 = Rugosidad inicial de la tubería nueva en mm.
- α = Coeficiente que depende de las características de agua. En la Tabla 28 se presentan los diferentes grupos en los que se puede clasificar el agua según Genijew.
- t = Numero de años en servicio de la tubería.

Tabla 28. Coeficientes para la fórmula de Genijew.

Grupo	Descripción	Valor de α
I	Agua con poco contenido mineral que no origina corrosión. Agua con un pequeño contenido de materia orgánica y de solución de hierro.	Entre 0.005 y 0.055. Valor medio 0.025
II	Agua con poco contenido mineral que origina corrosión. Agua que contiene menos de 3 mg/lt de materia orgánica y hierro en solución.	Entre 0.055 y 0.18. Valor medio 0.07
III	Agua que origina fuerte corrosión y con escaso contenido de cloruros y sulfatos (menos de 100 a 150 mg/lt). Agua con un contenido de hierro de más de 3 mg/lt.	Entre 0.18 y 0.40. Valor medio 0.20
IV	Agua que origina corrosión, con un gran contenido de cloruros (más de 500 a 700 mg/lt). Agua impura con una gran cantidad de materia orgánica.	Entre 0.40 y 0.60. Valor medio 0.51
V	Agua con cantidades importantes de carbonatos, pero de dureza pequeña permanente, con residuo denso de 2000 mg/lt.	Entre 0.6 y más de 1

Para el caso de las redes de abastecimiento de la Comunidad Valenciana se ha considerado que el agua de abastecimiento se puede incluir en el Grupo II, ya que esta posee cierto contenido de magnesio y calcio que lleva a la formación de incrustaciones calcáreas en las tuberías y origina corrosión en las mismas.

4.2.4 COTAS DE LOS NUDOS DE LA RED

Para conocer la elevación de los puntos de interés de la red es necesario contar con la altimetría del terreno. Esta información se puede encontrar en capas MDE (Modelo Digital del Elevaciones). Este tipo de capas obtienen sus valores a partir de vuelos LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging), los cuales mediante el uso de escáneres laser aerotransportados abarcan una nube de puntos sobre el terreno, consiguiendo las elevaciones.

Las capas MDE utilizadas han sido obtenidas desde la página web Terrasit (URL://terrasit.gva.es/), perteneciente a La Infraestructura de Datos Espaciales de la Comunidad Valenciana. En la Figura 32 se muestra el MDE de la ciudad de Valencia.

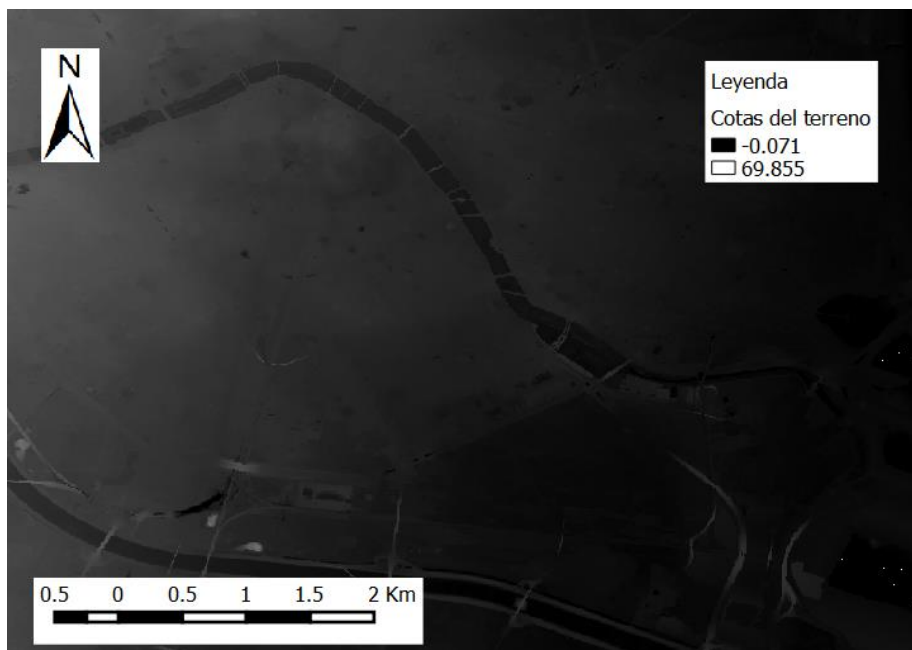


Figura 32. Modelo digital de elevaciones de la ciudad de Valencia.

Es importante que al momento de utilizar la altimetría del terreno se defina correctamente el “Sistema de Referencia y Coordenadas” (SRC) a utilizar en el proyecto, para que de esta manera todas las capas vectoriales y raster se encuentren espacialmente referenciadas de igual forma. El SRC a implementar en este caso será el ETRS89/UTM Zone 30N. Este es el

sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares.

4.2.5 VERIFICACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE LA RED

Finalizada la depuración, corrección y asignación de datos, se ha procedido a la importación y revisión de la topología de las redes mediante el software GISRed 2.0. Este programa tiene como objetivo principal, facilitar el proceso de construcción de modelos de redes de abastecimiento, al permitir la importación de los mismos desde un formato diferente como pueden ser archivos SIG, ficheros CAD, ficheros. inp de EPANET, entre otros. Adicionalmente GisRed 2.0 puede detectar y corregir errores en el trazado de la red, como es el caso de fallos en la conectividad de los elementos.

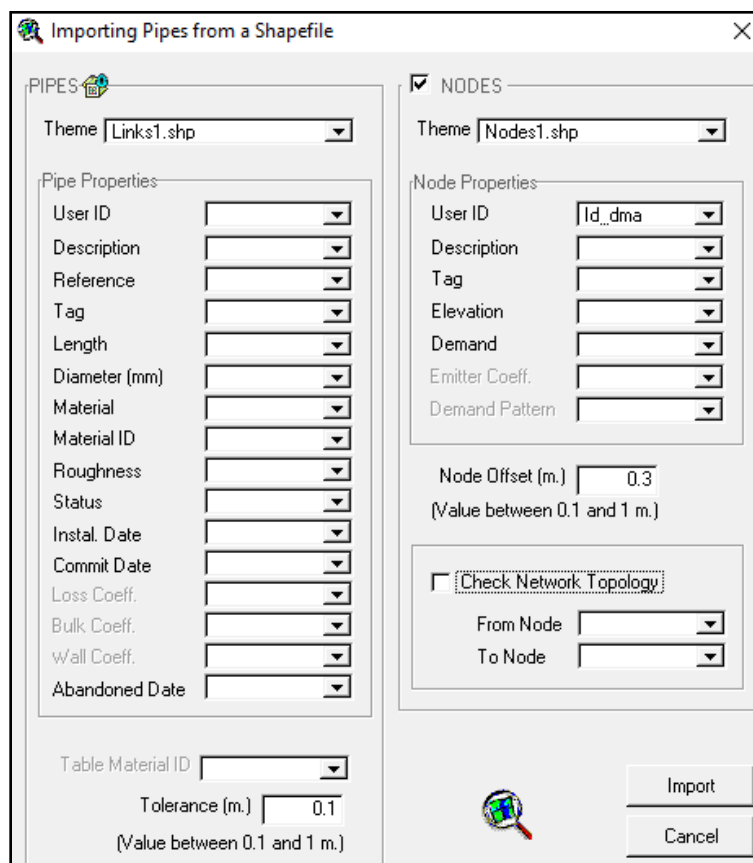


Figura 33. Datos solicitados por GisRed 2.0 para la importación de una red de abastecimiento.

Como se muestra en la Figura 33, para realizar la importación de las tuberías del sistema es necesario introducir para cada tubería: el identificador, la longitud, el diámetro, el material,

la rugosidad, el estado (abierta o cerrada) y la fecha de instalación, entre otros datos. Mientras que para los nodos de la red se requiere: el identificador, la elevación y la demanda de cada uno de ellos. Es por esta razón que se debió preparar debidamente la información de forma previa. Algunos de estos datos como son las fechas de instalación o abandono, simplemente brindan información acerca del sistema y no juegan ningún papel fundamental dentro del funcionamiento del modelo hidráulico, por lo que estos podrían omitirse o introducirse más adelante directamente en el software EPANET 2 (EPA. Cincinnati, OH).

En este caso el software GISRed 2.0 se ha utilizado principalmente para comprobar la conectividad de cada una de las redes analizadas. Al utilizar dicha herramienta el programa busca la existencia de posibles errores dentro del sistema, como pueden ser desfases en intersecciones que a priori no se aprecian gráficamente, ya que estos pueden llegar a ser mínimos. Es importante destacar que algunos de estos problemas de conectividad se generan en GISRed 2.0 al momento de importar los elementos del sistema, ya que este no es capaz de importar elementos con longitudes por debajo de los 10 cm. Para revisar la conectividad del sistema, el programa básicamente contabiliza el número de cuerpos que se encuentran independizados dentro de la red. En la Figura 34 se presenta un ejemplo de los resultados arrojados por el software GISRed 2.0.

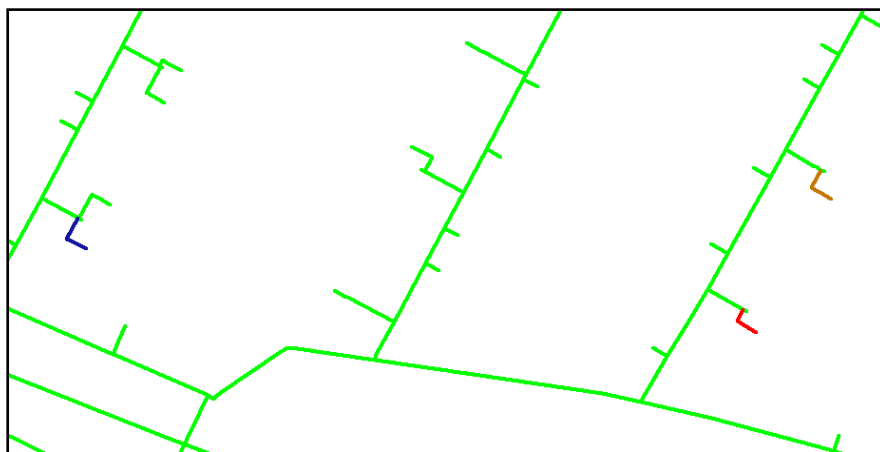


Figura 34. Ejemplo de conectividad en el programa GISRed 2.0.

Claramente se puede observar que en el ejemplo presentado existen tres cuerpos o elementos desconectados de la red principal, los cuales se encuentran resaltados en diferentes colores. Adicionalmente para garantizar que la topología del sistema sea fiel a la red real, se procederá a dibujar las tuberías que no han sido importadas por el programa. Esta medida podría llegar a disminuir el número de errores obtenidos inicialmente.

4.2.6 PATRONES DE CONSUMO

Una vez se haya revisado y corregido minuciosamente la topología de cada una de las redes analizadas, se han importado los modelos al software EPANET 2 (EPA. Cincinnati, EEUU) para estudiar el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento. Inicialmente se han incluido en los modelos los depósitos o embalses según sea el caso en cada uno de los puntos de alimentación existentes. Es importante destacar que cada elemento del sistema debe tener un identificador único, ya que de no cumplirse esta condición se generarán errores al momento de realizar las simulaciones. Adicionalmente en el EPANET 2 (EPA. Cincinnati, OH), se debe introducir un factor de demanda que realice la transformación de unidades, ya que los consumos asignados a los nodos de las acometidas se encuentran en $\text{m}^3 \text{ trimestre}^{-1}$ o $\text{m}^3 \text{ bimestre}^{-1}$ según el caso y las demandas deben encontrarse en l s^{-1} .

Con el fin de obtener resultados más precisos se ha decidido establecer los patrones de consumo anualmente y para cada sector hidráulico por separado, es decir para la red de Algemés se tendrán 16 patrones diferentes, mientras que para los sectores de Valencia se tendrá un patrón para cada red por separado.

Para la determinación de dichos patrones se utilizaron los valores de caudal medidos por la compañía Aguas de Valencia S.A. en cada uno de los sensores dispuestos en las entradas y las salidas de los sectores. Generalmente estos valores se encuentran medidos con una frecuencia de cada 15 minutos, por lo que se tienen 4 mediciones para cada hora del día. Para simplificar la base de datos se obtendrá un promedio horario para los caudales medidos.

En este tipo de mediciones puede presentarse el caso de que existan largos períodos de tiempo sin datos, por lo que inicialmente esta información será depurada y completada para tener un registro horario para cada día del año. Finalizado este proceso los patrones de consumo se incluirán en el modelo hidráulico respectivo para poder realizar las simulaciones necesarias.

4.2.7 BONDAD OFRECIDA POR LOS MODELOS

Una vez finalizados los modelos hidráulicos se determina la raíz del error cuadrático medio (RMSE = Root mean squared error), el cual es un indicador de desviación dimensional que permite comparar la bondad relativa de diferentes modelos. Esta medida maximiza el error al elevar al cuadrado, castigando aquellos pronósticos donde la diferencia fue más alta en comparación a otra. Por lo tanto, se recomienda aplicar esta medida de dispersión del error para desviaciones pequeñas. Este valor se calcula mediante la Ec. (3) presentada a continuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [X_{prom} - X_i]^2}{n}} \quad (3)$$

Para llevar a cabo dicha tarea, se utilizaron los puntos de control existentes en cada una de las redes, es decir, los sensores encargados de medir la presión en puntos claves del sistema como son las entradas y salidas de los sectores.

4.3 ANÁLISIS DEL REGISTRO DE ROTURAS DE LA CIUDAD DE VALENCIA

Inicialmente se ha verificado que la estructura de la base de datos donde se registran las roturas cuenta con la información necesaria para la implementación del modelo de predicción escogido (descrito en el Apartado 4.7), es decir, cada una de las roturas registradas debe tener asociado el diámetro, el tipo de material, la fecha de instalación y fecha de fallo de la tubería donde se produjo el fenómeno.

En este caso particular las roturas se encuentran identificadas tanto por un número de operación como por la dirección del sitio donde ocurrió el fallo. Debido a que este tipo de

información es registrada por diferentes operarios durante la resolución de incidencias, es conveniente verificar que la nomenclatura utilizada sea la misma, ya que se puede dar el caso que una misma dirección se registre de formas diferentes, lo que sesgaría los resultados obtenidos por el modelo.

Adicionalmente se debe comprobar la existencia de registros repetidos y la fecha de instalación de las tuberías siguiendo las siguientes pautas proporcionadas por la compañía Aguas de Valencia S.A.:

- Las tuberías de Fibrocemento no se instalan en las redes de abastecimiento desde el año 2002. Esto debido a la prohibición de la comercialización de productos fabricados con amianto por ser perjudicial para la salud.
- Las tuberías de Polietileno no se empezaron a implementar en la ciudad de Valencia hasta el año 1965. La producción en masa de elementos de este material se inició a principios de la década de los 60.
- Las tuberías de Fundición Dúctil no se empezaron a instalar hasta el año 1960.
- Las tuberías de Fundición Gris dejaron de utilizarse a partir del año 1970. La existencia de nuevas tecnologías para la fabricación de tuberías llevó a la disminución del uso de estos elementos.

Todos aquellos registros de dichos materiales que no cumplan con dichas condiciones se han descartado de la base de datos para obtener resultados más confiables.

4.4 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS INCIDENCIAS REGISTRADAS EN LA RED

4.5 BÚSQUEDA DE VALORES ATÍPICOS

Finalizada la depuración de la información pertinente se procedió a realizar un análisis estadístico de las roturas registradas. Inicialmente, asumiendo que la muestra sigue una distribución normal, mediante el software STATGRAPHICS® Centurion XVI se procede a estudiar la existencia de valores atípicos dentro de la información respectiva. Para llevar a cabo dicha tarea se deben clasificar previamente los datos de forma homogénea

considerando el tipo de material de los activos y el número de fallos que ha presentado cada tubería dentro del periodo estudiado.

El manual de usuario del STATGRAPHICS® Centurion XVI establece que se emplea el test de Grubbs, también llamado test de desviaciones extremas estudentizadas, para determinar si un valor es atípico o no. En general, dicho test se caracteriza por la obtención de un P-valor, el cual cuantifica la probabilidad de obtener un estadístico como inusual o más inusual que el observado en la muestra, en caso de que la hipótesis nula fuese cierta (hipótesis nula: el valor más extremo proviene de una distribución normal al igual que las otras observaciones).

La obtención de un Valor-P menor a 0.05, indica que el valor más extremo es un aberrante significativo, y, por ende, dicho dato debe descartarse de la muestra y se debe realizar de nuevo el análisis para encontrar más variables atípicas. Generalmente, todas las observaciones a más de 3 desviaciones típicas de la media se consideran atípicas, a menos que el tamaño de la muestra “ n ” sea muy grande o la distribución no sea normal.

Al realizar el análisis, el programa presenta de forma tabulada para los 5 valores más pequeños y los 5 valores más grandes existentes en la muestra sus “Valores Estudentizados Sin Supresión” correspondientes. Estos valores miden a cuantas desviaciones estándar de la media muestral se encuentra cada valor. Igualmente, en los resultados se presentan los “Valores Estudentizados Con Supresión”, los cuales indican la misma interpretación, pero ahora sin incluir la observación más extrema dentro del cálculo. Adicionalmente el programa presenta en un gráfico la distribución espacial de los puntos en función del número de fila que ocupa el evento y el número de reparaciones que sufrió cada tubería durante el período de análisis.

En este caso, cuando se tenga un valor atípico dentro de la base de datos, se corregirá el número de reparaciones del valor más extremo, disminuyéndolo en una unidad hasta obtener un P-valor mayor a 0.05 que garantice que no se tiene ningún valor inusual dentro de la muestra.

4.6 ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LOS FACTORES PREDICTIVOS

Por otra parte, empleando de nuevo el STATGRAPHICS® Centurion XVI, se realiza un análisis de la varianza (ANOVA), para determinar cuál es el factor más significativo entre el diámetro, el material y la edad de las tuberías al momento de predecir las tasas de roturas del sistema. El conocimiento de dicha información permite establecer criterios al momento de clasificar o agrupar los datos, además de corroborar que modelo se adapta mejor al caso de estudio.

De igual forma que ocurre en la búsqueda de valores atípicos, al analizar la varianza se obtiene un P-Valor para cada una de las variables predictivas. En este caso, la obtención de un P-Valor menor de 0.05 lleva al rechazo de la hipótesis de igualdad de medias, es decir, se comprueba que la variable en cuestión tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente.

4.7 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE PROBABILIDAD DE ROTURA DE SHAMIR Y HOWARD (1979) AL CASO DE ESTUDIO

A pesar de que existe una gran variedad de enfoques que buscan facilitar la toma de decisiones a la hora de reparar y reemplazar las tuberías de un sistema de abastecimiento, la mayoría de los trabajos de investigación existentes suelen hacer referencia al trabajo presentado por Shamir y Howard (1979), quienes propusieron un modelo analítico para la sustitución de tuberías basándose tanto en el historial de roturas de tuberías, como en el coste de reparación y sustitución asociado.

Tal como plantean Shamir y Howard (1979) en su investigación, la ecuación que describe el crecimiento del número de roturas con el paso del tiempo puede ser desarrollada para una tubería en concreto o para toda una zona de la red de abastecimiento, esto dependerá de cómo se implemente el análisis.

Teniendo en consideración que el registro de datos disponibles para una sola tubería es normalmente muy pequeño, de aplicarse la metodología de forma individual a cada elemento, podría obtenerse una ecuación con validez estadística baja. Por esta razón es

recomendable desarrollar una ecuación de predicción común para un grupo de elementos similares, aunque debe tenerse especial cuidado en considerar factores que puedan garantizar una clasificación homogénea con respecto a las causas de roturas, tales como el tipo de material de las tuberías, las condiciones del suelo y condiciones climáticas, presiones de operación, etc.

En este caso se ha decidido clasificar el registro de roturas según el tipo de material de la tubería donde se produjeron las mismas, ya que este es un factor que garantiza la homogeneidad del agrupamiento. Adicionalmente debido a que el registro de fallos con el que se cuenta no es tan amplio como se desearía, los activos serán agrupados en rangos de edades, para de esta manera poder apreciar de forma más clara la tendencia seguida por la correlación existente entre la edad y la tasa de fallos de los activos.

La ecuación de regresión obtenida por Shamir y Howard para determinar el número de roturas por año, tiene la siguiente forma:

$$N(t) = N(t_0)e^{A(t-t_0)} \quad (1)$$

Donde:

- $N(t)$ es el número de roturas por unidad de longitud esperadas en el año t .
- $N(t_0)$ es el número de roturas por unidad de longitud que se tienen para el año t_0 .
- t_0 es el año base del análisis, es decir el año de instalación de la tubería o el primer año para el que exista información.
- A es el parámetro de regresión o coeficiente de crecimiento, cuyas unidades son años⁻¹.

Inicialmente previo a la realización de la clasificación de las roturas, se debe verificar que todos los elementos presentes en la base de datos, cumplen con las limitantes temporales para cada tipo de material mencionada en el Apartado 4.3. Adicionalmente se acumularon

las roturas de acuerdo a la dirección donde estas se generaron, es decir, se ha determinado el número de fallos/reparaciones que tuvo cada tubería dentro del registro analizado.

Por otro lado, al momento de analizar los resultados se ha tenido en consideración el estudio realizado por Watson et al. (2004), quienes plantean que según la fase en la que se encuentren los activos de la red dentro de la “curva de la bañera” (Figura 35), puede aplicarse uno u otro modelo de predicción de rotura. Esta curva representa el número de fallos en función de la edad de la tubería y puede clasificarse en tres etapas:

- Fallos iniciales: esta etapa se caracteriza por tener una elevada tasa de fallos que desciende rápidamente con el tiempo. Estos fallos pueden deberse a diferentes razones como tuberías defectuosas o mal fabricadas, instalaciones incorrectas dentro del sistema de abastecimiento, etc.
- Fallos normales: esta etapa posee una tasa de fallos menor y relativamente constante. Las roturas de los activos no se producen debido a errores relacionados con la fabricación o la instalación, sino por causas aleatorias externas, como variación de la presión, esfuerzos externos, etc.
- Fallos de desgaste: etapa caracterizada por una tasa de errores rápidamente creciente. Los fallos se producen por el envejecimiento natural de las tuberías y el deterioro de la red de abastecimiento.

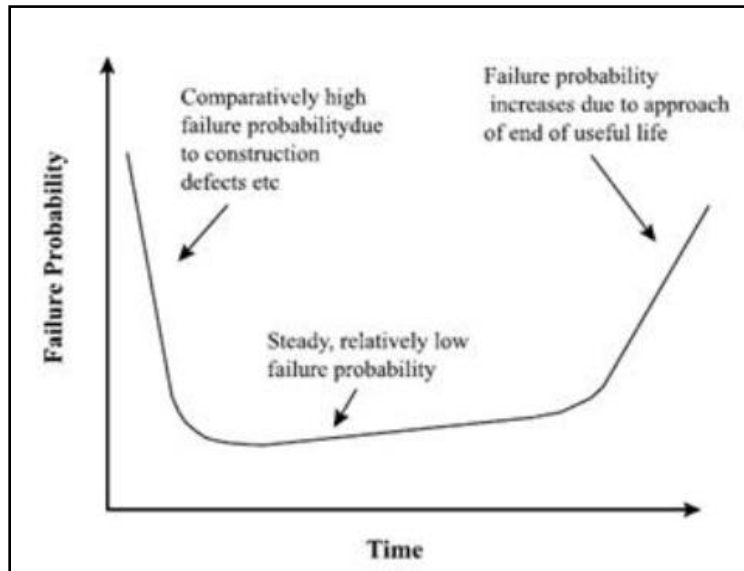


Figura 35. Variación de la probabilidad de fallos respecto al tiempo en una red de distribución de agua potable. (Fuente: Watson et al., 2004).

Tomando en cuenta que el modelo propuesto por Shamir y Howard emplea como variable predictiva la edad de las tuberías, se ha tratado de identificar de forma aproximada la fase de fallos iniciales con la ayuda de la curva de ajuste, la cual representa el comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad. Los datos correspondientes a dicha fase serán descartados, con la finalidad de no considerar roturas causadas por posibles errores en la instalación de las tuberías.

Por último, se ha realizado el análisis de regresión definitivo para cada tipo de material, se graficó la curva exponencial correspondiente y se determinó la ecuación que describe dicha curva.

Para conocer con mayor precisión el nivel de ajuste ofrecido por el modelo implementado, se ha determinado el coeficiente de determinación (R^2) para cada tipo de material. Este parámetro mide la capacidad del modelo para replicar los resultados de manera precisa. Mientras dicho valor se acerque más a 1, mayor será la fiabilidad del modelo.

4.8 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE COSTOS DE LOS ACTIVOS y EL TIEMPO ÓPTIMO DE SUSTITUCIÓN DE LOS MISMOS.

Mediante la metodología propuesta por Shamir y Howard (1979), se puede llegar a determinar el momento óptimo de sustitución/renovación de los activos de la red. A través de su investigación, éstos obtuvieron una función para determinar dicho momento y realizar un análisis económico, considerando los siguientes parámetros:

- 1) Número de roturas pronosticado en la tubería existente, en los próximos años.
- 2) Número de roturas pronosticado para la tubería nueva, en función del tiempo de su instalación.
- 3) Los costes asociados a la reparación de una rotura.
- 4) Los costes de reemplazar la tubería existente por una nueva.
- 5) La tasa de descuento que debe utilizarse en la conversión de los gastos futuros en valor presente.

El estudio económico a realizar se debe llevar a cabo para cada tubería del sistema de forma individual. Para cada elemento analizado se obtiene un gráfico que contiene:

- 1) Una curva que muestra el valor actual de todos costes por futuros reemplazos en función del año de reemplazo Ec. (4). Donde

$$\sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{C_b N(t_0) e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{t-t_p}} \quad (4)$$

- 2) Una curva que muestra el costo de reemplazar la tubería en función del año de sustitución Ec. (5).

$$\frac{C_r}{(1+R)^{t_r-t_p}} \quad (5)$$

- 3) Una curva que representa la suma de las Ec. (4) y la Ec. (5).
- 4) El año óptimo para la sustitución del activo Ec. (6).

$$t_r = t_0 + \frac{1}{A} \ln \left(\frac{\ln(1+R) C_r}{N(t_0) C_b} \right) \quad (6)$$

A continuación, se describe el significado de los valores considerados en las ecuaciones presentadas:

- C_b = Costo de reparar una rotura.
- C_r = Costo de sustituir un kilómetro de tubería.
- t_p = Año presente.
- t_r = Año en que la tubería será sustituida.
- R = Tasa de descuento no inflacionaria.

En este caso, se ha determinado el tiempo óptimo de sustitución para todas las tuberías de aducción y distribución de las redes estudiadas y se calculó el número de elementos que ya han superado este tiempo.

4.9 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE IMPORTANCIA DE LOS ACTIVOS DE LAS REDES ESTUDIADAS.

Para establecer un orden de prioridad o nivel de importancia para las tuberías de los sistemas analizados, se ha empleado el concepto de fiabilidad hidráulica. Tal como establece Alonso (2008), la fiabilidad de una red de abastecimiento se mide mediante el impacto que causa la indisponibilidad de una determinada tubería sobre el funcionamiento hidráulico del sistema. El fallo o rotura de un elemento, lleva a una redistribución de los caudales y una variación de las presiones en diversos puntos de la red.

La forma de determinar la fiabilidad de un sistema varía según la bibliografía consultada. Xu et al. (1999), establece que la fiabilidad de la red viene dada por su capacidad de asegurar con una presión mínima requerida la demanda de los nudos. Por otra parte, Ormsbee y Kessler (1990), definen la redundancia topológica e hidráulica como una medida de la fiabilidad. La redundancia topológica asegura la existencia de un camino alternativo para abastecer los nudos de consumo en caso de producirse una rotura, mientras que la redundancia hidráulica asegura la capacidad de dicho camino de abastecer con una presión adecuada a los usuarios.

En el presente trabajo se ha considerado la magnitud del caudal transportado por cada tubería como un indicador del nivel de fiabilidad que ofrecen las mismas. Mientras mayor sea el caudal que lleve una tubería, mayor será el número de usuarios que se verán afectados por un fallo de la misma.

Para llegar a establecer el nivel de fiabilidad, se han determinado mediante los modelos hidráulicos desarrollados en el software EPANET 2 (EPA. Cincinnati, EEUU), los caudales máximos trasegados por cada tubería durante los picos de consumo presentes en los patrones respectivos. Cabe mencionar que, para este análisis, no se han considerado las acometidas debido a que una posible rotura de éstas solo llegaría a afectar un punto de consumo en particular y no al funcionamiento general de la red.

Con los caudales máximos de cada tubería y el número de roturas anuales predicho que en teoría podría sufrir dicho elemento, se ha realizado un gráfico de dispersión para analizar la tendencia de las muestras y poder establecer grupos o “clusters” que permitan fijar prioridades al momento de ejecutar los planes de rehabilitación y renovación de activos. Para evitar que la escala del gráfico obtenido se distorsione por la existencia de valores muy alejados de la media, se ha asumido para todas aquellas tuberías que presenten un número de roturas anuales mayor a 50, este mismo valor. El mismo criterio será aplicado para aquellos caudales que superen los 100 l s^{-1} .

4.10 VERIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN EL FALLO DE TUBERÍAS MEDIANTE EL USO DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

Con la finalidad de determinar si la variación de presiones en la red ha tenido algún tipo de influencia en la aparición de roturas o fallos en las tuberías, se ha hecho uso tanto de los modelos hidráulicos desarrollados, como del registro de roturas ya depurado.

A pesar de que cada rotura registrada posee asociada una dirección, no se encuentra señalado en el registro el sector donde se produjo dicho fallo. Debido a esto, se debió realizar un análisis cruzado de la información disponible para ubicar geográficamente las

roturas que se han registrado dentro de los 2 sectores de la red de Valencia estudiados, Jesús (9-A) y Nazaret (11-C).

Seguidamente se ordenaron los fallos de cada sector en función a la fecha en que éstas fueron registradas y reparadas, y mediante el modelo hidráulico respectivo se buscaron las presiones máximas y mínimas que se tuvieron en los días previos a la aparición de la incidencia.

Cabe destacar que tal como se mencionó en el Apartado 1.2.4, el tiempo que tarda una rotura en manifestarse puede variar dependiendo de la magnitud que tenga ésta, es decir, el fallo pudo producirse mucho antes de que el mismo fuese detectado y reparado. Por esta razón se han verificado las presiones máximas que se tuvieron en un período de 30 días previos a que se registrase la rotura.

5 RESULTADOS

5.1 PLANTEAMIENTO DE FICHA MODELO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Para el planteamiento de la ficha tipo se han tomado en consideración tanto los modelos probabilísticos como determinísticos encontrados en la revisión bibliográfica, ya que dependiendo del caso en cuestión y de los datos con los que se cuente, puede que se adapten mejor unos u otros al caso real que se está estudiando. En la Tabla 29 se muestra un resumen de los modelos probabilísticos consultados, mientras que en la Tabla 30 se muestran los factores considerados en cada uno de dichos modelos.

Tabla 29. Modelos probabilísticos. Adaptado (Kleiner & Rajani, 2001)

Modelos			
Modelos probabilísticos	Multivariados	Marks et al. (1985)	1
		Marks, Andreou, Jeffrey, Park and Zaslavski (1987)	2
		Bremond (1997)	3
		Constantine, Darroch and Miller (1996)	4
		Lei (1997)	5
		Eisenbeis, Rostum and Le Gt (1999)	6
	Univariados	Deb, Hasit, Grablutz and Herz (1998)	7
		Kulkarni, Golabi and Chuang (1986)	8
		Gustafson and Clancy (1999)	9
		Goulter and Kazemi (1988). Goulter et al. (1993)	10
		Mavin (1996)	11

Tabla 30. Datos considerados por los modelos presentados en la Tabla 29.

Datos considerados											
Longitud de la tubería	1	X	X	X	5	X	X	8	9	10	X
Edad de la instalación	1	X	X	X	5	6	7	8	9	10	X
Historial de roturas	1	2	X	X	X	6	7	X	9	10	X
Diámetro de la tubería	X	2	X	4	5	6	7	8	9	10	11
Material de la tubería	X	X	X	X	5	6	7	8	9	10	11
Vida útil	X	X	X	X	X	X	7	X	X	X	X
Sobrecargas (Tráfico, etc.)	X	2	3	X	X	6	X	X	X	X	11
Porcentaje del suelo utilizado	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Presión de servicio	1	X	3	X	X	X	X	8	X	X	X
Tipo de suelo	1	2	X	4	X	6	X	8	X	X	11
Potencial corrosivo del suelo	1	2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Propiedades del suelo (Acidez, Humedad, etc.)	X	2	X	X	X	6	X	X	X	X	X

Dentro de los modelos probabilísticos tal y como se observa en la Tabla 29 se pueden tener modelos probabilísticos univariados y modelos probabilísticos multivariados. Los modelos de riesgos proporcionales, los modelos dependientes del tiempo y los modelos de vida acelerada son considerados modelos multivariados, mientras que los modelos que utilizan el agrupamiento de datos o filtrado de datos se consideran modelos univariados. Por otro lado en la Tabla 31 y Tabla 32 se puede observar un resumen de los modelos determinísticos existentes y los datos considerados en cada uno de los modelos respectivamente. Los modelos determinísticos abarcan los modelos lineales y exponenciales.

Tabla 31. Modelos determinísticos. Adaptado (Kleiner & Rajani, 2001)

Modelos			
Modelos determinísticos	Exponenciales	Shamir and Howard (1979)	1
		Walski and Pelliccia (1982)	2
		Clark, Stafford and Goodrich (1982)	3
	Lineales	Kettler and Goulter (1984)	4
		McMullen (1982)	5
		Jacobs and Karney (1994)	6

Tabla 32. Datos considerados por los modelos presentados en la Tabla 31.

Datos considerados						
Longitud de la tubería	1	2	X	4	X	6
Edad de la instalación	1	2	3	4	5	6
Historial de reparaciones	1	2	3	4	5	6
Diámetro de la tubería	1	2	3	4	X	6
Material de la tubería	1	2	3	4	X	6
Tipo de rotura	1	2	3	4	X	X
Sobrecargas (Tráfico, etc.)	1	2	X	4	X	X
Método de fabricación de la tubería	X	2	X	X	X	X
Presión de servicio	X	X	3	X	X	X
Potencial corrosivo del suelo	X	X	3	X	X	X
Composición y distribución del suelo en las adyacencias de la tubería	X	X	3	X	X	X
Propiedades del suelo (PH, Potencial redox, Resistencia del suelo en condición saturada)	X	X	X	X	5	X

Actualmente el sistema de base de datos utilizado por Aguas de Valencia S.A. donde se informa sobre las incidencias y su resolución se denomina AVALON. En dicho software se registran todas las tareas llevadas a cabo durante la reparación de fugas y roturas, o de ser el caso, la renovación de activos en la red. Dentro de dichas tareas se encuentran aquellas dedicadas a la obra civil como es la rotura del pavimento o acera, trabajos de excavación y la recomposición de toda estructura original. Adicionalmente se incluyen los trabajos de fontanería realizados, en donde se encuentran los datos de interés que se desea registrar siendo esta la zona de la ficha en donde se hará énfasis. En la Figura 36 y Figura 37 se muestran algunos de los datos solicitados en AVALON de acuerdo al caso en cuestión.

Reparación de fuga de tubería (datos tubería averiada)				Acometidas (datos acometida averiada)				
Reparación tubería		Sustitución válvula		Reparación		Montaje nueva		
Corte	Material	Ø(mm)	Ud	Ø(mm)	Ud	Material	Ø (mm)	Ud
Reparación prensa válvula en arqueta				0 u.				
Reparación prensa válvula en cala				0 u.				
				Sustitución de válvula 0 u.				
				Anulación acometida 0 u.				

Figura 36. Extracto de la ficha de AVALON utilizada durante la reparación de roturas.

Montaje de tubería nueva				Montaje de piezas y accesorios en tubería								
Tubería nueva		Empalme recto		Empalme en T		Válvulas		Piezas		Hidrantes		
Tipo tubería	Longitud	Ø(mm)	Ø(mm)	Ud	Ø(mm)	Ud	Ø(mm)	Ud	Ø(mm)	Ud	Ø(mm)	Ud

Figura 37. Extracto de la ficha de AVALON utilizada durante la sustitución de tuberías o tramos de tuberías.

Al realizar un análisis de los datos solicitados por AVALON se observa que se podrían considerar muchos más factores que se encuentran abarcados en los modelos mencionados en la Tabla 29 y la Tabla 31, todo esto sin complicar de manera significativa la recolección de datos durante la resolución de incidencias.

Observando con mayor detenimiento los datos considerados por algunos de los modelos, se puede decir que varios de estos son datos principales, ya que se encuentran en la mayor parte de los modelos planteados y a pesar de que algunos datos no son medidos en campo, como son la edad de la instalación, el historial de roturas, la presión de servicio de la tubería, etc., estos pueden ser extraídos de las bases de datos gestionadas por la empresa o de los sistemas de telegestión empleados en la red de abastecimiento. Otros factores que se encuentran en algunos de los modelos como son el potencial corrosivo, la distribución de las capas del suelo y algunas de sus propiedades como son la acidez, potencial redox, etc., pueden descartarse ya que solo se consideran en un par de modelos y adicionalmente para su obtención se requiere de la toma de muestras y ensayos en laboratorio.

Otras propiedades del suelo como son las condiciones de humedad y el tipo de suelo generalmente pueden ser estimadas de forma aproximada mediante inspección visual, por lo que en la ficha sería conveniente incluir fotografías en donde se observe tanto la zona en donde se encuentre la fuga o rotura como las adyacencias para corroborar tanto el tipo de fallo a reparar, como las condiciones del suelo que se encuentra alrededor de la tubería.

En cuanto a aquellas características de la tubería ya abarcadas en la ficha de AVALON como son el material de la tubería, su diámetro y su longitud, se considerarán adicionalmente otras características mencionadas por la mayoría de los modelos mostrados anteriormente tal como el calibre y el timbrado para conocer la presión que resiste la tubería en cuestión. El conocimiento de este último factor junto con la presión de servicio de la tubería es de suma importancia, ya que estudios como el llevado por Rezaei, Ryan y Stoianov (2015), han demostrado que las variaciones de presiones a las que se encuentran sometidas las tuberías y la frecuencia con que se dan estas variaciones a lo largo del tiempo influyen de forma directa en las roturas y fugas que se dan en las redes de abastecimiento.

Por último, otro factor considerado por gran parte de los modelos es el nivel de tráfico o las sobrecargas a las que se encuentra sometido el pavimento o la estructura que se encuentra sobre el emplazamiento de la tubería. El nivel de tráfico es un dato fácil de tomar si se consideran tres opciones: alto, medio y bajo.

Adicionalmente dentro de este análisis se han considerado las directrices establecidas por la norma ISO/FDIS 24516, que trata las “Pautas para la gestión de activos en sistemas de agua potable y aguas residuales”. En este caso particular solo se tomó en cuenta la primera parte de dicha norma que trata específicamente las “Redes de distribución de agua potable”. Dentro del documento en cuestión se establece que con la finalidad de realizar una evaluación de las condiciones y el desempeño de las redes de abastecimiento y sus componentes se debe llevar a cabo una investigación de las mismas, siendo este el primer paso en el proceso de gestión integral de las redes de agua potable tal y como se muestra en la Figura 38.



Figura 38. Proceso de gestión integrada de redes de abastecimiento de agua potable.

Para llevar a cabo satisfactoriamente este proceso de investigación es indispensable la recolección de datos, lo cual lleva un costo asociado. Por esto mismo se debe decidir qué datos son importantes para que sean adquiridos de forma pronta y oportuna durante la resolución de incidencias tal y como se ha mencionado con anterioridad. En aquellos casos en donde la información sea insuficiente, se debe actualizar inicialmente el inventario en aquellas zonas donde sea necesario y el resto de la información se recolectará cuando se lleven a cabo investigaciones ya sean de índole hidráulica, ambiental o estructural.

En la Tabla 33 se muestran los datos a considerar en el inventario de los activos del sistema de acuerdo a la norma ISO/FDIS 24516, los cuales pueden llegar a proveer información técnica esencial acerca de la red de distribución y sus componentes.

Tabla 33. Datos del inventario de la red de abastecimiento. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).

Datos de Inventario	Objetos		
	Tuberías	Válvulas/Equipos de control y medición	Acometidas
Ubicación (ID del elemento, coordenadas, direcciones, etc.)	X	X	X
Tipo de tubería (Troncales, principales, locales, acometidas, etc.)	X	?	X
Tipo de Componente (Junta, válvula de compuerta, válvula de mariposa, hidrante, etc.)	-	X	-
Material	X	X	X
Fabricante	O	X	O
Longitud	X	-	X
Diámetro nominal y/o diámetro interno o externo	X	X	X
Año de instalación	X	X	X
Año de desmantelamiento	X	O	X
Año de rehabilitación	X	O	X
Tipo de rehabilitación	X	O	X
Año de calibración	-	X	-
Presión de servicio	X	O	O
Timbrado	X	O	O
Tipo de conexión	X	X	O
Otros datos (espesor de la tubería, tipo de junta, calidad del agua, tipo de revestimiento, etc.)	O	O	O
X Obligatorio O Opcional ? No Aplica			

Adicionalmente la norma ISO/FDIS 24516 establece el mínimo de datos que debería de recolectarse cuando se produce la rotura de un elemento de la red de agua potable (Tabla 34). Esta información se relaciona directamente con los datos que se tienen del inventario, mencionados anteriormente.

Tabla 34. Datos a recolectar durante la reparación de roturas. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).

Datos de Roturas
Fecha de la recolección de datos
Fecha de la rotura (Si se conoce)
Ubicación
Punto de rotura
Tipo de rotura
Causa de la rotura (vejez, daño por otra estructura, etc.)
Tipo de solución (reparación, renovación, sustitución)
Costes de la eliminación de la rotura
Consecuencias causadas por la rotura (Colapso de la vía, filtraciones, número de abonados sin servicio, etc.)

Como ya se ha mencionado anteriormente, el diagnóstico de roturas debe ser llevado a cabo por personal bien entrenado en dicho campo, para así garantizar tanto la calidad de los datos recolectados, como la calidad del trabajo de reparación.

Por otra parte, la norma establece que durante la reparación de las roturas se debería obtener información adicional que permita determinar el estado general en que se encuentra la red y crear prioridades en las medidas de rehabilitación. En la Tabla 35 se muestran los datos que se deberían recolectar, siempre y cuando se adecuen al caso particular que se esté tratando y sean datos fáciles de distinguir y recolectar.

Tabla 35. Datos a recolectar para conocer el estado general de la red de abastecimiento. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).

Datos del Estado General de la Red
Fecha de la recolección de datos
Ubicación de la investigación (ID del elemento, coordenadas, direcciones, etc.)
Identificación e información relevante (Material, diámetro, revestimiento de la tubería, etc.)
Apoyo de los elementos de la red
Profundidad de los elementos de la red
Construcciones o edificaciones supra yacentes
Adhesión del recubrimiento de la tubería
Fallo del recubrimiento de la tubería
Datos de sistemas de protección catódica
Elasticidad del recubrimiento de la tubería
Forma de la corrosión externa

Datos del Estado General de la Red
Profundidad de la corrosión externa
Condición de la red (Deformaciones, etc.)
Depósitos internos
Datos contextuales
Fluctuación de la presión de servicio (Valores máximos y mínimos)
Temperatura ambiental
Precisión de elementos de control y medición

En cuanto a los datos contextuales referidos en la Tabla 35, estos proporcionan información técnica acerca de las inmediaciones de los activos de la red de distribución de agua potable. En la Tabla 36 se puede observar la información contextual a considerar de acuerdo a la norma ISO/FDIS 24516.

Tabla 36. Datos de las inmediaciones de los activos de la red. (Fuente: Norma ISO/FDIS 24516, 2017).

Datos Contextuales	Objetos		
	Tuberías	Válvulas/Equipos de control y medición	Acometidas
Fecha de la recolección de datos	X	X	X
Ubicación (ID del elemento, coordenadas, direcciones, etc.)	X	X	X
Tipo de suelo	X	X	X
Condición del suelo	O	O	O
Estructuras o elementos en las inmediaciones que puedan ser afectadas por los activos o puedan dañar a los mismos	X	X	X
Distancia a sitios de construcción	X	X	–
Distancia a vías de largo recorrido (Autopistas, vías de tren)	X	X	–
Nivel de tráfico	X	O	O
Ancho de protección	X	–	–
Ancho de trabajo	X	–	–
Uso de la superficie	X	O	O
Movimientos de tierra/actividades mineras	X	O	X
Taludes	X	O	O
Estructura del usuario	X	X	O
X Obligatorio O Opcional – No Aplica			

Finalmente basándose en el análisis y la investigación realizada, y considerando cada una de las fuentes consultadas, en la Tabla 37 se presenta un resumen de aquellos datos que pueden ser recolectados de forma rápida y sencilla durante la resolución de incidencias y que pueden ser de gran ayuda cuando se realicen más adelante estudios de probabilidad de rotura, modelos de predicción de fallos o estudios de otra índole dentro de la Comunidad Valenciana.

Tabla 37. Datos a incluir en la ficha modelo.

Datos a incluir en la ficha modelo por Aguas de Valencia S.A.	
Tubería o Componente	Fecha de la resolución de la incidencia
	Ubicación (ID del elemento, coordenadas, direcciones, etc.)
	Tipo de elemento donde se produjo la rotura (Junta, válvula, tubería, conexión, etc.)
	Tipo de tubería (Troncal, principal, local, acometida, etc.)
	Emplazamiento
	Material
	Diámetro
	Longitud
	Calibre
	Timbrado
	Presión de servicio
	Observaciones acerca del estado del elemento (corrosión, deformaciones, etc.)
	Profundidad del elemento
	Edad del elemento
	Historial de roturas
	Tipo de rotura (Puntual, Longitudinal o Transversal)
	Causa de la rotura (fortuita, vejez, daño por otra estructura, etc.)
	Consecuencias causadas por la rotura (Colapso de la vía, filtraciones, número de abonados sin servicio, etc.)
	Tipo de solución (reparación, renovación, sustitución)
	Fotografías
Adyacencias	Nivel de tráfico (Alto, Medio o Bajo)
	Tipo del Suelo (Arenoso, Arcilloso, etc.)
	Estado del suelo
	Uso de la Superficie
	Estructuras o elementos en las inmediaciones que puedan ser afectados por los activos o puedan dañar a los mismos
	Actividades o condiciones especiales cercanas (vías de tren, actividades mineras, movimientos de tierra, sitios de construcción, etc.)
	Fotografías

Adicionalmente a la resolución de incidencias, se pueden aprovechar otras actividades para llevar a cabo la recolección de datos, como son excavaciones, control activo de fugas o incluso la construcción de obras ejecutadas por terceras partes. Por último, cabe destacar que los datos almacenados deben ser revisados y actualizados de manera periódica para garantizar que la calidad de la base de datos se mantenga con el tiempo.

5.2 ANÁLISIS DEL REGISTRO DE ROTURAS

Inicialmente el registro de fallos proporcionado por la compañía Aguas de Valencia S.A. consta de 815 roturas en un período de dos años, específicamente el período comprendido entre enero del año 2015 y agosto del año 2016. Dichos fallos se han presentado a lo largo y ancho del sistema de abastecimiento de la ciudad de Valencia, es decir, estos no corresponden a algún sector en específico. En la Tabla 38 y Figura 39 se muestra la distribución de dicho registro de acuerdo al tipo de material de las tuberías. Para poder llevar a cabo una comparación uniforme y adecuada, se determinó el número de roturas por unidad de longitud para cada tipo de material respectivamente.

Tabla 38. Roturas registradas en la red de la ciudad de Valencia según el tipo de material.

Material	Número de roturas	Porcentaje (%)	Longitud de red (Km)	Roturas por Km
Fibrocemento	222	27.24	352.27	0.63
Fundición Dúctil	37	4.54	250.40	0.15
Fundición Gris	205	25.15	192.61	1.06
Polietileno	351	43.07	299.99	1.17
Total	815	100.00	1095.27	0.74

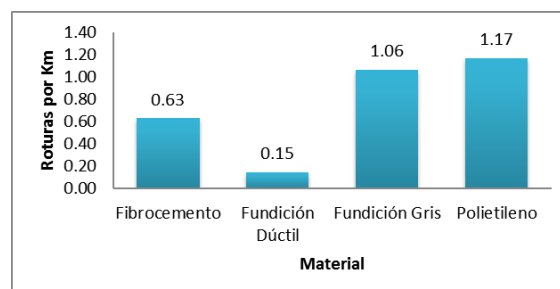


Figura 39. Roturas por kilómetro para cada tipo de material.

Se puede observar que para este caso las tuberías de Polietileno son las más propensas a sufrir roturas, mientras que las tuberías de fundición dúctil son las más fiables, existiendo un amplio margen entre ambas. Este dato debe tenerse en consideración al momento de establecer una jerarquía en la inspección y sustitución de tuberías.

Por otro lado en la Tabla 39 se presenta la distribución temporal de las roturas registradas mientras que en la Figura 40 se muestra la variación de dicha distribución gráficamente.

Tabla 39. Distribución temporal de los fallos registrados en la red de Valencia.

Año	Mes	Número de roturas
2015	Enero	34
	Febrero	29
	Marzo	27
	Abril	28
	Mayo	42
	Junio	49
	Julio	54
	Agosto	45
	Septiembre	27
	Octubre	43
	Noviembre	32
	Diciembre	15
2016	Enero	61
	Febrero	29
	Marzo	26
	Abril	39
	Mayo	34
	Junio	50
	Julio	99
	Agosto	52

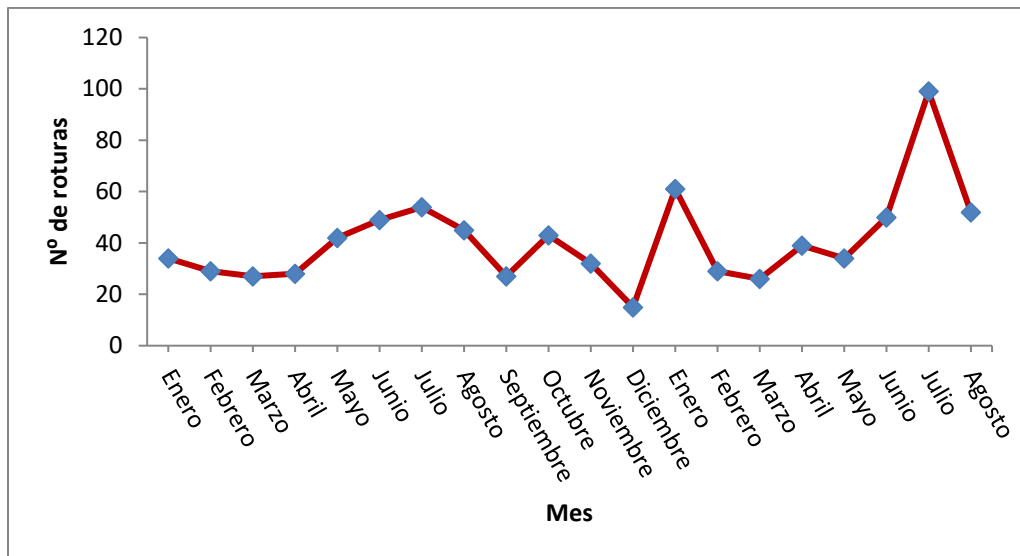


Figura 40. Variación temporal del número de roturas en la red de Valencia.

Se puede observar que durante los meses de Julio se presentan picos de roturas. Esto puede deberse a las variaciones estacionales tal como se mencionó anteriormente. Al existir un cambio de temperaturas frías del invierno a temperaturas calientes del verano, se generan asentamientos diferenciales en el suelo, que llevan a la alteración del entorno de las tuberías y producen esfuerzos de flexión o compresión sobre las mismas. La combinación de condiciones climáticas extremas y la existencia de tuberías muy antiguas en la red, son los causantes de la mayoría de las roturas de agua principal de esta época del año. Por otra parte, se observa un pico de roturas en el mes de enero del año 2016.

Adicionalmente, se realizó una clasificación de las tuberías de acuerdo a su diámetro, y considerando los kilómetros de red existentes correspondientes a cada rango establecido, se calcularon de nuevo las fugas por unidad de longitud para poder llevar a cabo las comparaciones pertinentes. En la Tabla 40 se muestran los valores obtenidos, mientras que en la Figura 41 se presenta gráficamente la correlación existente entre los parámetros considerados.

Tabla 40. Roturas registradas en la red de la ciudad de Valencia según el diámetro de la tubería.

Diámetro (mm)	Número de roturas	Porcentaje (%)	Longitud de red (Km)	Roturas por Km
0-50	119	14.60	34.71	3.43
50-100	440	53.99	458.91	0.96
100-150	181	22.21	285.27	0.63
150-200	51	6.26	193.28	0.26
200-250	8	0.98	42.89	0.19
250-300	4	0.49	34.54	0.12
300-350	5	0.61	18.66	0.27
350-400	7	0.86	27.01	0.26
Total	815	100.00	1095.27	0.74

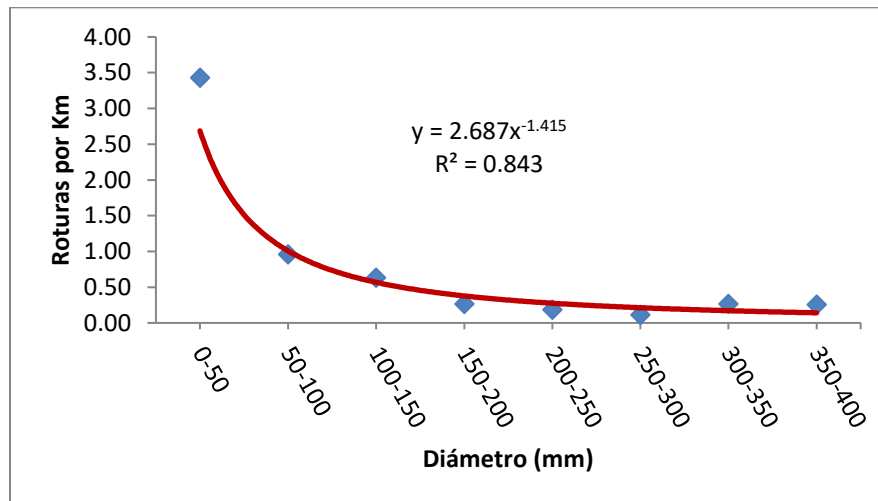


Figura 41. Relación entre las Fugas por kilómetro y el diámetro de las tuberías.

Claramente se puede observar que mientras menor es el diámetro de la tubería mayor es la tasa de roturas por kilómetro de red. Debido a esto las tareas de inspección y mantenimiento deberían ser prioritarias en aquellas zonas de la red compuestas por tuberías de diámetros pequeños. La tendencia que siguen los puntos en este caso particular puede describirse de forma bastante aproximada mediante una función potencial.

5.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS INCIDENCIAS REGISTRADAS EN LA RED

Después de depurar la información, se realizó la clasificación de las roturas según el tipo de material y el número de fallos que presentó cada tubería. En la Tabla 41 se muestra de

forma resumida el número de elementos que han sufrido un número determinado de roturas.

Tabla 41. Clasificación según el número de roturas que han sufrido las tuberías incluidas en el registro de fallos.

Material	Número de tuberías	Número de roturas
Fibrocemento	176	1
	12	2
	2	3
Fundición Dúctil	32	1
	1	2
Fundición Gris	152	1
	16	2
	3	3
Polietileno	191	1
	25	2
	7	3
	1	4
	5	5
	2	6
	1	7
	2	10
Total	628	763

Tal como se puede observar existen tuberías de la red que tan solo en un periodo de dos años tuvieron entre 3 y 10 reparaciones. Claramente aquellos elementos con un número de roturas tan elevado, no siguen una tendencia normal. Probablemente estos fenómenos se deban a malos trabajos de instalación, a reparaciones defectuosas o a afecciones causadas a la red durante las labores de reparación.

5.3.1 BÚSQUEDA DE VALORES ATÍPICOS

En la Tabla 42, se presentan de forma resumida los resultados obtenidos luego de eliminar los valores atípicos existentes en la muestra.

Tabla 42. Resultados obtenidos al eliminar los valores atípicos existentes en la muestra.

Material	P-Valor	Número de fallos descartados	Número de tuberías	Número de roturas
Fibro cemento	0.054	2	176	1
			14	2
Fundición Dúctil	Todos los valores son iguales	1	33	1
Fundición Gris	0.748	3	152	1
			19	2
Poli etileno	0.060	24	191	1
			25	2
			7	3
			11	4
Total		30	628	733

5.3.2 ANÁLISIS DE LA VARIANZA

Una vez se clasificó el registro de fugas en función del tipo de material, diámetro y edad, se llevó a cabo el análisis de la varianza de la muestra en el software STATGRAPHICS® Centurion XVI, consiguiéndose los resultados mostrados en el Tabla 43.

Tabla 43. Análisis de la varianza para el registro de roturas de la ciudad de Valencia.

Análisis de Varianza para Fugas por Km y año – Suma de Cuadrados Tipo III					
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Material	1778.83	3	592.944	5.45	0.0036
B: Diámetro	549.201	4	137.3	1.26	0.3041
C: Edad	1551.87	11	141.079	1.30	0.2684
RESIDUOS	3700.1	34	108.827		
TOTAL (CORREGIDO)	6734.9	52			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Tal como se observa, el análisis ha comprobado que el tipo de material de las tuberías tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el número de roturas por Km y año, al obtenerse un Valor-P (resaltado en rojo en la Tabla 43) menor a 0.05 para dicha variable. Adicionalmente se puede resaltar que, la siguiente variable que más se acerca a ser

significativa sobre la tasa de fallos, es la edad de las tuberías, por lo que la decisión de agrupar la muestra en base a estos factores se considera correcta.

5.4 PREDICCIÓN DE ROTURAS MEDIANTE EL MODELO DE SHAMIR Y HOWARD

5.4.1 FIBROCEMENTO

En la Tabla 44 y la Figura 42 se presentan, respectivamente, el número de roturas por Km y año y la curva que describe el comportamiento observado para las roturas en tuberías de Fibrocemento.

Tabla 44. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Fibrocemento.

Edad (años)	Año 2015		Año 2016		Nº roturas por Km y año
	Número de roturas	Longitud de red (Km)	Número de roturas	Longitud de red (Km)	
15-20	1	13.40	5	9.20	0.62
20-25	6	38.14	12	37.17	0.48
25-30	11	38.14	12	27.24	0.73
30-35	11	35.96	5	27.65	0.49
35-40	9	55.94	11	57.38	0.35
40-45	25	89.31	14	84.33	0.45
45-50	35	89.04	41	104.30	0.79
50-55	0	3.56	3	3.16	0.95
55-60	1	0.68	2	1.21	3.11

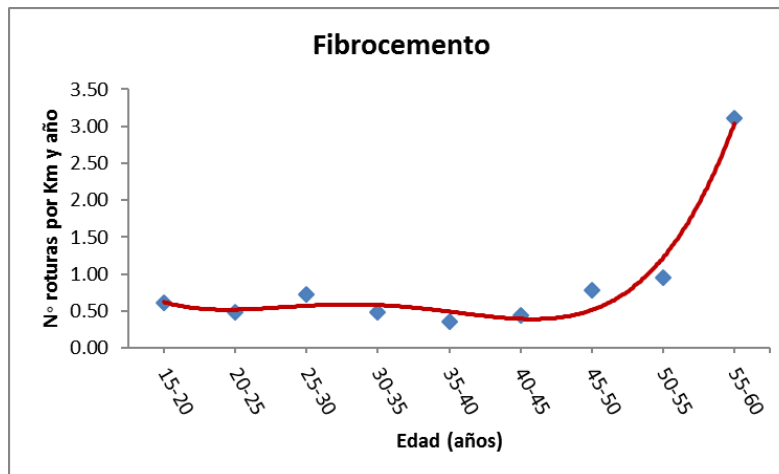


Figura 42. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Fibrocemento.

Claramente se puede observar que el gráfico presentado en la Figura 42 sigue la tendencia de la “curva de la bañera” a partir de la etapa de fallos normales. Esto es lógico, ya que los registros más recientes con los que se cuenta, tienen una edad entre 15 y 20 años, por lo que la etapa de fallos iniciales no se contempla en dicho gráfico. Según esto, se podría asumir que en el caso del Fibrocemento los fallos por el envejecimiento natural de las tuberías comienzan a darse después de los 50 años de edad. Considerando los mismos registros y aplicando una regresión exponencial tal como lo plantean Shamir y Howard se obtienen la curva y ecuación mostradas en la Figura 43.

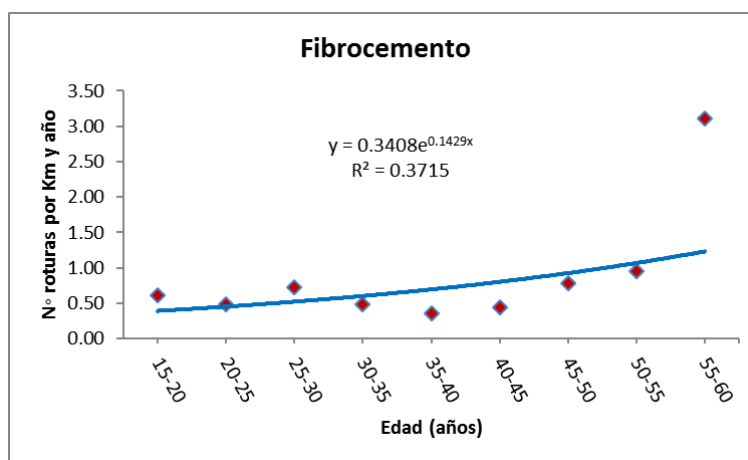


Figura 43. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Fibrocemento.

En este caso, para las tuberías de Fibrocemento, el ajuste de la curva exponencial posee un valor R^2 de 0.3715 distribución espacial de los puntos. Se puede observar, que la tasa de roturas para las tuberías de mayor edad, es la que no permite que la curva tenga un mejor ajuste a la distribución de lo puntos. Tal como se comentó en el Apartado 4.7, la etapa de fallos por desgaste suele presentar tasas de rotura elevadas, por este motivo el punto que representa a las tuberías más antiguas no se encuentra cercano a la curva de ajuste.

5.4.2 FUNDICIÓN DÚCTIL

De igual forma que en el caso anterior, en la Tabla 45 y la Figura 44 se muestran el número de roturas por Km y año y la curva que describe el comportamiento observado para las tuberías de Fundición Dúctil en el sistema de distribución estudiado.

Tabla 45. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Fundición Dúctil.

Edad (años)	Año 2015		Año 2016		Nº roturas por Km y año
	Número de roturas	Longitud de red (Km)	Número de roturas	Longitud de red (Km)	
0-5	4	41.65	0	38.49	0.096
5-10	0	49.99	0	38.22	-
10-15	0	28.03	0	41.92	-
15-20	0	36.65	1	33.89	0.030
20-25	0	15.58	1	19.57	0.051
25-30	1	18.63	0	18.08	0.054
30-35	0	10.29	0	9.01	-
35-40	3	19.92	4	18.83	0.363
40-45	6	22.85	3	22.71	0.395
45-50	4	5.00	6	9.67	1.421

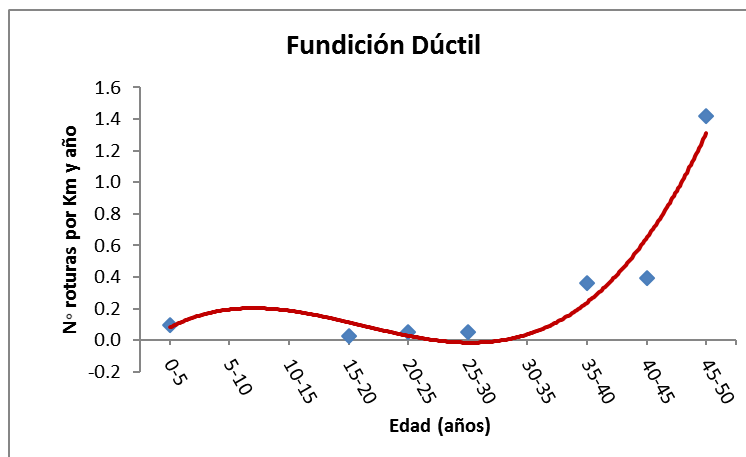


Figura 44. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Fundición Dúctil.

De forma notoria, se puede observar que para las tuberías de Fundición Dúctil se cumple de nuevo la tendencia descrita por la “curva de la bañera” a partir de la etapa de fallos normales. Las técnicas de fabricación e instalación que poseen los elementos de Fundición Dúctil permiten disminuir prácticamente en su totalidad la existencia de fallos iniciales. Adicionalmente cabe destacar que este tipo de material tiene mayores esfuerzos admisibles. Por esto, tomando en consideración todos los registros aplicando de nuevo una regresión exponencial, se obtienen la curva y ecuación mostradas en la Figura 45.

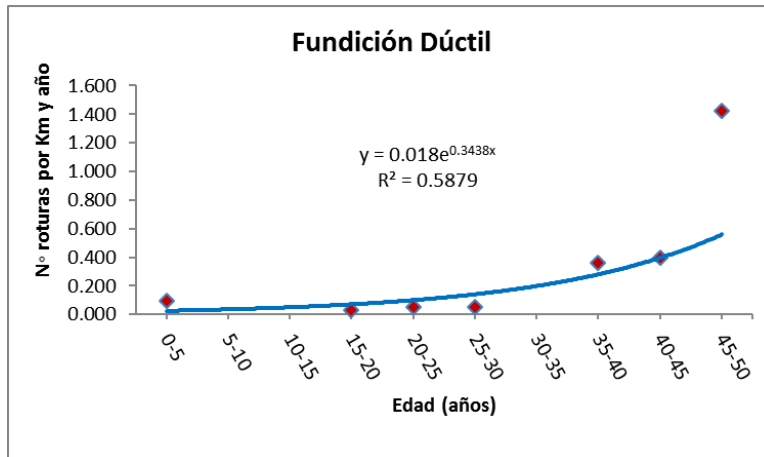


Figura 45. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Fundición Dúctil.

Para el análisis aplicado a las tuberías de Función Dúctil, el ajuste de la curva exponencial a la muestra tiene un valor R^2 de 0.5879. Este modelo será capaz de predecir de forma más precisa la tasa de fallos que el modelo obtenido para las tuberías de Fibrocemento, aunque en este caso se repite la misma condición en donde los registros para las tuberías más antiguas, se encuentran más alejados de la función de ajuste.

5.4.3 FUNDICIÓN GRIS

Seguidamente en la Tabla 46 y la Figura 46 se presentan tanto el número de roturas por Km y año, como la curva que describe el comportamiento observado para las tuberías de Fundición Gris de forma respectiva.

Tabla 46. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Fundición Gris.

Edad (años)	Año 2015		Año 2016		Nº roturas por Km y año
	Número de roturas	Longitud de red (Km)	Número de roturas	Longitud de red (Km)	
45-50	26	44.45	4	33.35	0.705
50-55	38	52.10	19	56.19	1.068
55-60	24	36.22	15	40.14	1.036
60-65	5	8.19	2	13.21	0.762
65-70	7	11.87	1	11.31	0.678
70-75	2	3.58	2	4.14	1.042
75-80	0	1.13	0	1.32	-
80-85	12	21.58	6	20.31	0.852

Edad (años)	Año 2015		Año 2016		Nº roturas por Km y año
	Número de roturas	Longitud de red (Km)	Número de roturas	Longitud de red (Km)	
85-90	5	6.81	2	7.71	0.993
90-95	0	1.01	2	1.41	1.418
95-100	0	0.20	0	0.18	-
100-115	14	3.19	4	3.34	5.586

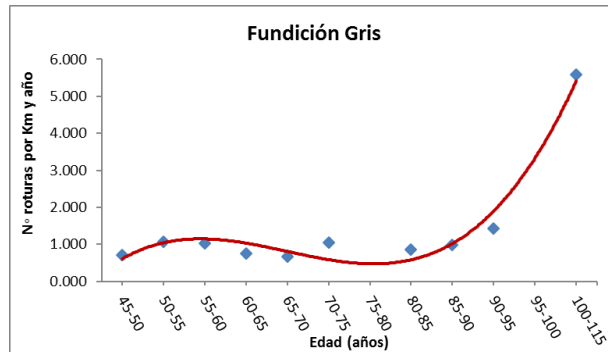


Figura 46. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Fundición Gris.

En este caso, al analizar el gráfico presentado en la Figura 46 se puede observar que, para los elementos de Fundición Gris en el sistema, la etapa de fallos normales tiene una duración aproximada de 40 años. A partir de los 85 años de edad, estas tuberías comienzan a degradarse y aumenta considerablemente el número de fallos que se presentan en las mismas. En la Figura 47 se presenta la regresión exponencial y la función que describe la curva obtenida para los datos mencionados.

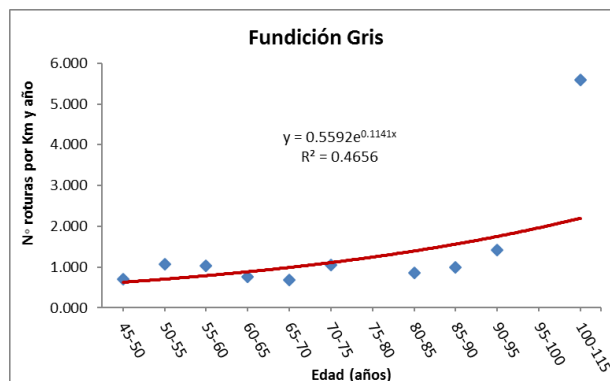


Figura 47. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Fundición Gris.

Se puede observar que para la Fundición Gris ocurre lo mismo que en los casos anteriores, en donde el valor del R^2 se ve afectado por los fallos registrados en las tuberías de mayor edad. A pesar de esto, la curva obtenida sigue la tendencia descrita por el resto de los puntos que componen la muestra.

5.4.4 POLIETILENO

Por último, en la Tabla 47 y la Figura 48 se muestra el número de roturas por kilómetro y año y la curva que describe el comportamiento observado en los registros para tuberías de Polietileno dentro de la red de abastecimiento de la ciudad de Valencia.

Tabla 47. Número de roturas por Km y año según la edad en tuberías de Polietileno.

Edad (años)	Año 2015		Año 2016		Nº roturas por Km y año
	Número de roturas	Longitud de red (Km)	Número de roturas	Longitud de red (Km)	
0-5	9	29.22	7	20.95	0.642
5-10	3	82.05	5	80.27	0.099
10-15	17	94.83	22	96.12	0.408
15-20	8	57.07	17	63.75	0.407
20-25	5	8.73	14	11.31	1.810
25-30	2	11.17	7	5.05	1.564
30-35	3	2.91	7	9.15	1.795
35-40	0	6.75	0	5.61	
40-45	30	3.89	34	4.70	14.937
45-50	34	2.45	35	3.07	25.275

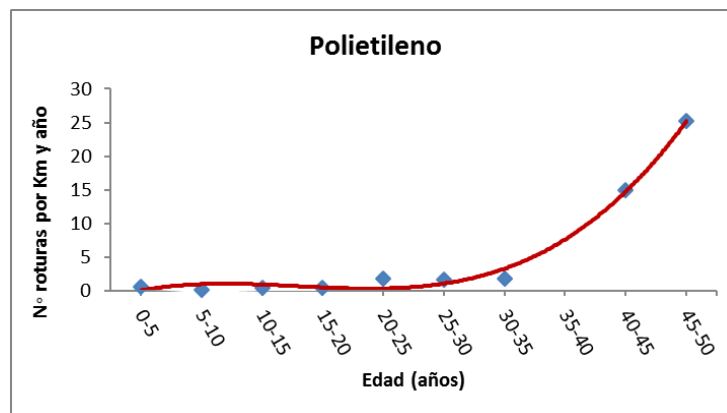


Figura 48. Comportamiento de la tasa de fallos en función de la edad en tuberías de Polietileno.

Al estudiar la curva obtenida en la Figura 48 se puede observar que para las tuberías de Polietileno del sistema se diferencian perfectamente las últimas dos zonas de la “curva de la bañera”, teniéndose un inicio de fallos por desgaste a partir de los 35 años de edad aproximadamente. Cabe destacar que las tuberías de Polietileno parecen entrar en una etapa de fallos por desgaste a edades relativamente tempranas. En la Figura 49 se presenta la regresión exponencial correspondiente.

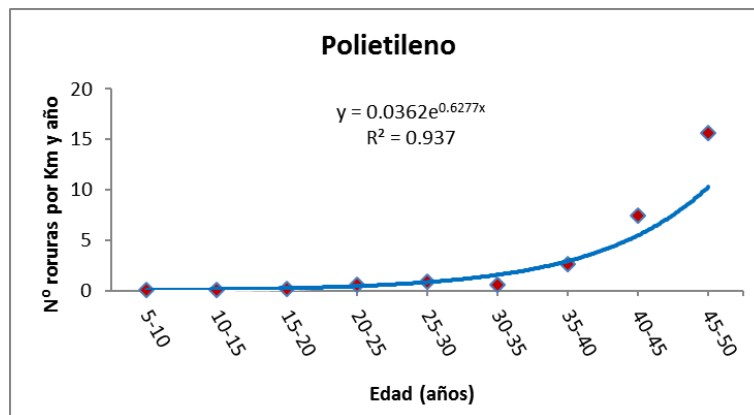


Figura 49. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Polietileno.

Cuando se trata de tuberías de Polietileno se puede llegar a distinguir dos poblaciones distintas. Aquellas tuberías instaladas durante la época de los 60 y 70, y las tuberías instaladas a partir de la década de los 80. Esto se debe a que entre ambos periodos tanto las técnicas de fabricación, como los métodos de unión han mejorado considerablemente. Por esto las tuberías de Polietileno más viejas suelen presentar una tasa de roturas mucho mayor. Ya que las tuberías instaladas más recientemente no han alcanzado su etapa de fallos por desgaste, no se conocen aun de forma certera las tasas de roturas que tendrán dichos elementos. Por esta razón se determinará mediante una regresión exponencial el ajuste para los registros que posean una edad menor a 35 años. El resultado se muestra en la Figura 59.

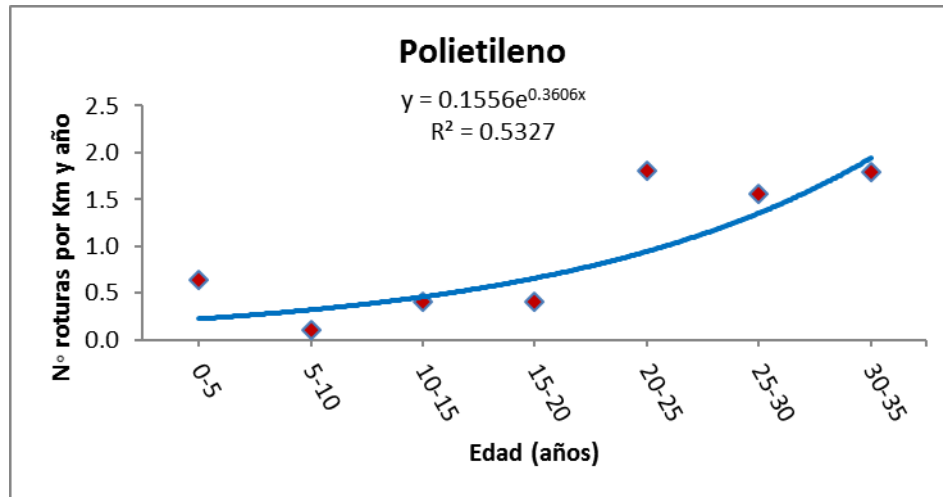


Figura 50. Ajuste de la curva exponencial a las tasas de roturas registradas en tuberías de Polietileno con edades menores a 35 años.

Al analizar los resultados obtenidos, observamos que el coeficiente de crecimiento de las roturas (A) obtenido en la Figura 50 decrece considerablemente respecto al caso donde se consideran todos los registros. Por lo tanto, el tipo de ecuación a utilizar dependerá del periodo de instalación de las tuberías de Polietileno.

5.4.5 RESUMEN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE SHAMIR Y HOWARD (1979)

En la Tabla 48 se presenta un resumen de los resultados obtenidos al aplicar el modelo planteado por Shamir y Howard en el año 1979 para los diferentes tipos de materiales de las tuberías existentes en la red de abastecimiento de la ciudad de Valencia.

Tabla 48. Factores de la ecuación planteada por Shamir y Howard obtenidos en la ciudad de Valencia para diferentes tipos de materiales.

Material	$N(t_0)$ (Roturas por Km y año)	A (años ⁻¹)
Fibrocemento	0.3408	0.1429
Fundición Dúctil	0.0180	0.3438
Fundición Gris	0.5592	0.1141
Polietileno	0.1556	0.3606

5.5 CURVAS DE COSTES Y TIEMPO ÓPTIMO DE RENOVACIÓN

De acuerdo a las ecuaciones obtenidas para cada tipo de material mediante el modelo planteado por Shamir y Howard, se puede calcular para una tubería determinada el tiempo óptimo de sustitución. De igual forma se pueden determinar las curvas de costes respectivas.

En la Tabla 49 se presentan los costes medios asociados a la reparación de una rotura según el material de la tubería. Dichos valores fueron obtenidos de los registros de roturas proporcionados por la empresa gestora. Adicionalmente en la Tabla 50 se pueden observar los costes implicados con la sustitución/renovación de tuberías de acuerdo al diámetro de las mismas.

Tabla 49. Costes medios de reparación de una rotura para distintos materiales.

Material	Costes medios de reparación
Fibrocemento	1,165.07 €
Fundición Dúctil	590.03 €
Fundición Gris	590.60 €
Polietileno	421.46 €

Tabla 50. Costes de sustitución para un metro de tubería según el diámetro de la misma.

Diámetro (mm)	Costes medios de reparación (€/m)
$\varnothing \leq 75$	243.75
$75 < \varnothing \leq 160$	325.00
$160 < \varnothing \leq 250$	406.25
$250 < \varnothing \leq 400$	568.75
$\varnothing > 400$	812.5

Tomando en consideración los costes mencionados y las ecuaciones de predicción obtenidas para cada material en el Apartado 5.4, se han determinado las curvas de costes respectivas, las cuales se presentan en la Figura 51. Se ha considerado en este caso para la realización de los gráficos una tasa de descuento (R) del 10% y se ha tomado como año base 1990.

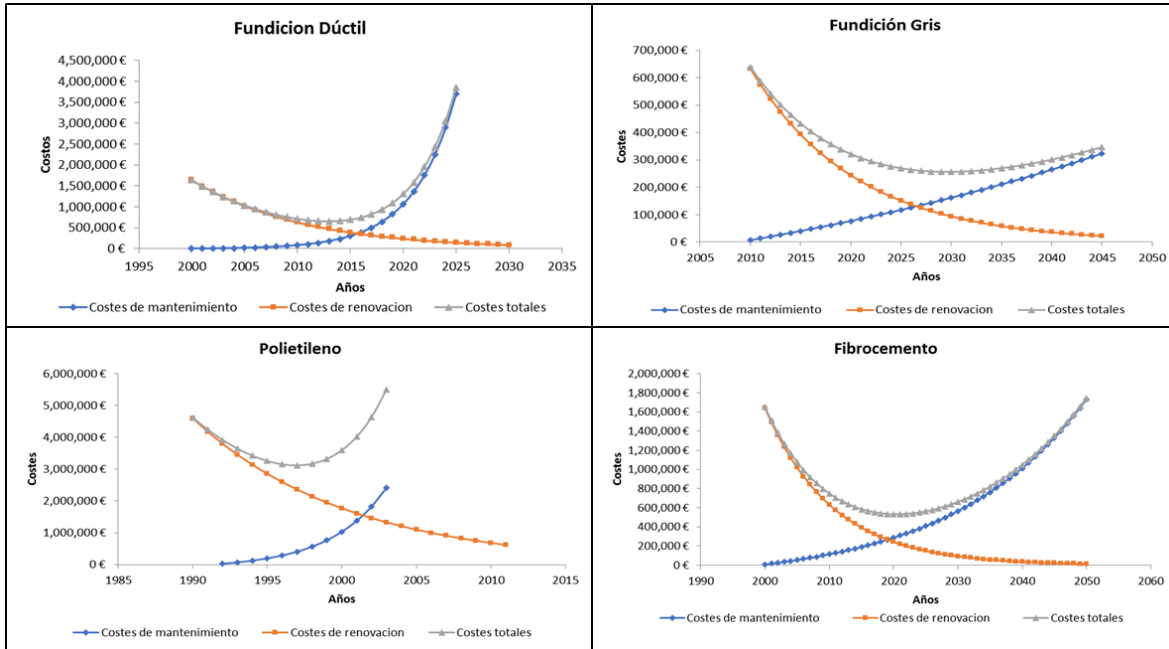


Figura 51. Curvas de costes obtenidas para diferentes tipos de materiales para $t_0 = 1990$, $R=10\%$, y $L = 1$ Km.

Se puede observar que, para este caso, bajo las mismas consideraciones de longitud, diámetro y edad, los elementos que pueden mantenerse en funcionamiento durante más tiempo sin llegar a involucrar costes de mantenimiento y sustitución más elevados de lo necesario, son las tuberías de Fundición Gris, las cuales para estas condiciones tienen un tiempo de vida útil de aproximadamente 40 años.

De forma contraria, los resultados arrojan que las tuberías de Polietileno deben ser sustituidas en aproximadamente la mitad del tiempo obtenido para las tuberías de Fundición Gris. Esto se debe a que tanto el coeficiente de crecimiento obtenido con los fallos registrados para los elementos de Polietileno como su número de roturas en el año de instalación, es bastante elevado en comparación al resto de materiales.

5.6 MODELOS HIDRÁULICOS

Una vez que se compararon las presiones medidas y las presiones obtenidas mediante la simulación en los modelos, se determinó la bondad que ofrecen cada uno de éstos utilizando la raíz media del error cuadrático (RMSE). En la Tabla 51 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 51. Bondad ofrecida por cada uno de los modelos desarrollados.

Red	RMSE	Desviación
Jesús (9-A)	8.62	4.85
Nazaret (11-C)	2.44	2.13
Algemesí	5.24	2.56

Se puede observar que, a pesar de que los modelos hidráulicos no han sido aún calibrados, el error que se obtiene al realizar las simulaciones es bajo, por lo que se podría decir que éstos ofrecen una predicción bastante fiable de las condiciones reales que se tienen en la red. En la Figura 52. se muestra un ejemplo de simulación en cada una de las redes modeladas.

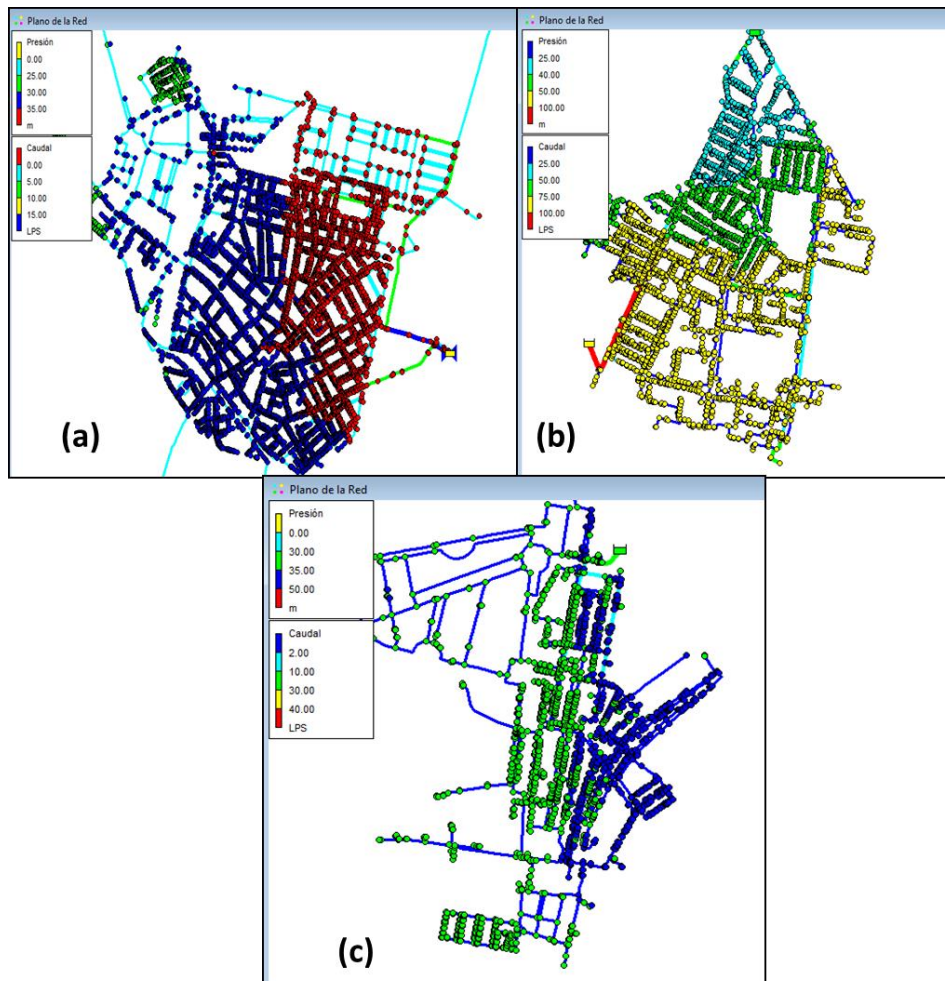


Figura 52. Ejemplos de simulación en los modelos desarrollados. (a) Algemesí, (b) Jesús (9-A), (c) Nazaret (11-C).

5.7 NIVEL DE IMPORTANCIA DE LOS ACTIVOS DE LAS REDES ESTUDIADAS

Inicialmente en la Figura 53 se presentan los grupos que se han considerado para clasificar cada una de las tuberías de los sistemas estudiados, según la prioridad que se le debe dar a las mismas al momento de implementar los planes de renovación y rehabilitación de activos.

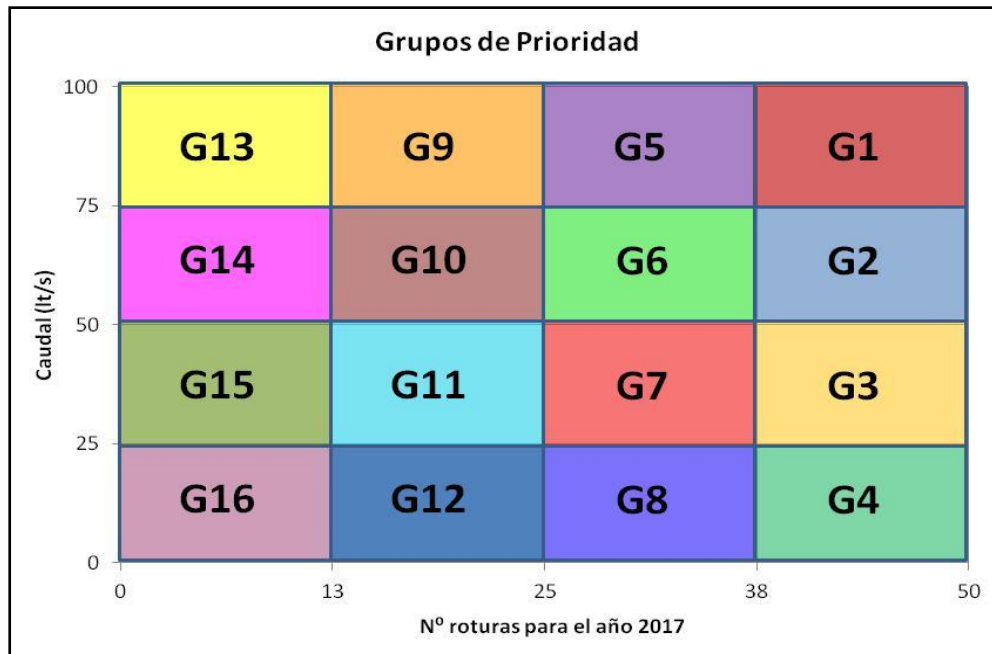


Figura 53. Grupos de prioridad para la renovación y rehabilitación de activos.

Para dicha clasificación, se han tomado en cuenta sólo aquellas tuberías con caudales circulantes mayores a 5 l s^{-1} , Esto se ha asumido considerando que, un fallo en una tubería que transporta caudales menores a dicho valor, no representará una afección grave al servicio prestado a los usuarios del sistema. Adicionalmente, al descartar dichos elementos, se garantiza la validez de los rangos establecidos para los grupos de prioridad.

Los resultados gráficos obtenidos para cada una de las redes se presentan en la Figura 54, Figura 55. y Figura 56. se presentan los gráficos de dispersión obtenidos para las tuberías consideradas en el estudio de la red de Algemesí de acuerdo al tipo de material de los elementos.

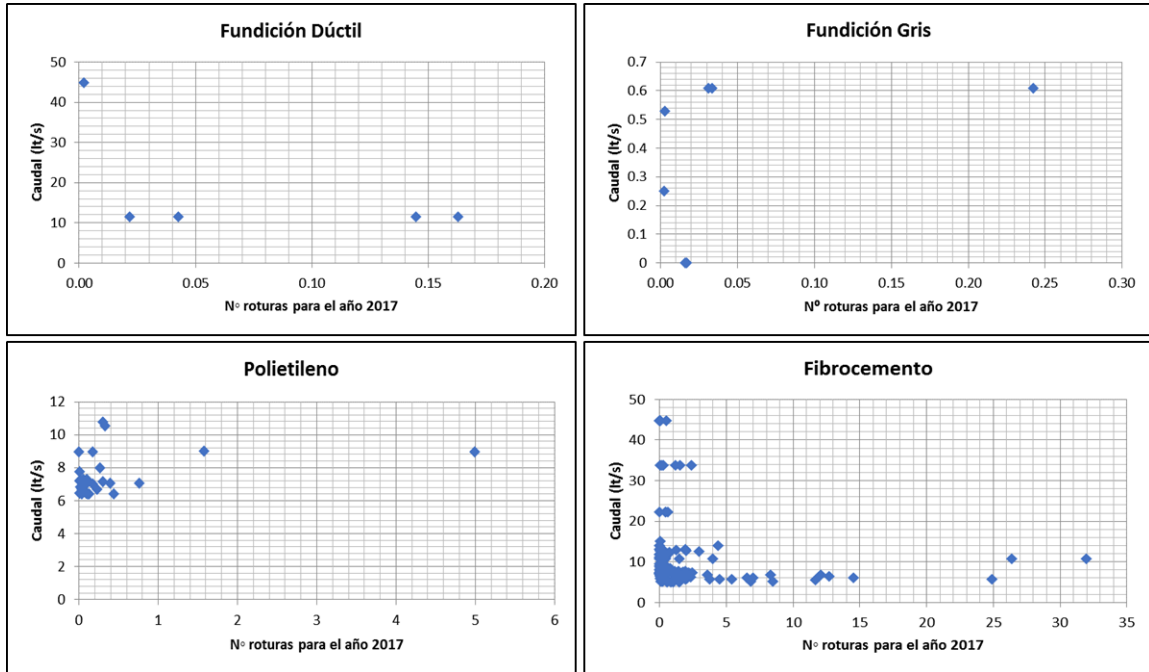


Figura 54. Gráficos de dispersión para las tuberías de la Red de Algemés según el tipo de material.

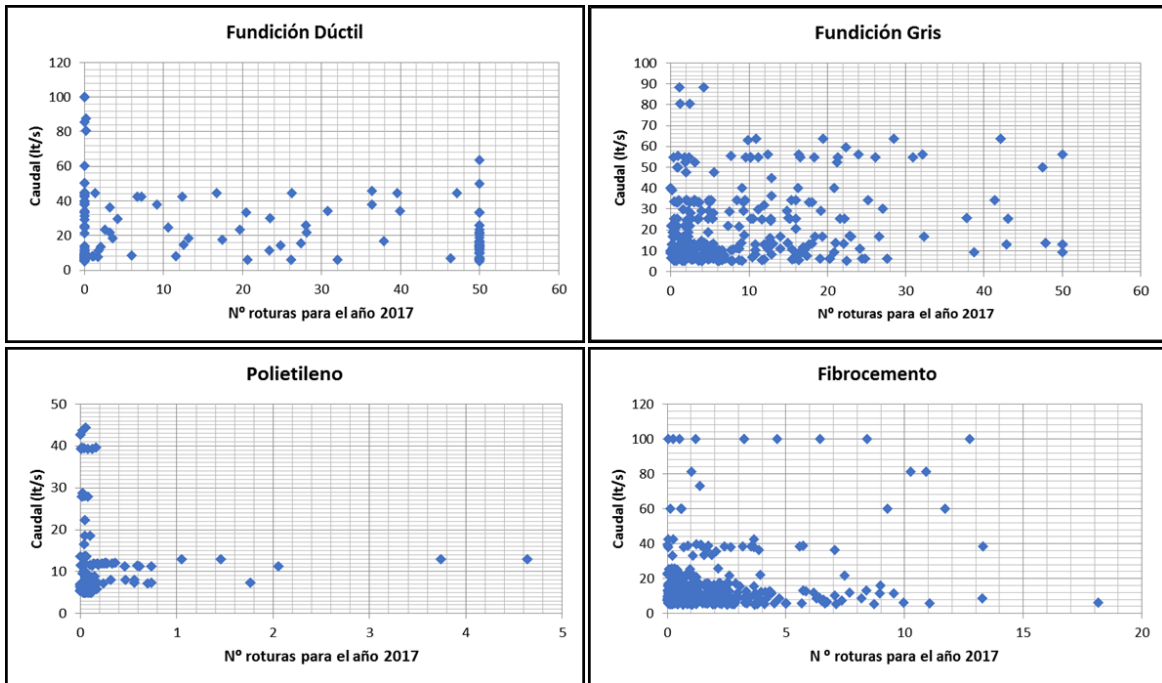


Figura 55. Gráficos de dispersión para las tuberías de la Red del Sector Jesús (9-A) según el tipo de material.

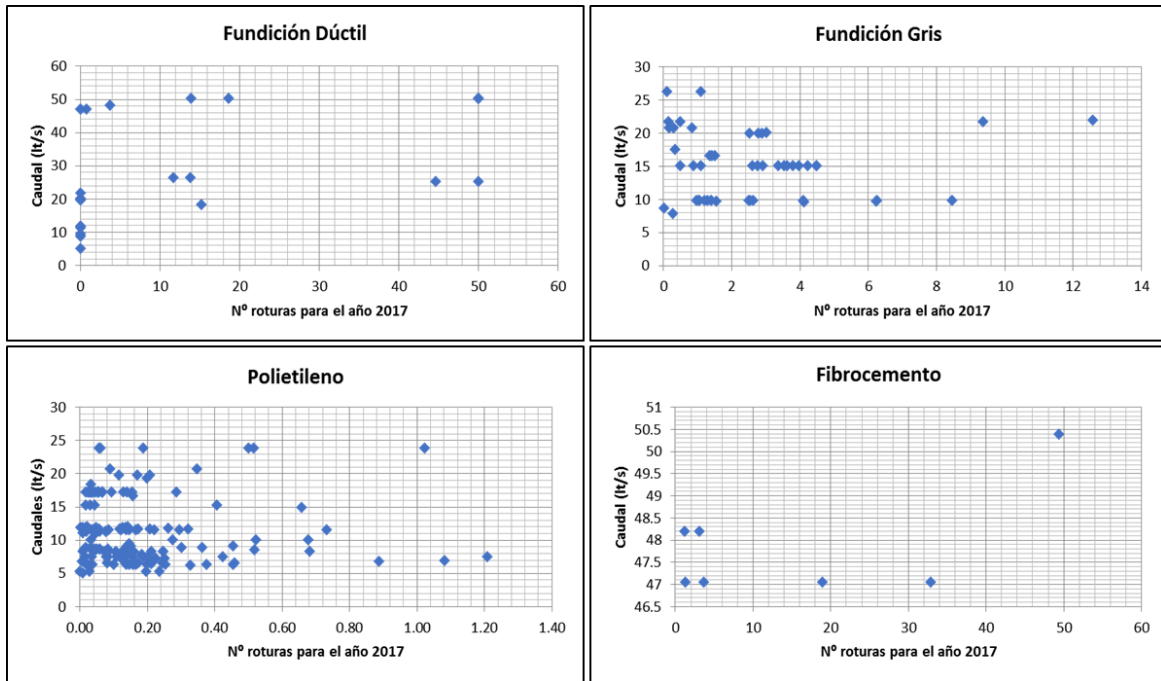


Figura 56. Gráficos de dispersión para las tuberías de la Red del Sector Nazaret (11-C) según el tipo de material.

5.7.1 RESUMEN DEL NIVEL DE IMPORTANCIA DE LOS ACTIVOS EN LAS REDES ESTUDIADAS

En Tabla 52, se presenta de forma sintetizada el número de tuberías que se tiene en cada grupo de prioridad y para cada red, en función al tipo de material.

Tabla 52. Resumen de los grupos de jerarquización establecidos para la renovación de activos.

Grupos	Redes de Abastecimiento												Total	
	Algemesí				Jesús (9-A)				Nazaret (11-C)					
	Fc	Fd	Fdg	Pe	Fc	Fd	Fdg	Pe	Fc	Fd	Fdg	Pe		
G1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G2	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	0	0	0	4
G3	0	0	0	0	0	9	4	0	0	1	0	0	0	14
G4	0	0	0	0	0	48	6	4	0	0	0	0	0	58
G5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G6	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	4
G7	0	0	0	0	0	5	2	0	1	0	0	0	0	8
G8	2	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	9
G9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Grupo	Redes de Abastecimiento												Total
	Algemesí				Jesús (9-A)				Nazaret (11-C)				
	Fc	Fd	Fdg	Pe	Fc	Fd	Fdg	Pe	Fc	Fd	Fdg	Pe	
G10	0	0	0	0	0	0	8	0	0	2	0	0	10
G11	0	0	0	0	1	3	16	0	1	1	0	0	22
G12	3	0	0	0	2	7	34	0	0	1	1	0	48
G13	0	0	0	0	12	6	4	0	0	0	0	0	22
G14	0	0	0	0	6	3	14	0	0	0	0	0	23
G15	11	1	0	0	33	25	47	14	4	5	2	0	142
G16	151	4	0	37	354	68	150	136	0	11	46	158	1115
Total	167	5	0	37	409	179	294	154	7	21	49	158	1480

Al analizar los resultados, se puede observar que, entre las tres redes existen 1480 tuberías abarcadas dentro de los grupos de prioridad establecidos. Gran parte de estos elementos corresponden a la ciudad de Valencia, resultado que es lógico, ya que, en esta zona, se tiene una mayor densidad de población y por ende existen más tuberías con caudales importantes.

Por otro lado, se puede resaltar que existen 4 tuberías en los sectores analizados de la ciudad de Valencia, pertenecientes al Grupo 2, las cuales deberían ser renovadas, ya que, de acuerdo a la metodología aplicada, éstas transportan un caudal mayor a los 75 l s^{-1} y podrían presentar más de 37.5 roturas al año según el modelo de predicción. Con lo cual, si se llegase a presentar un fallo en alguna de estas tuberías, el número de usuarios afectados sería elevado.

5.8 VERIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN EL FALLO DE TUBERÍAS MEDIANTE EL USO DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

5.8.1 RED DEL SECTOR JESÚS (9-A)

En la Tabla 53 se presentan las roturas registradas dentro de este sector entre enero de 2015 y agosto de 2016.

Tabla 53. Roturas registradas en el sector Jesús (9-A).

Fecha de registro	Dirección	Diámetro (mm)	Material	Año de instalación
16/01/2015	Carretera Escrivá 25	100	Fundición Gris	1958
25/02/2015	Salvador Guinot 3	80	Fundición Gris	1966
26/02/2015	Litógrafo Pascual y Abad/General Barroso	75	Polietileno	1977
04/03/2015	Republica Costa de Marfil/1 de Mayo	100	Fibro cemento	1982
09/04/2015	San Vicente Mártir 20	200	Fundición Gris	1904
20/05/2015	Carteros/Marques de Bellet	110	Polietileno	1997
17/06/2015	Uruguay 31	100	Fundición Gris	1960
19/06/2015	Uruguay 31	100	Fundición Gris	1960
21/07/2015	Gaspar Aguilar 32	200	Fibro cemento	1969
06/08/2015	Juan Fabregat 2	60	Fundición Gris	1931
10/08/2015	Juan Fabregat/Carretera Escrivá	60	Fundición Gris	1931
30/09/2015	San Vicente Mártir 52	200	Fundición Dúctil	2015
21/06/2016	Millares 12	125	Fundición Gris	1961
23/06/2016	Millares 4	90	Polietileno	1991
04/07/2016	Gaspar Aguilar 81	125	Fundición Gris	1964
15/07/2016	Carricola 9	100	Fundición Gris	1959
21/07/2016	Giorgeta 12	150	Fundición Gris	1969
22/07/2016	Jaime Beltrán 18	100	Fibro cemento	1975

Para el caso particular del Sector Jesús (9-A), tanto el patrón de consumo de los usuarios, como los patrones de alturas asignados a las entradas, solo pudieron ser planteados para el período comprendido entre noviembre del año 2016 y abril del año 2017. Esto es debido a que, al analizar los caudales medidos en cada sensor del sector, se observó un cambio brusco entre el compartimiento que se tenía previo al período mencionado y el comportamiento que se tiene actualmente.

Debido a que, ninguna de las roturas mostradas en la Tabla 53 se encuentra dentro del periodo comprendido en el patrón de consumo, la influencia de la presión en estos fallos no puede ser estudiada de forma precisa.

5.8.2 RED DEL SECTOR NAZARET (11-C)

A continuación, en la Tabla 54, se presentan los fallos registrados dentro del Sector Nazaret (11-C) para el periodo de registros estudiados.

Tabla 54. Roturas registradas en el sector Nazaret (11-C).

Fecha de registro	Dirección	Diámetro (mm)	Material	Año de instalación
26/06/2015	Francisco Falcons 33	100	Fundición Gris	1963
26/06/2015	Mayor de Nazaret 22	80	Fundición Gris	1963
26/06/2015	Ronda de Nazaret 25	110	Polietileno	2001
29/01/2016	Carretera Del Riu 150	400	Fibro cemento	1984
26/02/2016	Mayor de Nazaret 13	90	Polietileno	1972
30/03/2016	Carretera Del Riu 409	400	Fibro cemento	1998
21/03/2016	Pepe Gambo / Punta al Mar	50	Polietileno	1989
08/07/2016	Bernabé García 43	80	Fundición Gris	1967
20/08/2016	Puente Astilleros / Mayor de Nazaret	110	Polietileno	1972

Debido a que los patrones de alturas asignados a los embalses y los patrones de consumo asignados a los abonados se determinaron con presiones y caudales medidos entre mayo del 2016 y abril del 2017, solo se han podido examinar las roturas comprendidas en dicho periodo.

Luego de ubicar cada uno de los fallos considerados geográficamente, se determinó mediante el modelo hidráulico en EPANET 2 (EPA. Cincinnati, EEUU), la presión máxima y mínima que se tuvo en los nodos adyacentes a la tubería durante los días previos al fallo. Adicionalmente se obtuvo la evolución de las presiones en dichos nudos durante el periodo analizado. En la Tabla 55, Figura 57. y Figura 58., se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 55. Variación de presiones para las roturas analizadas en el Sector Nazaret (11-C).

Fecha de registro	Dirección	ID del Nudo en el Modelo	Presión máxima (m.c.a)	Presión mínima (m.c.a)
08/07/2016	Bernabé García 43	J598	40.77	28.09
20/08/2016	Puente Astilleros / Mayor de Nazaret	J1572	40.52	32.94

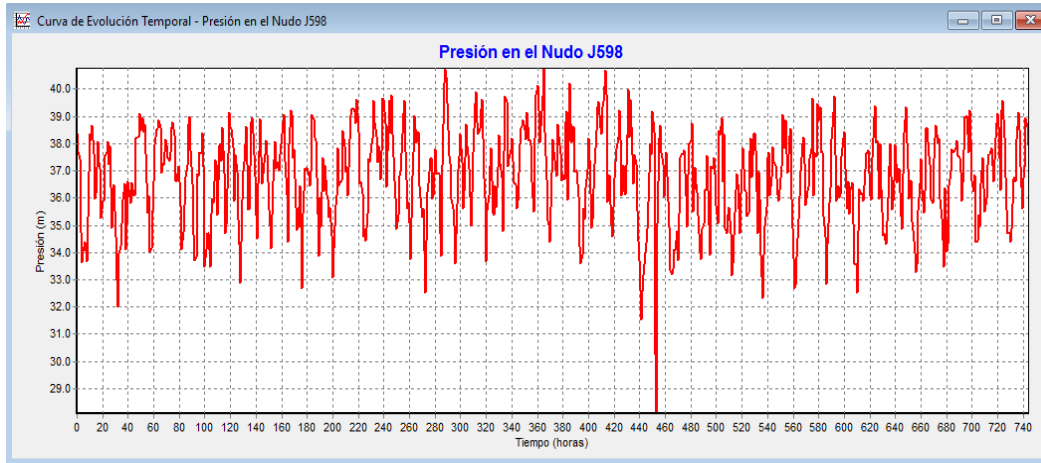


Figura 57. Evolución de las presiones en el Nudo J598 en los 30 días previos al registro de la rotura.

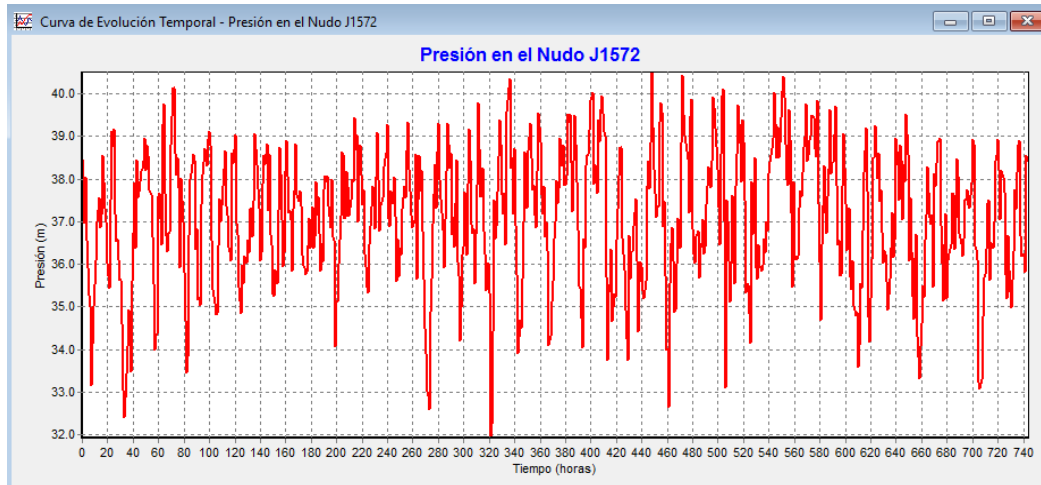


Figura 58. Evolución de las presiones en el Nudo J572 en los 30 días previos al registro de la rotura.

Al analizar los resultados, se puede observar que en ambos nudos donde se presentaron las roturas, existió una variación bastante acentuada de la presión en los días previos a que se registrara la rotura. Este tipo de fenómenos causan estrés sobre las tuberías, aumentando la susceptibilidad de las mismas a sufrir fallos. Específicamente para el Nudo J528 mostrado en la Figura 57, se observa una caída de presión por debajo de lo normal días antes del registro del fallo. Para estos casos, se puede concluir que las presiones pudieron tener algún tipo de influencia en la rotura ocurrida, aunque se requieren mayores estudios para determinar de forma certera la correlación existente entre fallos y presiones.

6 CONCLUSIONES

En el presente estudio, se tiene como principal limitante, el no contar con un registro de roturas más extenso y con información más detallada, referente a los eventos ocurridos. La falta de conocimiento de características tales como las condiciones y el tipo de suelo que se tiene en el ámbito del elemento, impide la aplicación de otros modelos de predicción que suelen ofrecer resultados más fiables y precisos.

A pesar de que el modelo de Shamir y Howard presenta un planteamiento interesante para los casos en donde no se tiene información acerca del entorno de los activos, la suposición de que la edad de las tuberías es el único factor influyente en la tasa de roturas existente en la red, no es siempre correcta. Por otra parte, la evaluación económica planteada por dicho modelo no considera el funcionamiento del sistema, por lo que no se considera la importancia que tenga un determinado elemento dentro de la red. Debido a esta razón, se han complementado los resultados obtenidos en dicho modelo con el concepto de fiabilidad hidráulica

La metodología implementada y las herramientas desarrolladas en esta investigación, pueden ser aplicadas para priorizar las acciones a ejecutar dentro del plan de rehabilitación y sustitución de activos, y por ende mejorar la gestión de los sistemas de abastecimiento que han sido objeto de estudio. Adicionalmente, para la toma de decisiones, los resultados obtenidos deben complementarse con la asignación de presupuesto que se tenga disponible, para establecer un marco más amplio en el manejo de las redes de distribución.

Con la finalidad de tener un control exhaustivo sobre la información con la que se cuenta, se recomienda que, el personal dedicado a inspecciones y reparaciones se encuentre debidamente preparado para recolectar los datos pertinentes de manera adecuada, para así aumentar la fiabilidad de los datos. Para facilitar dichas tareas se considera necesaria la utilización una interfaz o aplicación que permita que la información recolectado por los operarios, sea más uniforme y presente el mismo formato para todos los casos. La implementación de dicha medida permitirá realizar en un futuro estudios con modelos más confiables.

7 REFERENCIAS

- Alonso, C. (2008). Programación óptima de la renovación de tuberías en un sistema de abastecimiento urbano: Análisis de los factores de influencia. Universidad Politécnica de Valencia.
- Arsénio, A. M., Dheenathayalan, P., Hanssen, R., Vreeburg, J., & Rietveld, L. (2015). Pipe failure predictions in drinking water systems using satellite observations. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(8), 1102–1111. <https://doi.org/10.1080/15732479.2014.938660>.
- Asnaashari, A., McBean, E. A., Gharabaghi, B., & Tutt, D. (2013). Forecasting watermain failure using artificial neural network modelling. *Canadian Water Resources Journal*, 38(1), 24–33. <https://doi.org/10.1080/07011784.2013.774153>.
- Berardi, L., Giustolisi, O., Kapelan, Z., & Savic, D. A. (2008). Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR. *Journal of Hydroinformatics*, 10(2), 113. <https://doi.org/10.2166/hydro.2008.012>.
- Clair, A., & Sinha, S. (2014). Development of a standard data structure for predicting the remaining physical life and consequence of failure of water pipes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000384., DOI: 10.10.
- Delgado, X. (2011). Aplicación del método de jerarquías analíticas (AHP) a la gestión de pérdidas de agua en redes de abastecimiento. Universitat politècnica de Valencia.
- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES). (2015). El derecho humano al agua y al saneamiento. Hitos. Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio (UNW-DPAC).
- Durán, J., & Moral, A. (2015). Gestión de las redes de abastecimiento. Control del Agua No Registrada (ANR). IV Jornadas de Ingeniería Del Agua, 10. <http://www.uco.es/jia2015/ponencias/c/c026.pdf>.

- EGEVASA (2017). La instalación del telemando y telecontrol permite un mejor manejo de las instalaciones. <http://www.egevasa.es/portal/web/Tecnologia/Tecnologia/Telemando.html>.
- EPD. (2007). Water Leak Detection and Repair Program. *EPD Guidance Document*, (August), 1–12. http://www1.gadnr.org/cws/Documents/Leak_Detection_and_Repair.pdf.
- Francis, R. A., Guikema, S. D., & Henneman, L. (2014). Bayesian Belief Networks for predicting drinking water distribution system pipe breaks. *Reliability Engineering and System Safety*, 130, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.04.024>.
- Gallego B. (2017). Efectos del tiempo en la rugosidad de las tuberías. <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/flujoentuberias/efectotiemporugostub/efectotiemporugostub.html>
- Jafar, R., Shahrour, I., & Juran, I. (2010). Application of artificial neural networks (ANN) to model the failure of urban water mains. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(9), 117.
- Kabir, G., Tesfamariam, S., Francisque, A., & Sadiq, R. (2015). Evaluating risk of water mains failure using a Bayesian belief network model. *European Journal of Operational Research*, 240(1), 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.033>.
- Karimian, S. (2015). *Failure Rate Prediction Models of Water Distribution Networks*. Concordia University.
- Kimutai, E., Betrie, G., & Brander, R. (2015). Comparison of Statistical Models for Predicting Pipe Failures: Illustrative Example with the City of Calgary Water Main Failure. *Journal of Pipeline ...*, 1–34. [https://doi.org/doi:10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000196](https://doi.org/doi:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000196).
- Kleiner, Y., & Rajani, B. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: Statistical models. In *Urban Water* (Vol. 3, pp. 131–150). [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00033-4).

- Kutyłowska, M. (2015). Neural network approach for failure rate prediction. *Engineering Failure Analysis*, 47(PA), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.10.007>.
- Lambert, A. O. (2002). International report: Water losses management and techniques. In *Water Science and Technology: Water Supply* (Vol. 2, pp. 1–20). <https://doi.org/10.1177/001789695501300409>.
- Lawless, J. F. (1983). Statistical Methods in Reliability. *Technometrics*, 25(4), 305–316. <https://doi.org/10.2307/1267846>.
- L, J., S, G., & M, M. (2014). Comparison of pipeline failure prediction models for water distribution networks with uncertain and limited data. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 6(2), 0401.
- Mackey, T., Cashman, A., & Cumberbatch, R. (2014). Identification of factors contributing to the deterioration and losses in the water distribution system in Barbados. <https://doi.org/CERMES> Technical Report No. 68.
- Martínez, A. (2015). Metodología De Análisis Estadístico De Roturas En Redes De Distribución De Agua. Universidad Politécnica De Madrid. <https://doi.org/10.1174/021435502753511268>.
- Moglia, M., Davis, P., & Burn, S. (2008). Strong exploration of a cast iron pipe failure model. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(6), 885–896. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.033>.
- Norma ISO 24516-1 (2016). Guidelines for the management of assets of water supply and wastewater systems -- Part 1: Drinking water distribution networks. International Organization for Standardization.
- Ormsbee, L., & Kessler, A. (1990). Optimal Upgrading of Hydraulic-Network Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*, 116, 784–802.

- Ordoñez M., (2017). Corrosión en tuberías hidráulicas.
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulosos/flujoentuberias/corrosionentuberiashidraulicas/corrosionentuberiashidraulicas.html>
- Romero Chapa, M. A. (2013). Problema en redes de abastecimiento de agua potable, 81.
[http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/4135/1/TESIS PROBLEMAS EN LAS REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.pdf](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/4135/1/TESIS%20PROBLEMAS%20EN%20LAS%20REDES%20DE%20ABASTECIMIENTO%20DE%20AGUA%20POTABLE.pdf).
- Røstum, J. (2000). STATISTICAL MODELLING OF PIPE. *Norwegian University of Science and Technology*, 1–132.
- Shamir, U., & Howard, C. D. D. (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Am. Water Works Assoc. J.*, 71(5, May 1979), 248–258.
- Shirzad, A., Tabesh, M., & Farmani, R. (2014). A comparison between performance of support vector regression and artificial neural network in prediction of pipe burst rate in water distribution networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(4).
<https://doi.org/10.1007/s12205-014-0537-8>.
- STATGRAPHICS Centurion XVI Manual de usuario. (2010).
- St. Clair, A. M., & Sinha, S. (2014). Development of a Standard Data Structure for Predicting the Remaining Physical Life and Consequence of Failure of Water Pipes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(1), 191–203.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000384](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000384).
- Thornton, J., & Garzón Contreras, F. (2006). Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución. *XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental, Punta Del Este - Uruguay*, (1).
- United Nations. (2012). Agua y ciudades. Hechos y cifras., 1–4.
http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/swm_cities_zaragoza_2010/pdf/facts_and_figures_long_final_spa.pdf.

- Vegas, O. T. (2012). Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- 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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2009\)23:1\(47\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2009)23:1(47)).
- Watson, T. (2004). Bayesian-based pipe failure model. *Journal of Hydroinformatics*, pp.259-64.
- Xu, C., & Goulter I. (1999). Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Volume 125, no6, 352–362.
- Xu, Q., Chen, Q., Li, W., & Ma, J. (2011). Pipe break prediction based on evolutionary data-driven methods with brief recorded data. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(8), 942–948. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.010>.

8 ANEXOS

ANEXO “1” SECTORES DE LA RED DE VALENCIA



LEYENDA

ESTACIÓN DE SECTORIZACIÓN

- 2-A GRAN VIA (AÑO - 2013)
- 3-A PETXINA
- 4-A CAMPANAR OEST - MAESTRO RODRIGO (AÑO - 2009)
- 4-B CAMPANAR OEST - GENERAL AVILES (AÑO - 2009)
- 4-C CAMPANAR OEST - CAMP DEL TURIA (AÑO - 2009)
- 4-D CAMPANAR EST - CHOCCOMEU (AÑO - 2010)
- 7-A OLIVERETA (AÑO - 2009)
- 7-B TRES FORQUES (AÑO - 2009)
- 7-C SOTERRES (AÑO - 2009)
- 8-A PATRALIX (AÑO - 2010)
- 8-B SARRANAR (AÑO - 2010)
- 8-C RAUSA OEST (AÑO - 2010)
- 8-A JESUS (AÑO - 2012)
- 9-B SAINT MARCEL.LI (AÑO - 2012)
- 10-A MALLILA (AÑO - 2009)
- 10-B FUENTE SAN LUIS (AÑO - 2009)
- 11-A MALVARROSA (AÑO - 2002 / 2012)
- 11-B CABANYAL (AÑO - 2002 / 2012)
- 11-C NAZARET (AÑO - 2002)
- 11-D BETERO (AÑO - 2012)
- 12-A AOPRA (AÑO - 2013)
- 12-B CAMINS AL GRAU SUD (AÑO - 2014)
- 13-A CUITAT JARDI (AÑO - 2013)
- 13-B ILA PERBUDA (AÑO - 2002)
- 13-C ALGIROS NORD (AÑO - 2014)
- 17-A MASARROCHOS (AÑO - 2010)
- 17-B LLOMETES-MASARROCHOS (AÑO - 2011)
- 17-C BORROTO-CARPESA (AÑO - 2014)
- 17-D BENIFARRAG (AÑO - 2014)
- 18-A BENINAMET NORD (AÑO - 2011)
- 18-B LA TORRE (AÑO - 2009)
- 18-C CASTELLAR-OLIVERAL (AÑO - 2009)
- 18-D PINEDO (AÑO - 2007)
- 18-E EL PALMAR (AÑO - 2009)
- 18-F EL PERELONET (AÑO - 2014)

		A PARTIR DE LA FICHA Mapa del área de Turis	
PROYECTO DE SECTORIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE VALENCIA - EJERCICIO 2015.			
PLANO SECTORES Y ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN		SECTORES Y ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	
SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN
SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN
SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN	SECTORES ESTACIONES DE SECTORIZACIÓN