

Trabajo Fin de Máster

PROCEDIMIENTO DE ESTUDIO Y ANÁLISIS DE CUENCAS URBANAS BASADO EN LA EVALUACIÓN DE RIESGOS

Intensificación: TRATAMIENTO DE AGUAS

Autor:

JUAN ANTONIO CASAR ITURRIOZ

Director:

DR. JUAN BAUTISTA MARCO SEGURA

SEPTIEMBRE, 2015



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto
Título: Procedimiento de estudio y análisis de Cuencas Urbanas basado en la evaluación de Riesgos.
Alumno: Juan Antonio Casar Iturrioz.
Director: Juan Bautista Marco Segura.
Codirector/es:
Fecha de Lectura: Septiembre, 2015

Resumen
En castellano (máximo 2000 palabras)
<p>El presente Trabajo propone una metodología consistente y aplicable a cualquier cuenca urbana que permite en base al análisis de riesgos planificar las intervenciones necesarias a corto, medio y largo plazo para cumplir los objetivos fijados en dicha cuenca.</p> <p>Se trata punto por punto cada una de las fases propuestas por el autor dando metodologías para abordar cada una de ellas incluyendo:</p> <p>Una primera fase de análisis inicial de incidentes históricos, recolección de datos existentes y completado de datos mediante estudios y prospecciones de la red de saneamiento, como las prospecciones de pozos y estructuras como aliviaderos, estaciones de bombeo o estaciones depuradoras de aguas residuales, estudios de conectividad de la red de saneamiento, estudios de la red mediante CCTV, estudios de drenaje de áreas impermeables en la cuenca o monitorización de caudales mediante la instalación temporal de caudalímetros y pluviógrafos. En esta primera fase se realiza un análisis inicial de los riesgos de la cuenca que permite una planificación de los estudios e investigaciones a realizar.</p> <p>Segunda fase en la que se aborda la construcción del modelo hidrológico-hidráulico y posterior verificación en base a la monitorización de caudales en la red de saneamiento y posteriormente en base a los registros históricos de inundación. En este punto se trata la modelización de la cuenca mediante la utilización del software comercial Infoworks.</p>

Finalmente se trata la fase de evaluación de riesgos y el desarrollo de la estrategia o plan de actuación en la cuenca urbana. Éste incluye el análisis de viabilidad económica de las diferentes alternativas aplicables incluyendo actuaciones hidráulicas (tanto convencionales como técnicas de drenaje sostenible) e intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de la red, así como la evaluación del beneficio que las actuaciones tienen sobre el funcionamiento de la red de saneamiento. Los riesgos hidráulicos son analizados mediante la utilización del modelo hidrológico-hidráulico, mientras que los riesgos no hidráulicos son analizados mediante la utilización del modelo de deterioro.

Se incluye en el Trabajo un ejemplo de aplicación desarrollado por el autor en una cuenca de Gales que ilustra cada una de las fases desarrolladas.

En resumen, el análisis de cuencas urbanas basado en la evaluación de riesgos pretende identificar los problemas de la cuenca, clarificar cuáles son las causas de los problemas y aportar un Plan de Actuación que permita planificar las inversiones donde sean necesarias de la manera más eficiente a corto, medio y largo plazo, tanto en intervenciones hidráulicas como en actuaciones de rehabilitación y mantenimiento.

En valenciano (máximo 2000 palabras)

El present Treball proposa una metodologia consistent i aplicable a qualsevol conca urbana que permet en base a l'anàlisi de riscos planificar les intervencions necessàries a curt, mitjà i llarg termini per a complir els objectius fixats en aquesta conca.

Es tracta punt per punt cadascuna de les fases proposades per l'autor donant metodologies per abordar cadascuna d'elles incloent:

Una primera fase d'anàlisi inicial d'incidents històrics, recollida de dades existents i completat de dades mitjançant estudis i prospeccions de la xarxa de sanejament, com les prospeccions de pous i estructures com sobreeixidors, estacions de bombament o estacions depuradores d'aigües residuals, estudis de connectivitat de la xarxa de sanejament, estudis de la xarxa mitjançant CCTV, estudis de drenatge d'àrees impermeables a la conca o monitorització de cabals mitjançant la instal·lació temporal de cabalímetres i pluviògrafs. En aquesta primera fase es realitza una anàlisi inicial dels riscos de la conca que permet una planificació dels estudis i investigacions a realitzar.

Segona fase en què s'aborda la construcció del model hidrològic-hidràulic i posterior verificació d'acord amb la monitorització de cabals en la xarxa de sanejament i posteriorment en base als registres històrics d'inundació. En aquest punt es tracta la modelització de la conca mitjançant la utilització del programari comercial Infoworks.

Finalment es tracta la fase d'avaluació de riscos i el desenvolupament de l'estratègia o pla d'actuació a la conca urbana. Aquest inclou l'anàlisi de viabilitat econòmica de les diferents alternatives aplicables incloent actuacions hidràuliques (tant convencionals com tècniques de drenatge sostenible) i intervencions de manteniment i rehabilitació de la xarxa, així com l'avaluació del benefici que les actuacions tenen sobre el funcionament de la xarxa de sanejament. Els riscos hidràulics són analitzats mitjançant la utilització del model hidrològic-

hidràulic, mentre que els riscos no hidràulics són analitzats mitjançant la utilització del model de deteriorament.

S'inclou en el Treball un exemple d'aplicació desenvolupat per l'autor en una conca de Gal·les que il·lustra cadascuna de les fases desenvolupades.

En resum, l'anàlisi de conques urbanes basat en l'avaluació de riscos pretén identificar els problemes de la conca, clarificar quines són les causes dels problemes i aportar un Pla d'Actuació que permeti planificar les inversions on siguin necessàries de la manera més eficient a curt, mitjà i llarg termini, tant en intervencions hidràuliques com en actuacions de rehabilitació i manteniment.

En inglés (máximo 2000 palabras)

This dissertation shows a consistent methodology, valid for any urban catchment, which allows based on the risk analysis to plan the interventions in a short, medium and long term to meet the targets set for that catchment.

It is explained point by point each of the stages proposed by the author giving methodologies to develop each of them including:

A first stage which includes an initial incident analysis, existing data gathering and data completion through sewer surveys, as manhole surveys, combined sewer overflow surveys, pumping station surveys, waste water treatment works surveys, connectivity surveys, CCTV surveys, impermeable area surveys or flow surveys using flow monitors and rain gauges. This first stage includes an initial risk analysis which allows to plan the catchment surveys.

A second stage explains the model build and verification stage based on the flow survey and the historical verification. In this point Infoworks is introduced as hydrologic and hydraulic commercial software.

Finally it is explained the risk assessment and the catchment intervention plan. The intervention plan includes the risk-benefit analysis of the different alternatives considered including hydraulic solutions (both conventional and sustainable drainage solutions) and rehabilitation and maintenance interventions, including the analysis of the positive impact on the sewer network performance. Hydraulic risks are assessed using the hydraulic model, while the non-hydraulic risks are analysed using the deterioration model.

The dissertation includes an example developed by the author in a catchment in Wales which contains all stages.

In summary, the catchment risk based analysis identifies the issues in the catchment, contributes to develop their root cause assessment and helps to plan the interventions and expenditures in an efficient way in the short, medium and long term for the hydraulic solutions and the rehabilitation and maintenance interventions.

Palabras clave (máximo 5): Riesgo, Saneamiento, Hidráulica, Deterioro, Modelo

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ESTUDIO BASADO EN EL RIESGO	5
2.1.	Definición de Riesgo	5
2.2.	Clasificación de Riesgos	7
2.3.	Valoración de Riesgos	9
2.4.	Análisis intercuenca	14
3.	RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	16
3.1.	Tipos de datos existentes	16
3.2.	Análisis de Datos	27
4.	ANÁLISIS INICIAL DE LOS RIESGOS EN LA CUENCA.....	30
5.	INVESTIGACIÓN	37
5.1.	Tipos de investigaciones.....	37
5.2.	Planeamiento de las investigaciones a realizar.....	65
6.	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO	67
6.1.	Introducción	67
6.2.	Software: Infoworks CS	69
6.3.	Construcción del modelo	82
6.4.	Validación del modelo.....	91
7.	VERIFICACIÓN DEL MODELO	95
7.1.	Verificación en base al estudio de caudales.....	95
7.2.	Verificación histórica.....	100
8.	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RIESGOS	102
8.1.	Riesgos hidráulicos	102
8.2.	Riesgos con "otras causas". Modelo de deterioro	105
9.	DESARROLLO DEL PLAN DE INTERVENCIONES	109
9.1.	Intervenciones hidráulicas	109
9.2.	Mantenimiento y rehabilitación.....	117
10.	EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	123
10.1.	Recolección y análisis de datos	123
10.2.	Análisis inicial de los riesgos en la cuenca.....	127
10.3.	Investigación.....	129

Procedimiento de estudio y análisis de Cuencas Urbanas basado en la evaluación de Riesgos

10.4.	Construcción del modelo hidrológico-hidráulico	130
10.5.	Verificación del Modelo	133
10.6.	Evaluación y análisis de Riesgos	134
10.7.	Desarrollo del Plan de Intervenciones	138
11.	CONCLUSIONES	145
	BIBLIOGRAFÍA.....	149
	ANEJO: Fichas de verificación de caudalímetros.....	151

Índice de Tablas

Tabla 2-1.- Cálculo del Riesgo en una Red Simplificada	7
Tabla 2-2.- Clasificación de riesgos con niveles de severidad	13
Tabla 5-1.- Precios orientativos de Investigaciones en Reino Unido (2015) (Experiencia propia)	66
Tabla 6-1.- Infoworks: Características de los pozos	69
Tabla 6-2.- Infoworks: Características de los conductos	73
Tabla 6-3.- Infoworks: Características de las subcuencas	76
Tabla 6-4.- Infoworks: Escorrentía.....	78
Tabla 6-5.- Comprobaciones en la etapa de Validación del Modelo	91
Tabla 7-1.- Requisitos de tormentas para verificación (Drinkwater et al., 1987)	96
Tabla 10-1.- Five Fords-Wrexham: Investigaciones.....	129
Tabla 10-2.- Five Fords-Wrexham: Parámetros escorrentía modelo Infoworks.....	131
Tabla 10-3.- Five Fords-Wrexham: Porcentajes de producción de escorrentía.....	132
Tabla 10-4.- Five Fords-Wrexham: Usos del suelo	132
Tabla 10-5.- Five Fords-Wrexham: Objetivos para los riesgos “otras causas”	139
Tabla 10-6.- Five Fords-Wrexham: Coste Plan de Mantenimiento	141

Índice de Figuras

Figura 1.1.-Procedimiento de estudio de una Cuenca Urbana	3
Figura 2.1.-Estudio de Riesgo de Inundación Interna en un caso ideal	6
Figura 3.1.1.- Ejemplo de plano base	17
Figura 3.1.1.- Ejemplo de plano base	17
Figura 3.1.2.-Hydrobrake	19
Figura 3.1.3.-Hydrobrake: curva característica	19
Figura 3.1.4.- Ejemplo de plano de red de saneamiento	20
Figura 3.1.5.- Ejemplo de plano esquemático de la cuenca.....	21
Figura 3.1.6.- Ejemplo de estación de telemetría	22
Figura 3.1.7.- Ejemplo de datos de telemetría.....	22
Figura 3.2.-Representación gráfica de datos.....	28
Figura 4.1.- El análisis inicial de Riesgos dentro del proceso de Análisis de la Cuenca.....	30
Figura 4.2.- Ejemplo de Mapa Inicial de Riesgos.....	34
Figura 5.1.01.- Ficha de prospección de pozo: Datos	39
Figura 5.1.02.- Ficha de prospección de pozo: Fotos y croquis	40
Figura 5.1.03.- Ejemplo de croquis de aliviadero	41
Figura 5.1.04.- Ejemplo de test de bombeo	43
Figura 5.1.05.- Ejemplo de plano de Estudio de Áreas Impermeables	47
Figura 5.1.06.- Ejemplo de estudio de conectividad.....	48
Figura 5.1.07.- Ejemplo de instalación de un monitor de caudal.....	50
Figura 5.1.08.- Instalación típica de un monitor de caudal.....	50
Figura 5.1.09.- Ejemplo de instalación de un pluviógrafo.....	51
Figura 5.1.10.- Gráfico de densidad de pluviógrafos a instalar.....	54
Figura 5.1.11.- Distribución correcta de pluviógrafos en una cuenca de 10 Km ²	54
Figura 5.1.12.- Condiciones de ubicación recomendada para monitores de caudal	56
Figura 5.1.13.- Respuesta a una tormenta registrada por el caudalímetro	58
Figura 5.1.14.- Estudio de Caudales: Colector en carga.....	58
Figura 5.1.15.- Estudio de Caudales: Respuesta lenta	59
Figura 5.1.16.- Estudio de Caudales: Bombeo	59
Figura 5.1.17.- Estudio de Caudales: Mal funcionamiento	60
Figura 5.1.18.- Estudio de Caudales: Afección de lecturas por materia en suspensión	60
Figura 5.1.19.- Estudio de Caudales: Flujo turbulento.....	61
Figura 5.1.20.- Cámara estándar para inspección de colectores (CCTV)	62
Figura 5.1.21.- Clasificación del grado de deterioro estructural (Water Research Centre).....	63
Figura 6.3.1.- Esquema de construcción del modelo base.....	82
Figura 6.3.2.- Definición geométrica de un tanque de tormentas.....	83
Figura 6.3.3.- Modelado de un “hydrobrake”	86
Figura 6.3.4.- Distribución de caudales de escorrentía.....	88
Figura 6.3.5.- Componentes de la escorrentía	89
Figura 6.3.6.- Perfil de generación de aguas residuales domésticas en Infoworks	90
Figura 7.1.1.- Estudio de Caudales: Datos erróneos en comparación con curva teórica	97
Figura 7.1.2.- Estudio de Caudales: Los datos se ajustan a la curva teórica	97
Figura 8.1.1.- Mapa de riesgos de inundación	103
Figura 8.2.1.- Modelo de Deterioro: Variación del Riesgo	106

Figura 8.2.2.- Modelo de deterioro: Componentes del cálculo de riesgos.....	107
Figura 9.1.1.-Intervenciones hidráulicas: Proceso de análisis.....	111
Figura 9.1.2.- TDDS: Depósito de almacenamiento residencial (water butts).....	113
Figura 9.1.3.- TDDS: Canal ecológico.....	114
Figura 9.1.4.-TDDS: Laguna profunda.....	114
Figura 9.1.5.-TDDS: Humedal.....	115
Figura 9.1.6.-TDDS: Detención.....	115
Figura 9.1.7.-TDDS: Zanja de infiltración.....	116
Figura 9.1.8.-TDDS: Técnicas de filtración.....	116
Figura 9.2.1.- Implementación del Plan de Rehabilitación y Mantenimiento.....	118
Figura 9.2.2.- Mantenimiento/Rehabilitación: Re-entubado.....	119
Figura 9.2.3.- Mantenimiento/Rehabilitación: “Jetting”.....	120
Figura 9.2.4.- Mantenimiento/Rehabilitación: “Bursting”.....	121
Figura 9.2.5.- Modelo de deterioro: Evolución de la probabilidad de obstrucción en una tubería en función del Plan de Rehabilitación (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013).....	122
Figura 10.1.1.- Cuenca objeto de estudio: vista general.....	123
Figura 10.1.2.- Five Fords-Wrexham: Red de saneamiento modelada.....	124
Figura 10.1.3.- Telemetría: ScopeX.....	125
Figura 10.1.4.- Telemetría: Ejemplo niveles en aliviadero.....	126
Figura 10.2.1.- Five Fords-Wrexham: Eventos de inundación según severidad.....	128
Figura 10.4.1.- Ejemplo modelado aliviadero.....	130
Figura 10.4.2.- Ejemplo de trazado de subcuencas.....	131
Figura 10.6.1.- FEH: descriptores de la cuenca.....	134
Figura 10.6.2.- Infoworks: Módulo de generación de tormentas.....	134
Figura 10.6.3.- Comparación escenario actual-escenario futuro con cambio climático: Tormenta de diseño verano $T_r=30$ años, duración=960 minutos.....	135
Figura 10.6.4.- Tasas de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013).....	136
Figura 10.6.5.- Modelo de deterioro: Hoja de cálculo.....	137
Figura 10.7.1.- Five Fords-Wrexham: Plan de Mantenimiento 2015-2020.....	140
Figura 10.7.2.- Five Fords-Wrexham: Actuaciones mantenimiento en Wrexham centro.....	140
Figura 10.7.3.- Five Fords-Wrexham: Evolución riesgos OC con y sin actuaciones.....	141
Figura 10.7.4.- Five Fords-Wrexham: Plan de Mantenimiento, gráfica coste-beneficio.....	142
Figura 10.7.5.- Five Fords-Wrexham: Actuaciones hidráulicas Wrexham centro.....	143
Figura 10.7.6.- Five Fords-Wrexham: Plan de Intervenciones, corto y medio plazo.....	143
Figura 10.7.7.- Five Fords-Wrexham: Plan de Intervenciones, largo plazo.....	144

NOMENCLATURA

AMP	Asset Management Programme (UK)
CCTV	Circuito cerrado de televisión
CH	Causas Hidráulicas
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association (UK)
CIRIA	The Construction Industry Research and Information Association
DEFRA	Department for Environment, Food & Rural Affairs (UK)
EB	Estación de Bombeo
FEH	Flood Estimation Handbook
GI	Ground Infiltration
OC	Otras Causas
OFWAT	The Water Services Regulation Authority (UK)
RTC	Real Time Control
SIG	Sistema de Información Geográfica
SUDS	Sustainable Drainage Systems
SWMM	Storm Water Management Model
TD	Tasa de Deterioro
TDDS	Técnicas de Drenaje Sostenible
Tr	Periodo de retorno
WaPUG	Wastewater Planning Users Group (UK)

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de drenaje urbano o redes de colectores presentes en las zonas urbanas responden a la doble necesidad de servir de vehículo hacia las estaciones de tratamiento de aguas residuales y de prevenir frente a inundaciones recogiendo la escorrentía generada principalmente en las superficies impermeables propias del paisaje urbano convencional.

El desarrollo en los últimos años, principalmente en la última década, de software de cálculo hidrológico-hidráulico junto con la implantación de los sistemas de información geográfica que permiten la manipulación de grandes cantidades de datos y su posterior análisis gráfico y numérico, permite establecer nuevos cauces para la resolución de problemas, análisis de sus causas y planificación de intervenciones e inversiones de una manera, si no óptima, al menos racional.

Décadas atrás, sin la existencia de las herramientas citadas, resultaba complejo analizar los datos y conocer con exactitud la problemática existente en las cuencas urbanas y sus causas, y por lo tanto no se podía profundizar de igual manera que es posible ahora en la elaboración de los Planes de Actuación.

La posibilidad del tratamiento masivo de datos y su análisis tiene como consecuencia que se pueda realizar una mejor planificación de las intervenciones y las inversiones a realizar en las cuencas urbanas.

El presente proyecto tiene como objetivo dar una visión y presentar un procedimiento robusto de análisis global de las cuencas urbanas que permita analizar los datos y construir los modelos necesarios para establecer una planificación de actuaciones a corto, medio y largo plazo en base a los objetivos estratégicos previamente establecidos.

El estudio y análisis de la cuenca se basa en la evaluación de riesgos, la cual se describe con detalle en el Capítulo 2.

Se entiende por riesgo según el diccionario de la Real Academia de la Lengua a la *contingencia o proximidad de un daño*. Matemáticamente hablando el riesgo es el resultado de multiplicar la probabilidad de ocurrencia de un evento por la consecuencia generada por dicho evento.

El análisis de los riesgos aplicado a las cuencas urbanas permite cuantificar los costes asociados a los distintos tipos de riesgos analizados y por tanto permite planificar las actuaciones a realizar en función de la reducción de riesgo que se pretenda obtener.

El estudio de las cuencas basado en el análisis de riesgos permite la evaluación de distintos aspectos como son la gestión de escorrentías superficiales, los impactos causados por nuevos desarrollos urbanos o el deterioro de las redes de saneamiento.

El estudio y análisis propuesto en el presente proyecto incluye las siguientes fases, resumidas en la figura 1.1:

Una primera fase de análisis inicial de incidentes históricos, recolección de datos existentes y completado de datos mediante estudios y prospecciones de la red de saneamiento, como las prospecciones de pozos y estructuras como aliviaderos, estaciones de bombeo o estaciones depuradoras de aguas residuales, estudios de conectividad de la red de saneamiento, estudios de la red mediante CCTV (circuito cerrado de televisión), estudios de drenaje de áreas impermeables en la cuenca o monitorización de caudales mediante la instalación temporal de caudalímetros y pluviógrafos.

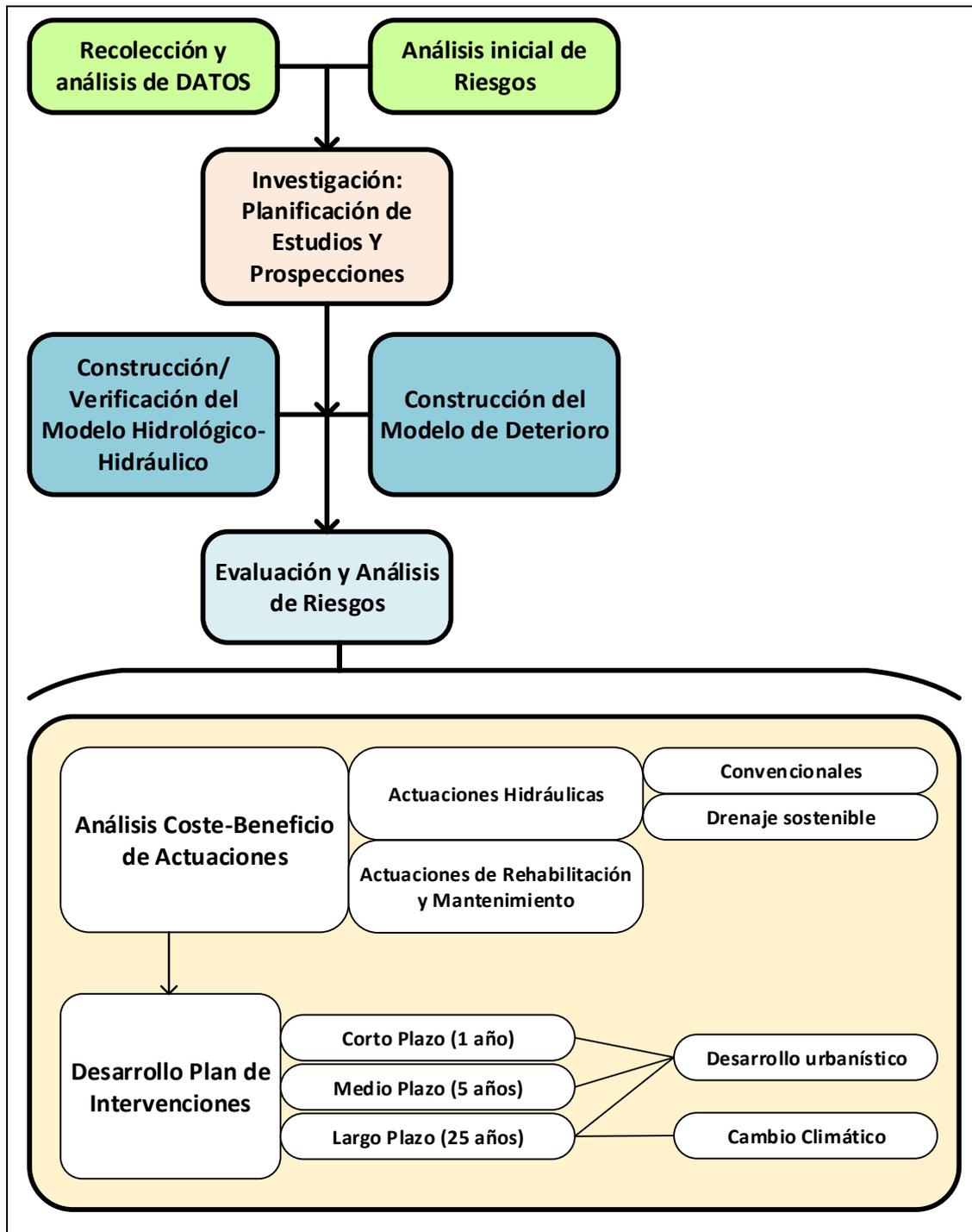
Segunda fase en la que se aborda la construcción del modelo hidrológico-hidráulico y posterior verificación en base a la monitorización de caudales en la red de saneamiento y a los datos históricos de inundación. En este punto se trata la modelización de la cuenca mediante la utilización del software comercial Infoworks.

La construcción y verificación del modelo es una etapa fundamental pues permite analizar la cuenca en escenarios futuros teniendo en cuenta las actuaciones a planificar e incluyendo en el análisis posibles desarrollos urbanos y afección del cambio climático al régimen de lluvias.

Finalmente se trata la fase de evaluación de riesgos y el desarrollo de la estrategia o plan de actuación en la cuenca urbana con objeto de cumplir los objetivos establecidos para la cuenca. Éste incluye el análisis de viabilidad económica de las diferentes alternativas aplicables incluyendo actuaciones hidráulicas (tanto convencionales como técnicas de drenaje sostenible) e intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de la red, así

como la evaluación del beneficio que las actuaciones tienen sobre el funcionamiento de la red de saneamiento.

Figura 1.1.-Procedimiento de estudio de una Cuenca Urbana



En resumen, el análisis de cuencas urbanas basado en la evaluación de riesgos pretende:

- Identificar los problemas de la cuenca.
- Averiguar las causas de los problemas.
- Identificar futuros problemas, por ejemplo los relacionados con nuevos desarrollos urbanos o el deterioro de la red de saneamiento.
- Generar un modelo hidráulico lo más ajustado a la realidad (proceso de verificación del modelo) que permita analizar con confianza suficiente los problemas en las zonas más conflictivas.
- Generar un modelo de deterioro de la red de saneamiento que permita planificación de actuaciones relacionadas con el mantenimiento y rehabilitación de la red.
- Ambos modelos deben comprenderse como modelos vivos, es decir, deben ser revisados, actualizados y mejorados periódicamente.
- Análisis coste/beneficio de las diferentes soluciones o actuaciones propuestas para cumplir los objetivos marcados en la cuenca.
- Aportar un Plan de Actuación que permita planificar las inversiones donde sean necesarias de la manera más eficiente a corto, medio y largo plazo.

2. ESTUDIO BASADO EN EL RIESGO

2.1. Definición de Riesgo

Como se ha comentado en la introducción, la primera acepción o definición de Riesgo en el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española es:

“Contingencia o proximidad de un daño.”

Se trata de una definición aparentemente simple pero que encierra más contenido del que pueda parecer.

El concepto contingencia o proximidad hace referencia a una probabilidad de que ocurra algo, y el concepto de daño se refiere a las consecuencias que ese algo tiene.

En un proceso aleatorio, la probabilidad es la razón entre el número de casos favorables y el número de casos posibles.

El riesgo se define como el resultado del producto de la probabilidad de ocurrencia de un evento por la consecuencia que ese evento tiene (Gill et al, 2013).

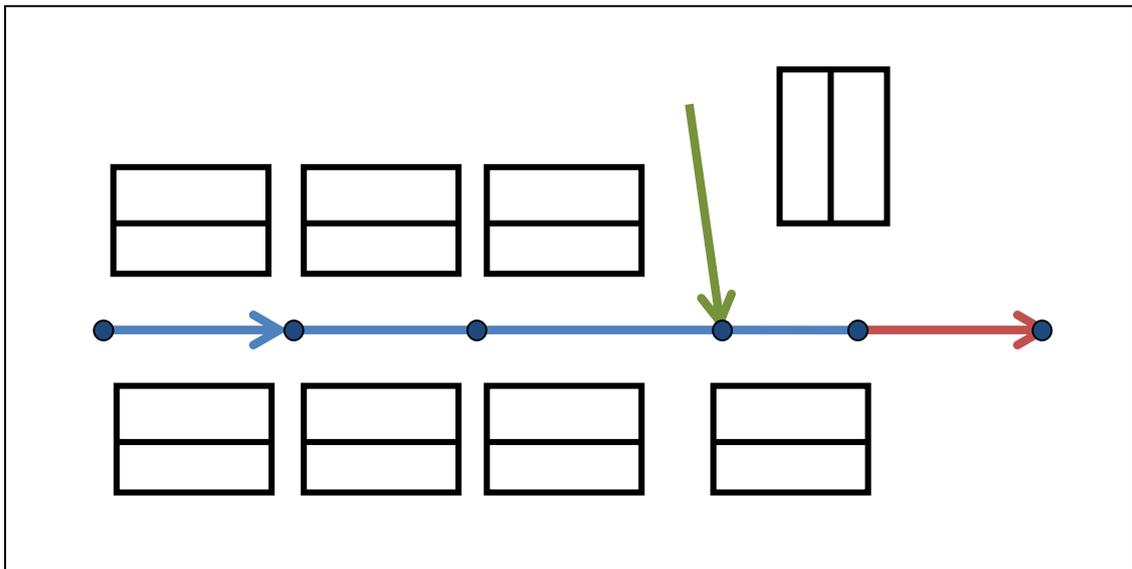
$$riesgo = probabilidad \times consecuencia$$

Así pues, un evento con probabilidad alta de ocurrencia puede tener un riesgo bajo si las consecuencias que tienen son bajas y viceversa. Esto indica que el análisis de los problemas basados en el riesgo puede dar resultados distintos a los esperados a priori, ya que en muchos casos se tiende a analizar las probabilidades de los eventos independientemente de las consecuencias que éstos tengan.

En el caso del análisis de cuencas urbanas se propone estudiar una serie de riesgos, relacionados con aspectos como la inundación y la polución, para calificar el estado de la cuenca y de su red de drenaje. En base a éstos se puede valorar la severidad de las afecciones en la cuenca.

Por ejemplo, podemos analizar el riesgo de inundación interna (tipo de inundación que afecta a viviendas) debido a obstrucciones en la red de saneamiento para el siguiente caso ideal:

Figura 2.1.-Estudio de Riesgo de Inundación Interna Red Simplificada



La figura 2.1 muestra una red de saneamiento simplificada en la que asumimos que todas las tuberías tienen similares características (misma pendiente, mismo material, mismo diámetro, misma edad, etc.).

Al estar todas las tuberías en la misma zona podemos asumir que todas tienen la misma probabilidad de sufrir obstrucciones; supongamos que tienen una probabilidad de 0.2 obstrucciones al año.

El número total de obstrucciones esperadas en un año será de 1.2 obstrucciones al año, ya que realizamos el análisis sobre un sistema de seis tuberías (cuatro de color azul, una de color verde y una de color rojo).

En cambio, las consecuencias de la obstrucción serán diferentes para cada tubería. Cabe esperar que el número de viviendas afectadas si se produce una obstrucción en la tubería roja será mayor que si se produce una obstrucción en la tubería azul situada más aguas arriba.

Suponiendo los valores mostrados en la tabla 2.1 podemos calcular el riesgo total de inundación interna debido a obstrucción de tuberías en el área analizada.

Tabla 2-1.- Cálculo del Riesgo en una Red Simplificada

	probabilidad (obstrucciones/año)	consecuencia (InundacionesInternas/obstr)	RIESGO (InundacionesInternas/año)
tubería roja	0.2	6	1.2
tubería verde	0.2	1	0.2
tubería azul 01	0.2	5	1
tubería azul 02	0.2	3	0.6
tubería azul 03	0.2	2	0.4
tubería azul 04	0.2	0	0
total	1.2	total	3.4

En este caso el riesgo total de inundación interna debido la obstrucción de tuberías sería de 3.4 viviendas inundadas por año para el área analizada.

El ejemplo pone de manifiesto que tuberías con la misma probabilidad de obstrucción tienen distintas consecuencias para en este caso las viviendas que forman parte de la cuenca urbana.

2.2 Clasificación de Riesgos

El estudio y análisis de cuencas urbanas basado en la evaluación de riesgos requiere una clasificación adecuada de los mismos que permita conocer el estado de la cuenca y sirva de base para continuar con la etapa de investigación, construcción de los modelos y desarrollo de soluciones.

Mediante la definición de los riesgos a analizar es posible su valoración y en base a ella su posterior análisis. En este punto es donde entraría la priorización de objetivos para la cuenca que vendría dada por el gestor de la misma.

La siguiente clasificación de riesgos (Nguyen, 2013) aborda los principales aspectos a tratar en el análisis de cuencas urbanas:

- Inundación interna (Causas Hidráulicas): Mide el riesgo de inundación interna en viviendas desde la red de saneamiento debido a restricciones hidráulicas de la red, como pueden ser diámetros insuficientes, mal diseño o mala ejecución.

- Inundación interna (Otras Causas): Mide el riesgo de inundación interna en viviendas desde la red de saneamiento debido a otras causas no hidráulicas como colapsos de tuberías, obstrucciones, fallos en bombeos, etc.
- Inundación externa (Causas Hidráulicas): Mide el riesgo de inundación externa a viviendas como por ejemplo carreteras, parques, etc... debido a restricciones hidráulicas de la red.
- Inundación externa (Otras Causas): Mide el riesgo de inundación externa a viviendas debido a otras causas no hidráulicas.
- Polución (Causas Hidráulicas): Mide el riesgo de vertido desde la red de saneamiento de aguas residuales potencialmente contaminantes para el medio natural debido a causas hidráulicas.
- Polución (Otras Causas): Mide el riesgo de vertido desde la red de saneamiento de aguas residuales potencialmente contaminantes para el medio natural debido a otras causas.
- Incumplimiento de Normas de Vertido: Mide el riesgo de incumplimiento de las normas de vertido en la red de saneamiento o en estructuras de la misma como pueden ser tanques de tormentas debido a descargas prematuras o por algún otro tipo de incumplimiento.
- Calidad del Efluente (EDAR): Mide el riesgo de fallo para los estándares demandados en los parámetros de calidad de las aguas residuales tratadas.
- Olores: Mide el riesgo de propagación de olores desde la red de saneamiento, estaciones de bombeo, depuradoras u otras estructuras que formen parte del sistema de drenaje urbano.
- Obstrucciones: Mide el riesgo de obstrucción en el sistema de drenaje urbano.
- Colapsos: Mide el riesgo de colapso en un tramo o localización del sistema de drenaje urbano.
- Mantenimiento no planificado: Mide el riesgo de fallo de alguna de las estructuras que componen la red de drenaje que desemboca en una operación de mantenimiento no planificado.

- Otros riesgos: Durante el estudio de ciertas cuencas pueden identificarse riesgos locales que no tengan cabida en la clasificación dada aunque pueden ser igualmente importantes. Cualquier riesgo que se considere de entidad debe ser incluido en el estudio de la cuenca.

La unidad de medida de los riesgos es (*número de incidentes / año*) obtenidos como multiplicación de la probabilidad de la causa del incidente por la consecuencia que cuantifica el impacto sufrido en la cuenca a causa del incidente.

La identificación de cada uno de los tipos de riesgo expuestos anteriormente se realiza en dos fases:

- Una primera fase de análisis de datos históricos en la cuenca y modelos existentes que permite localizar los riesgos en base a la clasificación proporcionada. En esta primera fase no sólo se analizan datos, es conveniente establecer contacto con los operarios que mantienen la red y con la población para tener un conocimiento mejor de la red de drenaje urbano.
- La segunda fase de análisis incluiría la revisión de los riesgos y ampliación en su caso mediante la utilización de modelos hidráulicos y de deterioro de la red que permiten conocer zonas de riesgo no detectadas en la primera fase.

En ambas fases es importante señalar para cada riesgo la confianza que se tiene en su identificación. Por ejemplo, al construirse el modelo hidráulico de la red de drenaje existen zonas en las que la calidad de los datos y la calidad de la verificación es inferior a otras por lo que la confianza en los riesgos predichos por el modelo es menor. La confianza que se tiene en los riesgos de la cuenca debe ser estudiada cuando se realiza el análisis, ya que en función del nivel de las actuaciones que se quieren realizar pueden descartarse riesgos identificados con un nivel de confianza bajo.

2.3 Valoración de Riesgos

El análisis de la cuenca en base a los riesgos identificados en ella requiere la catalogación o valoración de los riesgos que establezca e identifique las zonas con mayor riesgo.

En función de la severidad en cada uno de los riesgos propuestos en el punto anterior se establece el coste que tiene ese riesgo para un nivel de severidad dado.

La valoración del coste de los riesgos en función de su severidad se establece mediante dos vías principales:

- En primer lugar la entidad responsable de la explotación de la red de drenaje urbano debe establecer para cada riesgo y nivel de severidad el coste del riesgo en función de la importancia que éste tenga.
- En segundo lugar deberían realizarse encuestas a la población de manera que los costes establecidos por la entidad responsable de la explotación puedan modificarse en función de la percepción de los usuarios del sistema de colectores; las encuestas irían encaminadas principalmente a conocer en qué tipos de riesgos la población invertiría el dinero para disminuirlos.

Así pues, conociendo la valoración de los riesgos se puede conocer qué zonas tienen mayor riesgo. En base a esto se pueden planificar las intervenciones y, en su caso, las investigaciones a realizar para incrementar la confianza.

El coste anual de cada uno de los riesgos se obtiene multiplicando el valor obtenido de cada uno de los riesgos para cada uno de los niveles de severidad por la valoración de cada uno de los niveles de severidad de los riesgos.

Los niveles de severidad (Nguyen, 2013) para cada uno de los riesgos se enumeran a continuación:

- Inundación interna (Causas Hidráulicas y Otras Causas): se establecen cuatro niveles de severidad, ordenados de menor a mayor:
 - Uso restringido del inodoro.
 - Daño no permanente: definido como daño interno a la propiedad fácilmente limpiable y desinfectable.
 - Daño reparable: definido como daño a partes de la vivienda que son fácilmente sustituibles como electrodomésticos.
 - Daño irreparable: definido como daño a partes del inmueble que requieren de obras para restablecer su situación original.

- Inundación externa (Causas Hidráulicas y Otras Causas): se establecen cinco niveles de severidad, ordenados de menor a mayor:
 - Áreas públicas: definido como inundación que afecta a áreas comunes como parkings o parques.
 - Carreteras, caminos o accesos: incluye también caminos peatonales.
 - Propiedades privadas no residenciales: incluiría parkings privados o por ejemplo estaciones depuradoras entre otros.
 - Propiedades privadas residenciales permitiendo su acceso: definido como inundaciones en zonas externas de propiedades privadas que permiten el acceso de los residentes a sus viviendas.
 - Propiedades privadas residenciales obstaculizando el acceso: definido como inundaciones en zonas externas de propiedades privadas que impiden el acceso de los residentes a sus viviendas.

- Polución (Causas Hidráulicas y Otras Causas): se establecen cuatro niveles de severidad, ordenados de menor a mayor:
 - Categoría 4: definido como aquél nivel de polución que no origina impacto ambiental.
 - Categoría 3: definido como un nivel de polución que tiene un impacto menor en el medio ambiente, como por ejemplo un pequeño vertido con impacto visual únicamente.
 - Categoría 2: definido como un nivel de polución que tiene potencial de tener un impacto medioambiental negativo, como por ejemplo puede ser la cancelación de un evento acuático deportivo.
 - Categoría 1: definido como un nivel de polución que origina un impacto medioambiental mayor, como por ejemplo la muerte de peces en un río.

- Incumplimiento de Normas de Vertido: se establecen cuatro niveles de severidad, ordenados de menor a mayor:

- Vertido ilegal: definido como aquél vertido que se da en un punto no consensuado para ello, por ejemplo debido a la rotura de una tubería que discurra paralela a un río.
- Vertido prematuro: se produce cuando un aliviadero vierte al cauce público con una dilución insuficiente de la carga contaminante. Esto puede producirse por ejemplo si un aliviadero está mal diseñado y vierte antes de que el caudal pasante alcance un determinado valor mínimo.
- Vertido sin enrejado: se produce en aquellos aliviaderos en los que se exige un determinado enrejado previo al vertido y o bien no disponen de él, o bien está mal ubicado o en malas condiciones de conservación.
- Otros incumplimientos en las reglas de vertido: incluiría cualquier otro tipo de incumplimiento especificado en las normas de vertido y que sea considerado de una gravedad mayor a los casos mencionados anteriormente.
- Calidad del Efluente (EDAR): se establecen cuatro niveles de severidad, ordenados de menor a mayor:
 - Sobretratamiento: se da cuando la calidad del efluente es excesivamente buena en comparación con los estándares demandados.
 - Fallo esporádico: se da cuando el fallo en el tratamiento se da sobre una muestra aislada.
 - Fallo acumulativo: se da cuando el efluente no cumple los estándares demandados en varias muestras.
 - Fallo continuado: se da cuando persistentemente el efluente no cumple los requisitos demandados.
- Olores: se establecen dos niveles de severidad:
 - Olores aislados: definido como el nivel de olores esporádicos que se dan a conocer mediante quejas a la compañía explotadora.
 - Olores continuados: representa el mayor nivel de severidad, en el que comunidades o barrios son afectados con una frecuencia no esporádica.

- **Obstrucciones:** Las obstrucciones son un riesgo que a su vez es causa de otros riesgos (riesgos provocados por otras causas, por ejemplo inundaciones internas provocadas en este caso por obstrucciones). Las obstrucciones no se clasifican por severidad en el análisis de riesgos ya que de alguna manera la severidad queda implícita en los riesgos que dependen de ellas.
- **Colapsos:** Al igual que las obstrucciones, los colapsos son un riesgo que a su vez es causa de otros riesgos. Tampoco se clasifican por severidad.
- **Mantenimiento no planificado:** Al igual que colapsos y obstrucciones, el mantenimiento no planificado es un riesgo que a su vez es causa de otros riesgos. Tampoco se clasifica por severidad.

Para cada uno de los riesgos por tanto existe una serie de categorías dependiendo de la severidad.

En la tabla 2.2 se muestra un resumen de los distintos niveles de severidad para cada uno de los riesgos contemplados en el análisis de las cuencas urbanas.

Tabla 2-2.- Clasificación de riesgos con niveles de severidad

RIESGO	SEVERIDAD				
Inundación interna (Causas Hidráulicas y Otras Causas)	Uso restringido del inodoro	Daño no permanente		Daño reparable	Daño irreparable
Inundación externa (Causas Hidráulicas y Otras Causas)	Áreas públicas	Carreteras, caminos o accesos	Propiedades privadas no residenciales	Propiedades privadas residenciales permitiendo su acceso	Propiedades privadas residenciales obstaculizando el acceso
Polución (Causas Hidráulicas y Otras Causas)	Categoría 4	Categoría 3		Categoría 2	Categoría 1

RIESGO	SEVERIDAD			
Incumplimiento de Normas de Vertido	<i>Vertido ilegal</i>	<i>Vertido prematuro</i>	<i>Vertido sin enrejado</i>	<i>Otros incumplimientos en las reglas de vertido</i>
Calidad del Efluente (EDAR)	<i>Sobreratamiento</i>	<i>Fallo esporádico</i>	<i>Fallo acumulativo</i>	<i>Fallo continuado</i>
Olores	<i>Olores aislados</i>		<i>Olores continuados</i>	
Obstrucciones	No se distinguen niveles de severidad			
Colapsos	No se distinguen niveles de severidad			
Mantenimiento no planificado	No se distinguen niveles de severidad			

2.4 Análisis intercuenca

En general las Administraciones o Entidades explotadoras de redes de Saneamiento se encuentran con la necesidad de decidir qué cuencas o poblaciones son prioritarias para realizar inversiones.

En otras palabras, para realizar una correcta gestión de un sistema de cuencas urbanas es necesario optimizar las inversiones.

Mediante un estudio previo a nivel estratégico de los riesgos en cada cuenca se puede jerarquizar la necesidad de inversiones y su urgencia en las distintas cuencas urbanas a gestionar.

Sin necesidad de pasar a fases posteriores de estudio en detalle de la red o construcción de modelos, se puede realizar un análisis de los datos históricos y valorar los riesgos en base a su severidad.

Mediante el análisis de los costes totales de los riesgos para cada cuenca y el análisis gráfico (que indica zonas de concentración de riesgos) se puede realizar una primera jerarquización de cuencas y áreas de mayor urgencia.

La definición de objetivos a cumplir al realizar el que podemos denominar Plan de Cuenca tendrá como consecuencia el tipo de actuaciones a realizar en la cuenca; en cada caso deben estudiarse los objetivos que deben alcanzarse, aunque la definición de objetivos generalmente podría incluirse en las siguientes alternativas:

- Objetivo de la Cuenca o Intercuenca basado en la reducción de Obstrucciones, Colapsos e Inundaciones Internas debidas a otras causas a unos valores determinados; este sería el caso de Cuencas en las que los problemas hidráulicos no prevalecen y quiere aplicarse principalmente una política de mantenimiento de la red de drenaje. Los valores objetivo podrían definirse en base a la evolución histórica, planteándose como objetivo a corto y medio plazo el volver a una situación pasada en la que la red de drenaje se comportaba mejor y los riesgos citados tenían valores menores.
- Objetivo de la Cuenca o Intercuenca basado en la reducción de los Riesgos con causas hidráulicas, principalmente de inundación y polución. En este caso, sin dejar de lado la conservación de la red de saneamiento se le da un mayor protagonismo a la disminución de riesgos hidráulicos, generalmente de inundación. En este caso generalmente se requiere una inversión en la construcción o mejora de un modelo hidráulico fiable.
- Objetivo de la Cuenca o Intercuenca basado en la eliminación de Riesgos específicos. Este caso puede darse si existen riesgos muy importantes que

sobresalgan y destaquen sobre el resto por lo que se decide mitigar únicamente ciertos riesgos.

- En general Objetivos de Cuenca mixtos dependiendo de cada caso particular a estudiar.

Como se ha visto el análisis inicial de los riesgos en una Cuenca Urbana y su posterior estudio detallado es una herramienta de ayuda a la decisión con objeto de optimizar las inversiones que se realicen en la Cuenca o Sistema de Cuencas Urbanas.

3. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

3.1. Tipos de datos existentes

La primera fase en el estudio de la cuenca urbana es la de recolección y análisis de los datos existentes. A partir de este análisis conocemos qué datos es necesario completar, y en caso de tener datos suficientes podemos comenzar con la fase de análisis inicial de riesgos.

En base a los objetivos marcados para la cuenca necesitaremos un tipo de datos u otro; por ejemplo, en el caso de querer reducir los riesgos de inundación con causas hidráulicas necesitaremos un buen conocimiento de la red de saneamiento en las zonas de mayor riesgo.

A continuación se describen los tipos de datos que pueden ser necesarios para realizar el estudio posterior de la cuenca.

PLANOS DE BASE

En la actualidad suelen estar disponibles planos temáticos georeferenciados que muestran la distribución de edificaciones, calles y zonas verdes.

Puede parecer un tema baladí, pero los planos base son esenciales en tareas tan fundamentales como la delimitación de subcuencas de drenaje de aguas residuales según las parcelas o la diferenciación de usos del suelo. La siguiente figura 3.1.1 muestra un ejemplo de plano base.

Figura 3.1.1.- Ejemplo de plano base



Este tipo de planos, denominados usualmente planos base, suelen estar disponibles en formato arcmap (archivo *.shp) o mapinfo (archivo *.tab) lo que nos permite realizar análisis geoespacial de los datos con software destinado al análisis de sistemas de información geográfica como Arcgis-Arcmap o Mapinfo.

Los planos base son esenciales para el tipo de estudio que se realiza de la cuenca ya que el estudio y análisis de datos se complementa con el análisis geoespacial y gráfico. El mapa de riesgos es georeferenciado también, por lo que un plano base actualizado facilita el análisis de los riesgos en la cuenca.

Respecto al análisis hidráulico de la red, el plano base debe contener información que posteriormente será utilizada en el análisis hidrológico; dependiendo del modelo lluvia-escorrentía que se utilice necesitaremos mayor o menor cantidad de información.

Como mínimo el plano base debe dar información acerca de qué superficies son permeables o impermeables, y qué porción de las impermeables corresponden a viales o a viviendas. En algunos casos se requiere mayor información acerca de características de los suelos, como por ejemplo si se utiliza como modelo lluvia-escorrentía el modelo de porcentaje de escorrentía de Wallingford en el que es necesario conocer un índice que representa la capacidad de retención de agua en el suelo que depende del tipo de suelo.

PLANOS DE LA RED DE COLECTORES

Es necesario disponer de un plano o capa georeferenciada de la red de tuberías y pozos lo más completo y actualizado posible. En caso de no disponerlo deberían realizarse las investigaciones necesarias.

Cuanto más detallada sea la información a este respecto será mayor el nivel de detalle en las actuaciones propuestas y mayor confianza se tendrá en los resultados.

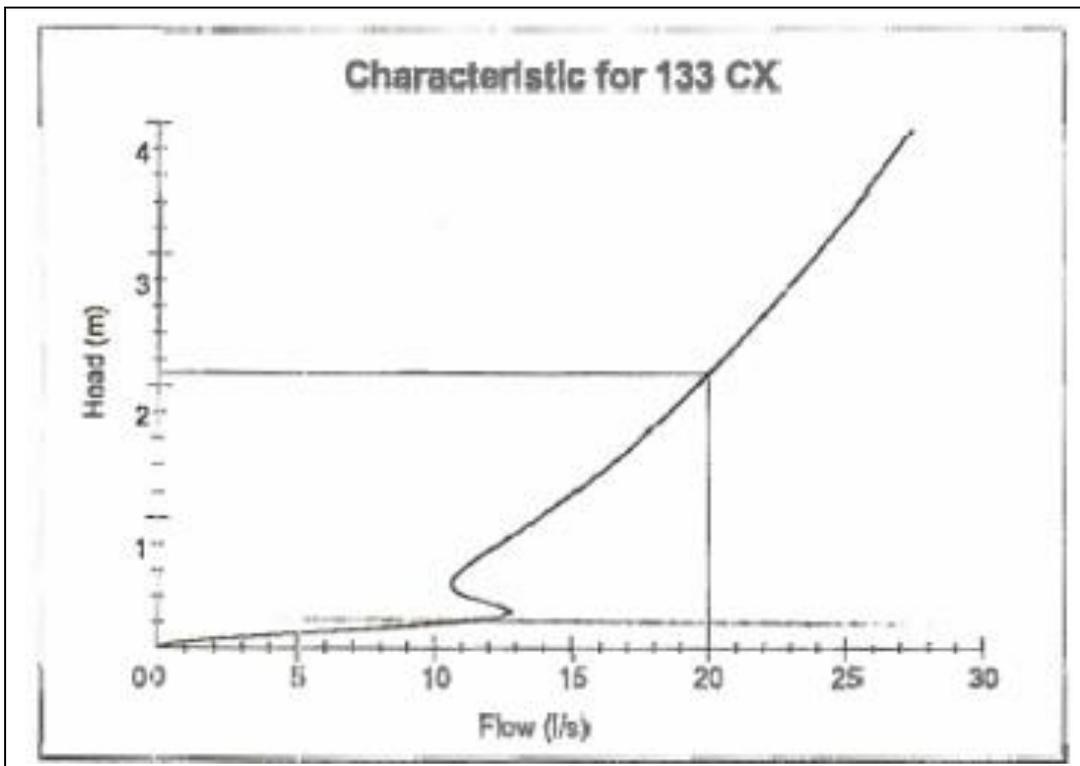
Los elementos básicos que deben incluirse en la capa de red de drenaje son:

- Tuberías, incluyendo como mínimo cotas de rasante aguas arriba y aguas abajo, sección, material, referencias de los pozos aguas arriba y aguas abajo.
- Pozos, incluyendo como mínimo la referencia del pozo (a poder ser relacionada con sus coordenadas), coordenadas, cota de trapa, forma y dimensiones de la cámara y embocadura, cota de la base del pozo, y opcionalmente material, capa de sedimentos, accesibilidad, etc...
- Aliviaderos, incluyendo como mínimo la información del pozo y además cota de aliviadero, forma y dimensiones de aliviadero, características del enrejado si está instalado, características de otros elementos en caso de estar instalados como compuertas, telemetría, reguladores de caudal (hydrobrakes), etc...
- Estaciones de bombeo, incluyendo información acerca de las bombas (caudal, niveles de puesta en marcha y paro), pozo húmedo y pozo seco, tuberías de impulsión, y características de otros elementos en caso de estar instalados como compuertas, telemetría, aliviadero, etc...
- Tanques de tormenta, incluyendo información de las dimensiones del tanque y características de otros elementos en caso de estar instalados como compuertas, telemetría, reguladores de caudal (un tipo de regulador sería por ejemplo los denominados hydrobrakes en terminología anglosajona, ver figuras 3.1.2. y 3.1.3.), etc...
- Bifurcaciones, incluyendo la información propia de los pozos; en muchos casos, dependiendo de la confianza que se tenga en los datos, será necesario comprobar que las bifurcaciones son reales y no un error topológico de la red.

Figura 3.1.2.-Hydrobrake



Figura 3.1.3.-Hydrobrake: curva característica



- Cualquier elemento regulador instalado en la red, como compuertas, válvulas, reguladores de caudal, etc..
- Estaciones depuradoras de aguas residuales, que incluyan información de los elementos que afecten aguas arriba a la red, al menos hasta donde se pueda “cortar” hidráulicamente la red, por ejemplo un bombeo hacia las unidades de tratamiento. Los aliviaderos y tanques de tormentas deben incluirse en el análisis en caso de existir.

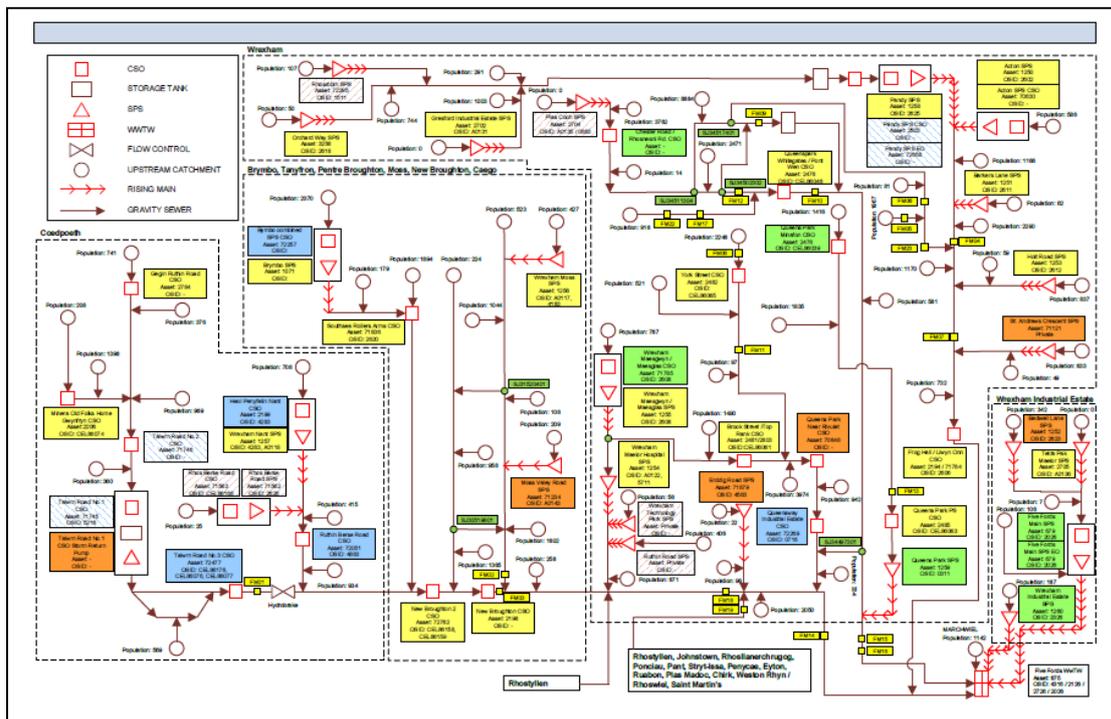
Figura 3.1.4.- Ejemplo de plano de red de saneamiento



Todos los datos dados para cada uno de los elementos deben contener información sobre su procedencia y nivel de confianza.

A partir de los datos referentes a la red de saneamiento se realiza el diagrama de flujo o plano esquemático de la red; éste incluye todas las estructuras hidráulicas y sus interconexiones, aspecto que será fundamental posteriormente para la construcción y verificación del modelo (Figura 3.1.5).

Figura 3.1.5.- Ejemplo de plano esquemático de la cuenca



TELEMETRÍA

La telemetría es la red de medición de niveles y caudales instalada a lo largo de la red de saneamiento.

En caso de existir, los datos de telemetría nos permiten comprobar niveles y caudales en estructuras críticas de la red, como aliviaderos o estaciones de bombeo por ejemplo, a la vez que se realiza el proceso de verificación de la red de caudalímetros instalados (ver punto 7.1.).

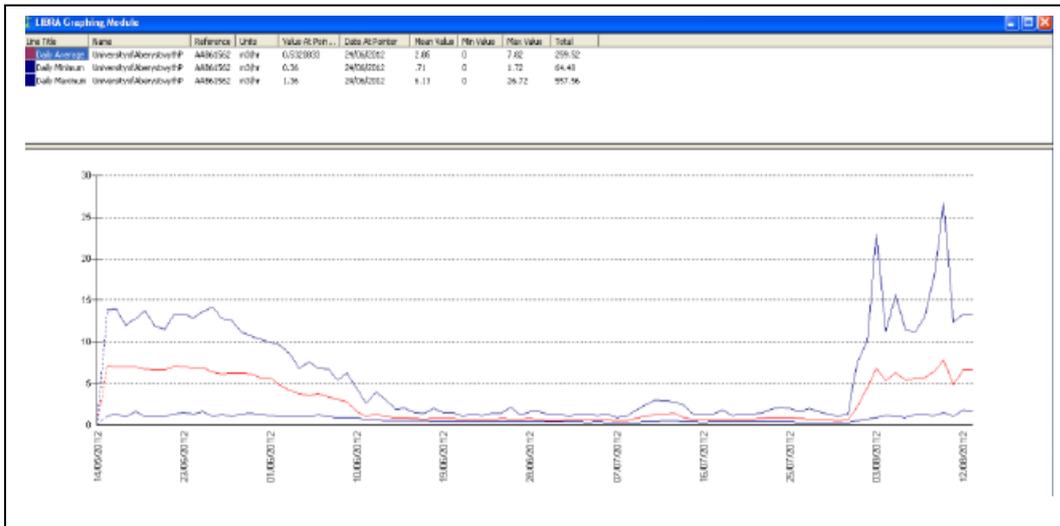
También puede servir para realizar otro tipo de comprobaciones como:

- Saber caudales bombeados y niveles de puesta en marcha y paro sin necesidad de realizar una prospección de la estación de bombeo.
- Conocer qué pasó en un punto determinado como respuesta a determinado evento histórico.
- Comprobar si los niveles de un aliviadero pudieran estar afectados por posibles obstrucciones aguas abajo.

Figura 3.1.6.- Ejemplo de estación de telemetría



Figura 3.1.7.- Ejemplo de datos de telemetría



En definitiva, es importante conocer los datos que nos pueden dar las estaciones de telemetría ya que ayudan a la construcción y verificación del modelo hidráulico y al análisis de la problemática en la cuenca.

PROYECTOS Y PLANOS EXISTENTES

Los proyectos y planos existentes dan mucha información a nivel geométrico de la red de drenaje y sus estructuras como aliviaderos, tanques de tormentas, estaciones de bombeo, etc...

En muchos casos la recopilación de proyectos y planos “as built” correspondientes a la red de saneamiento ahorra una gran cantidad de costes de investigación y prospección de la red de colectores y sus estructuras críticas.

En la fase de construcción del modelo es necesario incluir todos los datos disponibles provenientes de proyectos y “as built” en los casos en los que no se haya hecho una investigación in situ.

Al igual que el resto de datos, debe quedar clara su procedencia y el nivel de confianza que se tiene en ellos. Por ejemplo, un plano marcado como “as built” tendrá un nivel de confianza mayor que un plano de diseño, que posteriormente puede haber sido modificado durante la ejecución de la obra.

Por tanto es importante recopilar proyectos y planos existentes en el área de estudio para posteriormente incluir su información en el modelo hidráulico.

ESTUDIOS PREVIOS

Como se tratará posteriormente en el punto 5.1., como parte del estudio y análisis de la cuenca urbana es necesario llevar a cabo una serie de investigaciones o estudios de la red de drenaje que permiten principalmente:

- Proponer soluciones o descartarlas en su caso en base a datos reales.
- Construir o mejorar el modelo hidráulico, lo que permitirá mediante simulaciones del modelo el diagnóstico de los problemas, o conocimiento de la causa de los problemas, y la propuesta de soluciones.
- Analizar la vertiente no hidráulica de la red de colectores, pudiendo mejorarse las predicciones del modelo de deterioro, e incrementando la exactitud del plan de mantenimiento de la red de drenaje.

- Comprobar aspectos puntuales en la red como conexiones entre el sistema de pluviales y el de residuales.

Este tipo de estudios pueden haberse realizado anteriormente y, en caso de existir, deben tenerse en cuenta en el análisis de la cuenca. Dichos estudios son:

- Prospecciones de pozos
- Prospecciones de estaciones de bombeo
- Prospecciones de aliviaderos
- Estudios de drenaje de áreas impermeables
- Estudios de conectividad
- Estudio de la red por CCTV
- Prospecciones de Estaciones de Tratamiento de Aguas Residuales
- Estudio de Caudales

Hay que tener en cuenta en cualquier caso, que en muchos casos los estudios previos pueden haber quedado obsoletos debido por ejemplo a renovaciones que haya podido sufrir la red.

COMUNICACIÓN

Una parte importante en la fase de recolección de datos es la que se ha denominado como “Comunicación”, que incluye principalmente la recolección de datos mediante la interacción con:

- Operarios de la empresa de explotación de la red de saneamiento.
- Usuarios de la red de saneamiento.
- Cualquier otro agente implicado, como por ejemplo empresas suministradoras (bombas, compuertas, etc.)

Esta parte de la recolección de datos, que en principio puede parecer menos importante que las mencionadas anteriormente, es fundamental para conocer el estado y los principales problemas en la cuenca urbana a estudiar.

En muchos casos los operarios que se encargan directamente del mantenimiento de la red pueden poseer información que por alguna razón no haya llegado a las bases de datos.

REGISTROS HISTÓRICOS DE INCIDENTES

Como se verá en el punto 4, los registros históricos de incidentes son esenciales para realizar una primera aproximación a la estimación de riesgos en la cuenca, los cuales serán actualizados posteriormente utilizando los resultados obtenidos de los modelos construidos.

Dependiendo de la entidad explotadora los registros históricos variarán en cantidad y calidad; si estos fueran insuficientes debería plantearse el comenzar a elaborar las bases de datos de incidentes necesarias para poder analizar las zonas de mayor riesgo en los estudios que se pudieran realizar en el futuro.

Los registros históricos deben cubrir al menos la tipología de riesgos propuestos para el estudio de la cuenca:

- Inundación interna (Causas Hidráulicas)
- Inundación interna (Otras Causas)
- Inundación externa (Causas Hidráulicas)
- Inundación externa (Otras Causas)
- Polución (Causas Hidráulicas)
- Polución (Otras Causas)
- Incumplimiento de Normas de Vertido
- Calidad del Efluente (EDAR)
- Olores
- Obstrucciones
- Mantenimiento no planificado

REGLAS Y NORMAS DE VERTIDO

En caso de existir reglas o normas de vertido particulares para los aliviaderos existentes en la red de drenaje a analizar, éstas deben recopilarse para posteriormente realizarse el análisis de los riesgos de polución.

Las normas de vertido pueden venir dadas de diferentes maneras:

- Estableciendo unos requerimientos de enrejado mínimo: en este caso es sencillo comprobar si los requerimientos mínimos se cumplen.
- Estableciendo un caudal mínimo pasante previo al vertido al cauce en condiciones de tormenta que asegure una dilución mínima: en este caso debemos disponer de un modelo hidráulico que permita analizar el comportamiento del aliviadero.
- Estableciendo unas concentraciones máximas de vertido de contaminantes: en este caso deberíamos disponer de un modelo de calidad de aguas que simule la evolución de la concentración de contaminantes a lo largo de la red. Este caso supone en general una complejidad excesiva del modelo, cuya correcta verificación es prácticamente inviable.

DATOS SOBRE POBLACIÓN E INDUSTRIA

Como se explicará en el punto 6.3, donde se aborda la construcción del modelo hidráulico, es necesario conocer la distribución de la población y de la industria, así como los caudales generados y su distribución diaria (Ainger et al., 1998) (Armstrong, 2011).

Respecto a la población, comercios e industria pueden obtenerse datos de consumo de la empresa suministradora de aguas potables. Si estos datos están georeferenciados podremos estimar la distribución espacial de la generación de agua residual doméstica en la cuenca.

Para las industrias pesadas podemos conocer de manera más exacta los caudales máximos que éstas están autorizadas a verter, mediante consulta al Organismo de Cuenca o la Administración Hidráulica Autonómica.

MODELOS PREVIOS

En algunos casos puede ocurrir que la cuenca a estudiar disponga de un modelo hidráulico previo.

En este caso el modelo debe ser analizado y debe certificarse que cumple con los estándares de construcción establecidos en el punto 6 referente a la construcción del modelo.

En cualquier caso, es necesario incluir en el modelo las etiquetas que marquen que los datos provienen de un modelo previo, lo que indica que la confianza en este tipo de datos no es grande a no ser que tengamos la certeza de que los datos incluidos en el modelo previo son verídicos.

En el caso de estar previamente verificados debe consultarse toda la información disponible al respecto, como informes de verificación del modelo, y comprobar que el nivel de verificación alcanzado es suficiente (Aguas de Gales, 2011).

En cualquier caso, aunque el nivel de verificación fuera adecuado, el modelo debe ser actualizado ya que en la cuenca se producen cambios, por ejemplo en la distribución de las zonas impermeables o en la distribución de las industrias o la población.

Si el modelo existente es muy antiguo, o realizado con software de análisis hidrológico-hidráulico no compatible con el que se esté utilizando para el estudio de la cuenca puede darse el caso de que el modelo previo sea prácticamente inútil.

Por tanto, los modelos previos pueden ayudar en el análisis de la cuenca pero deben ser tratados con cautela, y en muchos casos no supondrán un ahorro en el coste de las campañas de investigaciones y prospecciones de la red de drenaje.

3.2. Análisis de Datos

El análisis de datos, dado la heterogeneidad y cantidad de los mismos se refiere más que a una depuración inicial de datos erróneos a su ordenación y posterior representación gráfica en un plano georeferenciado.

Así pues la fase de recolección y análisis de datos es fundamental para el análisis de riesgos y la construcción de los modelos tanto hidráulico como de deterioro de la red de saneamiento.

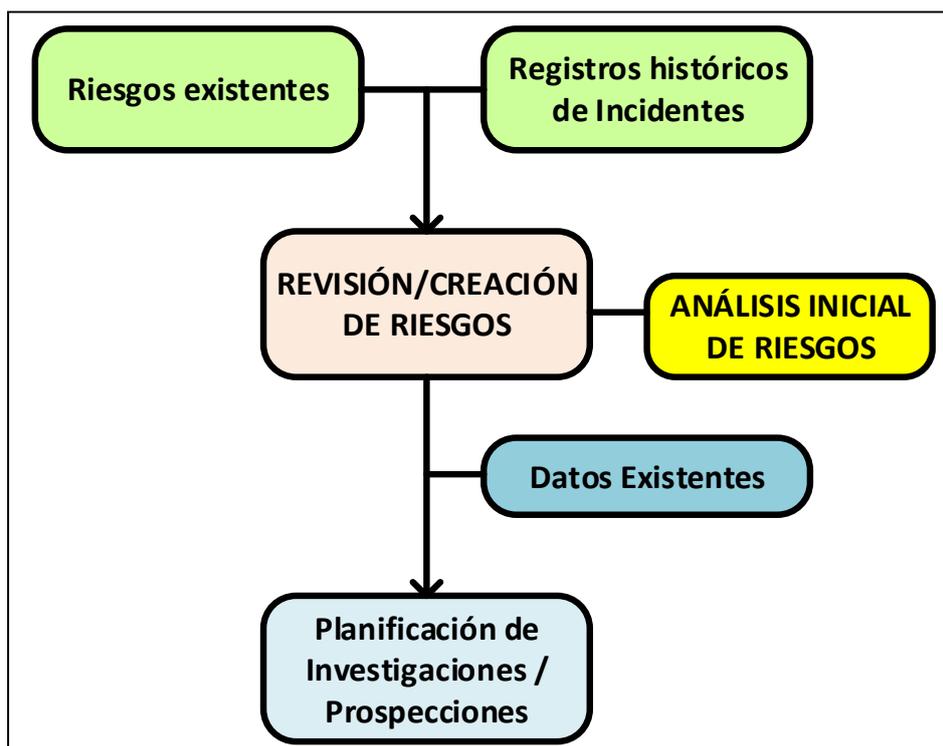
4. ANÁLISIS INICIAL DE LOS RIESGOS EN LA CUENCA

El análisis inicial de los riesgos en la cuenca permite establecer una primera valoración de la problemática en la cuenca urbana a analizar. Se trata de una primera identificación de los riesgos en base a registros de datos históricos de incidentes y bases de datos de riesgos existentes en caso de haberlos.

Mediante esta primera aproximación en la identificación de los riesgos en la cuenca es posible definir el plan de investigaciones y prospecciones a realizar para posteriormente pasar a la construcción de los Modelos. Dependiendo del presupuesto disponible y del nivel de riesgo en la cuenca se puede definir el nivel de detalle demandado en la modelación de la misma.

El proceso se resume en la siguiente figura:

Figura 4.1.- El análisis inicial de Riesgos dentro del proceso de Análisis de la Cuenca



En esta primera etapa de creación e identificación inicial de riesgos muchos de ellos necesitarán ser investigados dado la incertidumbre que existe en las bases de datos existentes (por ejemplo, eventos de inundación incluidos en la base de datos como inundación debida a causas hidráulicas por los operarios, puede ser que tras las

investigaciones pertinentes y la simulación del modelo se llegue a la conclusión de que en realidad el evento de inundación es debido a otras causas).

Las bases de datos son alimentadas durante la explotación por parte de los ingenieros, operarios y personal de mantenimiento que incluyen los incidentes registrados en la base de datos de la cuenca. Los usuarios de la red también contribuyen activamente a la implementación de las bases de datos comunicando a la entidad explotadora los incidentes que les afectan.

Por tanto los datos de partida para el análisis inicial de riesgos, además de los riesgos existentes identificados previamente, son:

- Datos de eventos de inundación, externa e interna, con causas hidráulicas u otras causas: cada evento de inundación registrado debe ser incluido en la base de datos indicando como mínimo:
 - si se trata de inundación interna o externa
 - localización de la inundación (coordenadas, ubicación de la vivienda, etc.)
 - causa de la inundación (si se estima que es por causas hidráulicas u otras causas)
 - es aconsejable en el caso de que la inundación sea por otras causas definir el tipo de causa: obstrucción, colapso, fallo de estación de bombeo, etc.
 - nivel de severidad del evento (ver clasificación de los niveles de severidad en la tabla 2.2)
 - cantidad impactada (número de viviendas afectadas, metros de carretera inundada, etc)
 - fecha de la inundación
- Datos de eventos de polución: los eventos de polución registrados por parte del personal de mantenimiento deben ser incluidos en la base de datos incluyendo como mínimo:

- localización de la polución (coordenadas, ubicación del aliviadero, etc.)
- causas de la polución (si se estima que es por causas hidráulicas u otras causas)
- nivel de severidad de la polución detectada (ver clasificación de los niveles de severidad en la tabla 2.2)
- fecha en la que se detectó la polución
- Datos de eventos de olor: los eventos de olor registrados por parte del personal de mantenimiento deben ser incluidos en la base de datos incluyendo como mínimo:
 - localización de los problemas de olores (coordenadas, ubicación de las zonas de malos olores, etc.)
 - nivel de severidad de la polución detectada (ver clasificación de los niveles de severidad en la tabla 2.2)
 - fecha en la que se detectaron los malos olores
- Obstrucciones y colapsos: las obstrucciones y colapsos registradas en las bases de datos deben incluir como mínimo:
 - localización (coordenadas, referencia de calle y número, etc.)
 - naturaleza de la obstrucción, si es por sedimentos, grasas, toallitas, etc.
 - fecha en la que fue localizada la obstrucción/colapso
- Mantenimiento no planificado: las tareas de mantenimiento no planificado registradas en la base de datos deben incluir como mínimo:
 - localización (estación de bombeo, enrejado automático en aliviadero, etc.)
 - tipo de mantenimiento realizado
 - fecha en la que se realizó el mantenimiento

A los datos mínimos propuestos pueden añadirse observaciones por parte del ingeniero de explotación o personal de mantenimiento acerca de la posible causa del incidente, que posteriormente será analizada durante el estudio de la cuenca.

La etapa de análisis inicial de los riesgos de la cuenca debe comenzar con la definición de los umbrales de riesgo; según los umbrales que se establezcan, el número de riesgos identificados variará. Para cada tipo de riesgo analizado en esta etapa inicial los umbrales de riesgo a definir son:

- Riesgos de inundación a partir de eventos de inundación: debe definirse el grado de severidad mínimo que identifique el evento como un riesgo.
- Riesgos de polución y malos olores a partir de eventos de polución y olores: debe definirse el grado de severidad mínimo requerido para la identificación del riesgo así como el número mínimo de incidentes.
- Riesgos de obstrucciones y colapsos a partir de obstrucciones y colapsos detectados en la red: debe definirse el número mínimo de obstrucciones o colapsos en un mismo punto de la red, o bien definir un radio de análisis de áreas de obstrucciones o colapsos estableciendo un número mínimo de obstrucciones o colapsos dentro del radio definido.
- Riesgos de mantenimiento no planificado a partir de mantenimientos realizados: debe definirse un número mínimo de mantenimientos realizados que se considere como riesgo.

Conocidos los umbrales para la identificación inicial de riesgos se realiza un análisis espacial de los datos contenidos en el plano georeferenciado mediante software SIG. De esta manera graficamos los riesgos en la cuenca, como se muestra en la figura 4.2.

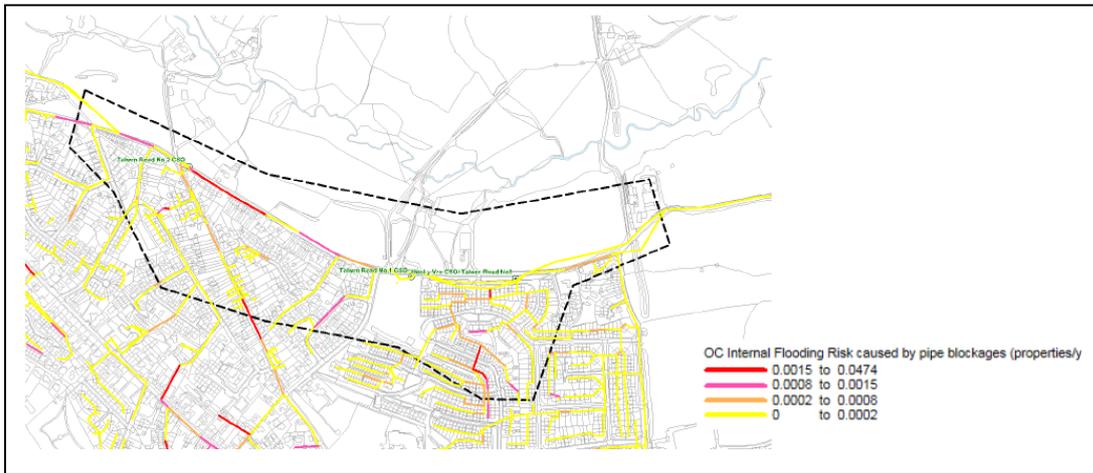
Para realizar una primera valoración de los mismos es necesario calcular la probabilidad para cada uno de ellos, cuyo cálculo se realiza de manera distinta según el riesgo sea de origen hidráulico u otras causas:

- Cálculo de probabilidad para riesgo hidráulico: En este caso el riesgo se da por la ocurrencia de un evento de precipitación. Deben contrastarse los registros de precipitación y hacerse una estimación de su periodo de retorno (T_r). La probabilidad de ocurrencia se calcula como el inverso del periodo de retorno. Si

no fuera posible calcular el periodo de retorno de la tormenta puede realizarse una estimación de la probabilidad calculada como riesgo con otras causas.

- Cálculo de la probabilidad para riesgos con otras causas: En este caso la probabilidad se calcula dividiendo el número de eventos registrados entre el número de años en los que se registra el evento.

Figura 4.2.- Ejemplo de Mapa Inicial de Riesgos



Conocida la probabilidad y severidad para cada riesgo identificado se puede realizar la valoración de cada uno de ellos como:

$$\text{ValorRiesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia} \times \text{Coste}$$

Por ejemplo, en el caso de tener un riesgo de inundación interna con severidad daño reparable afectando a tres casas contiguas con una probabilidad de 0,1 eventos al año, el valor del riesgo sería:

Probabilidad = 0,1 eventos/año ($T_r=10$ años)

Consecuencia = 3 viviendas afectadas / evento

Coste = supongamos 30.000 Euros / vivienda

El valor del riesgo sería $0,1 \times 3 \times 30.000 = 9.000$ Euros/año

Como se muestra en el cálculo, previamente deben asignarse costes a todos los niveles de severidad de los riesgos mostrados en la tabla 2.2. Este coste, como se describe en el punto 2.3, dependerá de la cuenca y de la zona que se esté analizando, así que variará

según la zona geográfica que se esté estudiando debido a la variación geográfica de los precios.

Así pues, conocida la distribución inicial de los riesgos en la cuenca y su valoración, y teniendo en cuenta otros tipos de datos existentes (ver punto 3.1.), se puede planificar la campaña de recogida de datos en función de:

- Dependiendo de la cantidad y la valoración de los riesgos, habrá zonas que serán prioritarias para el plan de investigaciones y prospecciones que dotará de un mayor nivel de detalle al modelo que se construirá posteriormente.
- Debe tenerse en cuenta el nivel de confianza que tenemos en los riesgos que han sido identificados. Un riesgo que ha obtenido una valoración muy alta pero que sin embargo tiene un nivel de confianza muy bajo puede no ser suficiente para justificar la investigación de la red en ese punto.
- Debe incluirse información acerca del estatus de los riesgos, es decir si es un riesgo ya resuelto por alguna actuación, si ha sido parcialmente resuelto (se ha reducido su probabilidad de ocurrencia), si se trata de un riesgo confirmado, o si se trata de un riesgo no confirmado.
- Como se ha dicho, la existencia de otros datos existentes puede justificar la reducción de la campaña de toma de datos a realizar; por ejemplo, si se dispone de planos suficientes "as built" de un aliviadero puede justificar que no se realice una prospección del aliviadero.
- Las estructuras críticas y colectores principales deben ser investigados aunque no estén localizados en las zonas de mayor riesgo, ya que de lo contrario el modelo hidráulico podría dar resultados no reales. Como se verá en el punto 5, las investigaciones con caudalímetros obtienen mejor resultados si son colocados en tuberías principales.
- Además de las zonas a investigar que se deducen de los puntos anteriores, en algunos casos se pueden identificar zonas con una mayor idoneidad para la implementación de soluciones de drenaje sostenible; éstas se encuentran en general en zonas aguas arriba en la cuenca, y la implementación de soluciones

de drenaje sostenible (generalmente eliminación de contribución de aguas superficiales en la red) tienen un beneficio múltiple en la red aguas abajo.

Así pues mediante la recolección y análisis de los datos disponibles, y el análisis inicial de los riesgos en la cuenca, se puede planificar la campaña de toma de datos necesaria para ampliar el nivel de detalle en el conocimiento de la misma, lo que permitirá la construcción de modelos que se ajusten a la realidad, que permiten la evaluación final de la cuenca y la propuesta de actuaciones.

5. INVESTIGACIÓN

5.1. Tipos de investigaciones

Las investigaciones, prospecciones o campañas de recogida de datos son fundamentales para la construcción de los modelos hidráulicos y de deterioro de la red de saneamiento a analizar.

El modelo hidráulico necesita nutrirse principalmente de datos geométricos de la red, aunque también de datos de estado de conservación y localización de colapsos y obstrucciones en las tuberías. También es necesario conocer en algunas zonas la distribución de áreas impermeables con un mayor nivel de detalle, así como la conectividad entre los diferentes sistemas de tuberías. Finalmente, para la verificación del modelo hidráulico es necesario realizar un estudio de caudales en la red de colectores que se comparará con los caudales obtenidos del modelo.

El modelo de deterioro (Aguas de Gales et al., 2013) es en general un modelo a escala regional que indica a nivel de tubería la probabilidad de tener una obstrucción o colapso, y la consecuencia que éstos tienen a nivel de inundaciones o poluciones. Al ser un modelo a escala regional y generalmente calculado mediante el uso de un modelo hidráulico con un nivel de detalle menor que el que se va a construir en la cuenca a estudiar, es necesario realizar una primera fase denominada de “tuning”, en la que el conocimiento local de la cuenca en cuanto a colapsos, obstrucciones e inundaciones y poluciones atribuidas a otras causas permite realizar una calibración a nivel local del modelo. En este aspecto, las investigaciones por medio de CCTV son fundamentales para obtener un modelo de deterioro que se pueda aplicar con garantías suficientes en la cuenca.

Además las investigaciones amplían el nivel de conocimiento de la cuenca, permitiendo confirmar o descartar riesgos que inicialmente se habían detectado o dar una mayor información que pueda ser utilizada en la etapa de propuesta de soluciones.

Los tipos de investigaciones que se realizan en la red de saneamiento se pueden clasificar en (Aguas de Gales, 2013):

- Prospecciones de pozos

- Prospecciones de aliviaderos
- Prospecciones de estaciones de bombeo
- Prospecciones de estaciones depuradoras de aguas residuales
- Estudios de áreas impermeables
- Estudios de conectividad
- Estudios de caudales
- CCTV (investigaciones por medio de circuito cerrado de televisión)

PROSPECCIONES DE POZOS

En general suele disponerse de una base de datos de pozos indicando referencias y coordenadas, niveles del terreno, y tuberías indicando generalmente material, tipo de sección y dimensiones. En algunos casos se suelen encontrar cotas de la solera de los colectores, aunque éstas se pueden asumir a partir de las cotas del terreno.

Utilizando la base de datos básica puede comenzar a construirse el modelo hidráulico, aunque en algunas zonas, las de mayor riesgo, necesitamos un mayor nivel de detalle.

En las zonas en las que necesitamos una información más fiable de la red se debe planificar una campaña de prospecciones de pozos. Las prospecciones de pozos deben incluir al menos la siguiente información:

- Referencia del pozo investigado y coordenadas del mismo.
- Dimensiones de la cámara del pozo y forma; se debe incluir un croquis en caso que el pozo tenga dimensiones no regulares. Si el pozo diera acceso a un tanque de tormentas deben indicarse las dimensiones y acompañarse los planos correspondientes.
- Fecha en que se realiza la prospección.
- Cota de la rasante en el pozo.
- Profundidad de la lámina de agua y de la lámina de sedimentos en caso encontrarse sedimentos.

Procedimiento de estudio y análisis de Cuencas Urbanas basado en la evaluación de Riesgos

- Relación de tuberías entrantes y salientes, indicando tipo de sección, dimensiones, material, pozos de conexión aguas arriba y aguas abajo, y cota de solera en el entronque con el pozo.
- Croquis de localización, croquis de planta y fotografías.
- Detalles de cualquier estructura de regulación incluida en el pozo como compuertas, limitadores de caudal, etc.

En las figuras 5.1.01 y 5.1.02 se muestra un ejemplo de la ficha de prospección de pozo.

Figura 5.1.01.- Ficha de prospección de pozo: Datos

Forms for use with
STC25 COMPUTERISED SEWER RECORDS

NODE REFERENCE

STC25 GRID REFERENCE

LOCATION

DRAINAGE AREA CODE

YEAR LAID

COVER SHAPE HINGED LOCK DUTY

STATUS PU FUNCTION NODE TYPE

SHAFT SIDE ENTRY REGULAT COURSES DEPTH (mm) LADDERS LANDINGS

CHAMBER SOFFIT STEPS LADDERS LANDINGS

DEPTH OF FLOW (mm) DEPTH OF SILT (mm) HEIGHT SURCHARGE (mm) COVER LEVEL (m)

SURVEY DATE

TOXIC ATMOSPHERE

EVIDENCE OF VERMIN

CONSTRUCT CODE

	UPSTREAM REFERENCE	PIPE SHAPE	PIPE SIZE (mm) (diam)	BACKDROP DIAM (mm)	PIPE MATERIAL	LINING MATERIAL	DEPTH FROM COVER (m)	INVERT LEVEL
INCOMING PIPES	A	34801818	C	450		CO	2.065	72.53
	B	34802051	C	225		VC	1.794	72.74
	C	34802762	C	150		VC	1.796	72.76
	D	GULLY	C	150		VC	1.380	73.16
	E	GULLY	C	150		VC	1.906	72.82
	F							

	DOWNSTREAM REFERENCE	PIPE SHAPE	PIPE SIZE (mm) (diam)	COND	CRITY	PIPE MATERIAL	LINING MATERIAL	DEPTH FROM COVER (m)	INVERT LEVEL
OUTGOING PIPES	X	34802738	C	450		CO		2.025	72.51
	Y								

CONDITION (7 Filled in required) COVER IRON/LADDERS SHAFT CHAMBER BENCHING OTHER

REMARKS

Figura 5.1.02.- Ficha de prospección de pozo: Fotos y croquis



Las prospecciones de pozo pueden utilizarse también para confirmar información proveniente de la base de datos existente como puede ser:

- Conexiones de redes de aguas pluviales que conectan con redes de aguas negras, que en muchos casos son errores.
- Bifurcaciones. Es necesario comprobar las bifurcaciones para conocer con más exactitud la distribución de caudales en la red.
- Pozos correspondientes a redes de colectores en desuso.
- Confirmar infiltración desde el nivel freático a la red de saneamiento.
- Confirmar la ubicación de tanques de tormenta.

La información acerca de los aliviaderos puede corroborarse o completarse con datos de telemetría si ésta está disponible. Con datos de telemetría que indiquen el nivel del agua en el aliviadero podemos conocer la cota de alivio.

En ocasiones, documentación acerca de las condiciones de vertido del aliviadero puede confirmar o completar la información de los enrejados.

Los fabricantes de enrejados o estructuras de regulación (compuertas, etc.) también son una fuente de información ya que en muchos casos disponen de una base de datos del material suministrado con un nivel de detalle en ocasiones mayor al obtenido mediante la prospección del aliviadero.

PROSPECCIONES DE ESTACIONES DE BOMBEO

Las estaciones de bombeo al igual que los aliviaderos también son estructuras críticas en la red de saneamiento.

Las prospecciones de estaciones de bombeo son más complejas que las anteriormente citadas ya que incluyen, además de la definición geométrica del pozo de bombeo y aliviadero y estructuras auxiliares en caso de existir, información acerca de la operación de las bombas y caudales bombeados.

La prospección de la estación de bombeo debe incluir al menos la siguiente información:

- Referencia del pozo de bombeo (pozo húmedo y pozo seco en su caso) y coordenadas del mismo.
- Dimensiones de la cámara del pozo y forma, incluyendo los planos de definición correspondientes, el recinto de la estación de bombeo, edificaciones auxiliares, etc.
- Fecha en que se realiza la prospección.
- Relación de tuberías entrantes y salientes (tubería de impulsión), indicando tipo de sección, dimensiones, material, pozos de conexión aguas arriba y aguas abajo, y cota de solera en el entronque con el pozo.

- Fotografías de todos los elementos constituyentes de la estación de bombeo: pozo húmedo, pozo seco, tuberías de impulsión, bombas, cuadros eléctricos, paneles de control, valvulería y calderería, edificios auxiliares, caminos de acceso, etc.
- Detalles y números de serie de las bombas.
- Si es posible incluir copias escaneadas de los manuales de operación de la estación de bombeo en caso de existir.
- Niveles de puesta en marcha y paro.
- Tipo de operación de las bombas: definir si trabajan por funcionamiento alterno, o una de las bombas trabaja para asistir a la otra en caso de caudales de entrada mayores a los habituales en situaciones de tormenta.
- Caudal bombeado: deben realizarse tests de caudal a cada una de las bombas por separado y trabajando en conjunto en caso de que la instalación esté diseñada para ello. El test de caudal se realiza mediante la medición de niveles en el pozo de bombeo y su posterior traducción a caudales conociendo el área del pozo de bombeo y el tiempo de medición. Se realiza una primera medición con las bombas paradas para conocer el caudal entrante al pozo, y posteriormente se realiza la medición del descenso de nivel en el pozo con la/s bomba/s en marcha, por lo que sumando ambos valores se conoce el caudal neto bombeado. El test se realiza tres veces, obteniendo el caudal bombeado como la media aritmética de los tres valores. La figura 5.1.4 muestra un ejemplo de test de bombeo.

Figura 5.1.04.- Ejemplo de test de bombeo

Pump	Start Time	Start Depth of Water (m)	Stop Time	Stop Depth of Water (m)	Rise/Fall (m)	Time (s)	Cross Sectional Area (m ²)	Volume Moved (m ³)	Rate	Pump Rate l/s
									l/s	
Inflow		0.450		0.800	0.350	120	23.983	8.39	69.95	
2		0.900		0.630	0.270	120	23.983	6.48	53.96	123.91
Inflow		0.500		0.840	0.340	120	23.983	8.15	67.95	
2		0.910		0.510	0.400	210	23.983	9.59	45.68	113.63
Inflow		0.500		0.840	0.340	120	23.983	8.15	67.95	
2		0.860		0.550	0.310	120	23.983	7.43	61.96	129.91

PROSPECCIONES DE EDAR

Las investigaciones en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales incluyen prospecciones de pozos, aliviaderos y estaciones de bombeo.

Para el estudio de la red de drenaje no es necesario modelar la EDAR al completo, sino que es suficiente modelar hasta la sección donde se pueda establecer un punto hidráulico de control, por ejemplo aguas abajo del aliviadero de tormentas donde el caudal máximo de tratamiento es conocido.

Por tanto, las prospecciones de EDAR están encaminadas a obtener como mínimo la siguiente información:

- Prospecciones de pozos, aliviaderos y estaciones de bombeo aguas arriba del punto final de control, incluyendo todos los documentos citados anteriormente para cada tipo de prospección.
- Planos o croquis de la EDAR indicando la conectividad entre los distintos elementos.
- Reportaje fotográfico completo.
- Fecha en que se realiza la prospección.
- Copia de todos los documentos disponibles en la EDAR: planos, manuales de mantenimiento y operación de la EDAR, manuales de los elementos de regulación de la EDAR (enrejados, válvulas, compuertas, bombas, etc.)
- Deben anotarse los comentarios de los operarios de la EDAR en referencia a la operación de la misma, sobre todo operación de compuertas, bombas y tanques de tormentas.
- Comentarios acerca de problemas en la operación de la EDAR.

La modelación hidráulica de la EDAR es generalmente el punto más complejo a nivel de construcción del modelo debido a la cantidad de elementos a modelar por lo que la prospección o investigación realizada debe proporcionar la cantidad de datos suficiente como para conocer la operación y la interacción entre todos los elementos.

Muchos de los elementos incluidos en el modelo de la EDAR requieren incluir sus reglas de operación para que el modelo represente con suficiente detalle la realidad. Las reglas

de operación pueden ser por ejemplo apertura o cierre de compuertas en función del nivel de agua en los pozos o cámaras aguas arriba o aguas abajo, la conexión/desconexión de bombas en función del caudal o nivel en un punto de la EDAR, etc.

Dependiendo del software utilizado la modelación de la operación de la EDAR podrá realizarse con mayor o menor precisión.

Puede darse el caso de no ser necesaria la modelación hidráulica de la EDAR, por ejemplo si existe una impulsión aguas arriba de la EDAR que incluya el aliviadero de tormentas y que únicamente impulse el caudal de tratamiento.

En cada caso deberá decidirse si es necesario o no modelar la EDAR y hasta qué punto es necesario modelarla.

ESTUDIOS DE ÁREAS IMPERMEABLES

En la fase de construcción del modelo asignamos el drenaje de las subcuencas definidas hacia los pozos más próximos (ver punto 6.3). La mayor fracción de escorrentía se produce desde las áreas impermeables (edificaciones y viales).

Como se ha comentado anteriormente, es necesario la modelación con más detalle en las áreas que se han identificado como prioritarias durante el análisis inicial de riesgos.

En el caso de que sólo exista una única tubería de drenaje (sistema unitario) es fácil asignar el drenaje de las áreas impermeables a esa tubería.

En el caso que coexistan varias tuberías en una calle, o que coexista la red de pluviales y fecales, la conexión de las áreas impermeables con los pozos es a priori desconocida.

Cuando no se dispone de estudios de áreas impermeables, la conexión de las áreas impermeables a los pozos se realiza en base a otras fuentes de información:

- Planos de construcción.
- Visitas de campo.
- Información proveniente de operarios de la red.

- Google Street view.
- Mapas temáticos de usos del suelo.
- Distribución de drenaje de las áreas impermeables en modelos hidráulicos previos.
- Estudios previos de drenaje de áreas impermeables.

Mediante el estudio de las fuentes citadas puede obtenerse una distribución del drenaje de las áreas impermeables suficientemente aproximada, pero para las zonas en que se necesite un mayor nivel de detalle es necesario recurrir a los estudios de áreas impermeables.

Los estudios de áreas impermeables, realizados por empresas especializadas, dan información sobre a qué sistema de drenaje están conectadas las áreas impermeables incluidas en el área que se desea sondear.

Las áreas impermeables pueden estar conectadas al sistema de pluviales, al sistema de fecales o bien pueden no estar conectadas al sistema de colectores y estar drenando directamente a cauces públicos o acequias.

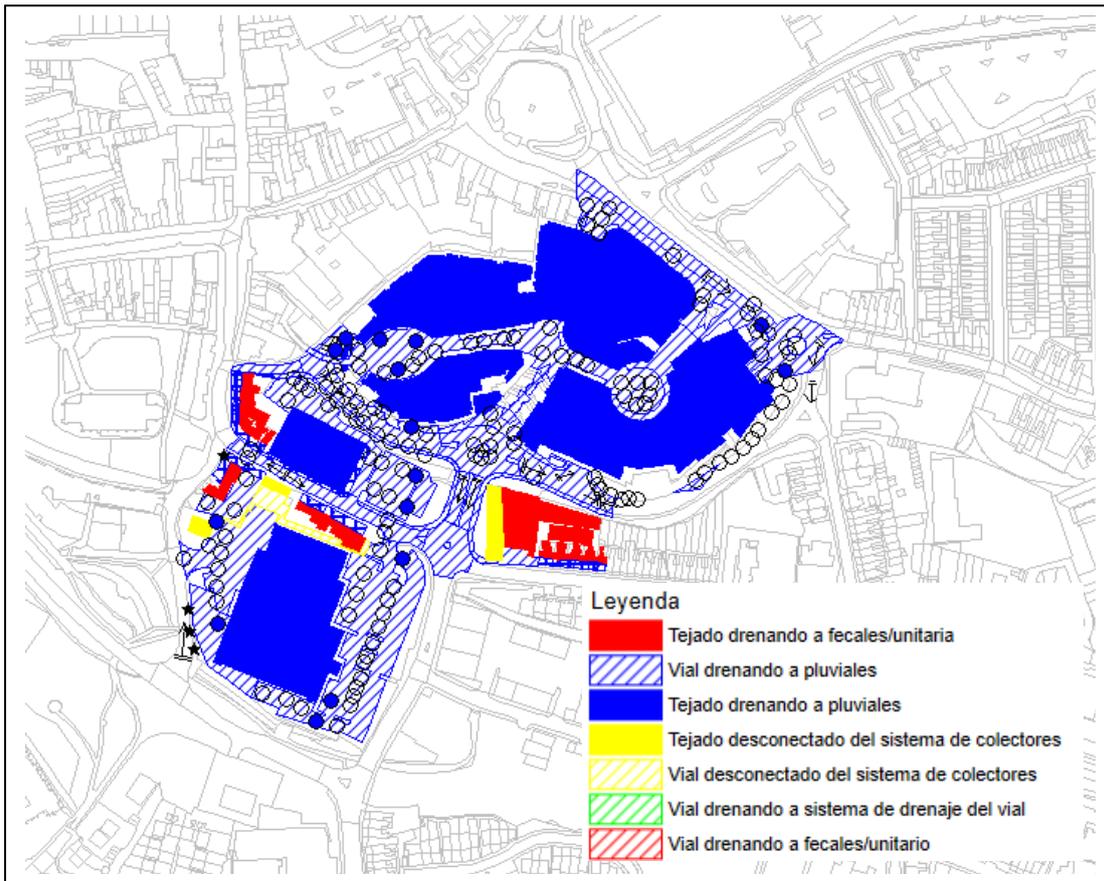
Los estudios de áreas impermeables deben incluir al menos los siguientes resultados:

- Identificación de todas las áreas impermeables dentro del área propuesta de estudio.
- Identificación de sumideros e imbornales.
- Elaboración de un plano georeferenciado donde se distingan por colores a qué sistema de drenaje drena cada una de las áreas impermeables incluidas en el área de estudio.

La figura 5.1.05 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos en un estudio de áreas impermeables.

La distribución de áreas impermeables obtenida y el drenaje a los diferentes tipos de redes se incluye en el modelo hidráulico; de esta manera se maximiza el nivel de confianza en la distribución de la escorrentía dentro de la zona estudiada.

Figura 5.1.05.- Ejemplo de plano de Estudio de Áreas Impermeables



Los estudios de áreas impermeables pueden usarse con otros fines como puede ser localizar grandes áreas impermeables drenando al sistema de fecales o unitario que puedan ser desconectadas mediante actuaciones de drenaje sostenible.

Las grandes áreas impermeables conectadas al sistema de fecales o unitario suponen un gran impacto en la red de colectores a nivel de inundaciones y también a nivel energético ya que la escorrentía de pluviales generada llega innecesariamente a estaciones de bombeo intermedias y finalmente a la EDAR donde supone un exceso de caudal a ser tratado.

ESTUDIOS DE CONECTIVIDAD

En los casos en los que los datos disponibles reflejan conexiones entre la red de pluviales y la red de fecales, o bien no se dispone de datos en algunos tramos de colector es

necesario realizar estudios de conectividad para completar los datos de la red o bien comprobar que las conexiones entre pluviales y residuales son correctas.

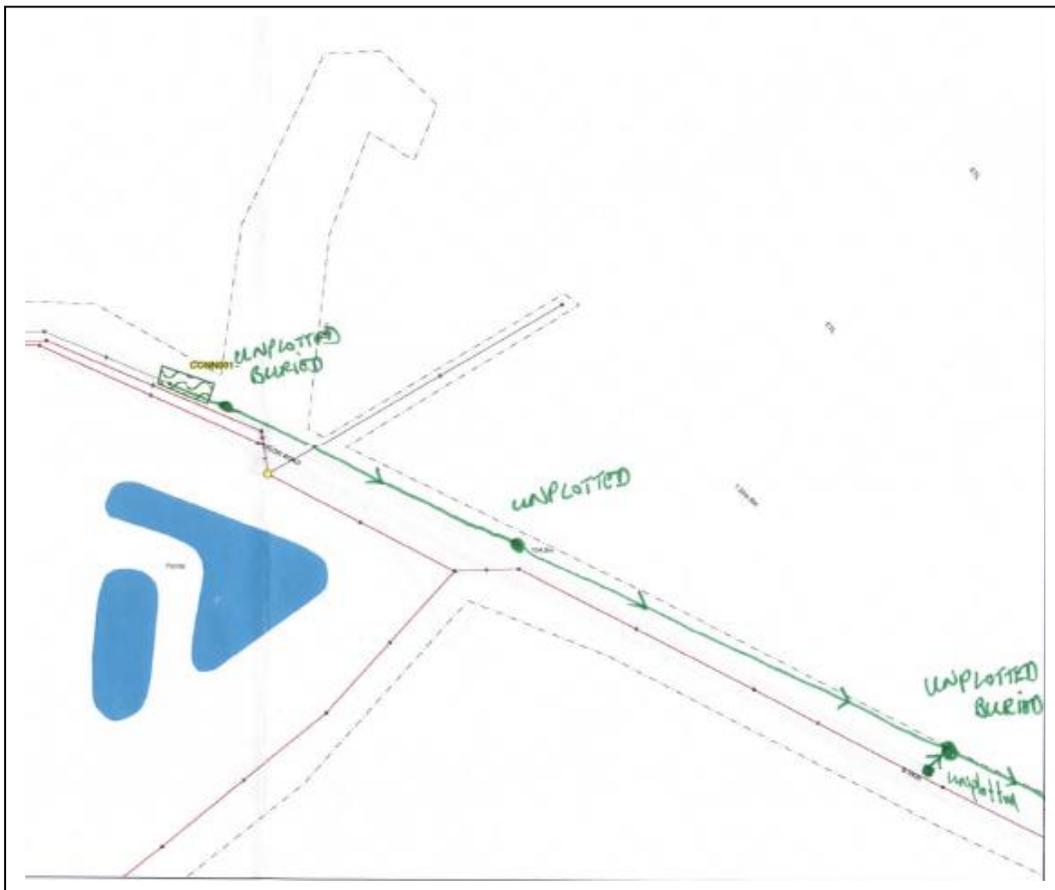
Los estudios de conectividad comprenden:

- Realizar una campaña de prospecciones de pozos en el área a estudiar, de acuerdo con lo descrito en el punto dedicado a prospecciones de pozo.
- Comprobar la conectividad entre pozos utilizando por ejemplo trazadores de colores que se añaden al agua para verificar las conexiones aguas abajo.

El resultado de los estudios de conectividad, como se muestra en la figura 5.1.06, se debe plasmar en un plano para incluirlo posteriormente en el modelo.

Las prospecciones de pozo realizadas como parte de los estudios de conectividad deben realizarse de acuerdo a lo expuesto anteriormente en el punto dedicado a ellas.

Figura 5.1.06.- Ejemplo de estudio de conectividad



ESTUDIO DE CAUDALES

El modelo hidráulico de la cuenca a estudiar se realiza en dos fases (WaPUG, 2002) (Balmforth et al., 2006) explicadas en detalle en los puntos 6 y 7:

- **Construcción:** es la fase en la que se introducen todos los datos disponibles acerca de la red de colectores y las subcuencas drenantes. Finalizada esta etapa pueden realizarse simulaciones con el modelo, pero los resultados pueden diferir de la realidad ya que incluye una serie de datos interpolados o con un nivel de confianza bajo, debido a que no es posible realizar investigaciones en el 100% de la red de colectores.
- **Verificación:** en esta fase se contrasta el modelo con datos reales por lo que se realizan las modificaciones pertinentes para que los resultados obtenidos con el modelo están dentro de unos intervalos de aceptación en comparación con los datos reales. Cuando el modelo alcanza unos niveles de verificación aceptable pueden realizarse simulaciones para comprobar el comportamiento de la cuenca para diferentes tormentas de diseño o para diseñar actuaciones.

La recogida de datos reales se realiza mediante el estudio de caudales (Drinkwater et al., 1987), que también comprende la recogida de datos de precipitación. La metodología propuesta está reglada por el Centro de Investigaciones del Agua en Reino Unido.

Los monitores de caudal, o caudalímetros, utilizados generalmente incorporan como mínimo un sensor para medir la presión y un sensor doppler para medir la velocidad.

También se utilizan sensores de nivel en los pozos de bombeo. La instalación de los monitores de caudal y de nivel se complementa con la instalación de pluviógrafos según las normas que se dan a continuación.

Figura 5.1.07.- Ejemplo de instalación de un monitor de caudal



Figura 5.1.08.- Instalación típica de un monitor de caudal

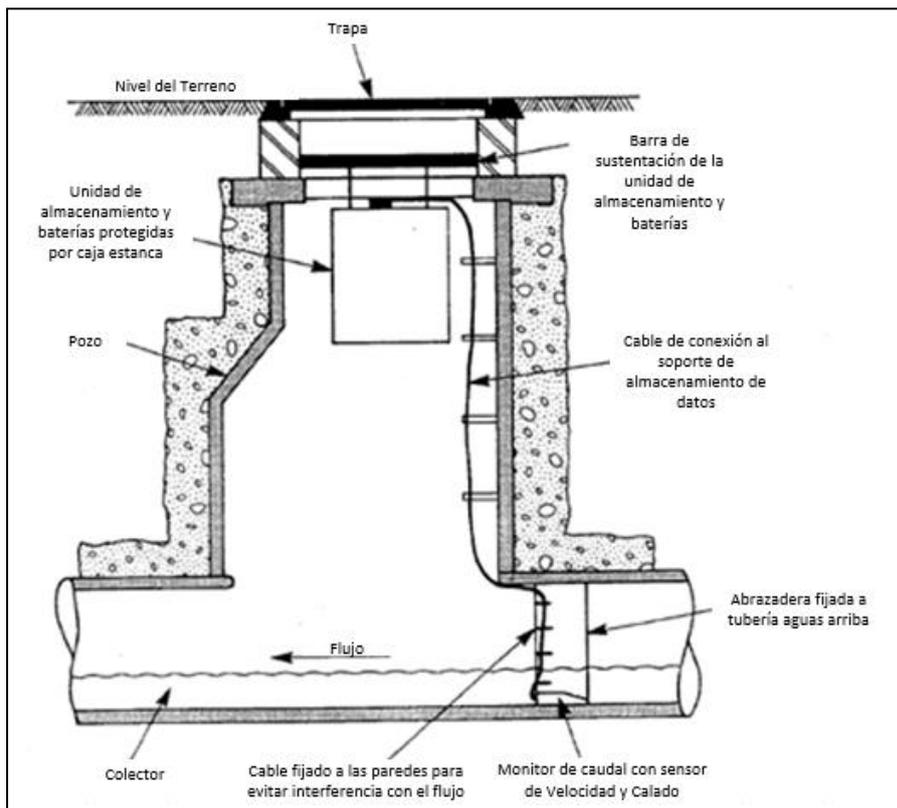


Figura 5.1.09.- Ejemplo de instalación de un pluviógrafo



Los monitores de caudal y pluviógrafos se instalan durante un período de ocho semanas, en el que se espera tomar información de tres eventos de precipitación y dos días secos (uno entre semana y uno en fin de semana); en el caso que no se registren eventos de precipitación el período de toma de datos podría extenderse. Esta regla podría variar en función de la localización geográfica.

El intervalo de toma de datos es de 2 minutos lo que representa una densidad de datos suficiente para realizar el proceso de verificación.

En caso de existir datos de telemetría en la cuenca, el intervalo de toma de datos suele ser de 15 minutos, el cual es demasiado amplio como para verificar la red de saneamiento modelada utilizando únicamente datos provenientes de telemetría.

El plan de ubicación de los monitores de caudal se realiza en base a los siguientes criterios:

- En función de las zonas de riesgos detectadas en la fase previa de análisis inicial de riesgos.
- Deben ubicarse monitores en puntos estratégicos como colectores principales ya que la calidad de los datos obtenidos en general será mejor que en colectores secundarios y realizar la verificación en las tuberías principales asegura que al menos los caudales de mayor entidad en la red están verificados.
- En función del presupuesto disponible podrá realizarse un modelo más o menos detallado, con un mayor o menor nivel de verificación.
- Deben estudiarse las estructuras críticas como aliviaderos, estaciones de bombeo, EDARs, etc. y determinarse si es necesario la ubicación de monitores de caudal.
- En el caso de partir de un modelo previo, debe estudiarse si existe alguna zona suficientemente verificada y que no haya sufrido variaciones, pues en ese caso podría evitarse la instalación de monitores.
- Los monitores de caudal deben planificarse en puntos en los que la calidad esperada de los datos sea suficiente. Las condiciones que deben cumplir las ubicaciones elegidas se explican a continuación.

La elección previa de localizaciones para los monitores de caudal y los pluviógrafos debe ser contrastada in situ con la empresa especializada encargada de la instalación previamente a que monitores y pluviógrafos sean instalados.

Esto es así porque muchas de las ubicaciones que se creen ideales no lo son cuando se realiza la inspección in situ de pozos en el caso de monitores de caudal o tejados en el caso de pluviógrafos.

Además, deben quedar bien claras y marcadas las ubicaciones deseadas para que no haya ningún tipo de error de instalación.

Respecto a la ubicación de los pluviógrafos, muchas veces no se le presta tanta atención como la ubicación de los monitores de caudal, pero hay que tener en cuenta que los datos de intensidad de precipitación son fundamentales para la verificación del modelo.

Las condiciones que debe cumplir la ubicación de los pluviógrafos son:

- Deben escogerse superficies planas.
- La superficie escogida debe ser accesible para la empresa que se encargue de su instalación y de recopilar los datos semanalmente.
- No deben existir elementos que puedan interferir en la recogida del agua de lluvia, como por ejemplo árboles cercanos.
- La ubicación debería estar a ser posible a salvo de actos vandálicos.
- Es necesario pensar ubicaciones alternativas a las ubicaciones propuestas por si no fuera posible la instalación en las ubicaciones elegidas.
- Si es posible es recomendable contactar telefónicamente con las ubicaciones elegidas para confirmar que el propietario da permiso para la instalación.
- En muchos casos los edificios públicos o colegios son ubicaciones en la que es más probable obtener permiso, aunque hay que comprobar que los horarios sean compatibles con los horarios en los que semanalmente la empresa instaladora recopilará los datos.

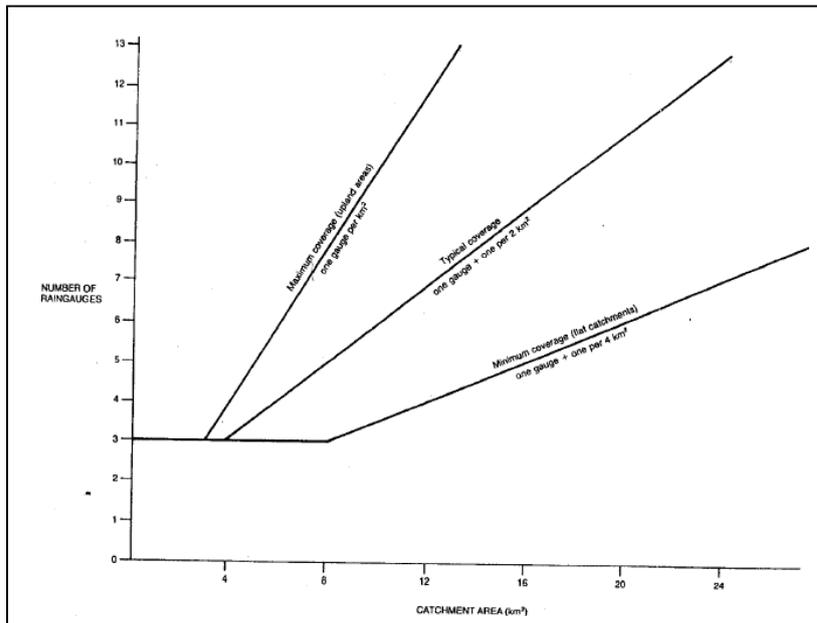
La densidad de pluviómetros a instalar debe asegurar que la variación espacial de la precipitación está suficientemente representada; además debe tenerse en cuenta que algún pluviómetro puede fallar durante al período de toma de datos.

La densidad de pluviómetros a instalar depende del área de la cuenca a estudiar, su complejidad y la topografía de la zona. La densidad de pluviómetros recomendada es:

- Independientemente del área de la cuenca, el número mínimo de pluviómetros a instalar es de tres; dos de ellos darían una idea de la variabilidad espacial de la precipitación y el tercero se instala como medida de precaución por si alguno de los otros dos fallara.
- En general, el número de pluviómetros a disponer es de uno más un pluviómetro por cada 2 Km², teniendo en cuenta que el mínimo recomendado es tres.
- En áreas montañosas es recomendable incrementar la densidad de pluviómetros instalados: se recomienda disponer un pluviómetro más un pluviómetro por kilómetro cuadrado.
- En zonas muy llanas puede reducirse la densidad de pluviómetros a uno más un pluviómetro por cada 4 Km².

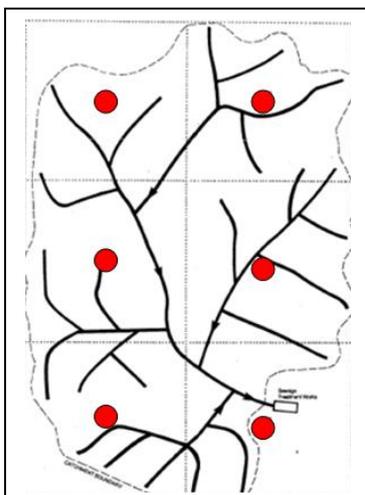
En la siguiente figura 5.1.10 se muestra en un gráfico la densidad recomendada de pluviógrafos (Drinkwater et al., 1987) en función del área de la cuenca para los tres casos comentados: caso general, caso de cuenca montañosa y caso de cuenca en terreno llano.

Figura 5.1.10.- Gráfico de densidad de pluviógrafos a instalar



Los pluviómetros deben distribuirse uniformemente en el área de la cuenca, como se muestra en la siguiente figura 5.1.11. La figura muestra una cuenca de 10 Km², en la que aplicando la regla de 1 pluviómetro más 1 pluviómetro por cada 2 Km², el número de pluviómetros (puntos rojos) a instalar es de 6.

Figura 5.1.11.- Distribución correcta de pluviómetros en una cuenca de 10 Km²



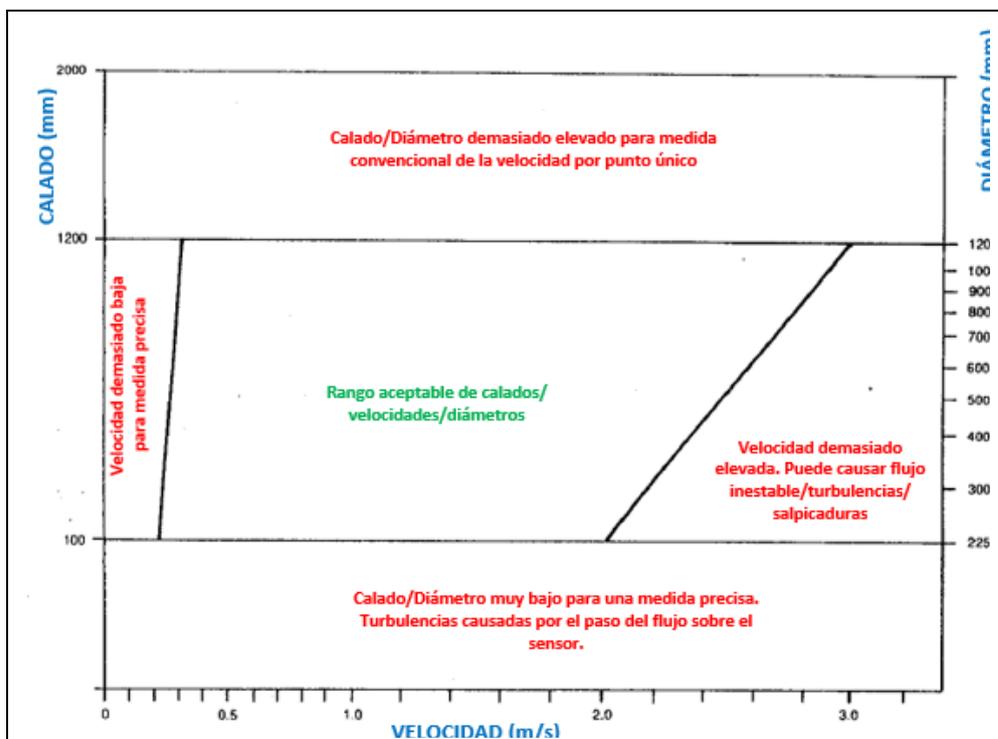
Respecto a los monitores de caudal, su correcto emplazamiento es de gran importancia, ya que si se eligen emplazamiento inadecuados los datos obtenidos no son utilizables y por tanto deben realizarse cambios de ubicación durante el transcurso del período de monitorización de las tuberías lo que conlleva en algunos casos a tener que alargar el período de investigación con los sobrecostos que ello significa.

Las condiciones que debe cumplir la ubicación de los monitores de caudal son (Drinkwater et al., 1987):

- En primer lugar el colector debe ser accesible, es decir, la apertura del pozo debe ser lo suficientemente grande para que el operario descienda y el material a instalar pueda ser introducido.
- El pozo debe garantizar las medidas de seguridad mínimas. Si el caudal es muy elevado debe verificarse si por la noche el caudal es menor; en caso de ser menor debe realizarse la instalación de noche.
- Si el pozo se encuentra en una calle o avenida muy transitada deben tomarse las medidas necesarias para que el tráfico no suponga un riesgo. Deben pedirse los permisos pertinentes a las entidades locales.
- Debe comprobarse que la concentración de gases nocivos para la salud en el interior del pozo es suficientemente baja.
- Las condiciones de flujo no deben ser excesivamente turbulentas.
- El monitor de caudal debe ser instalado en tuberías entrantes al pozo, ya que en ellas el nivel de turbulencia es menor.
- En el caso de haber un escalón desde la tubería hacia el pozo, el monitor debe ser instalado suficientemente dentro de la tubería para que no tome velocidades y calados erróneos producidos por la proximidad al salto de agua, donde se produce el calado crítico. En general el monitor debe ser introducido en la tubería una longitud entre 2 y 4 veces su diámetro.
- Comprobar que el diámetro de la tubería es compatible con los monitores de caudal a instalar; generalmente no se dispone de monitores de caudal para tuberías de diámetro menor a 200 mm.
- En función de los calados esperados en la tubería la ubicación puede no ser la idónea:

- Si el calado es menor que 10 cm., los valores de calado obtenidos no serán suficientemente precisos ya que el flujo tenderá a pasar sobre el sensor.
- Generalmente para calados mayores a dos metros habría que consultar si el tipo de sensor instalado ofrece lecturas con suficientes garantías.
- El flujo debe ser lo más uniforme posible para la correcta medición de velocidades.
- Deben evitarse tuberías y pozos propensos a acumular sedimentos o elementos transportados en suspensión que afectan a la lectura del sensor de velocidad.
- Velocidades inferiores a 0,2 m/s no son apropiadas para la instalación de monitores de caudal, ya que los datos obtenidos no tendrán suficiente precisión.
- Deben contemplarse localizaciones alternativas en el caso de que la localización original no sea ideal.
- Dependiendo del diámetro, velocidad y calados se proponen unos intervalos ideales para la instalación de monitores de caudal como se muestra en la figura 5.1.12.

Figura 5.1.12.- Recomendaciones de ubicación para monitores de caudal



Planeadas las ubicaciones de los monitores de caudal y pluviógrafos y sus ubicaciones alternativas, debe realizarse una visita in situ con la compañía especializada que instalará los monitores para comprobar las ubicaciones y marcar las ubicaciones finalmente acordadas.

Tras realizarse la instalación, la compañía instaladora debe suministrar al menos:

- Fotografías de cada uno de los monitores de caudal y pluviógrafos instalados para realizarse la comprobación de la ubicación.
- Informe para cada uno de los monitores de caudal y pluviógrafos instalados que incluya información acerca de la ubicación, características de la tubería, características del flujo, existencia de sedimentos y fecha de toma de datos.

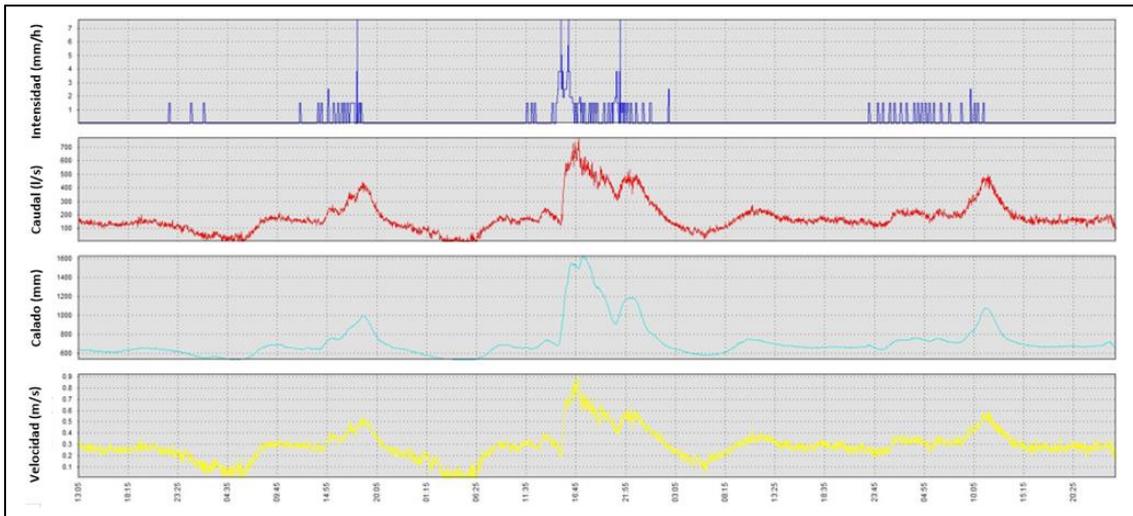
Una vez comprobadas las instalaciones iniciales comienza el período de análisis de datos semanal. Cada semana la compañía instaladora descarga los datos y los envía para la comprobación de su calidad. En base a la comprobación de datos puede conocerse qué ubicaciones no son idóneas.

Debe comprobarse igualmente si se producen los eventos de precipitación que cumplan los mínimos que a priori se establezcan, dependiendo de la zona de estudio. Los valores comúnmente utilizados son:

- Duración del evento mayor que 1 hora.
- Precipitación total registrada mayor que 5 mm.
- Intensidad máxima mayor que 6 mm/h, por un tiempo mayor que 4 minutos.
- El pluviógrafo que registre una precipitación que varíe más del 40% respecto a la media se considera nulo.

El análisis de datos se realiza mediante la visualización de los mismos comprobando que los resultados obtenidos son los esperados, por ejemplo, ante una tormenta registrada la velocidad, el calado y el caudal (calculado a partir de la velocidad, el calado y el tipo de sección) deben aumentar (figura 5.1.13).

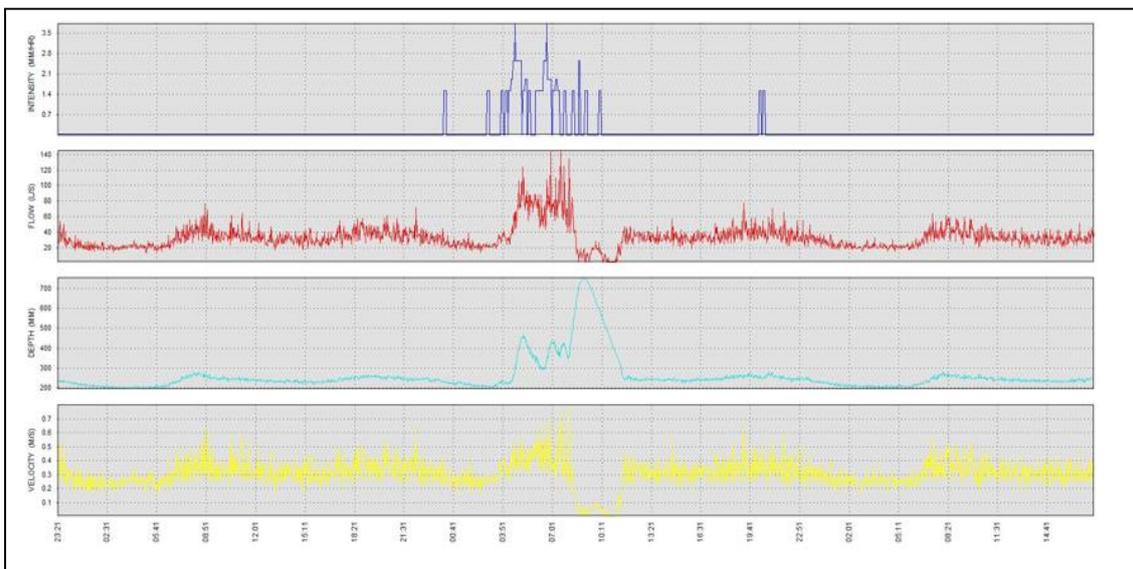
Figura 5.1.13.- Respuesta a una tormenta registrada por el caudalímetro



Existe una casuística en el análisis de resultados que permite interpretar lo que está pasando en el colector, y a su vez saber si las condiciones de la instalación del monitor de caudal son mejorables si se modifica su ubicación.

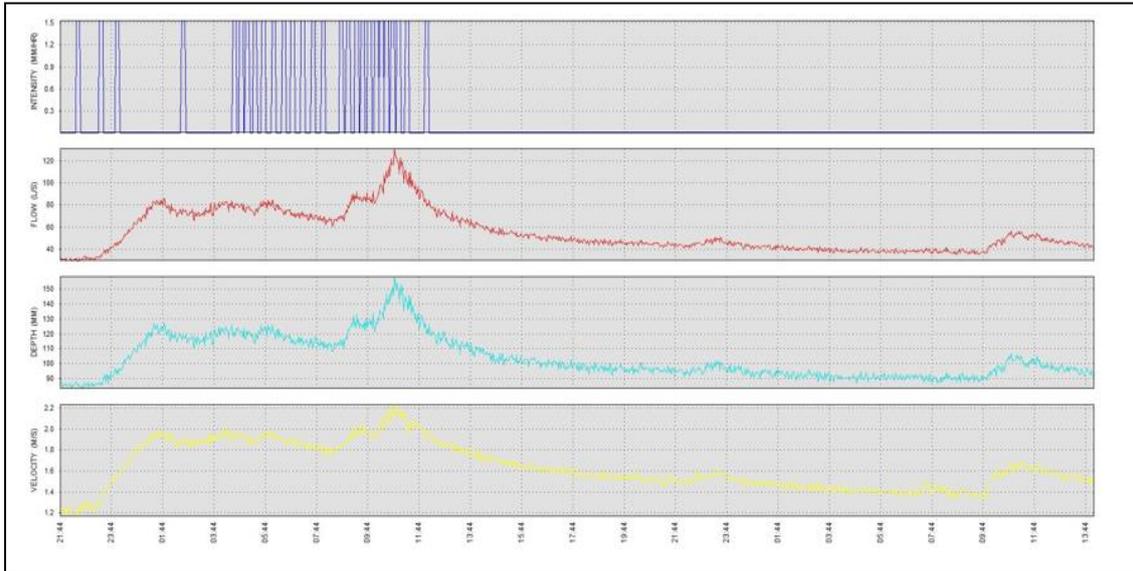
En el caso de que el colector entre en carga, el caudalímetro debe registrar un decremento en la lectura de la velocidad a la vez que el calado sobrepasa el valor del diámetro del colector (figura 5.1.14).

Figura 5.1.14.- Estudio de Caudales: Colector en carga



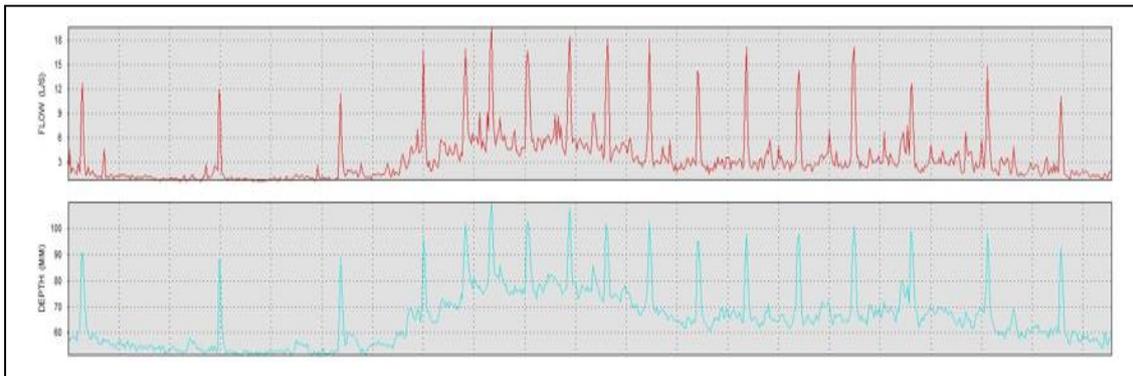
En el caso de haber infiltración hacia el sistema de colectores, los datos recogidos muestran una respuesta lenta (figura 5.1.15).

Figura 5.1.15.- Estudio de Caudales: Respuesta lenta



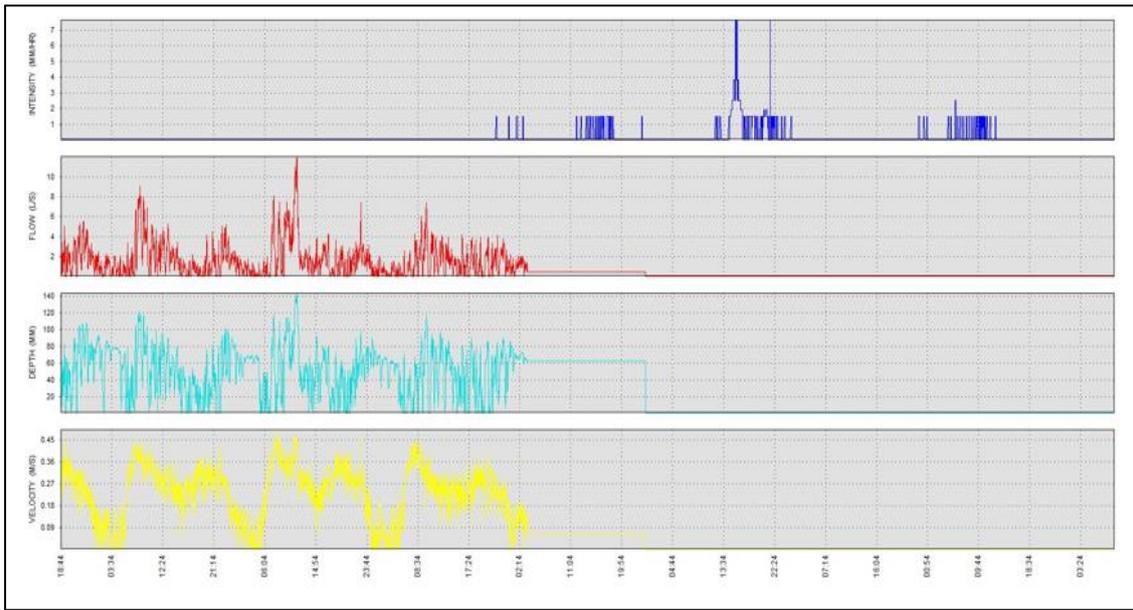
Los bombeos también deben ser captados por el caudalímetro como se muestra en la figura 5.1.16 como incrementos puntuales de caudal.

Figura 5.1.16.- Estudio de Caudales: Bombeo



Mediante el análisis gráfico de los datos también se puede detectar cuándo un monitor de caudal está funcionando mal y debe sustituirse por otro. Como puede comprobarse en la figura 5.1.17 llega un momento en el que el caudalímetro deja de registrar datos, incluso registrándose precipitación por parte de un pluviógrafo.

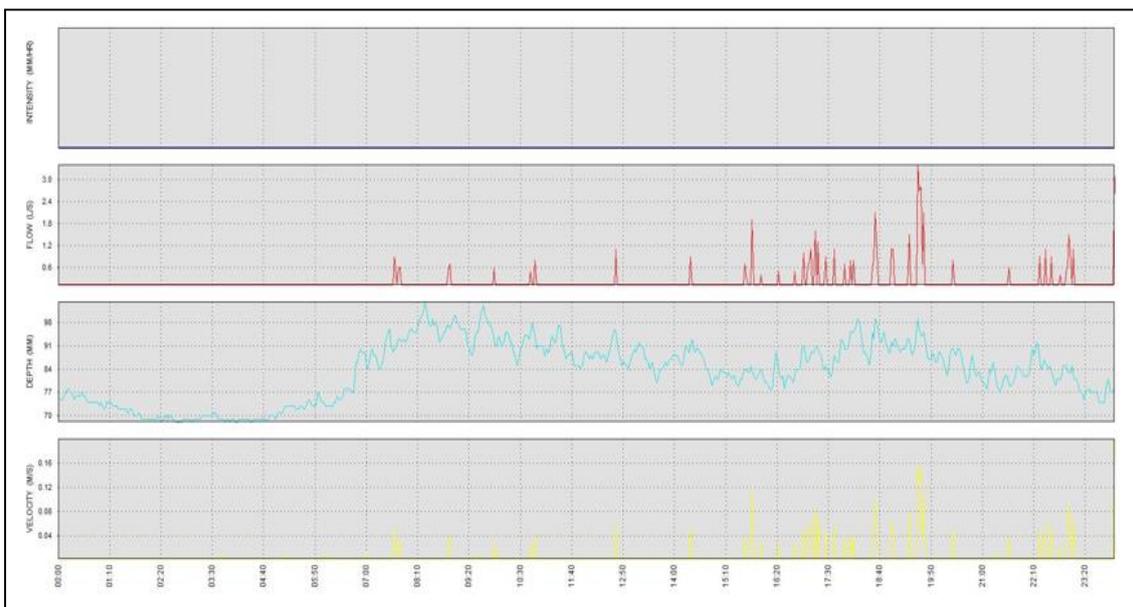
Figura 5.1.17.- Estudio de Caudales: Mal funcionamiento



En algunos casos el monitor se ubica en un colector que a priori parece idóneo pero que tras analizar los datos se comprueba que semana tras semana el sensor de medición de velocidad es afectado por materia transportada en suspensión.

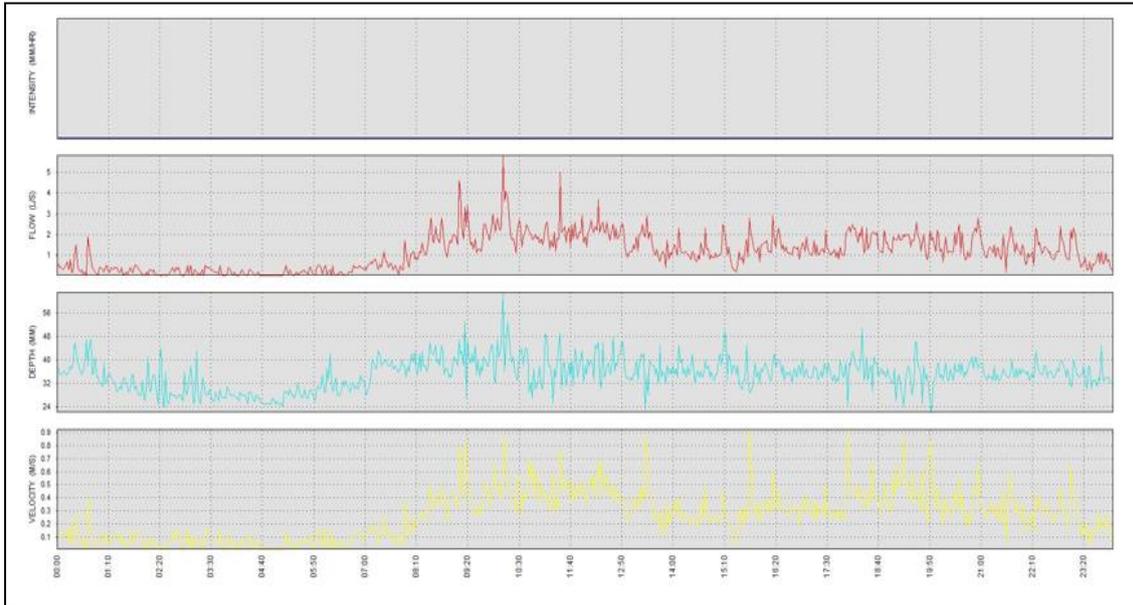
En estos casos, como se muestra en la figura 5.1.18, los datos obtenidos son de mala calidad para velocidades y caudales por lo que el monitor debe ser ubicado en un colector alternativo.

Figura 5.1.18.- Estudio de Caudales: Afección de lecturas por materia en suspensión



Si el flujo es muy turbulento se obtienen mediciones erráticas (Figura 5.1.19); en este caso es recomendable cambiar de ubicación el monitor.

Figura 5.1.19.- Estudio de Caudales: Flujo turbulento



Existe por tanto una amplia casuística a analizar durante el período de toma de datos del estudio de caudales.

De este análisis depende la calidad de los datos que se obtendrá, y de la calidad de los datos de intensidad de precipitación, caudal, velocidad y calado depende la calidad de la verificación del modelo.

Por tanto el estudio de caudales en la red, además de complejo, es un eslabón clave para que los resultados que obtengamos del modelo hidráulico, que será verificado en base a este estudio, sean suficientemente fiables.

CCTV

El estudio de la red de colectores por medio de cámara por circuito cerrado de televisión (CCTV) permite conocer con exactitud el estado estructural de la red de colectores; el estado estructural no solamente se refiere a la vertiente resistente de la tubería

(fracturas, colapsos, etc.), sino también a la vertiente relacionada con obstrucciones (sedimentos, entronques que disminuyen la sección, debris, raíces, etc.) e infiltración a la red de colectores.

En la siguiente figura 5.1.20 se muestra una cámara estándar de inspección de colectores.

Figura 5.1.20.- Cámara estándar para inspección de colectores (CCTV)



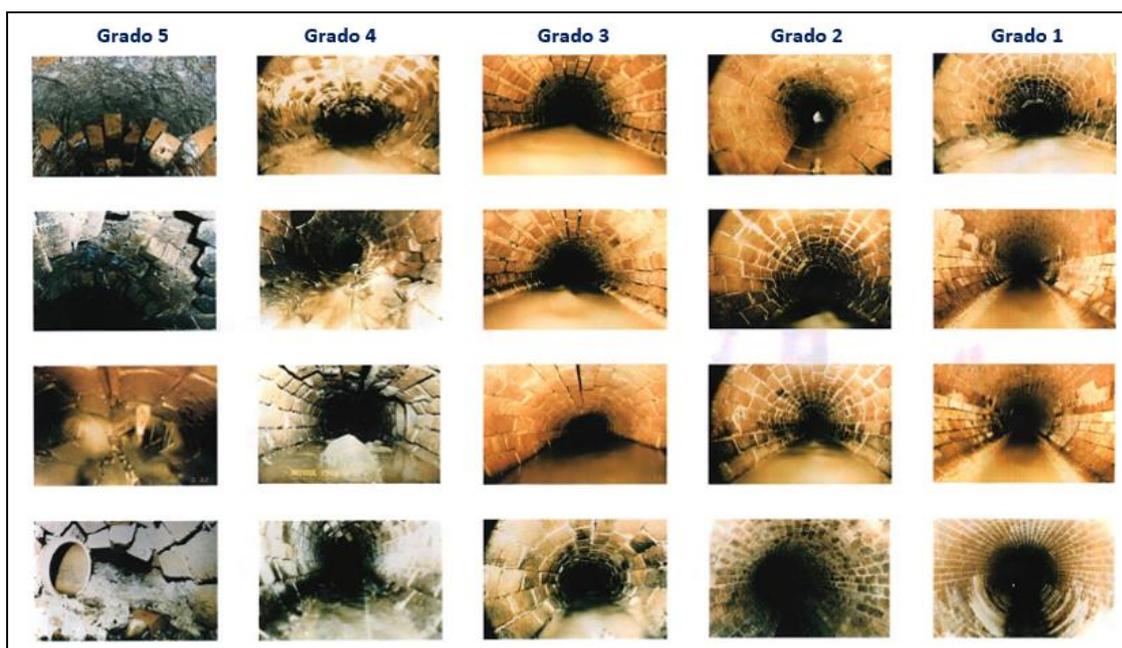
A partir de los estudios de CCTV se obtienen datos que son utilizados en:

- Modelo hidráulico: las obstrucciones son incluidas en el modelo tal y como son identificadas en el informe de CCTV. En cuanto a la infiltración, es un aspecto más complicado ya que es difícil de estimar. Ambos inputs se tratarán posteriormente en el punto 6.3.
- Modelo de deterioro: la información obtenida del CCTV representa un input en el modelo de deterioro ya que supone una actualización de la información de la que se nutre el modelo. Como se verá en el punto 8.2, tanto el porcentaje de obstrucción como el grado estructural provenientes de la inspección por CCTV se utilizarán para realizar el “tuning” del modelo de deterioro.

La información obtenida de la investigación por CCTV, además del video en el que se puede corroborar la inspección realizada, comprende un informe que incluye al menos:

- Referencia de los pozos aguas arriba y aguas abajo de cada tubería y sus coordenadas.
- Características de la tubería: tipo de sección, dimensiones, material, longitud, profundidad de la solera.
- Localización de la tubería, indicando por ejemplo el nombre de la calle.
- Fecha en la que se realiza la investigación.
- Descripción del grado de deterioro estructural de la tubería; se ha tomado como referencia la escala de grado estructural propuesta por el Water Research Centre de Reino Unido, que propone una escala de 1 a 5 en función del grado de deterioro, siendo el grado 5 el de mayor deterioro (ver figura 5.1.21).

Figura 5.1.21.- Clasificación del grado de deterioro estructural (WRC, 2001)



- Descripción en la que se indica en un longitudinal de la tubería las secciones en las que se detecta alguno de los siguientes elementos:
 - o Variaciones en la lámina de agua, expresada ésta en porcentaje de la sección.
 - o Roturas o fracturas puntuales en la tubería, indicando si son circunferenciales o longitudinales.

- Fracturas múltiples.
- Conexiones intrusivas, indicando el porcentaje de pérdida de sección.
- Deformación en la tubería.
- Material sedimentado, indicando la pérdida de sección que éste ocasiona.
- Agujeros en la tubería.
- Infiltración desde el nivel freático, indicando la intensidad de infiltración, si es un goteo, un caudal bajo o un caudal alto.
- Obstrucciones, indicando el porcentaje de pérdida de sección.
- Rotura de la tubería debida a la invasión de raíces, indicando el porcentaje de obstrucción.
- Colapso de la tubería.

En la siguiente figura 5.1.22 se muestra un ejemplo de informe de investigación por CCTV.

Figura 5.1.22.- Ejemplo de informe de investigación por CCTV

Inspection report					
Date : 10/02/2014	Job number : NCPWA70152	Weather : rain	Operator : MORGAN SINDA	Section number : 4	PLR SUFFIX: X
Weather rain	Vehicle : YCS2 LWR	Camera : MINI CAM	Preset :	Cleaned : not known	Operator : MORGAN SINDA
Place : Road : Location Inspection	Wrexham Warrenwood Road Road SJ34518903 (U/S) SJ34517801	Location details: Catchment: Tape number : Pipe Length		U/S MH : U/S Depth : D/S MH : D/S Depth :	SJ34517801 1.68 SJ34518903 1.18
Inspection Type: Year laid : Purpose : Total length :	Combined Z Routine Inspection of condition 69.92 m	Pipe shape : Pipe size : Pipe material : Lining :		Circular 375 mm Vitrified clay	
Comment : complete					
1:555 Depth: 1.18	Position	Observation	MPEG	Photo	Grade
	SJ34518903	0.00 Start node type, manhole, reference number : SJ34518903	00:00:04	5_5_48_A.JPG	(Constr) 0
	0.01	Water level, 10% of the vertical dimension	00:00:07		(Serv) 0
	2.62	Junction, at 9 o'clock, diameter 225mm	00:00:46		(Constr) 0
	8.35	Water level, 20% of the vertical dimension	00:01:11		(Serv) 0
	18.26	Water level, 10% of the vertical dimension	00:01:50		(Serv) 0
	19.89	Water level, 5% of the vertical dimension	00:01:59		(Serv) 0
	24.23	Junction, at 10 o'clock, diameter 150mm	00:02:17		(Constr) 0

5.2. Planeamiento de las investigaciones a realizar

Como se ha explicado en el punto anterior, las investigaciones a llevar a cabo en la cuenca son necesarias no sólo para tener un mayor conocimiento de la misma, sino para poder construir los modelos hidráulicos y de deterioro con suficiente precisión como para que los resultados obtenidos de ellos tengan validez.

Debido a que el presupuesto a destinar siempre es limitado, se propone el siguiente criterio para planear y priorizar las investigaciones a realizar en la cuenca:

- Realizar un primer plan de investigaciones en función de las zonas detectadas como de mayor riesgo y teniendo en cuenta todos los datos disponibles en la cuenca (como se explica en el punto 3, pueden aprovecharse datos existentes para disminuir el plan de investigaciones en la red de saneamiento).
- Realizar la valoración del plan de investigaciones propuesto y comprobar si es viable económicamente.
- En el caso de no ser viable económicamente, según los precios orientativos mostrados en la tabla 5.2.1 se comprueba que el estudio de caudales es generalmente la partida de mayor importe en la fase de investigaciones, por lo que el estudio de caudales debe ser replanteado como sigue:
 - Pueden eliminarse caudalímetros moviendo dos ubicaciones que confluyan aguas abajo a una tubería de mayor diámetro a una sola ubicación en la tubería a la que confluyen ambas ubicaciones.
 - Puede realizarse una primera etapa de investigaciones de pozos en las ubicaciones elegidas mediante la cual pueden descartarse ubicaciones que tras la prospección de pozo se consideren no ideales (caudal muy bajo, sedimentos, turbulencia excesiva, etc.)
 - En cualquier caso, debe tenerse en cuenta la posibilidad de realizar una verificación del modelo a nivel de tuberías principales, de las que en cualquier caso se obtienen siempre mejores resultados.

Ya que en cada estudio la problemática a afrontar es totalmente diferente, habrá que recurrir al criterio ingenieril para establecer en cada caso qué tipo de investigaciones

son prioritarias y qué nivel de investigación permitirá obtener resultados razonables de los modelos que se construyan a partir de ellas.

Tabla 5-1.- Precios orientativos de Investigaciones en Reino Unido (2015) (Experiencia propia)

Tipo de investigación	Precio
Prospección de Pozo (Ud)	£ 40.00
Prospección de Aliviadero (Ud)	£ 40.00
Estudio de Conectividad (Ud)	£ 200.00
Prospección de EB (Ud)	£ 800.00
Estudio de Caudales (5 MF, 3 PG, 8 semanas)	£ 5,862.00
CCTV (m)	£ 1.50
Estudio de Area Impermeable (Ha)	£ 79.00

6. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO-HIDRÁULICO

6.1. Introducción

El modelo hidrológico-hidráulico simula el comportamiento de la cuenca tanto en tiempo seco como frente a eventos de tormenta sirviendo de herramienta para desempeñar las siguientes funciones:

- Confirmar o descartar riesgos hidráulicos detectados en la etapa previa de identificación y análisis de riesgos.
- Detectar nuevos riesgos hidráulicos en la cuenca, permitiendo calcular su valoración en base al cálculo de su probabilidad y la severidad de sus consecuencias.
- Conocer la raíz o causa de problemas detectados en la red de colectores.
- Predecir el funcionamiento futuro de la red de saneamiento en función del desarrollo urbanístico (evolución de la población y áreas impermeables) y del cambio climático (afección a la intensidad de precipitación).
- Planear y diseñar las soluciones hidráulicas en la red de saneamiento.
- Confirmar el efecto que las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación tienen sobre el comportamiento hidráulico.
- Calcular el beneficio que tienen sobre la red las actuaciones de drenaje sostenible.
- Determinar el efecto que tienen en la red distintas reglas de operación en bombes y equipos instalados en la red.
- El modelo hidrológico-hidráulico actualizado podrá utilizarse posteriormente para cualquier estudio o intervención que se contemple en la cuenca.

La construcción del modelo hidrológico-hidráulico supone incluir toda la información recopilada en la cuenca durante las fases previas, modelar las diferentes estructuras hidráulicas presentes en la red y decidir mediante qué modelo se realizarán los cálculos hidrológicos e hidráulicos, es decir, elegir los modelos de producción de escorrentía, de propagación en la cuenca y en la red de colectores.

También supone la elección del software de cálculo hidrológico-hidráulico que nos permita construir el modelo aportando todos los datos de los que disponemos, verificar

el modelo y finalmente realizar las simulaciones necesarias para evaluar y analizar la cuenca y proporcionar soluciones.

En este caso se ha optado por el software Infoworks CS mediante el cual se ha construido y verificado el modelo que se emplea en el ejemplo de aplicación (punto 10). Las ventajas que tiene Infoworks, que permiten integrarlo en el proceso de análisis propuesto en la presente Tesis son principalmente:

- Se trata de un software que permite trabajar con capas como si de un SIG se tratara. Permite la exportación e importación de datos georeferenciados, por lo que se integra en el modelo de estudio propuesto en el que la visualización de los resultados georeferenciados es importante para la fase de análisis.
- Incluye una gran variedad de elementos hidráulicos a ser introducidos en el modelo (bombas, vertederos, compuertas, válvulas de clapeta, etc...) y que comprenden la práctica totalidad de estructuras hidráulicas que podemos encontrar en una red de colectores. También permite incluir funciones de carga hidráulica – caudal para modelar aquellos elementos que puedan ser más complejos como reguladores de caudal o enrejados en los que el fabricante proporcione dicha relación.
- Permite la inclusión de todos los datos a obtener de la cuenca que se han descrito en los puntos anteriores.
- Permite la inclusión de toda la información proveniente de los distintos tipos de estudios de la cuenca y de la red de drenaje mencionados en el punto 5.
- Permite realizar la verificación de la red en base a los datos obtenidos del estudio de caudales de manera gráfica y numérica. Integra un módulo que permite la importación directa de datos provenientes de estudios de caudales.
- Se trata de un software ampliamente contrastado.

Por tanto, la construcción del modelo hidrológico-hidráulico conlleva una serie de peculiaridades en base al procedimiento de análisis de cuencas propuesto en la presente tesis que se tratan a continuación.

6.2. Software: Infoworks CS

La modelación hidrológica e hidráulica de los colectores se propone realizar utilizando como herramienta de cálculo el programa comercial Infoworks Collection Systems, o Infoworks CS, ya que, como se ha citado en el apartado anterior, aporta una serie de ventajas entre las que cabe destacar su integración con la metodología de análisis propuesta en la presente tesis.

El análisis de la propagación del flujo se realiza en régimen transitorio, lo que permite una aproximación más fina a la realidad de las redes de colectores.

El régimen transitorio en este caso es “innegociable” para la fase de verificación del modelo, en la que se utilizan datos de lluvia y características del flujo a intervalos de tiempo de 2 minutos obtenidos de las investigaciones de caudales.

El método que sigue el programa es:

- Modelo de producción de escorrentía: A partir del hietograma y de los parámetros de infiltración el programa realiza un balance en cada una de las subcuencas vertientes a cada pozo.
- Modelo de propagación de escorrentía: determina cómo se propaga el flujo de cada subcuenca hasta el pozo correspondiente.
- Modelo de propagación del flujo a través del sistema de colectores (Cálculo hidráulico): Las ecuaciones por las que se rige el modelo de cálculo empleado son las de Saint Venant, es decir, las ecuaciones del flujo transitorio unidimensional en lámina libre.

Las características del programa y sus bases de cálculo se resumen en las siguientes tablas 6.1, 6.2 y 6.3, en las que se muestran las variables, datos y los modelos de cálculo que utiliza el programa.

Tabla 6-1.- Infoworks: Características de los pozos

Elemento	Descripción
Node ID	Es un número o cadena de caracteres que identifica el nodo Es importante que en todos los registros se mantenga el Node ID. En muchos casos se relaciona con las coordenadas para cumplir unicidad.

Elemento	Descripción
Node Type	<p>Es el tipo de nodo. <i>Infoworks</i>, posee 4 tipos de pozos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Manhole Pozo con capacidad de almacenamiento definida por una cámara inferior y una chimenea de acceso. Por un manhole el agua entra en la red. 2. Outfall Pozo de desagüe de la cuenca, donde no se produce almacenamiento. A partir de un Outfall el flujo sale del sistema. 3. Break Puede usarse simplemente para introducir un cambio en el longitudinal de la conducción (cambios de pendiente, escalones) y carecen de capacidad de almacenamiento. Se usa también para añadir pozos auxiliares cuando se modelan estructuras hidráulicas. 4. Storage Pozo con capacidad de almacenamiento, cuya geometría se puede definir particularmente con una curva de almacenamiento en función de la cota. Suelen emplearse para modelar tanques de tormentas, pozos de bombeo, etc.
System Type	<p>Es el tipo de red, y puede ser:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Foul: se emplea para redes de aguas residuales en sistemas separativos. 2. Storm: aguas pluviales. 3. Combined: para sistemas mixtos. 4. Other: para otro tipo de sistemas, como por ejemplo acequias, o cuando se quieren distinguir por ejemplo subcuencas de industrias de las subcuencas estándar.
Asset Id	<p>Es un indicador de pozo que se puede emplear cuando se quiere señalar alguna singularidad del pozo</p>
X(m), Y(m)	<p>Son las coordenadas UTM del pozo</p>
Ground Level (mAD)	<p>Cota de la tapa de registro del pozo, o cota del terreno</p>
Flood Level (mAD)	<p>Cota por encima de la cual cualquier calado se considera de inundación. Suele tomarse por defecto el valor de Ground Level, pero por ejemplo en el caso de acueductos sería la cota de la clave.</p>
Chamber Floor Level (mAD)	<p>Cota de solera del pozo. Por defecto es la mínima cota de solera de las tuberías que entran o salen del pozo.</p>
Chamber Roof Level (mAD)	<p>Cota del “techo” de la cámara del pozo. Por defecto es el valor máximo de las cotas de clave de los conductos conectados al pozo.</p>

Elemento	Descripción
Chamber Plan Area (m²)	Es la sección transversal de la cámara del pozo. Define el volumen de almacenamiento del pozo entre la solera y el "techo" del mismo. Sus dimensiones están condicionadas por las tuberías que se conectan a los pozos. Las opciones por defecto de Infoworks deducen este valor para cada pozo en función del tamaño de las conducciones que conectan con él.
Shaft Plan Area (m²)	Área de almacenamiento del pozo entre el "techo" de la cámara y el nivel del suelo (tapa de registro). Cuando no se dispone información se deja que <i>Infoworks</i> infiera el valor por defecto.
Flood Type	<p>Tipo de inundación de los pozos, puede ser:</p> <p>Sealed: el nivel del agua puede subir indefinidamente sin salir del sistema. Pretende simular la existencia de un cierre del pozo. Estos pozos no permiten la inundación en superficie y por ellos el agua no puede abandonar la red. Se utiliza para el caso de que el pozo esté sellado, o cuando se modelan pozos auxiliares.</p> <p>Lost: al subir el nivel en el pozo, el agua que sale a la superficie se pierde del sistema. El agua no se almacena tras dejar la red, de forma que el agua que abandona la red se pierde y no vuelve a ella. Se utiliza este sistema por ejemplo para colectores "foul" en sistemas separativos ya que se supone que en caso de desborde, el agua se recogería por el sistema de pluviales. También se puede emplear en el caso de que el colector discorra fuera de la ciudad, cerca de cauces, por lo que el agua que desborda circularía hacia el cauce y no retornaría al sistema.</p> <p>Stored: Al subir el nivel de agua y salir a la superficie, ésta se almacena en la cuenca de modo que cuando disminuyen los caudales se produce el drenaje de esta agua por la red.</p> <p>Para simular el nivel al que llegaría el agua, Infoworks define la geometría espacial de la subcuenca como un doble cono con distintas pendientes.</p>
Floodable Area (ha)	Es el área total que puede almacenar agua de inundación para el nudo en cuestión, área superior del doble cono de inundación mencionado anteriormente. Por defecto, es la suma de áreas contribuyentes de la subcuenca que drena a ese nudo. Debe estudiarse qué valor se adopta para la "Floodable Area" en el caso de nodos que no estén conectados a subcuencas, ya que en este caso si se deja el valor por defecto sería 0, por lo que el volumen de inundación sería nulo. Si no se sabe con certeza el área inundable, puede tomarse como valor 0.1-0.2 Ha, aunque esto

Elemento	Descripción
	depende de los valores que tomemos para definir el doble cono de inundación. Habría que estudiar cada caso.
Flood Depth 1 (m)	El calado de inundación que alcanza el agua para el área de inundación 1 (cono de inundación inferior). El valor por defecto es de 1 m. Para redes de colectores suele optarse por reducir el valor a 0.1 m., ya que es más realista.
Flood Area 1 (%)	Porcentaje del "floodable area" que se inunda tal como se representa en el primer cono o cono inferior. Este primer cono se extiende pues desde el pozo a cota de terreno hasta esta área a cota igual al calado 1. El valor por defecto es el 10%.
Flood Depth 2 (m)	El calado de inundación que alcanza el agua para el área de inundación 2 (cono de inundación superior). El valor por defecto es de 99 m. Para redes de colectores suele optarse por reducir el valor a 1 m., ya que es más realista.
Flood Area 2 (%)	Porcentaje del "floodable area" que se inunda tal como se representa en el segundo cono o cono superior. Este segundo cono se extiende pues desde el área 1 a cota igual al flood level 1 hasta esta área 2 a cota igual al calado 2. El valor por defecto es el 100% del "floodable area".
Shaft Plan Area Additional (m2)	Estas casillas incluyen la rectificación de áreas de pozos debidas a: - la compensación de almacenamiento ("storage compensation"), pues debe contemplarse un incremento en el volumen de la red de colectores ya que no se modela el 100% de tuberías presentes como acometidas, etc. - corrección numérica: debido al empleo del denominado "Priessman Slot"
Chamber Plan Area Additional (m2)	en el cálculo de los colectores en carga (ranura en la clave de las tuberías para simular el comportamiento en carga), y el alojamiento en el colector del volumen de flujo base, debe corregirse el volumen en los pozos para contrarrestar estas variaciones de volumen derivadas del cálculo numérico. El cálculo de estos ajustes de volumen se trata en el punto 6.3.
User Number 1	Existe espacio disponible para anotaciones numéricas para cada pozo.

Elemento	Descripción
User Text 1	Existe espacio disponible para anotaciones a realizar para cada pozo. Estos espacios son muy importantes para incluir notas aclaratorias, por ejemplo acerca de prospecciones de pozos, describir si se ha realizado algún cálculo a parte para incluir alguno de los datos, etc. Es importante incluir el máximo de información disponible.
Flags	Las banderas o flags son fundamentales en la construcción del modelo. Indican la procedencia de cada uno de los datos que se incluyen, si proviene de una prospección nueva de pozo, si es un dato asumido o calculado, si proviene de Lidar, etc.

Tabla 6-2.- Infoworks: Características de los conductos

Elemento	Descripción
US/DS Node	Identificación del pozo aguas arriba y aguas abajo de la conducción respectivamente.
Link Suffix	Es un único carácter que completa la nomenclatura de la conducción (se han utilizado números empezando desde el 1). El link suffix permite que un nudo tenga hasta 36 conexiones que nazcan de él. Así la nomenclatura de cada conducción está constituida por el nombre del pozo en el que nace, un punto y el sufijo correspondiente
System Type	es el tipo de red, y puede ser, como se ha comentado para los pozos: <ol style="list-style-type: none"> 1. Foul: es el que hay por defecto en <i>Infoworks</i>, aguas residuales 2. Storm: aguas pluviales. 3. Combined: para sistemas mixtos 4. Other: otros tipos de sistemas.
Length (m)	Longitud de la conducción entre pozos. Si no introducimos ningún valor, Infoworks la calculará por defecto mediante las coordenadas UTM de los pozos de aguas arriba y aguas abajo
Shape ID	Forma del conducto. Puede ser una forma predefinida (ya existente en Infoworks) o requerir una nueva definición en el caso que se quieran introducir nuevas secciones definidas manualmente.
Width (mm)	Ancho del conducto
Height (mm)	Altura del conducto
Roughness Type	Tipo de rugosidad adoptada para el cálculo (Colebrook-White o Manning).

Elemento	Descripción
Bottom Roughness	Rugosidad para el tercio inferior de la tubería. Actúa como rugosidad por defecto de toda la conducción si no se da ningún valor en la columna Top Roughness. La rugosidad depende del tipo de material, y generalmente se distingue para un mismo tipo de material la rugosidad en colectores de pluviales y residuales.
Top Roughness	Rugosidad para los dos tercios superiores de la tubería
Sediment Depth (mm)	Altura de sedimentos permanentes y consolidados en la tubería. La profundidad de capa de sedimentos se obtiene principalmente de las investigaciones por CCTV, aunque también de las prospecciones de pozos o de los estudios de caudales. Como se explica en el punto 6.3 si la obstrucción de la tubería es de gran entidad es preferible modelarla mediante un orificio o una compuerta.
Sediment Type	Tipo de sedimento, en el caso de que exista.
Solution Model	Método empleado para la modelización, puede ser "full" o "pressure" (para redes a presión o permanentemente sobrecargadas). En general para redes de saneamiento se utiliza "Full" (a sección llena), que aplica las ecuaciones de Saint Venant. Pressure se utilizaría para secciones cerradas que vayan a funcionar siempre en presión.
US/DS Invert Level	Cota de solera aguas arriba y aguas abajo respectivamente
US/DS Headloss Type	<p>Tipo de pérdidas localizadas en cambios de alineación y pozos aguas arriba y aguas abajo respectivamente. Las pérdidas se expresan como un porcentaje de la altura de velocidad, definiendo una serie de curvas que relacionan este porcentaje con el nivel de sobrecarga (nivel del flujo respecto de la altura del conducto). Estableciéndose 4 tipos diferentes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. High, recomendable para pozos mal contruidos 2. None, no se contabilizan las pérdidas 3. Normal, recomendable para pozos bien contruidos 4. Fixed, la pérdida de carga es un porcentaje fijo, definido por el usuario, respecto de la altura de velocidad <p>También permite definir una curva en función del estado de sobrecarga</p>
US/DS Headloss Coefficient	Coefficiente de pérdidas de carga localizadas aguas arriba y aguas abajo de las conducciones. Es un factor que multiplica la curva anterior.

Elemento	Descripción
	<p>Con estos coeficientes se han representado pérdidas adicionales debidas al ángulo de aproximación de la conducción al pozo. El valor se adjudica al pozo situado aguas abajo y al pozo de aguas arriba de la siguiente conducción. Por defecto este valor es 1.</p> <p>Infoworks implementa una herramienta de cálculo automático de los coeficientes de pérdidas localizadas en función de los ángulos de incidencia de las tuberías en los pozos. Si se utiliza esta herramienta es recomendable realizar comprobaciones en los nudos más complejos, o por ejemplo en las tuberías que entroncan por clave dejando un escalón, ya que en este caso no habrían pérdidas en el entronque. Las pérdidas de carga se tratarán posteriormente en el punto 6.3.</p>
Critical Sewer Category	Clasificación estructural de la tubería.
Minimum Computational Nodes	En general suelen utilizarse 5 nodos.
Inflow (m³/s)	Caudal adicional. Es 0 por defecto.
Gradient (m/m)	Pendiente de la conducción. La calcula el programa dados los datos de longitud y cotas
Conduit full capacity	Capacidad del conducto a sección llena y régimen uniforme. La obtiene el programa
Is Merged	Informa sobre si la conducción ha sido "merged", es decir, combinada.
User Number 1	Existe espacio disponible para anotaciones numéricas para cada conducto.
User Text 1	Existe espacio disponible para anotaciones a realizar para cada conducto. Como se ha comentado para el caso de pozos, estos espacios son muy importantes para incluir notas aclaratorias, por ejemplo acerca de investigaciones realizadas, describir si se ha realizado algún cálculo a parte para incluir alguno de los datos, etc. Es importante incluir el máximo de información disponible.
Flags	Las banderas o flags son fundamentales en la construcción del modelo. Indican la procedencia de cada uno de los datos que se incluyen, si proviene de algún tipo de investigación, "as built", si es un dato asumido o calculado, si proviene de Lidar, etc.

Tabla 6-3.- Infoworks: Características de las subcuencas

Elemento	Descripción
Subcatchment Id	Identificación de la subcuenca. En la práctica se hace coincidir con la identificación del pozo en que desagua la subcuenca.
System Type	Al igual que pozos y conductos, los tipos son: 1. Foul: es el que aplica por defecto en <i>Infoworks</i> , aguas residuales. 2. Storm: aguas pluviales. 3. Combined: para sistemas mixtos. 4. Other: otros tipos de sistemas. Suele utilizarse en el caso de subcuencas auxiliares utilizadas para introducir caudal generado por industrias.
Node ID	Identificación del pozo al que drena la subcuenca.
Total Area (Ha)	Área total de la cuenca, en Ha, incluso las áreas que no drenen al alcantarillado. Se trata de un valor meramente informativo que el programa no utiliza, ya que se basa en el área contributiva (Contributing Area).
Contributing Area (Ha)	Área de la cuenca, en Ha, que genera escorrentía. Por defecto se considera igual al área total.
X (m), Y (m)	Coordenadas del centro de las subcuencas. Calculadas por infoworks.
Land Use ID	Es el nombre del Land Use que se aplica a la subcuenca. El Land Use ID indica para cada una de las distintas superficies drenantes incluidas en la subcuenca (pueden caracterizarse hasta 12 diferentes) qué modelos de producción y propagación de escorrentía se eligen para realizar los cálculos, y qué valor adoptan variables y parámetros de dichos modelos.
Population	En este campo se indica el número de habitantes incluidos en la subcuenca.
Connectivity (%)	Indica el porcentaje de coactividad de la población en la subcuenca. Salvo casos excepcionales será 100%.
Wastewater Profile	En este campo se indica el identificador del perfil de caudal residual doméstico y el consumo por habitante y día que corresponde a la subcuenca. Se pueden generar diferentes perfiles para el caudal residual doméstico generado; estos se ajustan en la fase posterior de verificación para obtener una representación más cercana a la realidad.
Base Flow (m³/s)	Caudal base que aporta la subcuenca. Suele utilizarse para modelar los flujos constantes de infiltración detectados durante las investigaciones en la red de saneamiento.

Elemento	Descripción
Additional Foul Flow (m³/s)	Caudal adicional de residuales generado en la subcuenca, en caso de que se quiera añadir al generado por la población asignada a la subcuenca y su "Wastewater Profile".
Trade Flow (m³/s)	Caudal generado por las industrias; debido a que el tipo de perfiles de generación de este tipo de caudal es muy distinto al generado por la población se tratan a parte.
Trade Profile	Perfil o gráfico de generación de caudal por parte de las industrias, en el que se indica cómo varía la generación del caudal a lo largo del tiempo.
Rainfall Profile	Para variaciones espaciales de lluvia en caso de disponer de varios registros. En el caso del proceso de verificación las subcuencas tomarán el valor de la tormenta registrada en el pluviógrafo más cercano (se obtiene mediante el proceso de los Polígonos de Thiessen aplicado a los pluviógrafos instalados en el estudio de caudales)
Area measurement type	Puede ser en porcentaje o en valor absoluto. Determina qué porciones de area corresponden a las distintas clases de superficies de escorrentía consideradas.
Soil Type	Sólo se emplea en caso de escoger el modelo de escorrentía Wallingford Procedure UK o New UK. Para este caso existe un mapa que define el tipo de suelo para Reino Unido.
Slope (m/m)	Pendiente media con la que la cuenca drena el agua de escorrentía hacia el pozo. Por defecto el programa la obtiene como diferencia de cotas del terreno dividido por la longitud de tubería entre pozos.
Dimension (m)	Dimensión de la subcuenca. El programa obtiene este valor por defecto.
Runoff Area 1-12	Define qué parte de la subcuenca pertenece a cada tipo de superficie de escorrentía. Es un valor de superficie medido en hectáreas o porcentaje según el Area measurement type. Pueden definirse hasta 12 tipos distintos.
Ground Infiltration ID	Indica qué tipo de respuesta lenta incluimos en la subcuenca. El módulo "Ground Infiltration" es una manera de introducir una respuesta lenta de la subcuenca frente a eventos de tormenta, que puede representar infiltración debida a agua de lluvia que se introduce en el sistema de colectores. El módulo "Ground infiltration" incluye una serie de parámetros que pueden ser calibrados durante el proceso de verificación (ver punto 7).
User Number 1	Existe espacio disponible para anotaciones numéricas para cada subcuenca.

Elemento	Descripción
User Text 1	Existe espacio disponible para anotaciones a realizar para cada subcuenca. Como se ha comentado para el caso de pozos, estos espacios son muy importantes para incluir notas aclaratorias, por ejemplo acerca de investigaciones realizadas, describir si se ha realizado algún cálculo a parte para incluir alguno de los datos, etc. Es importante incluir el máximo de información disponible.
Flags	Las banderas o flags son fundamentales en la construcción del modelo. Indican la procedencia de cada uno de los datos que se incluyen, si proviene de algún tipo de investigación, si proviene de algún estudio realizado previamente, etc.

Tabla 6-4.- Infoworks: Escorrentía

Elemento	Descripción
Runoff Surface ID	Número entero que identifica a este tipo de superficie. Cada identificador de superficie debe ser único. Corresponderá con los valores de Runoff surface.
Description	Descripción, con un máximo de 80 caracteres, del tipo de superficie empleado.
Runoff Routing Type	Hay dos posibles valores, Rel y Abs, que determinan el tipo de valor que se introduce en <i>Runoff Routing Value</i> Si se selecciona Rel , el Runoff Routing Value es un factor que multiplica al valor por defecto del Routing Factor. Seleccionando Abs el Runoff Routing Value es el valor que damos al Routing Factor en el modelo de propagación de escorrentía.
Runoff Routing Value	Si en Runoff Routing Value tenemos Rel , ahora introducimos el valor que multiplica al valor por defecto del Routing Factor. En caso de haber seleccionado Abs , se introduce el valor del Routing Factor. Si se usa el modelo de propagación de escorrentía del SWMM este valor coincide con el número de Manning.
Runoff Volume Type	Permite seleccionar entre los siguientes modelos de producción de escorrentía: <ol style="list-style-type: none"> 1. Fixed 2. Wallingford (Chapman, 2009) 3. NewUK (Osborne, 2009) 4. SCS 5. Horton 6. Green-Ampt

Elemento	Descripción
	7. ConstInf
Surface Type	<p>Se pueden seleccionar tres valores diferentes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Impervius (impermeable) por ejemplo para carreteras 2. Pervius (permeable) por ejemplo para zonas verdes 3. Unknown
Ground Slope (m/m)	<p>El programa usa este valor para calcular el Runoff Rate y las Dentraciones iniciales (P_0). Si no se introduce ningún valor, el programa la calcula como:</p> <p>$\frac{((\text{nivel del terreno del pozo conectado a la subcuenca}) - (\text{nivel del terreno del nodo de aguas abajo del conducto} \cdot 1 (\text{ver link Suffix en la tabla de conductos}) \text{ que sale desde el nodo al que se conecta la subcuenca}))}{(\text{longitud del conducto anterior})}$</p> <p>Si la subcuenca no está conectada a ningún nodo del sistema, o no hay un conducto .1 que salga desde el nodo, el valor por defecto será 0</p>
Initial Loss Type	<p>Se pueden seleccionar 3 valores diferentes para este campo:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Abs (Absoluto) 2. Slope 3. SCS
Initial Loss Value	<p>Se asume que en el inicio de una lluvia, el primer volumen de agua caído no produce escorrentía, es lo que llamamos umbral de escorrentía (Initial Loss Value). En función del Tipo de Umbral de Escorrentía que se haya seleccionado en la casilla anterior, el Initial Loss Value representa:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Si Type = Absolute entonces Value es el valor en m del umbral de escorrentía P_0. · Si Type = Slope entonces el umbral de escorrentía en la subcuenca está relacionado con la pendiente del terreno (Ground Slope) por la expresión: $D = \text{Value} / s^{(1/2)}$ <p>Donde D es la profundidad de la depresión (depression storage depth) y s es la pendiente del terreno (Ground Slope)</p> · Si Type = SCS entonces Value es k. $k = P_0/S$ <p>donde:</p> <p>P_0 = umbral de escorrentía (m)</p> <p>S = Volumen máximo de retención (m) = SCS Depth</p>

Elemento	Descripción
	<p>Los valores que recomienda Infoworks, en caso de usar el modelo de Wallingford y Type = Absolute, son los siguientes:</p> <p>Impervius surfaces 0.000071</p> <p>Pervius surfaces 0.00028</p>
Routing Model	<p>Modelos de propagación de escorrentía:</p> <p>Wallingford - Wallingford Procedure: considera que la escorrentía se genera desde dos depósitos iguales en serie de forma lineal con el tiempo (ecuación de doble embalse lineal). El valor del Coeficiente de escorrentía depende de la intensidad de la lluvia, del área contributiva y la pendiente de la subcuenca.</p> <p>LargeCatch - Large Catchment Model: mismas ecuaciones que el modelo anterior, pero con distinto ajuste pues el programa también le aplica un tiempo de respuesta y un factor multiplicador al coeficiente de escorrentía. Éstos son función del área pendiente y longitud de la subcuenca. Adaptado para subcuencas de mayor extensión.</p> <p>Sprint: este modelo considera que la escorrentía se genera desde un único depósito de forma lineal con el tiempo. El valor del Coeficiente de escorrentía depende del área y pendiente de la subcuenca y del porcentaje de superficie impermeable.</p> <p>Desbordes: este modelo considera que la escorrentía se genera desde un único depósito de forma lineal con el tiempo. El valor del Coeficiente de escorrentía depende del área, pendiente y longitud de la subcuenca, del porcentaje de superficie impermeable, de la duración de la tormenta y el llamado volumen de la tormenta (depth storm).</p> <p>SWMM: Este modelo considera que la escorrentía se genera desde un único depósito de forma no lineal con el tiempo y emplea la ecuación de la onda cinemática para conducir el flujo de cada subcuenca hasta el pozo correspondiente. El coeficiente de escorrentía depende de la rugosidad de la superficie, el área de la misma, la pendiente del terreno y la anchura de la subcuenca.</p>
Fixed Runoff Coefficient	<p>En caso de usar el modelo Fixed Runoff como modelo de producción de escorrentía, el Fixed Runoff Coefficient indica el porcentaje de lluvia que se transforma en escorrentía. Por ejemplo, 0.1 indica un 10% de escorrentía.</p>
Wallingford Procedure Minimum	<p>Indica mediante una proporción la mínima cantidad de escorrentía generada por la superficie.</p>
Wallingford Procedure Maximum	<p>Indica mediante una proporción la máxima cantidad de escorrentía generada por la superficie.</p>

Elemento	Descripción
Wallingford Procedure Distribution	Utilizado en le modelo de escorrentía de Wallingford; factor corrector de la escorrentía generada en áreas permeables e impermeables.
New UK Depth	Valor de la profundidad de humedad utilizado en el modelo de porcentaje de escorrentía variable, también conocido como New UK. Generalmente se utiliza un valor de 200 mm.
SCS Depth (m)	Es la máxima profundidad de almacenamiento, S (en metros) para esta superficie. El rango válido para este valor es >0 - 999.99 metros
Horton Initial	Valor de la infiltración inicial (f0) en caso de utilizar el modelo de infiltración de Horton.
Horton Limiting	Valor de la infiltración límite (fc) en caso de utilizar el modelo de infiltración de Horton.
Horton Decay	Factor de decaimiento k (1/hr) en caso de utilizar el modelo de infiltración de Horton.
Horton Recovery	Factor de recuperación en caso de utilizar el modelo de infiltración de Horton.
Green Ampt Suction	Valor medio de succión capilar en caso de utilizar el modelo de Green Ampt. Depende del tipo de suelo.
Green Ampt Conductivity	Mínima tasa de infiltración del suelo en caso de utilizar el modelo de Green Ampt.
Green Ampt Deficit	Representa la diferencia entre la porosidad del suelo y el contenido de humedad en el modelo de Green Ampt.
Infiltration Loss Coefficient	Se emplea en el cálculo de las pérdidas por infiltración en el caso de utilizar el modeo ConstInf.
Initial Loss Porosity	<p>Este valor puede usarse para simular una superficie donde el volumen de almacenamiento inicial (que viene definido por los campos Initial Loss Type y el Initail Loss Value) realmente esté formado por materiales de relleno tipo arena, grava o rocas.</p> <p>Estos materiales de relleno reducen la capacidad máxima de almacenamiento de agua. Un valor (Initial Loss Porosity) de 0.3 representa un 30% de volumen de aire en la estructura (entonces el restante 70% del volumen estará ocupado por el material de relleno y tan sólo se podrá aprovechar un 30% del volumen para almacenar agua antes de que empiece la escorrentía).</p> <p>Este aspecto es especialmente útil cuando se usa para simular un pavimento permeable</p>

En definitiva Infoworks incluye un amplio abanico de posibilidades en cuanto a modelos de cálculo de escorrentía y modelación de caudales en tiempo seco. Todos los elementos de la red están georeferenciados e incluyen campos para la inclusión de datos descriptivos, así como la posibilidad de añadir banderas o “flags” lo cual permite que el

modelo muestre información complementaria muy útil cuando éste es revisado o actualizado.

Es por tanto una herramienta que permite incluir fácilmente las fases anteriormente descritas de recolección de información (punto 3) e investigación (punto 5) tanto en la fase de construcción del modelo como en la fase de verificación en base al estudio de caudales realizados.

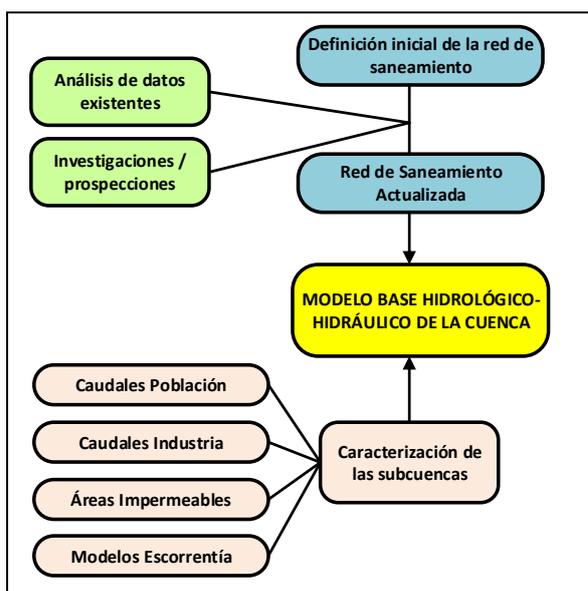
6.3. Construcción del modelo

Se plantea en este punto la metodología de construcción del modelo coherente con el proceso de análisis de cuencas propuesto.

La construcción del modelo se realiza con el software de cálculo Infoworks descrito en los puntos 6.1 y 6.2. Se podría resumir el concepto de construcción del modelo como la definición hidrológica de las subcuencas y la definición geométrica e hidráulica de la red de saneamiento incluyendo las estructuras hidráulicas presentes como pueden ser aliviaderos o estaciones de bombeo.

La construcción del modelo nos permite obtener el modelo base, que posteriormente será validado y verificado para que pueda ser utilizado en la fase de análisis de la cuenca y de propuesta de soluciones. La figura 6.3.1 resume el proceso de construcción del modelo para obtener el modelo base.

Figura 6.3.1.- Esquema de construcción del modelo base



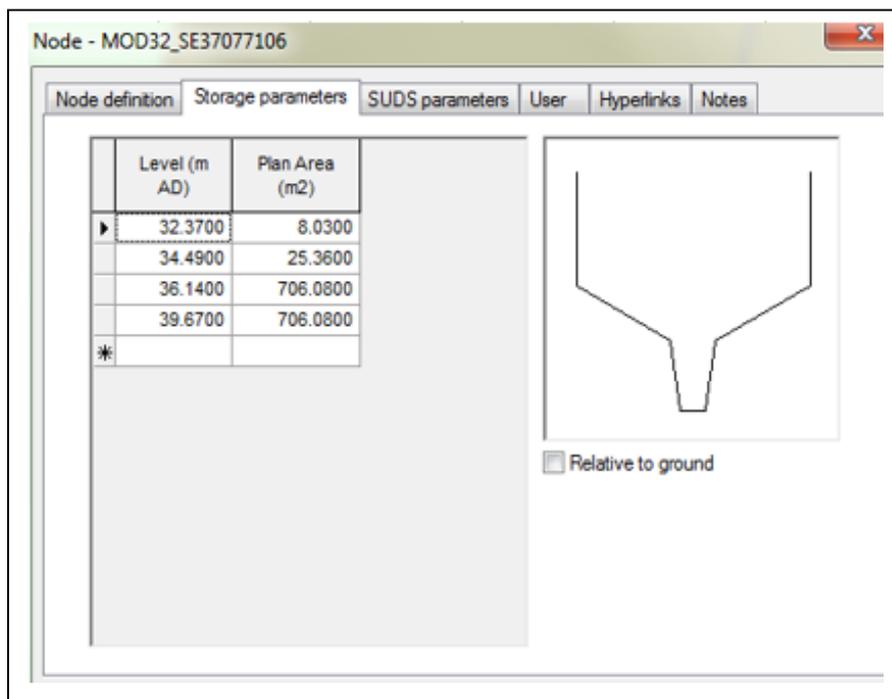
DEFINICIÓN DE LA RED DE SANEAMIENTO

La primera fase en la construcción del modelo es la definición, en este caso en Infoworks, de la red de saneamiento de la cuenca. En función de la calidad de los datos geométricos de partida, los datos existentes recopilados durante la fase de análisis de datos, la magnitud de los riesgos detectados en el análisis inicial de riesgos y el presupuesto disponible, será necesario planificar una campaña de investigaciones más o menos extensa (ver punto 5) para completar la información necesaria.

La definición de la red se compone de:

- Definición de los pozos: la definición de los pozos incluye como mínimo los valores de las coordenadas del pozo y cota del terreno. La definición geométrica del pozo puede ser calculada por Infoworks en función de las tuberías entrantes y salientes. En zonas de mayor riesgo o colectores principales deberían definirse geoméricamente los pozos. En el caso de que el pozo sea de grandes dimensiones, o se trate de un tanque de tormentas, la definición geométrica del mismo es fundamental, incluyendo en el modelo la variación del área con la cota (figura 6.3.2).

Figura 6.3.2.- Definición geométrica de un tanque de tormentas (INCLUIR EJEMPLO)



- Definición de colectores o tuberías: Los campos a implementar para el caso de tuberías incluidas en la red de saneamiento se muestran en la tabla 6.2. Las prospecciones de pozo permiten la inclusión de los datos requeridos en la tabla de tuberías, aunque en general no se suele disponer de la mayoría de ellos, por lo que es necesario recurrir a técnicas de interpolación como se verá en el punto 6.4.

La información en relación con sedimentos y obstrucciones en los colectores proveniente de las investigaciones mediante CCTV debe ser incluida en el modelo. Se propone la siguiente regla práctica para su inclusión inicial (Aguas de Gales, 2011), a falta de su confirmación en la fase de verificación:

- Si la obstrucción detectada ocupa entre un 10% y un 25% de la sección de la tubería, modelarla como una capa de sedimentos de espesor la mitad del valor del porcentaje aplicado al diámetro de la sección.
- Si la obstrucción detectada ocupa entre un 25% y un 40% de la sección de la tubería, modelarla como una capa de sedimentos de espesor igual al valor del porcentaje aplicado al diámetro de la sección.
- Si la obstrucción está entre el 40% y el 90% de la sección:
 - Modelar inicialmente como un orificio (ver modelado de estructuras hidráulicas) de diámetro el paso libre en caso de resultar menor que 100 mm.
 - En caso de obtenerse un orificio de diámetro mayor a 100 mm., modelar como una compuerta con el área equivalente de paso.
- Modelado de estructuras hidráulicas: Algunos de los elementos que componen la red de saneamiento como la estaciones de bombeo, aliviaderos o tanque de tormentas, poseen elementos singulares como enrejados, vertederos, elementos de control de caudal, orificios, válvulas o compuertas que son determinantes para el cálculo de la distribución de los caudales y el cálculo hidráulico en la red.

Infoworks incorpora elementos específicos para facilitar el modelado de dichas estructuras hidráulicas, aunque algunos de los parámetros deben ser introducidos

manualmente previo cálculo. También existe la opción de modelar los controles hidráulicos aportando la curva de descarga que relaciona caudal trasegado con carga hidráulica, por lo que de esta manera puede incluirse cualquier elemento de control por complejo que sea.

El modelado de los vertederos presentes en los aliviaderos requiere su definición geométrica y de los coeficientes de desagüe cuando éste se comporta en lámina libre o en presión como si fuera un orificio. El coeficiente de desagüe primario (Balmforth, 2011) actuando en lámina libre puede suponerse inicialmente con valores de 0,6, 0,7 ó 0,8 en función de si el borde del vertedero es en forma de lámina, cuadrada o redondeada.

Para el cálculo del coeficiente de desagüe secundario o en presión se recomienda realizar una primera aproximación mediante la fórmula del orificio anegado, que depende de A_0 , área del orificio, y A , área de la sección de continuación:

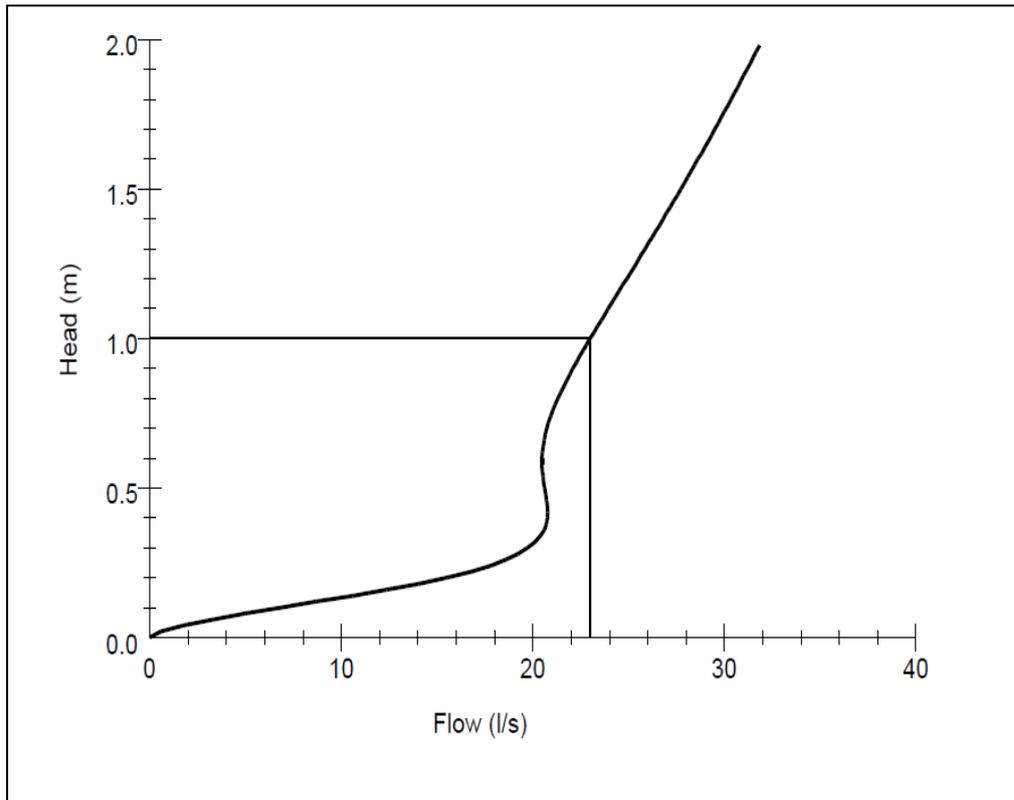
$$C_0 = \frac{1.41}{1.70 - (A_0/A)}$$

Los orificios y las compuertas requieren su definición geométrica, y como primera aproximación para el coeficiente de desagüe se puede emplear la fórmula de desagüe anegado (Balmforth, 2011).

Hay que tener en cuenta en el cálculo del coeficiente de desagüe que pueden existir elementos como por ejemplo placas metálicas separadoras de gruesos flotantes que disminuyen el coeficiente de desagüe calculado. La casuística es muy grande, y en cualquier caso el coeficiente de desagüe se ajustará durante la fase de verificación del modelo.

Las rejas pueden modelarse utilizando el elemento reja incluido en Infoworks en el que se introduce su definición geométrica, o bien si se conoce la curva de descarga (generalmente proporcionada por el fabricante de la reja) se puede introducir como "User Control". También se introducen como "User Control" los elementos reguladores de caudal, como pueden ser los "hydrobrakes". La figura 6.3.3 muestra el modelado de un "hydrobrake" a partir de su curva de desagüe.

Figura 6.3.3.- Modelado de un “hydrobrake” (User control)



En ocasiones para estructuras hidráulicas complejas se requiere la introducción de controladores que actúen sobre bombas, compuertas u otros elementos activándolos o desactivándolos en función de las reglas de operación que tengan. Infoworks permite el control de las estructuras hidráulicas a través del módulo RTC (“Real Time Control”), o Control en Tiempo Real.

El módulo de Control en Tiempo Real incluye una serie de reglas lógicas que permiten relacionar la activación o desactivación de elementos de la red en función de valores de variables de cálculo, como por ejemplo que se abra una compuerta cuando el nivel en cierto pozo aguas arriba llegue a un determinado valor.

Como se ha explicado, Infoworks es una herramienta que permite modelar al completo todos los elementos integrantes de cualquier red de saneamiento, presentando como ventaja particular en este caso la posibilidad de incluir la información proveniente de las fases anteriores de análisis de la cuenca explicada principalmente en los puntos 3 y 5.

DEFINICIÓN DE LAS SUBCUENCAS

El modelado de la cuenca de estudio se propone realizar como un modelo distribuido, dividiéndose en subcuencas lo que proporciona una mejor representación de la realidad.

El procedimiento propuesto exige dividir las subcuencas en dos tipos:

- Subcuencas de residuales: Las subcuencas de residuales tienen una doble vertiente:
 - Por una parte incluyen las áreas productoras de escorrentía que están conectadas con el sistema de aguas residuales, por lo que el agua de lluvia que cae sobre estas superficies impermeables (y permeables) pasará a incrementar el caudal circulante por la red de residuales. Esta situación es usual en sistemas unitarios, aunque también puede ser que en sistemas separativos parte de la escorrentía se haya conectado por error con el sistema de residuales.
 - Por otra parte incluyen el caudal generado por la población residente en ellas, los comercios y las industrias. Este caudal de residuales no depende del área de la subcuenca.
- Subcuencas de pluviales: Pueden superponerse con las cuencas de residuales, y tan sólo generan caudal desde superficies permeables e impermeables incluidas en ellas que estén conectadas con el sistema de aguas pluviales.

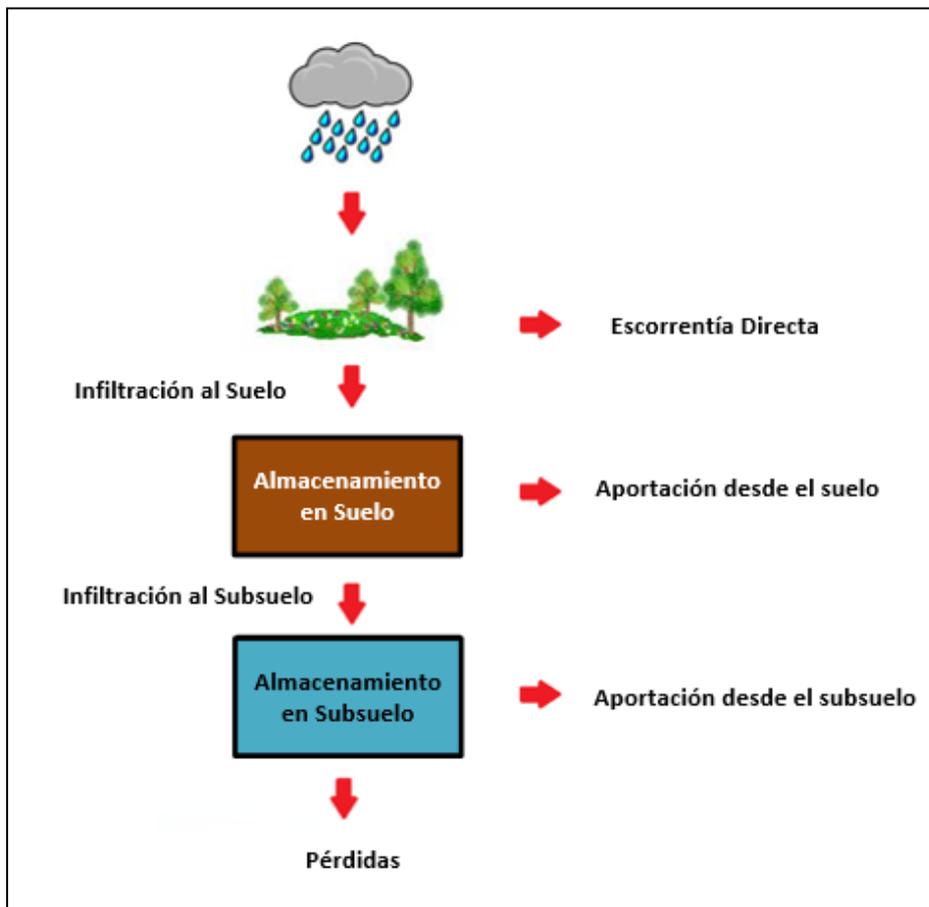
Además del aporte por escorrentía y debido al consumo humano las subcuencas pueden aportar agua al sistema de drenaje también por infiltración en el mismo. Esta infiltración puede modelarse como continua, debido a presencia del freático que aporta un caudal más o menos constante a la red, o bien puede modelarse como diferida en el tiempo debido a infiltración en el terreno a causa de eventos de tormenta (Bettess, 1996).

Ambos tipos de infiltración pueden ser modelados en Infoworks. El tipo de infiltración continua se puede introducir en cada subcuenca como flujo base (o “base flow”), mientras que la infiltración inducida por eventos de precipitación se introduce a través del módulo que incorpora Infoworks de infiltración en el terreno (“Ground infiltration”).

La infiltración en el terreno se modela durante la etapa de verificación en la que se comprueba si existe escorrentía de respuesta lenta captada por los caudalímetros instalados. El módulo de infiltración en el terreno incluye la generación de escorrentía subsuperficial de respuesta lenta por parte de la primera capa de suelo y de respuesta muy lenta por parte del subsuelo (Figura 6.3.4.).

Los parámetros del modelo se calibran en base a los caudales observados durante el estudio de caudales. La escorrentía desde el subsuelo en raras ocasiones se modela ya que se necesitarían series de datos muy extensas.

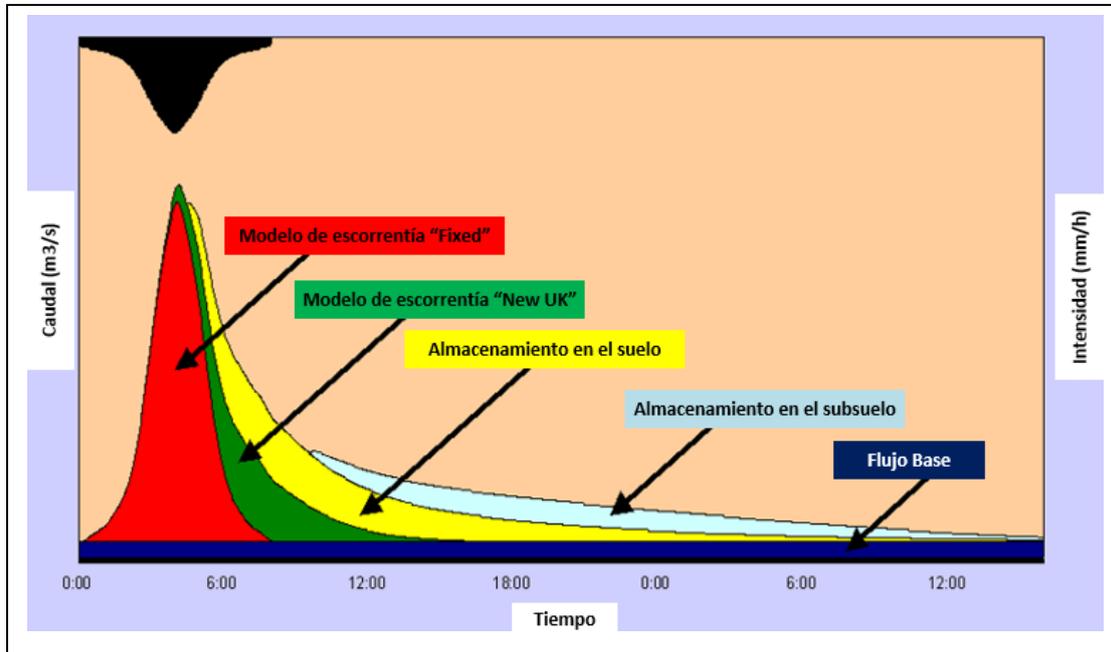
Figura 6.3.4.- Distribución de caudales de escorrentía



La figura 6.3.5 muestra los componentes de la escorrentía generada por un evento de lluvia que alcanza la red de saneamiento. Se comprueba que dependiendo del modelo de escorrentía que se utilice, en este caso se muestra el Fixed y el New UK, se obtiene una respuesta más o menos diferida en el tiempo. Si además se incorpora el módulo de infiltración en el terreno se reproduce la respuesta lenta debida a la infiltración. El flujo

base representa un caudal constante que se introduce en la red de saneamiento debido en general a la presencia del nivel freático.

Figura 6.3.5.- Componentes de la escorrentía (Innovyze.com, Infoworks help)



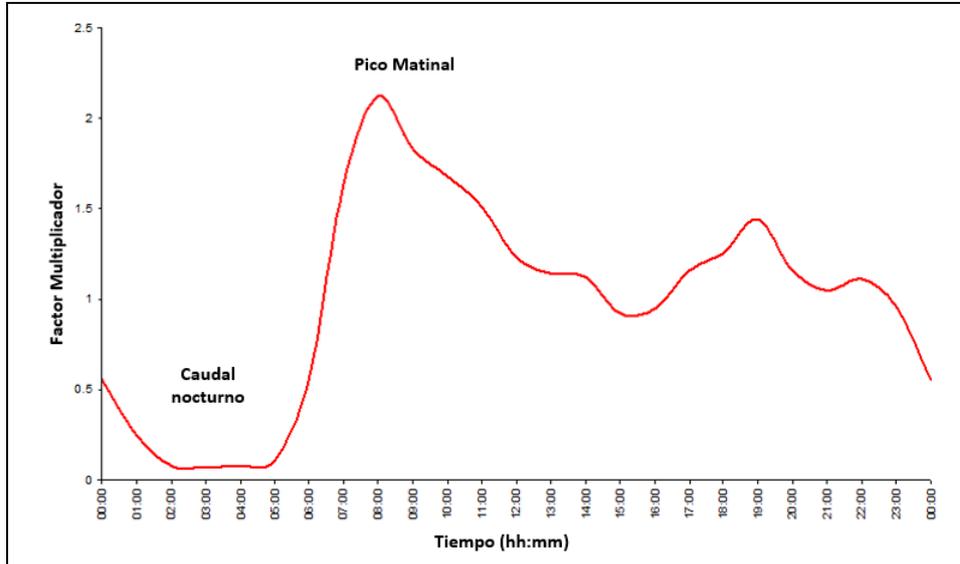
El trazado de las subcuencas es una fase fundamental dentro de proceso de construcción del modelo. Deben trazarse por un lado las subcuencas vertientes al sistema de residuales y por otra parte las vertientes al sistema de pluviales; éstas pueden superponerse y en muchos casos coincidir. Se propone que las subcuencas no excedan de 2 Ha (aunque el tamaño depende de la precisión que se requiera en los resultados del estudio) y cada subcuenca debe ser conectada con el pozo al que sea más probable su drenaje. El trazado y asignación de pozos puede ajustarse posteriormente en la fase de verificación.

Para cada subcuenca deben definirse sus características (tabla 6.3.), que se pueden resumir en:

- Caracterización del caudal generado por la población dentro de la subcuenca: asignación del perfil de generación de aguas residuales y del consumo diario por persona. El perfil asignado se calibra posteriormente en la fase de verificación. Como primera aproximación puede utilizarse el perfil propuesto por la Asociación de Investigación e Información en la Construcción (Ainger et al., 1998)

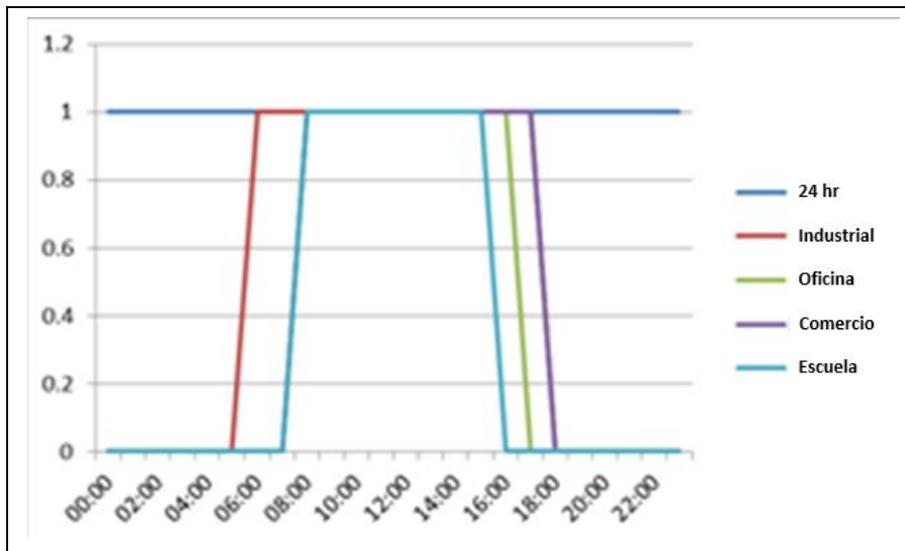
que realizó un estudio para definir un perfil medio de generación de aguas residuales domésticas (figura 6.3.6)

Figura 6.3.6.- Perfil de generación de aguas residuales domésticas



- Caracterización del caudal generado por comercios e industrias, indicando el caudal total generado y su distribución en el tiempo. Al igual que en el perfil de residuales domésticas, el perfil de residuales comerciales/industriales se calibra durante la verificación. Pueden suponerse como perfiles iniciales los propuestos en la figura 6.3.7 (Aguas de Gales, 2011).

Figura 6.3.7. Perfiles de generación de aguas residuales comerciales/industriales



- Área de las distintas superficies de escorrentía incluidas en la subcuenca (por ejemplo superficie tipo pavimento, tipo tejado y tipo zona verde), indicando qué modelo de escorrentía se utiliza para el cálculo de cada uno de los tipos de superficie de escorrentía considerados. La distribución de áreas de escorrentía se realiza a ser posible a partir de los resultados de los estudios de áreas impermeables (punto 5.1.).

Definida la red de drenaje y las subcuencas vertientes, incluyendo toda la información recopilada en etapas anteriores, daría por finalizada la fase de construcción del modelo. El modelo está listo para ser validado y posteriormente verificado.

6.4. Validación del modelo

La fase denominada como de validación del modelo se podría incluir dentro de la etapa de construcción ya que consiste en realizar comprobaciones en el modelo construido que garanticen que no hay errores o inconsistencias en él y por tanto pueda ser posteriormente verificado.

Las comprobaciones a realizar en la red se pueden clasificar según se muestra en la tabla 6.5 a continuación.

Tabla 6-5.- Comprobaciones en la etapa de Validación del Modelo

Proceso	Descripción
Comprobación de secciones longitudinales	Comprobación de datos y etiquetas (flags) en conductos y pozos e interpolación de datos.
Rugosidad / Sedimentos	Comprobación de rugosidad asignada a los conductos en función del material y de la existencia de sedimentos en el tramo.
Tipos de inundación	Comprobación de los tipos de inundación asignado a cada pozo (sealed, lost, stored)
Profundidades de inundación	Definición del cono de inundación asignado a los pozos.
Área inundable	Asignación del área inundable asignada a cada pozo. Infoworks asigna área inundable nula por defecto a los pozos no conectados con subcuencas.
Coefficientes de pérdidas	Definición del coeficiente de pérdidas localizadas para cada entronque colector-pozo.

Proceso	Descripción
Almacenamiento adicional en pozos	Rectificación de las áreas asignadas a los pozos para compensar el volumen de almacenamiento de la red de colectores.
Modelos de escorrentía	Revisión de los modelos de escorrentía aplicados en el modelo.
Validación ingenieril	Validación final de la red de saneamiento a nivel topológico y geométrico mediante la utilización del módulo "engineering validation" en Infoworks.
Estabilidad del modelo	Comprobación de la estabilidad numérica del modelo.

La comprobación de secciones longitudinales consiste en la comprobación de los datos geométricos introducidos en colectores y pozos a partir de los datos recopilados en fase anteriores de análisis y de las etiquetas (flags) asignadas a cada dato que dan información sobre su procedencia.

También se comprueba la conectividad, y se realiza un completado de datos mediante interpolación en los casos en los que no se hayan podido obtener de las fuentes de información analizadas. En el caso de los perfiles longitudinales de los conductos es recomendable asumir la no existencia de tramos en contrapendiente a no ser que las investigaciones realizadas indiquen lo contrario.

La comprobación de rugosidad implica asignar el valor correcto de rugosidad (número de Manning o rugosidad en milímetros si se opta por Colebrook-White) en función del material del colector. También es posible diferenciar la rugosidad de un mismo material en función de si está instalado en una red de residuales o de pluviales. Esta comprobación implica también el chequeo de los conductos a los que se les ha aplicado capa de sedimentos proveniente de la información de las investigaciones por CCTV. La capa de sedimentos suele tener una rugosidad mayor que cualquier otro tipo de material. Los valores de rugosidad a utilizar pueden variar ligeramente dependiendo de la fuente de información que se utilice.

Los tipos de inundación (tabla 6.1) asignados deben ser revisados ya que los resultados obtenidos pueden diferir bastante en función de los tipos de inundación elegidos:

- Tipo de inundación “sealed”: es aplicable a pozos que se sepa están físicamente sellados, pozos auxiliares utilizados para modelar estructuras hidráulicas complejas pero que en realidad no existen, pozos ficticios que se han utilizado para cambios de alineación.
- Tipo de inundación “stored”: aplicable a los pozos convencionales en sistemas de residuales y pluviales.
- Tipo de inundación “lost”: aplicable en pozos situados en zonas verdes extensas en las que no es probable que el volumen de inundación retorne al sistema, pozos de residuales en sistemas separativos en los que el volumen de inundación se introducirá en el sistema de pluviales, pozos cercanos a cauces en los que el volumen de inundación verterá al cauce.

Las profundidades de inundación y el área inundable (tabla 6.1) definen la geometría del cono de inundación que Infoworks utiliza para establecer la relación entre volumen de inundación y profundidad de inundación para los pozos en los que el tipo de inundación es “stored”. Es importante definir valores para el área inundable de cada pozo ya que Infoworks considera por defecto esta área nula en el caso que el pozo no esté conectado con ninguna subcuenca.

En los entronques de cada colector con cada pozo debe definirse el coeficiente de pérdidas localizadas. En función del ángulo de incidencia del conducto que llega al pozo se define el coeficiente para dicho conducto en su extremo de entrada al pozo. El coeficiente del extremo de salida del pozo puede asimilarse al valor del coeficiente del extremo de entrada del conducto aguas arriba en el mismo pozo. En el caso de intersecciones complejas se realiza una media ponderada en función de los diámetros de entrada al pozo.

Debe realizarse una comprobación del volumen total de la red de saneamiento y corregirse de manera que se aproxime lo máximo posible al volumen real. Por una parte debe contemplarse un incremento en el volumen de la red de colectores ya que no se modela el 100% de tuberías presentes como acometidas domiciliarias que en realidad suponen un volumen de almacenamiento extra. Por otra parte, para realizar el cálculo numérico Infoworks dota de un volumen extra a los conductos (“Priessman Slot”) para

el cálculo en carga y también disminuye el volumen útil de los conductos al utilizar un porcentaje del conducto para alojar el flujo base.

Por tanto el volumen de almacenamiento de cada pozo debe aumentarse o disminuirse para compensarse las variaciones de volumen de la red por cálculo numérico y para incluir el volumen de la red de colectores no incluida en el modelo (como por ejemplo acometidas domiciliarias). Esta compensación de volúmenes se realiza utilizando el módulo denominado “Storage compensation” en Infoworks.

Debe realizarse una comprobación de los diferentes modelos de escorrentía implementados para cada una de las diferentes áreas drenantes consideradas en el modelo.

Como última comprobación de la red se utiliza la herramienta “Engineering Validation” para detectar errores topológicos en la red o cualquier anomalía que pueda ocasionar problemas en los cálculos, como por ejemplo la presencia de conductos demasiado cortos.

Finalmente, con la red ya construida se realiza la comprobación de la estabilidad del modelo. Se trata de testear el modelo frente a un día seco y dos tormentas sintéticas, por ejemplo pueden ser de 5 y 25 años de período de retorno (Aguas de Gales, 2011).

Para el día seco se comprueba que ninguno de los aliviaderos está activo y que ninguna red de pluviales está aliviando al cauce.

Para las tormentas puede comprobarse la inestabilidad numérica del modelo verificando que los balances de volumen entrante, saliente y almacenado no son excesivamente altos.

7. VERIFICACIÓN DEL MODELO

7.1. Verificación en base al estudio de caudales

Como se ha descrito en el punto 5.1 a partir del estudio de caudales obtenemos datos de intensidad de precipitación a lo largo de la cuenca y de velocidad y calado en los puntos elegidos de la red de saneamiento. A partir de los datos de velocidad y calado y conociendo las características de la sección podemos obtener el caudal.

Conociendo estos datos reales, el proceso de verificación consiste en realizar los ajustes legítimos o no arbitrarios para que el modelo construido reproduzca los caudales, velocidades y calados observados a partir de los datos de precipitación tomados en el estudio de caudales.

Es importante resaltar que los ajustes que se realizan sobre la red o la cuenca deben estar fundamentados o al menos ser probables y quedar documentados para que puedan ser comprobados. La verificación del modelo no puede suponer un ajuste forzoso de las características de la red para obtener los resultados deseados. Por ejemplo, la verificación no incluiría el modificar el diámetro de una tubería que ha formado parte de las investigaciones para modificar la velocidad obtenida del modelo.

La verificación es por tanto un proceso iterativo que requiere del conocimiento ingenieril de la cuenca y del comportamiento hidráulico de la red de saneamiento para conseguir que el modelo replique la realidad.

La primera fase de la verificación en realidad se lleva a cabo durante la realización del estudio de caudales:

- Es fundamental elegir los puntos adecuados en los que se instalarán los monitores de flujo o caudalímetros; deben ser zonas en las que necesitemos que el modelo replique la realidad con más detalle, y a la vez puntos en los que la calidad esperable de los datos sea buena.
- Es importante también realizar el seguimiento y el análisis de los datos que se van obteniendo del estudio de caudales para proceder a los cambios y modificaciones necesarias en caso que los datos no sean buenos.

- En base a los datos de precipitación obtenidos deben elegirse los eventos de tormenta y los días secos frente a los que se realizará la verificación del modelo.

En definitiva, la calidad de los datos obtenidos del estudio de caudales determinará el grado de verificación que se podrá obtener del modelo construido.

La entidad explotadora o reguladora de la cuenca objeto de estudio debe establecer los requisitos que deben cumplir los días secos y las tormentas seleccionadas. En este caso se exponen los criterios presentados en la Guía para Investigaciones de Caudales del Centro de Investigaciones del Agua de Reino Unido (Drinkwater et al., 1987):

- Deben seleccionarse al menos tres eventos de tormenta que cumplan los requisitos expuestos en la tabla 7.1.

Tabla 7-1.- Requisitos de tormentas para verificación (Drinkwater et al., 1987)

Cuenca	Precipitación total mínima (mm)	Intensidad mínima (mm/h)	Duración mínima de la tormenta (min)	Variabilidad
Pequeñas cuencas urbanas (menos de 5,000 habitantes)	5 mm	5 mm/h durante al menos 4 minutos	30 min	No mayor del 40% en las precipitaciones acumuladas
Cuenca mediana, hasta 50,000 habitantes	5 mm	5 mm/h durante al menos 6 minutos	60 min	
Cuenca grande, población > 50,000 habitantes	8 mm	4 mm/h durante al menos 15 minutos	El mayor entre el tiempo de concentración de la cuenca y 60 minutos	

- Deben seleccionarse al menos dos días secos que hayan sido precedidos por al menos dos días sin registro de precipitación. Uno de ellos debe ser fin de semana y el otro entre semana, a poder ser no coincidentes con grandes eventos que incrementen considerablemente la población en la cuenca de estudio.

Las tormentas seleccionadas y los días secos deben coincidir además con buena calidad en los datos registrados por caudalímetros y pluviógrafos.

Además del análisis de los gráficos de datos provenientes del estudio de caudales también es posible analizar si los datos obtenidos de caudal y calado se aproximan a la curva teórica del flujo en la tubería, por ejemplo utilizando la fórmula de Colebrook

White. Las figuras 7.1.1 y 7.1.2 muestran casos en los que los datos parecen erróneos y correctos respectivamente al compararlos con la curva teórica.

Figura 7.1.1.- Estudio de Caudales: Datos erróneos en comparación con curva teórica

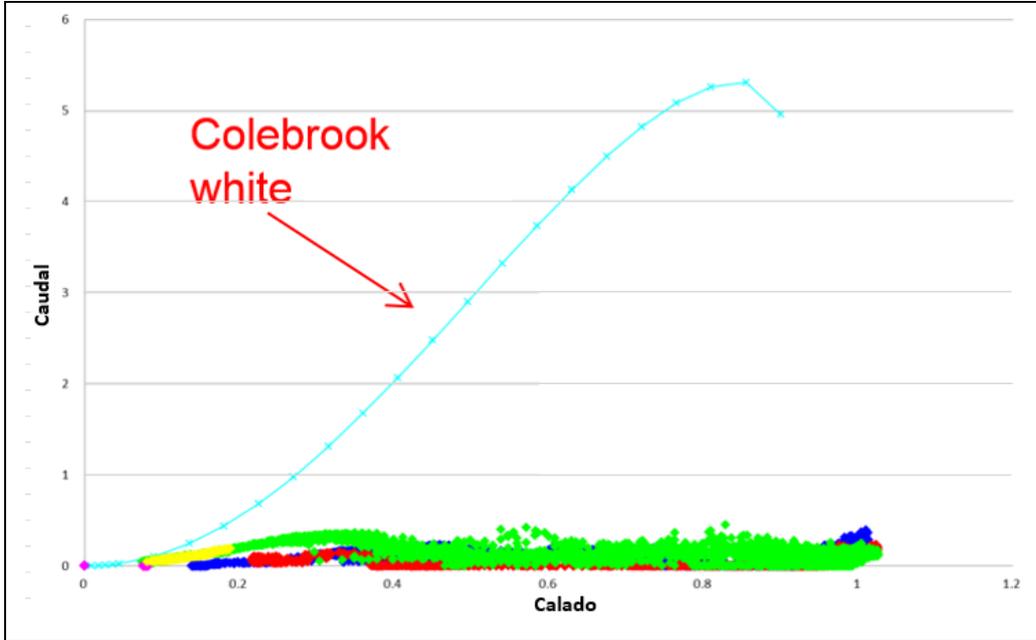
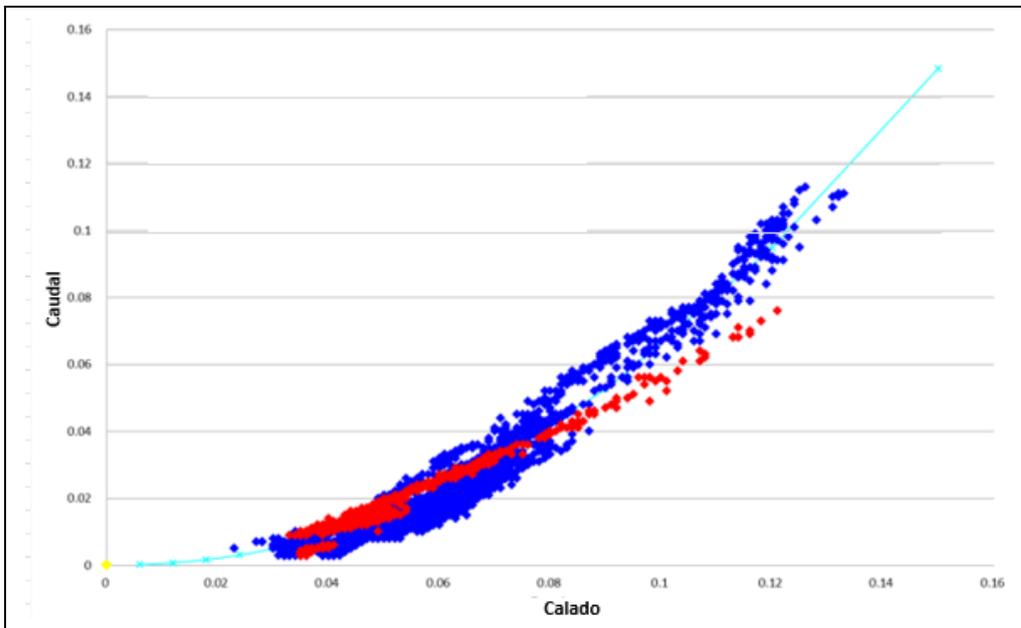
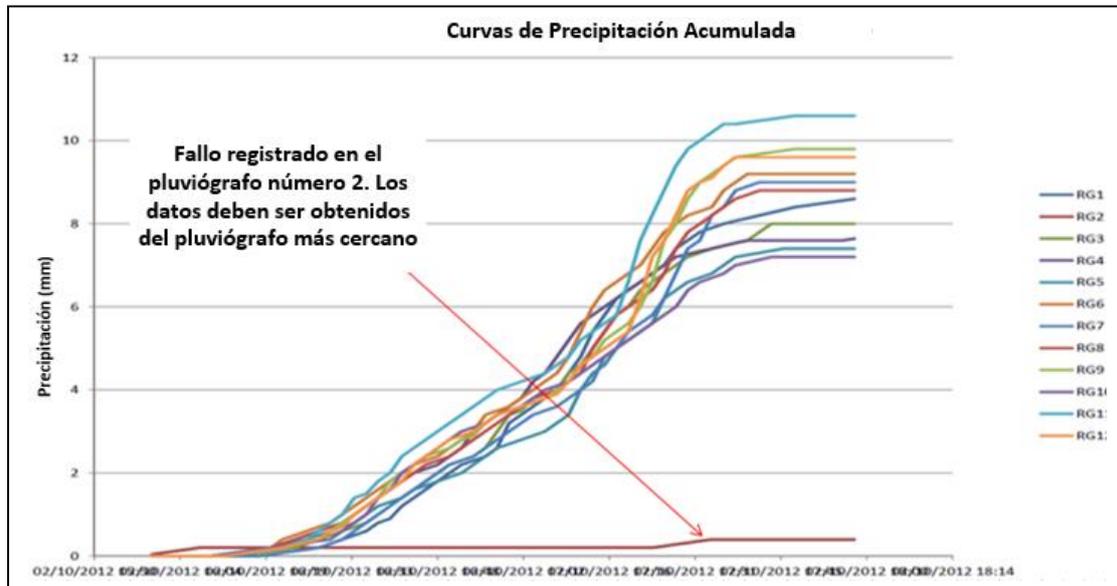


Figura 7.1.2.- Estudio de Caudales: Los datos se ajustan a la curva teórica



La calidad de los datos proporcionados por los pluviógrafos se puede analizar realizando un gráfico de precipitaciones acumuladas en la que se puede comprobar si alguno de los pluviógrafos falla en el registro de alguna tormenta (figura 7.1.3).

Figura 7.1.3.- Pluviógrafos: Gráfico de precipitaciones acumuladas



Seleccionados los eventos de precipitación y los días secos que presentan a su vez una buena calidad en los datos registrados por caudalímetros y pluviógrafos la secuencia lógica del proceso de verificación es:

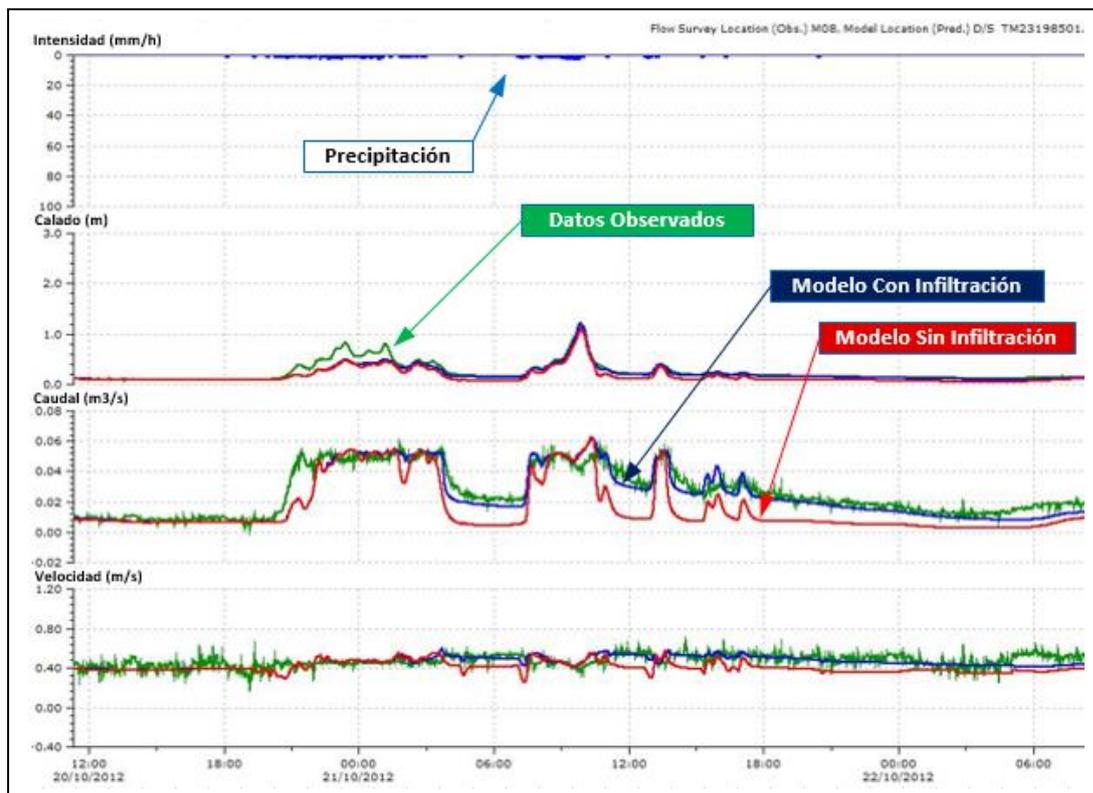
- Verificar primero los días secos y después las tormentas, verificando primero los caudales de residuales e infiltración no inducida por tormentas y después los caudales de tormenta que se adicionan a los de tiempo seco.
- Verificar los caudalímetros desde aguas arriba hacia aguas abajo, ya que los cambios realizados afectan hacia aguas abajo.

Se considera que un caudalímetro está verificado cuando además de que los gráficos observados y obtenidos del modelo se aproximan visualmente en forma y magnitud, las diferencias en magnitud entran dentro de unos intervalos de confianza. Estos intervalos de confianza deben ser fijados por la entidad que gestione la cuenca, y se debe tener en cuenta que las mediciones de los caudalímetros, aunque sean correctas, siempre tienen un margen de error que suele ser en general del 10% (Drinkwater et al., 1987).

En el caso de la verificación en tiempo seco los gráficos resultados del modelo se ajustan principalmente actuando sobre las fuentes generadoras de caudal de residuales como caudal generado por la población, comercios, e industrias, no sólo en magnitud si no también calibrando las curvas de generación de caudal. También se ajusta la infiltración observada, y características geométricas e hidráulicas de la red que proporcionen un mejor ajuste.

Para la verificación de las tormentas principalmente se ajustan las áreas drenantes a los pozos, obstrucciones que puedan afectar al flujo, comportamiento de aliviaderos y bombes, características geométricas e hidráulicas que mejoren el ajuste de las predicciones del modelo a los datos observados. También se introduce el módulo de infiltración en el terreno en el caso de que se observen respuestas diferidas en el tiempo; la figura 7.1.4 muestra un ejemplo en el que la introducción del módulo de infiltración en el terreno mejora significativamente el nivel de verificación al observarse respuesta diferida de la escorrentía.

Figura 7.1.4.- Verificación: ejemplo con respuesta diferida



Los intervalos propuestos para considerar que la verificación se ha alcanzado son los propuestos en el Código Práctico de Modelación Hidráulica de Sistemas de Drenaje Urbano de Reino Unido (WaPUG, 2002):

- Para la verificación en tiempo seco debe cumplirse que:
 - El caudal pico comparado entre el valor obtenido del modelo y el observado debe estar entre el 10% y el -10%.
 - El volumen comparado entre el valor obtenido del modelo y el observado debe estar entre el 10% y el -10% para el período analizado.
- Para la verificación de los eventos de tormenta debe cumplirse que:
 - El caudal pico comparado entre el valor obtenido del modelo y el observado debe estar entre el 25% y el -15%.
 - El volumen comparado entre el valor obtenido del modelo y el observado debe estar entre el 20% y el -10% para el período analizado.
 - El calado pico obtenido del modelo con respecto al observado debe estar dentro del intervalo +0.5 m y -0.1 m.

Todos los cambios realizados en el modelo como consecuencia de la fase de verificación deben ser documentados y las etiquetas en el modelo actualizadas para reflejar que el dato proviene de la fase de verificación.

Con el modelo verificado en base al estudio de caudales es necesario realizar la verificación del modelo en base a los registros históricos.

7.2. Verificación histórica

La verificación histórica sería el último proceso a realizar para obtener un modelo de la cuenca fiable para poder utilizarlo como herramienta de análisis de la misma.

La etapa de verificación histórica consiste en la comparación de las predicciones del modelo con los registros históricos de inundaciones en la cuenca objeto de estudio (Aguas de Gales, 2011).

La verificación histórica es un proceso importante ya que representa un primer test del modelo frente a eventos de mayor período de retorno ya que rara vez la verificación frente a caudales obtenidos del estudio de caudales incluye eventos extraordinarios de precipitación. En el caso de no tener registrados eventos históricos de inundaciones con la suficiente precisión como para ser comparados con los resultados del modelo, la verificación histórica supone al menos un análisis crítico de los resultados de inundación para altos períodos de retorno, permitiendo encontrar errores en el modelo que puedan estar causando inundaciones no esperadas.

En el caso de tener un registro de precipitaciones histórico y sus consecuencias a nivel de áreas de inundación el modelo se ejecuta incluyendo como input el registro de precipitaciones extraordinarias que causaron inundaciones en el pasado, comprobándose si las predicciones del modelo se aproximan a la realidad, realizando las modificaciones oportunas en el modelo para que éste represente los eventos de inundación históricos, y en su caso, realizando más investigaciones si fuera necesario.

Si no se dispone de registro de tormentas históricas el modelo se comprueba con tormentas generadas para distintos periodos de retorno y distintas duraciones, comprobándose si las áreas de inundación que predice el modelo coinciden con las registradas históricamente.

En el caso de que las áreas de inundación no coincidan o el modelo de como resultado volúmenes de inundación excesivamente altos en zonas en las que no se registran inundaciones debe realizarse un análisis de las causas. En muchos casos pueden ser errores en el modelo, principalmente en zonas que no han sido verificadas frente al estudio de caudales; en otros casos puede ser por falta de datos en los registros históricos, o que el área en el que predcimos inundaciones sea un área de nueva construcción y que, por tanto, no aparece en los registros históricos.

La verificación histórica supone por tanto el análisis final del modelo en el que es necesario un conocimiento del funcionamiento hidrológico-hidráulico global de la misma y en el que no existe una casuística ni un procedimiento de actuación concreto, sino que debe ser el criterio ingenieril el que comprenda las limitaciones del modelo para su utilización en las posteriores etapas de análisis y propuestas de soluciones.

8. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RIESGOS

8.1. Riesgos hidráulicos

Construido y verificado el modelo hidráulico de la cuenca puede realizarse la evaluación y análisis de los riesgos hidráulicos. En la fase de análisis inicial de los riesgos de la cuenca (punto 4) se revisaron y actualizaron los riesgos hidráulicos en base a bases de datos de riesgos existentes y a registros históricos de incidentes.

El modelo hidráulico de la cuenca permitirá en esta fase comprobar y actualizar los riesgos hidráulicos detectados en la fase de análisis inicial de riesgos y generar nuevos riesgos provenientes de los resultados obtenidos del modelo.

La evaluación y análisis de los riesgos de la cuenca incluye el estudio de los riesgos en un escenario futuro según los resultados obtenidos del modelo que incluya las características climáticas y de la cuenca en el escenario futuro que se desea estudiar. En el ejemplo de aplicación (punto 10) el escenario futuro se contempla para un horizonte de 25 años.

Conociendo la valoración actualizada de los riesgos en el presente y en el escenario futuro podrá analizarse qué zonas presentan mayor riesgo y de esta manera planificar las intervenciones necesarias.

Los riesgos hidráulicos a analizar son principalmente los de inundación interna y externa, polución e incumplimiento de normas de vertido ligado al nivel de severidad de “vertido prematuro” (Tabla 2.2).

El primer elemento a comprobar es si los riesgos hidráulicos recopilados en la etapa de análisis inicial son realmente debidos a causas hidráulicas, o son debidos a “otras causas”, como obstrucciones, colapsos, fallos en bombeos, etc. Esta comprobación exige la simulación del modelo eliminando los elementos que originan inundaciones por “otras causas” como obstrucciones introducidas en el modelo, y comprobando que los riesgos de inundación coinciden con las inundaciones obtenidas del modelo.

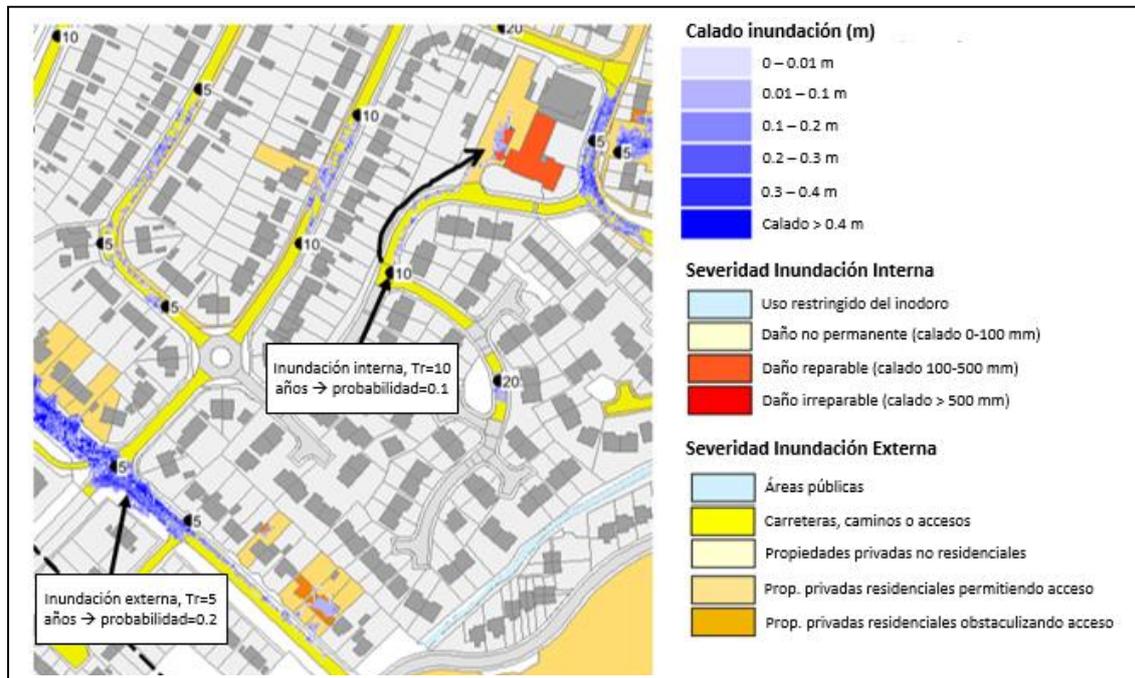
En el caso que el modelo confirme que riesgos de inundación catalogados inicialmente como de causas hidráulicas no lo sean, éstos deberían cambiar de catalogación pues el tipo de solución aplicable será distinta.

Los resultados obtenidos del modelo al realizar múltiples simulaciones con tormentas de distintos períodos de retorno y distintas duraciones permiten obtener resultados de probabilidad y severidad (o consecuencia) de los riesgos hidráulicos. Esto permite la actualización de los valores de riesgos hidráulicos asignados en la etapa de análisis previo y la generación de nuevos riesgos hidráulicos.

Los distintos grados de severidad son asignados en función del calado de inundación obtenido a partir del volumen de inundación obtenido en los pozos. Este análisis supone el modelado en dos dimensiones, o al menos el pseudomodelado utilizando los volúmenes de inundación obtenidos y un modelo digital del terreno que permita distribuir el volumen de inundación en la superficie. El análisis en un sistema de información geográfico permite determinar si la inundación es interna o externa.

La figura 8.1.1 muestra un ejemplo en el que el volumen de inundación es extendido sobre la superficie a partir de cada pozo, determinándose el alcance de ésta.

Figura 8.1.1.- Mapa de riesgos de inundación (ejemplo de aplicación)



Como resultado del modelo se obtiene el período de retorno a partir del cual comienza la inundación. Dependiendo de los calados alcanzados podemos clasificar la severidad de la inundación en uno de los cuatro niveles propuestos en el punto 2.3 para realizar la

valoración de riesgos en el caso de inundación interna, o cinco niveles en el caso de inundación externa.

Con los valores de probabilidad y severidad obtenidos del modelo se obtiene la valoración de los riesgos hidráulicos:

- Por una parte se actualiza la valoración de los riesgos hidráulicos existentes, ya que en general la valoración realizada en el análisis inicial de riesgos proviene de datos observados lo que dificulta en la mayoría de casos la estimación correcta de la probabilidad de ocurrencia.
- Por otra parte se generan nuevos riesgos hidráulicos y se asigna a ellos la valoración procedente de los resultados del modelo.

Como se explica en el punto 4, la valoración de cada riesgo se puede calcular como:

$$\text{ValorRiesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia} \times \text{Coste}$$

Además de las inundaciones se analizan los riesgos de polución y de incumplimiento de normas de vertido. En este caso se analizan los eventos de inundación que alcancen cauces públicos para el caso de polución, y los vertidos prematuros a cauces públicos desde aliviaderos.

El análisis de los riesgos hidráulicos a partir de los resultados obtenidos del modelo se realiza para la situación actual pero también debe realizarse para un escenario futuro de manera que pueda analizarse la evolución esperada de los riesgos en la cuenca y puedan planificarse convenientemente las actuaciones en la cuenca a corto, medio y largo plazo.

El escenario futuro supone la simulación del modelo incluyendo las siguientes actualizaciones al mismo:

- Deben incluirse todos los planes urbanísticos que se espera sean ejecutados dentro del horizonte considerado. Esto significa la adición de subcuencas con su respectiva población estimada, comercios e industria, incluyendo las áreas de drenaje que se estima contribuyan como escorrentía en la red de saneamiento.
- Se actualiza el valor total del área impermeable en la cuenca, ya que para estar del lado de la seguridad hay que suponer que el área impermeable en la cuenca

conectada con la red de saneamiento va a incrementarse. Dependiendo de la zona de estudio los ratios de incremento de áreas impermeables en la cuenca variarán por lo que habrá que realizar un estudio detallado o recurrir a normativa que indique los valores a utilizar.

- Las tormentas de diseño deben ser modificadas para tener en cuenta el efecto del cambio climático. Dependiendo de la zona de estudio y de los estudios existentes en este ámbito se puede determinar el factor corrector aplicable a las tormentas de diseño.

Por tanto el modelo hidrológico-hidráulico de la cuenca permite identificar los riesgos hidráulicos en la cuenca para la situación actual y el escenario futuro, de manera que éstos pueden ser analizados para la elaboración del plan de actuaciones de la cuenca.

8.2. Riesgos con "otras causas". Modelo de deterioro

Los riesgos con "otras causas" son los debidos a causas "no hidráulicas", principalmente obstrucciones y colapsos en la red de saneamiento. Las obstrucciones y colapsos son el origen o causa de riesgos importantes en la cuenca como los de inundación interna y externa, y polución.

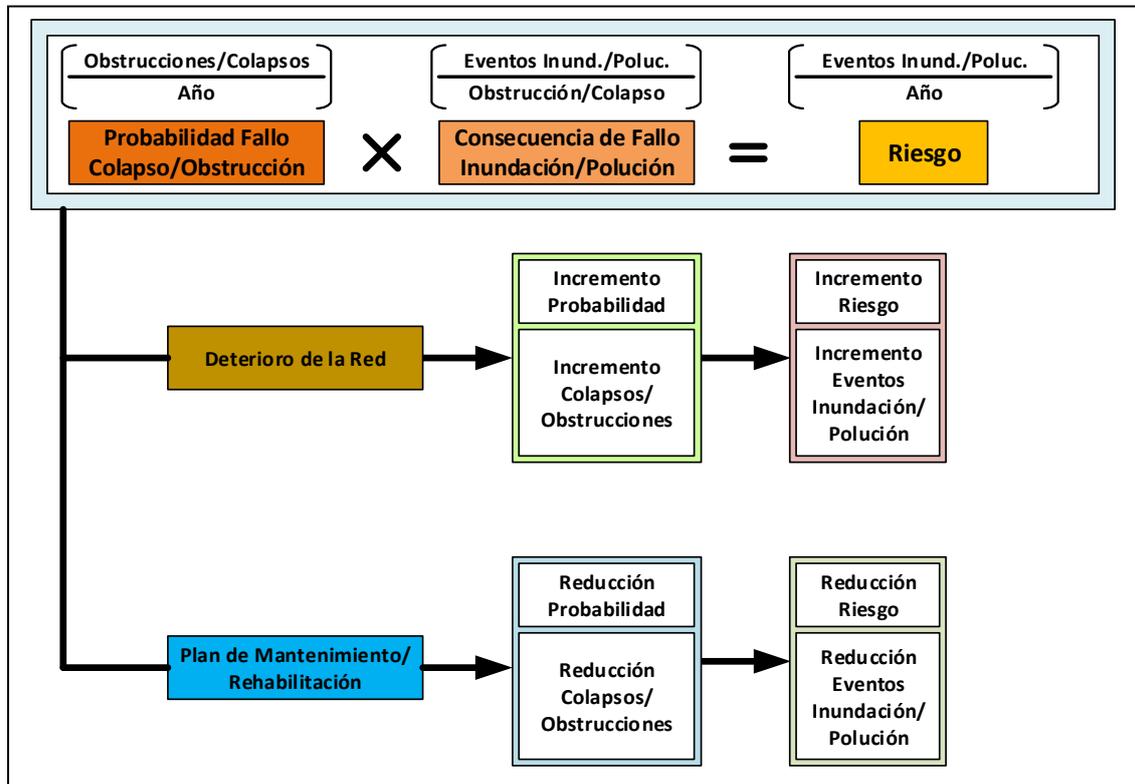
En base a los riesgos de inundación y polución debidos a "otras causas" se planea la estrategia de mantenimiento y rehabilitación de la red de saneamiento. El análisis propuesto por lo tanto no se enfoca solamente en las causas, sino también en las consecuencias de obstrucciones y colapsos.

Si se planeara la estrategia de mantenimiento y rehabilitación únicamente teniendo en cuenta las zonas de obstrucciones y colapsos podría ocurrir que las actuaciones se centraran en zonas de grandes concentraciones de obstrucciones o colapsos pudiendo dejar al margen por ejemplo obstrucciones aisladas que pudieran estar originando un daño grave de inundación.

El modelo de deterioro (Aguas de Gales et al., 2013) indica a nivel individual de cada conducto o tubería la probabilidad de fallo (obstrucción o colapso) y la consecuencia de ese fallo (inundación o polución), así como la evolución con el tiempo de las

probabilidades de fallo en un escenario reactivo (ausencia de reparaciones o rehabilitación) y suponiendo que se realizan actuaciones para la rehabilitación o reparación de la red de saneamiento.

Figura 8.2.1.- Modelo de Deterioro: Variación del Riesgo



Es decir, el modelo permite el cálculo del riesgo de inundación y polución debido a “otras causas” para cada tubería, por lo que, conociendo la valoración de los riesgos puede conocerse el coste anual de cada una de las severidades de los riesgos para el global de la cuenca sumando el coste de todas la tuberías.

El modelo de deterioro permite el cálculo de la evolución con el tiempo de cada uno de los riesgos, por lo que se conoce el incremento de coste anual de los riesgos de inundación y polución debidos a “otras causas”.

También se realiza el cálculo de la variación de la probabilidad de obstrucción o colapso en función de la intervención de reparación o rehabilitación que se aplica; de esta manera se puede calcular la variación en los riesgos de inundación y polución y la variación de su coste, por lo que al compararlo con el coste de la actuación de reparación elegida puede determinarse si es económicamente viable. La elección y optimización de

actuaciones a ejecutar y su distribución temporal constituye el Plan de rehabilitación y mantenimiento (punto 9.2).

El modelo de deterioro consta de un modelo de fallo del que se obtiene la probabilidad de cada tubería de sufrir una obstrucción o colapso y un modelo de consecuencia que da como resultado para cada tubería las diferentes severidades de inundación y polución causadas por las obstrucciones o colapsos (Figura 8.2.2). El modelo de fallo incluye el cálculo de la evolución de la probabilidad de obstrucciones y colapsos con el tiempo, por lo que se puede calcular la evolución de los riesgos debidos a obstrucciones y colapsos.

Figura 8.2.2.- Modelo de deterioro: Componentes del cálculo de riesgos



Existe una gran variedad de artículos e investigación sobre los modelos de deterioro. El modelo de deterioro utilizado en el ejemplo de aplicación (punto 10) es el modelo utilizado por la compañía Aguas de Gales.

Aguas de Gales realizó en 2013 un estudio a escala estatal mediante el cual obtuvo:

- Utilizando los datos de obstrucciones y colapsos en Gales en el período 2001-2012, mediante técnicas estadísticas se determinaron las probabilidades de obstrucción y colapso para cada tubería.
- El estudio incluyó el cálculo de las consecuencias de obstrucciones y colapsos de cada tubería en términos de inundación interna y externa, y polución, para cada uno de los niveles de severidad que se muestran en la figura 8.2.2.

El modelo de deterioro utilizado en el estudio indica la formulación a utilizar para el cálculo de la evolución de la probabilidad de obstrucción y colapso en los siguientes supuestos:

- Escenario reactivo, no se realiza ninguna actuación: en este caso la evolución de la probabilidad de obstrucción y colapso sigue una función exponencial que depende de una tasa de deterioro (TD) tabulada según el material de la tubería y el área de Gales (ver punto 10.6 y 10.7):

$$P_{i+1} = P_i \cdot e^{TD \cdot \Delta t}$$

- Escenario incluyendo el Plan de Mantenimiento: en este caso la evolución de probabilidad de obstrucción y colapso para cada tubería depende del tipo de intervención (ver punto 9.2).

Como se verá en el ejemplo de aplicación, los valores de probabilidad inicial de obstrucciones y colapsos requieren de una primera fase de “tuning” o calibración en la que se actualizan según la información registrada de la cuenca proveniente de los estudios de CCTV.

9. DESARROLLO DEL PLAN DE INTERVENCIONES

9.1. Intervenciones hidráulicas

El Plan de Intervenciones de la cuenca supone el objetivo de la metodología de análisis propuesta en la presente tesis. El Plan de Intervenciones incluye las actuaciones propuestas económicamente viables para la solución total o parcial de los riesgos identificados en la cuenca.

Debido a la definición y procedimiento de análisis diferente de los riesgos denominados hidráulicos y de los riesgos denominados como “otras causas” el desarrollo de intervenciones se propone estudiarlo y confeccionarlo de manera desacoplada entre intervenciones hidráulicas e intervenciones de mantenimiento y rehabilitación correspondientes a los riesgos con “otras causas”.

Las intervenciones hidráulicas están destinadas a resolver o paliar parcialmente los riesgos hidráulicos identificados en la cuenca, es decir, los riesgos de inundación interna, los riesgos de inundación externa y los riesgos de polución ligados a una causa hidráulica, como por ejemplo la polución de un río debido al desbordamiento de un pozo de aguas residuales próximo a él.

El período de estudio propuesto tanto para el análisis hidráulico de la cuenca como para el análisis de las intervenciones es de 25 años aunque este podría modificarse en función del estudio de cuenca a realizar. Los riesgos hidráulicos se analizan y valoran para el escenario presente y para el escenario futuro teniendo en cuenta la evolución del urbanismo, el incremento de áreas impermeables y la afección del cambio climático a las tormentas de diseño.

En función de la valoración de los riesgos en la cuenca y su ubicación correspondiente es posible establecer qué zonas requieren un estudio de soluciones y con qué prioridad deben acometerse las actuaciones dentro del Plan de Intervenciones.

Las actuaciones hidráulicas pueden eliminar totalmente los riesgos, por ejemplo al incrementar el diámetro de una conducción la inundación interna que muestra el modelo desaparece para el máximo período de retorno de diseño contemplado, o bien pueden reducir la valoración de los mismos.

La reducción parcial de la valoración de riesgos puede tener dos componentes:

- Reducción de la frecuencia: por ejemplo si la actuación propuesta elimina la inundación para un período de retorno de 10 años, pero no la elimina para un período de retorno de 30 años.
- Reducción de la severidad: por ejemplo si la actuación propuesta elimina una inundación interna con daño irreparable, y pasa a ser una inundación externa afectando a carreteras o caminos.

Tanto si se elimina el riesgo totalmente como si se elimina parcialmente debido a la implementación de una actuación, se puede cuantificar el beneficio obtenido como la suma de la reducción de coste del riesgo en el horizonte de análisis.

Conociendo el coste de la actuación propuesta, el análisis coste-beneficio para cada actuación consiste en la comparación del coste de la actuación con el beneficio causado por ésta en la cuenca.

Por ejemplo, en el caso de tener una zona con distintos riesgos de inundación interna para períodos de retorno bajos, en la que el coste del riesgo sea 100.000 €/año, si se propone la construcción de un tanque de tormentas que incremente el período de retorno de inundación y disminuya el riesgo a 10.000 €/año, el beneficio a lo largo de 25 años sería de 2.250.000 €, por lo que si el tanque se presupuesta por una cantidad inferior (incluyendo costes de proyecto, construcción, mantenimiento y explotación) sería un proyecto viable económicamente.

En el caso que el coste de la actuación sea asumible (económica y medioambientalmente) y genere un beneficio suficiente, la actuación pasaría a formar parte del Plan de Intervenciones de la cuenca.

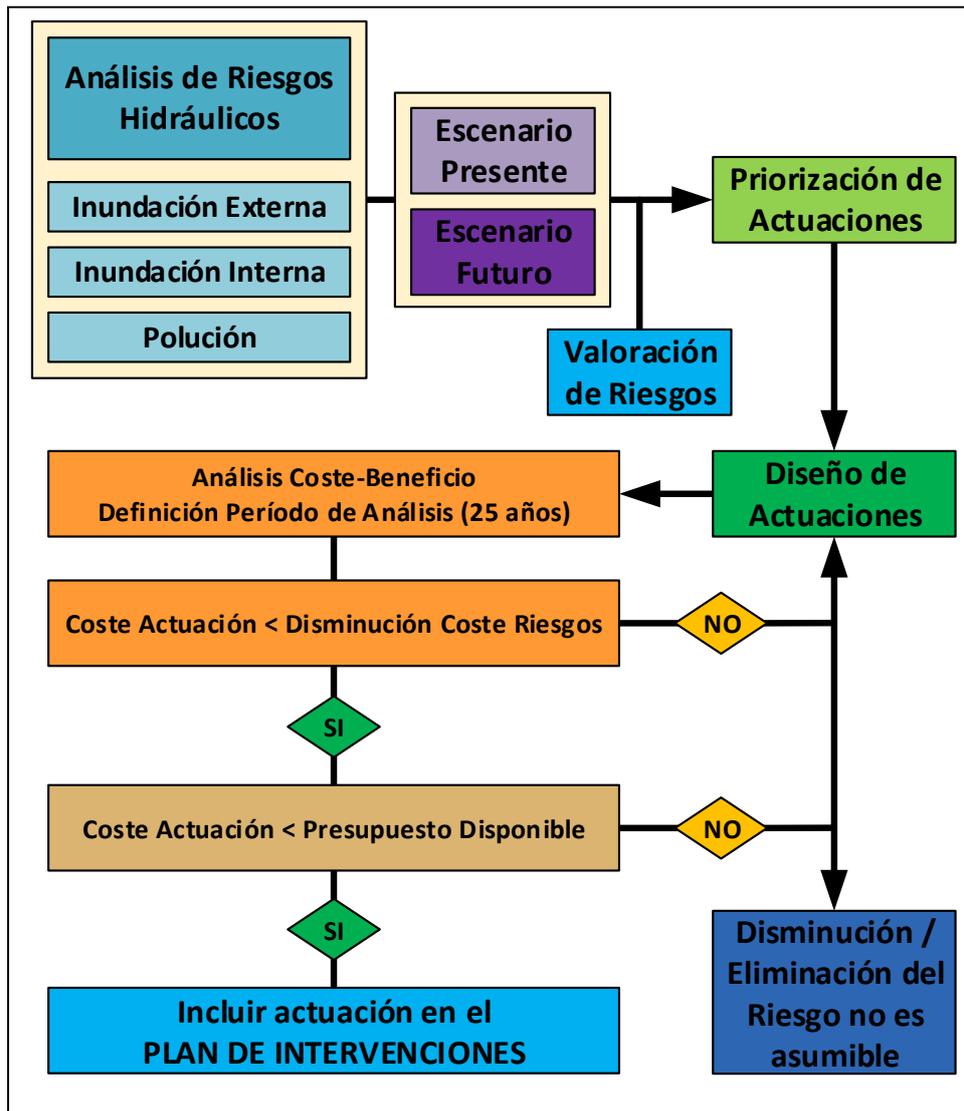
En función de la importancia de las actuaciones, el presupuesto disponible y los objetivos de disminución de riesgo establecidos en la cuenca, se pueden planificar cronológicamente las actuaciones propuestas que tras el análisis de coste-beneficio se consideran rentables.

En ocasiones puede ocurrir que la eliminación de un riesgo o su disminución parcial no sea viable económicamente. En estos casos habría que realizar un estudio del impacto social para determinar la importancia que el riesgo tiene sobre la comunidad antes de

desechar la actuación. En cualquier caso siempre existen actuaciones de menor coste como la instalación de válvulas anti-retorno que atenúan en este caso las consecuencias de las inundaciones internas a un coste muy bajo.

La siguiente figura 9.1.1. muestra el proceso propuesto de implementación de soluciones hidráulicas.

Figura 9.1.1.-Intervenciones hidráulicas: Proceso de análisis



Los tipos de actuaciones hidráulicas son difíciles de acotar y enumerar, y su aplicabilidad y diseño depende de cada caso concreto. La propuesta de actuaciones hidráulicas en la red debe incluir no sólo el estudio del beneficio aportado en sus proximidades, sino también las consecuencias que las actuaciones pueden tener aguas arriba y aguas abajo

ya que en algunos casos pueden llegar a ser negativas. Los tipos de actuaciones hidráulicas más utilizadas son:

- Reposición de tramos de colectores para incrementar la capacidad hidráulica de la red: en ocasiones el modelo puede indicar que mediante el incremento de diámetro de ciertas tuberías o cambio de pendiente o material pueden resolverse ciertos riesgos hidráulicos.
- Construcción de tanques de tormentas; este tipo de solución tiene dos vertientes:
 - Tanque de tormentas en serie (“on line”): se trata de un tanque o tubería de gran diámetro insertada en la red que atenúa la propagación de caudal hacia aguas abajo. Generalmente se dispone un dispositivo regulador de caudal a su salida.
 - Tanque de tormentas en paralelo (“off line”): se trata de un depósito conectado a la red mediante una tubería. Puede contemplarse el retorno del caudal almacenado mediante bombeo si el volumen necesario es elevado y no se dispone de espacio en planta.
- Desconexión mediante bombeo: En ocasiones es una opción a considerar en el caso de querer controlar el caudal aportado a la tubería principal desde cuencas vertientes secundarias.
- Tuberías de nuevo trazado: Supone la construcción de desvíos o desdoblamiento de colectores cuya capacidad es insuficiente.
- Incremento de capacidad de bombeo: En el caso que el modelo muestra que los bombeos existentes no tienen la capacidad suficiente y generan problemas aguas arriba.
- Revisión o nueva construcción de aliviaderos: No es una solución muy frecuente, pero la modificación de un aliviadero puede resolver problemas de inundación aguas arriba y aguas abajo.

- Elevación de la trapa de pozos o sellado: Puede ser una solución para pozos que se encuentran fuera del núcleo urbano y son causa de polución hacia cauces naturales próximos debido a inundaciones.
- Técnicas de drenaje sostenible y reducción de áreas impermeables: Es una opción alternativa que puede aportar muchos beneficios, no sólo al área de riesgo, si no a otras áreas situadas aguas abajo. La base de estas técnicas es desviar, retardar o evitar que el agua de lluvia entre en la red de saneamiento lo que conlleva beneficios no sólo en cuanto a disminución de riesgos de inundación y polución hidráulica, si no también beneficios ambientales, estéticos, sociales, medioambientales y económicos en bombeos y tratamiento entre otros.

La técnica de drenaje sostenible a aplicar en cada caso depende de las condiciones específicas de impermeabilidad del terreno, pendiente, disponibilidad de espacio, aunque también depende del objetivo marcado en función de si la actuación está encaminada más hacia una reducción de la cantidad o una mejora de la calidad del agua (Woods-Ballard et al., 2007).

Las técnicas de drenaje sostenible pueden clasificarse en:

- o Técnicas de control en la generación: el objetivo de este grupo de técnicas es el de evitar que la escorrentía sea generada. Son ejemplos de este grupo los pavimentos drenantes, los depósitos de almacenamiento residencial (water butts) (figura 9.1.2) o los tejados verdes.

Figura 9.1.2.- TDDS: Depósito de almacenamiento residencial (water butts)



- Técnicas de canales ecológicos: se trata de canales con calados pequeños revestidos con vegetación que pueden conducir o retener el agua atenuando la escorrentía generada. También pueden permitir la infiltración, y la vegetación sirve de filtro de partículas (Figura 9.1.3).

Figura 9.1.3.- TDDS: Canal ecológico



- Técnicas de retención: Como su nombre indica se diseñan para retener el agua de escorrentía. Esto se consigue mediante el diseño de lagunas profundas (Figura 9.1.4) o almacenamiento subterráneo en geocélulas.

Figura 9.1.4.-TDDS: Laguna profunda



- Técnicas de humedal: Se trata de lagunas o humedales más someros que los utilizados para retención. Atenúan la escorrentía y filtran el flujo (Figura 9.1.5).

Figura 9.1.5.-TDDS: Humedal



- Técnicas de detención: Se trata de depresiones secas diseñadas para almacenar el agua por un determinado tiempo de retención (Figura 9.1.6).

Figura 9.1.6.-TDDS: Detención



- Técnicas de infiltración: Mediante estas técnicas se elimina la escorrentía mediante el mecanismo de infiltración. La infiltración se consigue mediante el almacenamiento del agua en estructuras enterradas, zanjas o lagunas, siempre que la naturaleza del terreno lo permita (Figura 9.1.7).

Figura 9.1.7.-TDDS: Zanja de infiltración



- Técnicas de filtración: El principal objetivo de estas técnicas es el de recolectar el agua de escorrentía y filtrarla previamente a su descarga al medio natural receptor (Figura 9.1.8).

Figura 9.1.8.-TDDS: Técnicas de filtración



En ocasiones se podrán combinar las técnicas convencionales con las técnicas de drenaje sostenible que en muchos casos actúan como complementarias, ofreciendo además de beneficios hidráulicos, beneficios estéticos, medio ambientales y en ocasiones sirviendo como zonas de recreo.

Existe por tanto una gran variedad de actuaciones a estudiar para conseguir reducir el riesgo al objetivo prefijado en la cuenca. En cada caso habrá que realizar el análisis coste-beneficio y estructurar las actuaciones elegidas cronológicamente para establecer el Plan de Intervenciones de la cuenca.

9.2. Mantenimiento y rehabilitación

El mantenimiento y rehabilitación de las redes de saneamiento, además de estar ligado a los riesgos que se pretende mitigar en la cuenca, supone una parte muy importante del coste que debe afrontar la entidad gestora de la red.

En el período 2010-2015 Aguas de Gales tenía previsto un gasto de 117 millones de libras en tareas de mantenimiento y rehabilitación de la red, mientras que el gasto presupuestado de las actuaciones y obras destinadas a prevenir inundaciones era de 46 millones de libras (Aguas de Gales, 2010).

El coste de mantenimiento y rehabilitación puede ser por tanto muy superior al de las actuaciones hidráulicas en la cuenca. Es por ello que debe ser analizado y planificado pues se corre el riesgo de estar invirtiendo dinero en mantener zonas que pueden tener un nivel de prioridad menor al de otras zonas, por lo que no se estaría actuando en las zonas con una mayor severidad en las consecuencias de la falta de mantenimiento y rehabilitación.

Como se ha visto en el punto 8.2., el modelo de deterioro permite el análisis de los riesgos con “otras causas” a nivel de tubería.

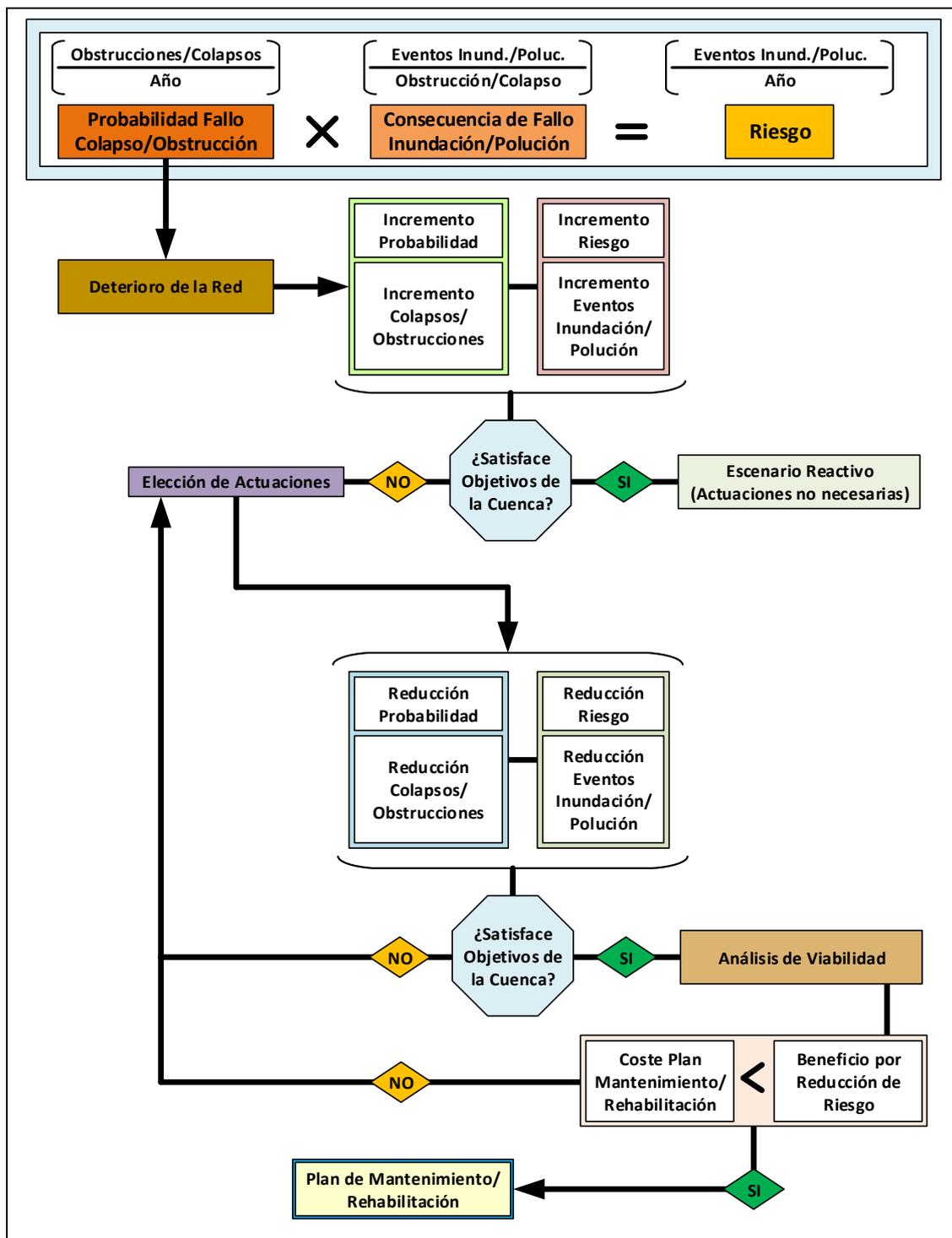
Conocidos los objetivos marcados en la cuenca a nivel de obstrucciones, colapsos y de sus consecuencias (inundaciones OC y polución OC), el modelo de deterioro permite la localización de las áreas de mayor riesgo y la elección de las actuaciones a realizar para alcanzar los objetivos fijados de manera que el Plan de Mantenimiento y Rehabilitación sea viable económicamente.

Es importante destacar que el modelo de deterioro permite el cálculo de los riesgos asociados al fallo por obstrucción o colapso de una determinada tubería, así como la

valoración de todas las consecuencias asociadas, lo que permite el análisis coste beneficio de cada una de las actuaciones propuestas a nivel de tubería.

El proceso de análisis propuesto hasta la implementación del Plan de Rehabilitación y Mantenimiento se muestra en la figura 9.2.1.

Figura 9.2.1.- Implementación del Plan de Rehabilitación y Mantenimiento



Las actuaciones contempladas para la implementación del Plan de Rehabilitación y Mantenimiento son (Aguas de Gales et al., 2013):

- Re-entubado o rehabilitación con mangas (CIPL, "Cured in place lining"): Este sistema de rehabilitación permite la reparación de la tubería sin necesidad de hacer zanja. Existe una gran variedad de alternativas y técnicas pero en general el proceso es insertar un tubo flexible o manga impregnada en resina en el interior del tubo a reparar; posteriormente se adapta el tubo flexible al tubo a reparar (mediante inflado por ejemplo) y se cura o fragua la resina mediante agua caliente, vapor radiación ultravioleta de manera que el tubo flexible adquiere resistencia (Figura 9.2.2).

Figura 9.2.2.- Mantenimiento/Rehabilitación: Re-entubado



Al aplicar el re-entubado se consigue la siguiente reducción en la probabilidad de obstrucciones y colapsos dentro del modelo de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013):

- Obstrucciones: *Probabilidad = 0.0002 x Longitud*
- Colapsos: *Probabilidad = $P_{i+1} = P_i - [0.5 \cdot (P_i - 0.00002 \cdot Long)]$*
- Reemplazo de tramo de tubería: En ocasiones, cuando el estado estructural de la tubería es muy malo, no queda más remedio que reemplazar el tramo de tubería por otro de similares características.

Al aplicar la técnica de reemplazo de tubería se consigue la siguiente reducción en la probabilidad de obstrucciones y colapsos dentro del modelo de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013):

- Obstrucciones: *Probabilidad = 0.0002 x Longitud*
- Colapsos: *Probabilidad = 0.00002 x Longitud*
- “Jetting”: Es un método efectivo para la eliminación de sedimentos depositados en la tubería. Se introduce agua a alta presión a través de mangueras diseñadas para ello de manera que se arrastran los sedimentos hacia el pozo aguas abajo donde se succionan y se extraen de la tubería (Figura 9.2.3).

Figura 9.2.3.- Mantenimiento/Rehabilitación: “Jetting”



Al aplicar la técnica de “jetting” se consigue la siguiente reducción en la probabilidad de obstrucciones y colapsos dentro del modelo de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013):

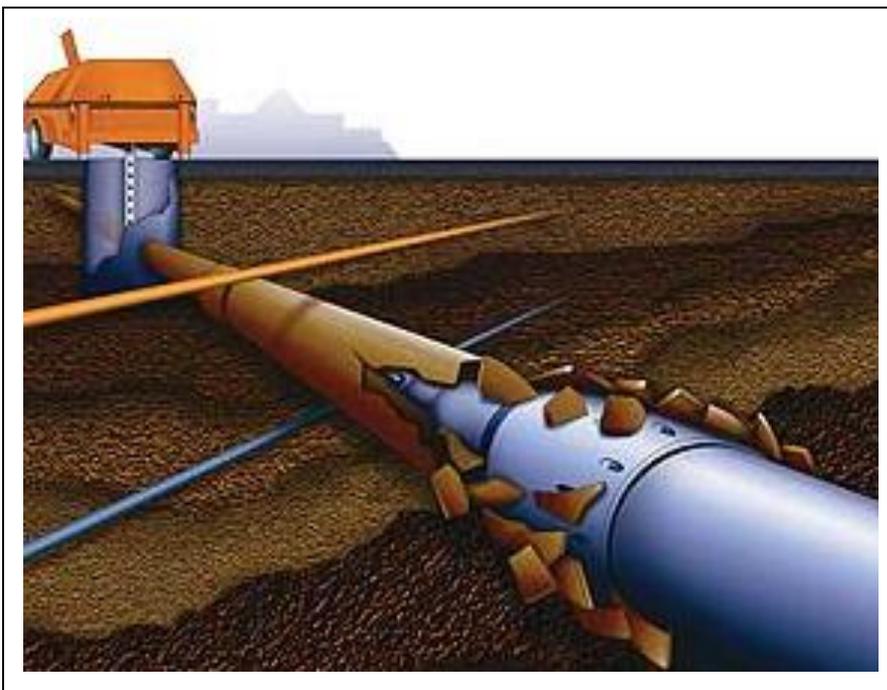
- Obstrucciones: Se considera que la aplicación del “jetting” reduce la probabilidad de obstrucción en la tubería un 95%, aunque ocasiona un incremento en la tasa de deterioro en los cuatro años siguientes volviendo a su nivel inicial de probabilidad de obstrucción. Tras alcanzar el valor inicial de probabilidad de obstrucción la tubería continuaría deteriorándose con la tasa correspondiente al escenario reactivo (sin intervenciones):

Aplicación de “jetting”: $P_1 = 0.05 \cdot P_0$

Evolución en los cuatro años siguientes: $P_{i+1} = P_i + \frac{(P_0 - P_1)}{4}$

- Colapsos: La probabilidad de colapso no varía.
- “Bursting”: La técnica de “bursting” consiste en reemplazar un tramo de tubería sin necesidad de abrir zanja, mediante una cabeza percutora que a la vez que rompe la tubería existente empuja de la nueva tubería a instalar (Figura 9.2.4).

Figura 9.2.4.- Mantenimiento/Rehabilitación: “Bursting”



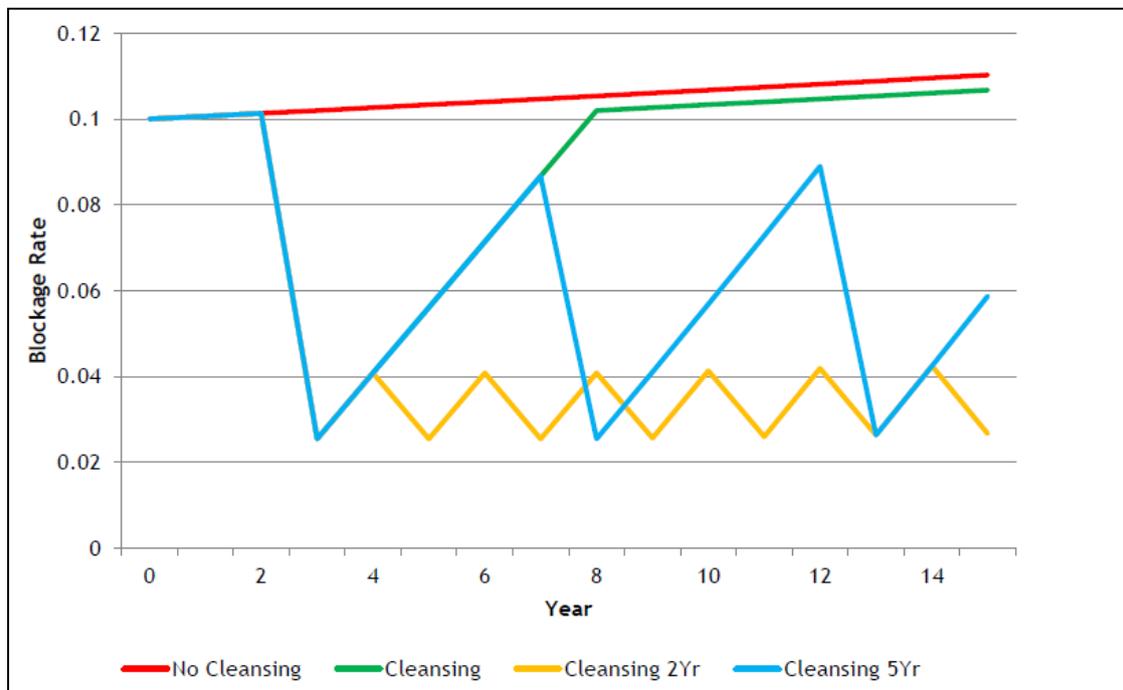
Al aplicar el “bursting” se consigue la siguiente reducción en la probabilidad de obstrucciones y colapsos dentro del modelo de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013):

- Obstrucciones: $Probabilidad = 0.0002 \times Longitud$
- Colapsos: $Probabilidad = P_{i+1} = P_i - [0.5 \cdot (P_i - 0.00002 \cdot Long)]$
- Reparaciones localizadas: Las reparaciones localizadas consisten en un re-entubado localizado de la longitud de tubería deteriorada.

Al aplicar la técnica de reparación localizada se consigue la siguiente reducción en la probabilidad de obstrucciones y colapsos dentro del modelo de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013):

- Obstrucciones: $Probabilidad = 0.0002 \times Longitud$
- Colapsos: $Probabilidad = P_{i+1} = P_i - [0.5 \cdot (P_i - 0.00002 \cdot Long)]$

Figura 9.2.5.- Modelo de deterioro: Evolución de la probabilidad de obstrucción en una tubería en función del Plan de Rehabilitación (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013)



10. EJEMPLO DE APLICACIÓN

10.1. Recolección y análisis de datos

El ejemplo de aplicación tiene como objeto mostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta a un caso real. La cuenca objeto de estudio en este caso, Five Fords-Wrexham, está localizada al norte de Gales y comprende una serie de pequeñas poblaciones que junto a Wrexham comparten la red de saneamiento que finaliza en la EDAR de Five Fords (Figura 10.1.1).

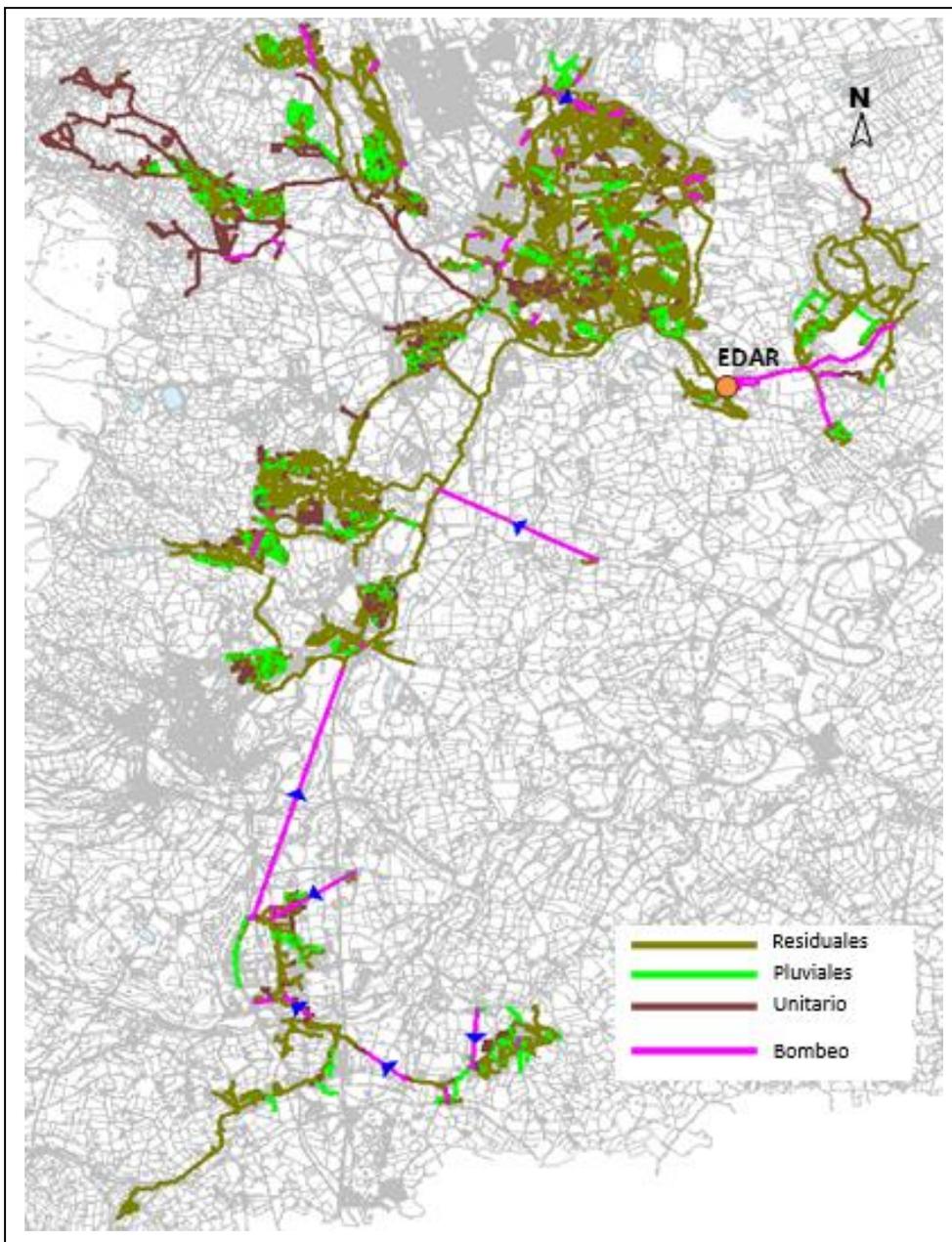
Figura 10.1.1.- Cuenca objeto de estudio: vista general



El modelo final construido está compuesto por 15.398 pozos y 15.294 conductos. El área total de la cuenca es de 3.006 Ha y la población total incluida en el modelo fue de 96.561 habitantes. El modelo incluye 71 estaciones de bombeo, 56 aliviaderos y 38 tanques de retención y/o almacenamiento.

Se trata de una red de saneamiento en general antigua (gran parte de los conductos datan de principios del siglo XX), por lo que la gran parte de la cuenca es sistema unitario o parcialmente separativo. Sólo las nuevas urbanizaciones disponen de sistema exclusivamente separativo. La red de saneamiento incluida en el modelo se muestra en la figura 10.1.2 (cabe comentar que a efectos de cálculo los conductos de red unitaria (“combined”) y de residuales pertenecientes a red separativa (“foul”) no varían por lo que la figura no muestra la verdadera distribución de conductos “combined” y “foul”).

Figura 10.1.2.- Five Fords-Wrexham: Red de saneamiento modelada



En la primera fase del estudio se realiza la recolección de datos de la cuenca. En este caso Aguas de Gales (entidad gestora de la cuenca objeto de estudio) dispone de una amplia base de datos accesible on-line lo que por una parte facilitó el acceso, pero por otra parte conllevó un incremento de tiempo de análisis considerable en la elección y depuración de los datos a utilizar.

Los planos base, modelo digital del terreno (dimensiones de celda 2x2m) y la red de colectores están disponibles para el estudio y fueron cedidos por Aguas de Gales; sin embargo la información incluida en la red de colectores se comprobó que era incompleta, por lo que se completó principalmente utilizando la información incluida en el modelo previo disponible, planos de proyectos existentes y los datos provenientes de las prospecciones realizadas. En los casos en lo que no fue posible disponer de datos se recurrió a la interpolación o al cálculo en función de los niveles del terreno, según se explica en el procedimiento de construcción del modelo (puntos 6.3 y 6.4).

La información de telemetría, generalmente referente a niveles de lámina de agua en aliviaderos y estaciones de bombeo, y caudales bombeados, está disponible para algunos de los aliviaderos y estaciones de bombeo en tiempo real a través de la aplicación ScopeX (Figuras 10.1.3 y 10.1.4). ScopeX permite la búsqueda de la estructura hidráulica por nombre o por referencia, de manera que se puede visualizar o exportar a excel las lecturas de telemetría para el período deseado.

Figura 10.1.3.- Telemetría: ScopeX

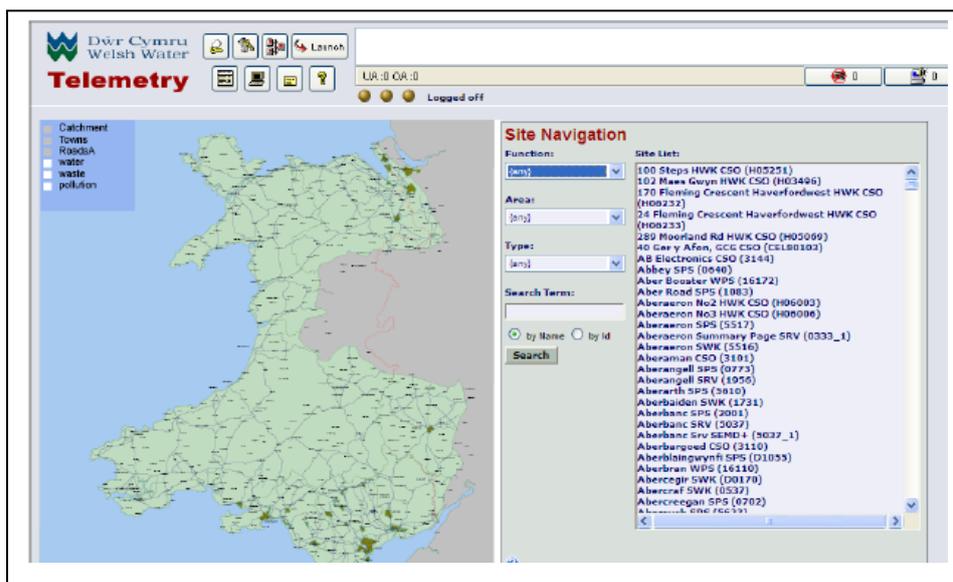
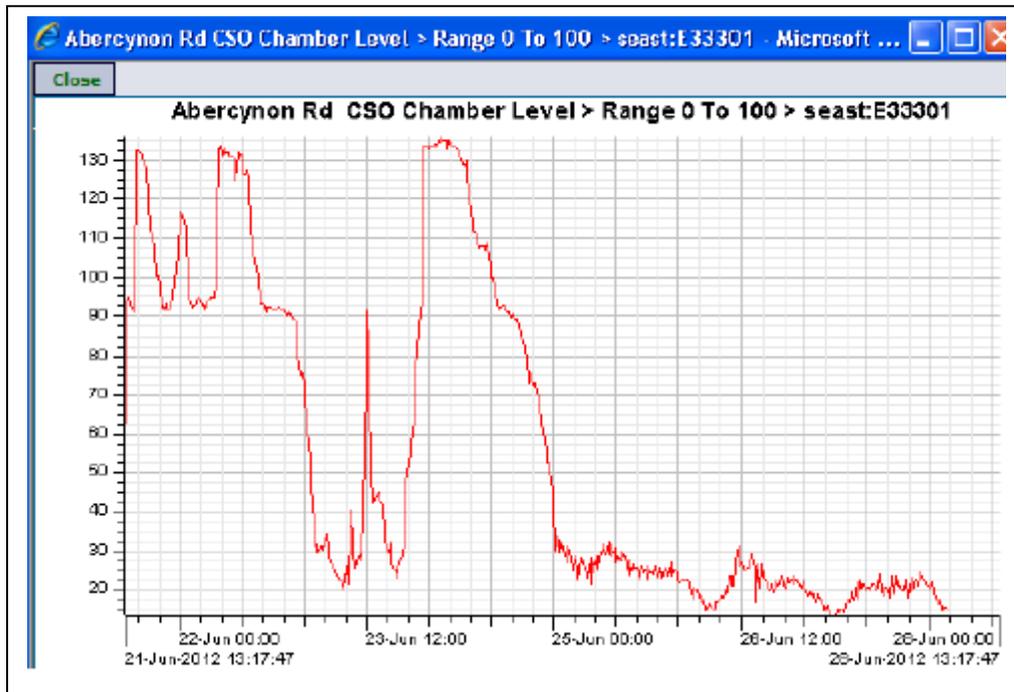


Figura 10.1.4.- Telemetría: Ejemplo niveles en aliviadero



Se recopiló todos los proyectos previos y planos existentes para incluirlos en el modelo. Se encontraron un total de 34 proyectos previos, aunque finalmente sólo 18 fueron incluidos en el modelo ya que el resto no incluía la información necesaria.

En cuanto a los estudios previos, se recopiló todas las prospecciones realizadas en la cuenca, analizándose cuáles podrían ser incluidas en el modelo. Cabe destacar el archivo en tiempo real de investigaciones por CCTV que está disponible a través de la aplicación Writemedia de Aguas de Gales. En total se recopiló 1.018 prospecciones de pozo, 59 prospecciones de aliviadero (algunas de ellas duplicadas), 37 prospecciones de estaciones de bombeo (algunas de ellas duplicadas), 11 Ha de área impermeable investigada (debe comprobarse si el drenaje ha cambiado desde que se realizó la investigación), estudios de caudales realizados en 2006 (para toda la cuenca) y 2012 (para la zona sur de la cuenca, St. Martins), 104.668 metros de tubería investigada por CCTV desde 2001.

El registro histórico de incidentes incluye datos de colapsos registrados desde 2005, obstrucciones desde 2006, inundaciones debidas a otras causas desde 2001, inundaciones debidas a causas hidráulicas desde 2000 y polución desde 2004. Los datos

registrados se georeferenciaron para su posterior análisis en la etapa de análisis inicial de los riesgos de la cuenca.

Se recopilaron las normas de vertido referentes a la cuenca de estudio. Éstas dan información sobre las características de los enrejados de los aliviaderos y sobre las restricciones de vertido, las cuales deben ser comprobadas.

Los datos de población se obtuvieron del “Office for National Statistics” de UK, mientras que los consumos de agua por habitante y día fueron facilitados por Aguas de Gales. En cuanto a los caudales industriales, los caudales de descarga máximos permitidos fueron facilitados por Aguas de Gales.

Para la cuenca de estudio había disponible un modelo previo en Infoworks que se utilizó como base del nuevo modelo. La mayoría de la cuenca fue verificada en 2006 por lo que el modelo debía verificarse de nuevo, excepto en una pequeña área al sur (St. Martins) que fue verificada en 2012 con un nivel de verificación bueno. El modelo previo fue utilizado básicamente a nivel geométrico, incluyendo en el nuevo modelo datos de prospecciones de pozos, aliviaderos y estaciones de bombeo realizadas para la construcción del modelo antiguo.

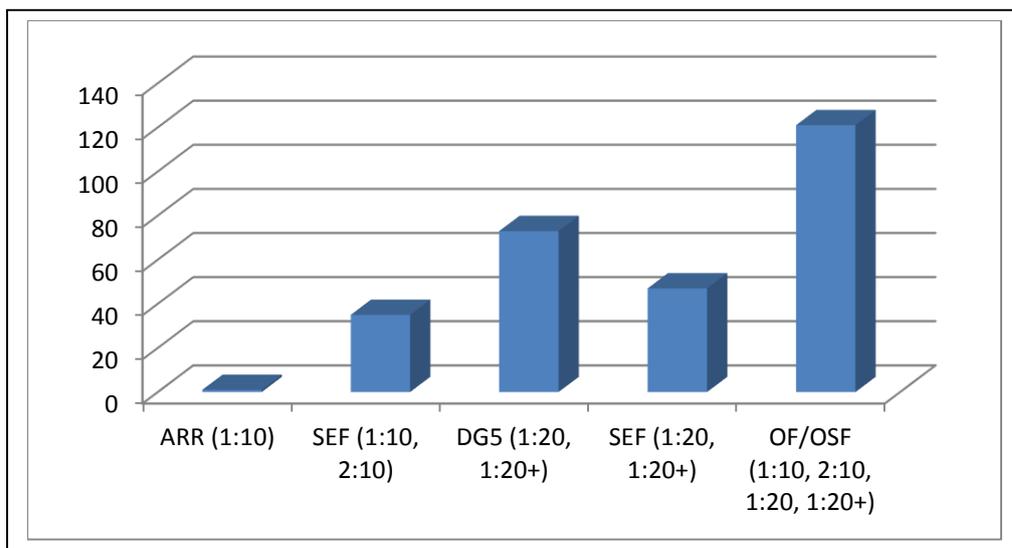
10.2. Análisis inicial de los riesgos en la cuenca

Para el análisis inicial de los riesgos de la cuenca se utilizó la base de datos de riesgos previamente identificados y no resueltos y las series de datos históricos de incidentes registrados en la cuenca, que se utilizaron para actualizar la base de datos de riesgos existentes.

El registro histórico de inundaciones debidas a causas hidráulicas contiene todos los eventos de inundación registrados tanto activos como inactivos; se indica la severidad estimada, clasificando los eventos de mayor a menor severidad en ARR, DG5, SEF y OF y dando un valor del período de retorno estimado (10, 20 ó 20+).

Para la identificación inicial de riesgos de inundación debida a causas hidráulicas se consideraron todos los eventos de inundación activos ordenándose según el grado de severidad y período de retorno (Figura 10.1.5).

Figura 10.2.1.- Five Fords-Wrexham: Eventos de inundación según severidad



En el caso de las inundaciones debidas a otras causas no se categorizaron todos los incidentes como riesgos. El primer análisis realizado consideró como riesgo aquél grupo de tres o más eventos de inundación registrados en un radio de 50 metros, que hubieran ocurrido en los últimos 5 años, que estuvieran relacionados hidráulicamente y tuvieran la misma causa, y que no ocurrieran en mismo día. Mediante el análisis en SIG se obtuvieron los riesgos de inundación debidos a otras causas.

El análisis inicial de los datos de obstrucciones se realizó de manera similar al análisis de las inundaciones con otras causas. Se consideró riesgo de obstrucción la zona en la que en un radio de 5 metros se hubieran dado al menos 4 incidentes en los últimos 6 años. Se destacaron aquellas áreas en las que se detectaron más de 10 incidentes.

El número de colapsos registrados es menor, por lo que se incluyeron como riesgo todos los colapsos incluidos en los registros históricos localizados en tuberías de un diámetro de 300 mm o superior.

Los eventos de polución fueron analizados espacialmente, incluyendo nuevos riesgos de polución en zonas donde se concentran 3 ó más incidentes para los eventos de polución categoría 3, o donde se tienen registros de uno o más incidentes de polución categoría 1 ó 2.

Se consultó el planeamiento urbanístico previsto en Wrexham a través de los planes urbanísticos municipales y desarrollos de planes de urbanización privados cuando éstos

aportaban mayor detalle. Las zonas de previsión de crecimiento se incluyeron en el mapa de riesgos para tenerlas en cuenta a la hora de desarrollar el programa de investigaciones en la cuenca.

A partir de la infiltración aplicada en el modelo existente y del registro de CCTV previo en la cuenca se creó un mapa de posible infiltración para tenerlo en cuenta para planear las nuevas investigaciones por CCTV. Igualmente se incluyó un mapa que recogía el mantenimiento planificado y no planificado de las estaciones de bombeo, resaltando aquellas que habían registrado más problemas.

10.3. Investigación

En función de las investigaciones previas recopiladas en la fase análisis de datos existentes, los riesgos identificados en la fase de análisis inicial de riesgos y la elección de puntos estratégicos en los que se considera importante la obtención de datos (por ejemplo intersecciones de colectores principales), se planeó la ubicación de las investigaciones a realizar en la cuenca previa consulta con Aguas de Gales acerca de la viabilidad económica de las mismas.

La siguiente tabla muestra la magnitud de las investigaciones finalmente llevadas a cabo (Tabla 10.1); gracias a la labor previa de análisis de datos existentes se logró reducir a un número muy pequeño el número de investigaciones a realizar.

Tabla 10-1.- Five Fords-Wrexham: Investigaciones

Tipo de investigación	Cantidad
Prospección de pozo	135
Estudio de conectividad	2
Prospección de aliviadero	6
Prospección de estación de bombeo	4
Caudalímetros instalados	23
Pluviógrafos instalados	27
Estudio de áreas impermeables	153 Ha
CCTV	6.726 m

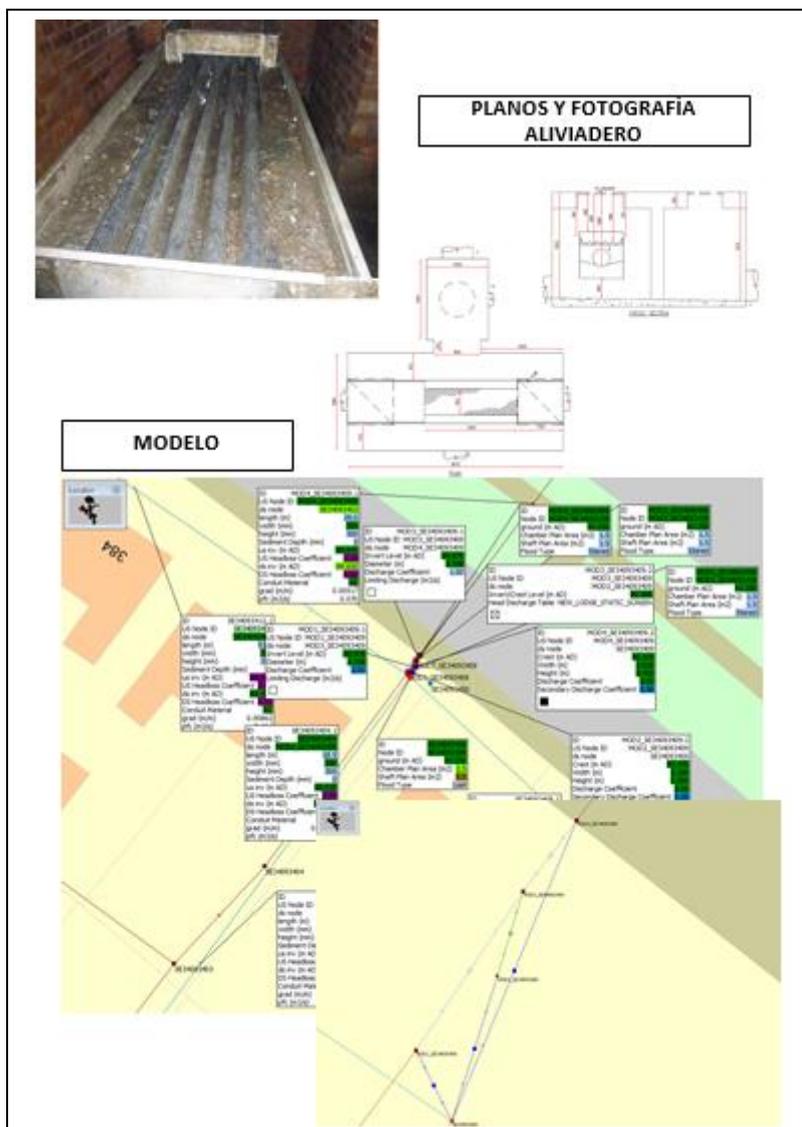
10.4. Construcción del modelo hidrológico-hidráulico

La definición de la red de saneamiento y las subcuencas se realizó siguiendo el procedimiento marcado en el punto 6.3.

Para el modelado de la red de saneamiento se recurrió al modelo previo que sirvió de base y se actualizó con los datos de las nuevas investigaciones realizadas, proyectos y planos de actuaciones posteriores al modelo previo, datos provenientes de las base de datos de Aguas de Gales que actualizaban características de la red, cotas provenientes del modelo digital del terreno de la zona y datos provenientes de la telemetría disponible, que ayudan a confirmar caudales bombeados y cotas de aliviaderos.

En la siguiente figura (Figura 10.4.1) se muestra un ejemplo de modelado de aliviadero.

Figura 10.4.1.- Ejemplo modelado aliviadero



En cuanto a las subcuencas se trazaron manualmente conectándose con el pozo al que se supuso más probable su drenaje. El trazado se realizó siguiendo los límites de parcela (ver figura 10.4.2.) teniendo en cuenta que el tamaño de las subcuencas por regla general no debe superar las 2 Ha.

Figura 10.4.2.- Ejemplo de trazado de subcuencas



Se incluyeron los datos de población así como los caudales por habitante y día y caudales máximos de vertido autorizados a industrias obtenidos en la fase previa de recolección de información. Para la fase de construcción del modelo se asumen perfiles típicos de generación de aguas residuales domésticas e industriales para en la fase de verificación poder ajustarlos a los datos observados.

El modelo de producción de escorrentía (Runoff Volume Type) utilizado es el denominado como “Fixed” debido a que así fue indicado por Aguas de Gales. Los parámetros incluidos en el modelo son los recomendados por la Normativa (Aguas de Gales, 2011) (Tabla 10.2).

Tabla 10-2.- Five Fords-Wrexham: Parámetros escorrentía modelo Infoworks

Runoff Surface ID	Description	Runoff Routing Type	Runoff Routing Value	Runoff Volume Type	Surface Type	Ground Slope (m/m)	Initial Loss Type	Initial Loss Value (m)	Initial Abstraction Factor	Routing Model	Fixed Runoff Coefficient
1	Roads - New	Rel	1	Fixed	Impervious	0	Slope	0.00007	0	Wallingford	1
2	Roads - Average	Rel	1	Fixed	Impervious	0	Slope	0.00007	0	Wallingford	1
3	Roads - Poor	Rel	1	Fixed	Impervious	0	Slope	0.00007	0	Wallingford	1

Runoff Surface ID	Description	Runoff Routing Type	Runoff Routing Value	Runoff Volume Type	Surface Type	Ground Slope (m/m)	Initial Loss Type	Initial Loss Value (m)	Initial Abstraction Factor	Routing Model	Fixed Runoff Coefficient
4	Roof - New	Rel	1	Fixed	Impervious	0.05	Abs	0.0001	0	Wallingford	1
5	Roof - Old	Rel	1	Fixed	Impervious	0.05	Abs	0.0001	0	Wallingford	1
6	Fixed Pervious	Rel	1	Fixed	Pervious		Abs	0.001	0	Wallingford	0

Los valores de porcentaje de producción de escorrentía se obtuvieron igualmente de la Normativa dependiendo del tipo de superficie (tabla 10.3). Para cada subcuenca se definió el “Land Use ID” que indica qué tipo de pavimento y qué tipo de tejado está incluido en la subcuenca. Los “Land Use Ids” también vienen definidos en la Normativa (Aguas de Gales, 2011) (tabla 10.4).

Tabla 10-3.- Five Fords-Wrexham: Porcentajes de producción de escorrentía

Id	Tipo de Superficie	Porcentaje producción escorrentía
1	Carretera - nueva	85%
2	Carretera - conservación normal	75%
3	Carretera - malas condiciones	65%
4	Tejado - nuevo	90%
5	Tejado - antiguo	80%
6	Superficie permeable	10%

Tabla 10-4.- Five Fords-Wrexham: Usos del suelo

Land Use ID	Descripción	Superficie de escorrentía A	Superficie de escorrentía B	Superficie de escorrentía C
LU2	Nueva urbanización (<20 años) - carreteras en buena condición	1	4	6
LU3	Urbanizaciones más antiguas	2	5	6
LU4	Casco histórico en centro de ciudades	3	5	6
LU5	Industrial / Comercial	2	5	6

Finalmente se realizaron las comprobaciones de validación del modelo tal y como se explican en el punto 6.4.

10.5. Verificación del Modelo

El modelo se verificó inicialmente en base al estudio de caudales realizado desde el 12/02/14 hasta el 30/03/14 para el cual se instalaron 23 caudalímetros y 27 pluviógrafos a distribuidos a lo largo de la cuenca.

Posteriormente se comprobaron los resultados en la fase de verificación histórica siendo éstos satisfactorios en las áreas en las que el modelo se había verificado frente al estudio de caudales. Durante la fase de verificación, siguiendo el procedimiento que se muestra en el punto 7.1., se realizaron los siguientes cambios:

- Se incluyeron aportaciones de flujo base o infiltración continua proveniente del freático distribuida en subcuencas aguas arriba de los caudalímetros que registraban dicho caudal.
- Se modificaron y crearon nuevos perfiles de aportación de aguas residuales tanto domésticas como industriales para ajustarse a los perfiles observados en tiempo seco.
- Se modificaron los sedimentos incluidos en el modelo antiguo donde fue necesario.
- Se modificaron las áreas impermeables drenantes para ajustar los volúmenes observados tras las tormentas registradas.
- Se añadió a las subcuencas el módulo de infiltración en el terreno (Montgomery Watson Harza, 2001) para reproducir la respuesta lenta generada por las tormentas registradas donde fue necesario.
- Se modificó la geometría y características de la red para acercarse a los valores observados en las zonas en las que la calidad y confianza de los datos incluidos en el modelo era baja.

En el anejo incluido al final del documento se muestra el resumen de la verificación realizada para cada uno de los caudalímetros instalados en la red. El nivel de verificación obtenido de los caudalímetros instalados es entre aceptable y bueno, por lo que el modelo se considera apto para realizar la evaluación de riesgos y propuesta de soluciones en la cuenca.

10.6. Evaluación y análisis de Riesgos

El modelo verificado se simuló para tormentas de diseño de invierno y verano de períodos de retorno 1, 2, 5, 10, 20 y 30 años y duraciones 15, 30, 60, 90, 120, 240, 480 y 960 minutos tal y como indica la Normativa de Aguas de Gales (Aguas de Gales, 2011).

Las tormentas siguen las recomendaciones de diseño incluidas en el “Libro de estimación de inundaciones” (Reed, 1999), y se generaron utilizando el módulo de generación de tormentas FEH de Infoworks. El módulo de generación de tormentas requiere la introducción de los descriptores de la cuenca que dependen de la localización de la misma (Figura 10.6.1). Los descriptores de la cuenca se introducen en el módulo de generación de tormentas de Infoworks que permite seleccionar distintos períodos de retorno y distintas duraciones (Figura 10.6.2).

Figura 10.6.1.- FEH: descriptores de la cuenca

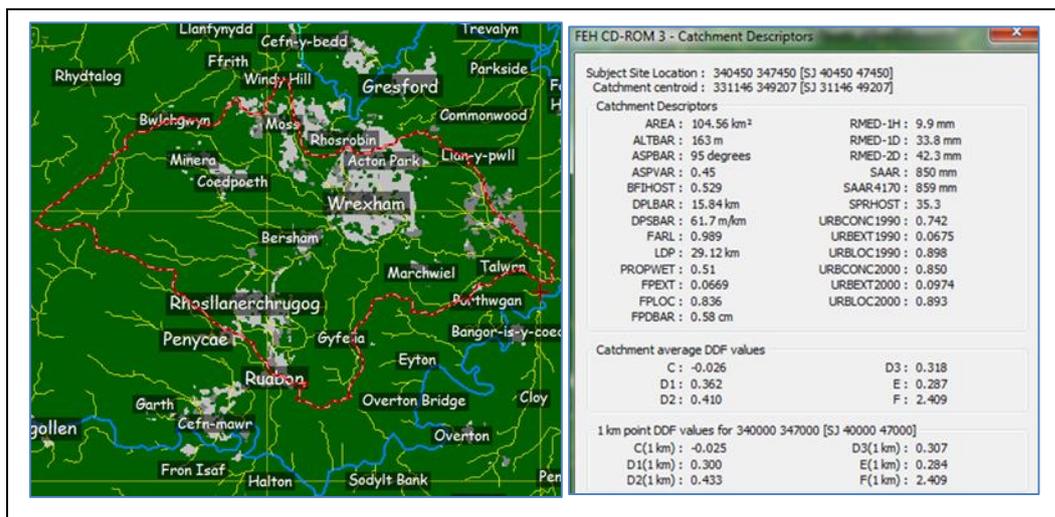
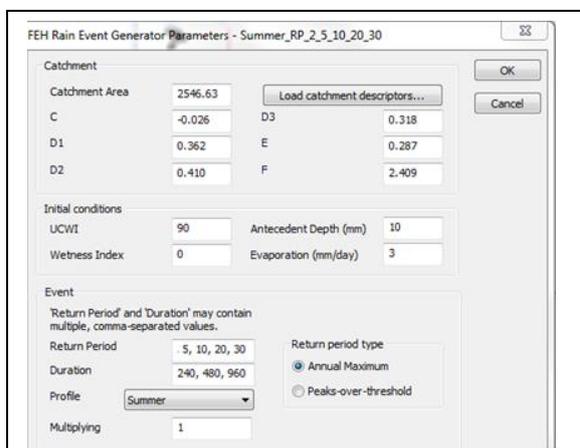


Figura 10.6.2.- Infoworks: Módulo de generación de tormentas

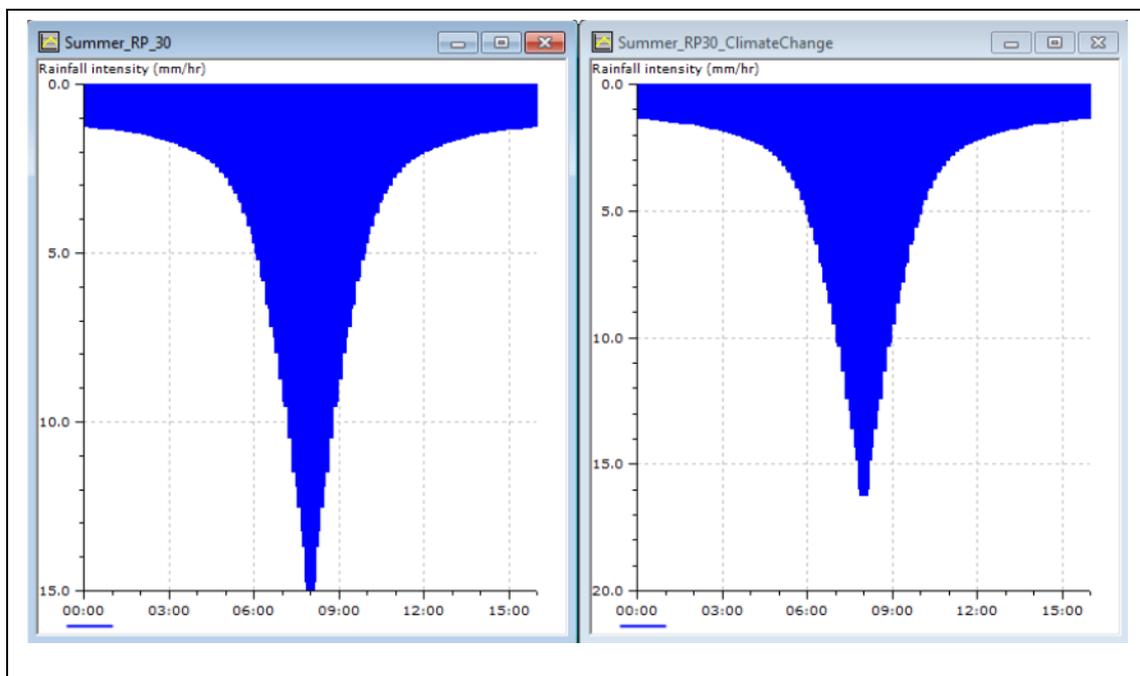


Por tanto el modelo se simuló con una gran variedad de duraciones de tormenta de distintos períodos de retorno lo que permitió analizar para qué duración y período de retorno se producían los distintos niveles de severidad de inundación en función de los calados observados.

Analizados los resultados se actualizó la valoración de los riesgos de inundación hidráulica siguiendo el procedimiento explicado en el punto 8.1.

El proceso se repitió para el escenario futuro (año 2040), en el que se incluyeron los desarrollos urbanísticos previstos provenientes de la etapa de análisis de datos, el cálculo del incremento de áreas impermeables en la cuenca (Allitt, 2009), y las modificaciones en las tormentas de diseño debidas al cambio climático suponiendo un escenario medio de emisiones (Wilson et al., 2011). Como consecuencia del cálculo de cambio climático las tormentas de diseño contempladas para el escenario futuro se incrementaron un 10%. El incremento total de área impermeable calculado para 2040 es de 44,03 Ha.

Figura 10.6.3.- Comparación escenario actual-escenario futuro con cambio climático: Tormenta de diseño verano $T_r=30$ años, duración=960 minutos



Conociendo las nuevas valoraciones y la distribución de los riesgos de inundación hidráulicos se determinan las zonas en las que es necesaria plantear algún tipo de intervención para eliminar o reducir el riesgo.

En cuanto a los riesgos de inundación debidos a “otras causas”, se tomaron los valores iniciales de probabilidad de colapso y obstrucción y sus consecuencias (distintos niveles de severidad de inundación interna, inundación externa y polución) así como las tasas de deterioro (ver punto 8.2.) del modelo global de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013).

Figura 10.6.4.- Tasas de deterioro (Aguas de Gales-ICS Consulting, 2013)

Obstrucciones		Colapsos	
MATERIAL		MATERIAL	
VC	0.0060	VC	0.0046
UNKN	0.0152		
PLASTIC_PVC	0.0259		
PLASTIC_PE	0.0152		
PF	0.0152		
OTHER	0.0152		
GRP	0.0152		
FERROUS_2	0.0077		
FERROUS_1	0.0077		
CONC	0.0041		
BRICK	0.0060		
AC	0.0152		
		AREA	
		Central	0.0134
		Gwent	0.0055
		Hereford	0.0197
		NorthEast	0.0100
		NorthWest	0.0067
		Swansea	0.0042
		Valleys	0.0055
		Western	0.0055

Para el escenario inicial de análisis (2015) el modelo global daba como resultado un total de 457,18 obstrucciones, 13,57 colapsos y 3,42 eventos de inundación interna en la cuenca. Estos valores se compararon con los valores medios obtenidos de los registros de incidentes entre 2006 y 2014 que resultaron ser diferentes: 505,14 obstrucciones, 20,44 colapsos y 3 eventos de inundación interna. Por tanto fue necesario realizar “tuning” o calibración de las probabilidades iniciales para ajustar los totales a los valores observados.

Para la calibración o “tuning” del modelo se recurrió a los datos de las investigaciones históricas por CCTV asignando mayores probabilidades de colapso y obstrucción en base a los porcentajes de intrusión, categoría estructural de la tubería y número de defectos detectados en las investigaciones por CCTV de manera que se consiguió llegar a valores

de 505,92 obstrucciones, 20,73 colapsos y 2,98 eventos de inundación interna que se consideraron suficientemente aproximados a los valores observados.

Para el cálculo del tuning y el cálculo de la evolución del deterioro de la red considerando los distintos tipos de actuaciones (punto 9.2) contempladas se realizó una hoja de cálculo (Figura 10.6.5). La hoja de cálculo permite conocer el riesgo para cada tubería en un año determinado causado por colapsos y obstrucciones, disgregado en los correspondientes niveles de severidad. Las valoraciones de riesgo obtenidas se utilizaron para actualizar las valoraciones de los riesgos debidos a “otras causas”.

Figura 10.6.5.- Modelo de deterioro: Hoja de cálculo

(block or coll / year)->	457.181	13.573	505.923	20.736	ALL CALCULATIONS ARE DONE USING TUNED LIKELIHOODS
	ORIGINAL DATA (DON'T MODIFY)		TUNED (MODIFY THESE COLUMNS)		EXPLAIN HERE WHY THE LIKELIHOOD HAS BEEN TUNED
ITEM NAME	Blockages likelihood	Collapses likelihood	Blockages likelihood	Collapses likelihood	TUNING COMMENTS/REASONS
ORDS (WREXHAM)	0.021795908	0.001004334	0.04	0.02	percentage blockage CCTV>40% CCTV: two or three grade 4 defects
ORDS (WREXHAM)	0.018304438	0.000923263	0.04	0.000923263	percentage blockage CCTV>40%
ORDS (WREXHAM)	0.022054965	0.00088209	0.25	0.02	intrusion CCTV>60% CCTV: two or three grade 4 defects
ORDS (WREXHAM)	0.027616806	0.003035221	0.04	0.003035221	percentage blockage CCTV>40%
ORDS (WREXHAM)	0.021557969	0.001355434	0.1	0.001355434	percentage blockage CCTV>50%
ORDS (WREXHAM)	0.023699876	0.001560617	0.1	0.008	percentage blockage CCTV>50% CCTV: one grade 4 defects
ORDS (WREXHAM)	0.129685412	0.001748971	0.129685412	0.001748971	not tuned
ORDS (WREXHAM)	0.02179285	0.001597935	0.04	0.001597935	percentage blockage CCTV>40%
ORDS (WREXHAM)	0.021926029	0.001399308	0.1	0.001399308	percentage blockage CCTV>50%
ORDS (WREXHAM)	0.026028857	0.001568442	0.04	0.001568442	percentage blockage CCTV>40%
ORDS (WREXHAM)	0.025630209	0.001697031	0.75	0.001697031	percentage blockage CCTV>70%
ORDS (WREXHAM)	0.133174054	0.002915015	0.133174054	0.002915015	not tuned
ORDS (WREXHAM)	0.214041995	0.002090756	0.214041995	0.002090756	not tuned
ORDS (WREXHAM)	0.550214601	0.002818688	0.550214601	0.002818688	not tuned
ORDS (WREXHAM)	0.024637683	0.001751792	0.25	0.001751792	percentage blockage CCTV>60%
ORDS (WREXHAM)	0.024595108	0.001382206	0.04	0.001382206	percentage blockage CCTV>40%
ORDS (WREXHAM)	0.027573635	0.001011358	0.027573635	0.001011358	not tuned

2016	2015	INTERVENTIONS
Nr. of Blockages / year =	505.923	490.463
Nr. of Collapses / year =	18.274	17.430
INTERNAL FLOODING (PROPERTIES/YEAR)		
	BLOCKAGE	COLLAPSE
restricted toilet usage	0.166	0.008
internal flooding no permanent damage	0.334	0.037
internal flooding repairable damage (fittings)	1.552	0.206
internal flooding irreparable damage (fixtures)	0.074	0.010
TOTAL	2.127	0.260
TOTAL	2.127	0.260

COSTS (£/YEAR)	BLOCKAGE	COLLAPSE
£, for restricted toilet usage	13,465.713	635.455
£, for internal flooding no permanent damage	27,043.961	2,973.703
£, for internal flooding repairable damage (fittings)	157,709.219	20,929.790
£, for internal flooding irreparable damage (fixtures)	9,125.749	1,219.653
£, for external flooding curtilage inhibiting access	13,811.647	1,989.682
£, for external flooding curtilage	298,971.941	26,258.031
£, for external flooding non curtilage	15,995.752	2,770.047
£, for external flooding roads/footpaths	145,041.277	17,653.124
£, for external flooding public amenity	29,565.188	2,681.728
£, for pollution Cat 4	0.000	0.000
£, for pollution Cat 3	134,591.008	27,742.333
£, for pollution Cat 2	112,264.371	9,426.057
£, for blockage	147,138.814	0.000
£, for collapse	0.000	26,145.417
TOTAL	1,104,724.639	140,425.021
TOTAL	1,104,724.639	140,425.021
TOTAL	£	1,245,149.66

Conocido el coste de los distintos niveles de riesgo para cada tubería debidos a obstrucciones y colapsos, y sabiendo el efecto de las actuaciones a planear sobre la probabilidad de ocurrencia de colapsos y obstrucciones se puede definir el Plan de Mantenimiento y Rehabilitación de la cuenca incluyendo el análisis coste beneficio y priorizando las actuaciones más urgentes.

10.7. Desarrollo del Plan de Intervenciones

El objetivo del estudio realizado es el de elaborar un Plan de Intervenciones utilizando como herramientas los modelos construidos, el hidráulico y el de deterioro, y la actualización de los riesgos de la cuenca que permiten localizar las zonas con una mayor necesidad de intervención.

Para la elaboración del Plan de Intervenciones se tuvieron en cuenta tres horizontes:

- Corto Plazo: Es el horizonte a un año. Las intervenciones incluidas en el horizonte de corto plazo deben ser las de mayor urgencia.
- Medio Plazo: Debido a que en Reino Unido los Planes de Intervenciones se realizan cada cinco años, se considera horizonte medio plazo a las intervenciones realizadas en los siguientes cinco años. Se incluyen intervenciones hidráulicas que se haya probado sean rentables (análisis coste-beneficio) y que hayan sido diseñadas utilizando áreas del modelo en las que haya sido verificado y se tenga una confianza media o alta en los resultados que de él puedan obtenerse. Respecto a las intervenciones de rehabilitación y mantenimiento se planean todas a medio plazo, ya que al cabo de cinco años el modelo de deterioro se actualizará con nuevos datos y se podrá reelaborar el plan de mantenimiento de una manera más precisa.
- Largo Plazo: Se considera el horizonte a largo plazo un período de estudio de 25 años. Las actuaciones hidráulicas incluidas en el Plan a largo plazo son las que se diseñan en zonas de menor confianza del modelo y que son menos urgentes. Quedan de esta manera registradas para su revisión en el siguiente Plan de Intervenciones a realizar al cabo de 5 años.

Como se ha comentado, en Reino Unido se realizan Planes de Intervenciones para las infraestructuras hidráulicas y de saneamiento cada 5 años. Cada uno de esos períodos se denomina Asset Management Programme (AMP) y se le asigna un número en orden cronológico; por ejemplo, el período 2010-2015 corresponde al AMP-5, y el que comienza ahora 2015-2020 se denomina AMP-6.

Para la valoración de las actuaciones propuestas se ha utilizado la base de precios propuesta por Aguas de Gales, que incluye precios unitarios para los distintos tipos de actuaciones a diseñar.

Las actuaciones frente a los riesgos con “otras causas” se planificaron en función de los resultados obtenidos del modelo de deterioro y los objetivos de la cuenca, de manera que se optimizó la distribución de actuaciones para cada uno de los cinco primeros años de manera que se garantizaron los objetivos de la cuenca y las actuaciones propuestas resultaron rentables.

La tabla 10.5 muestra los objetivos marcados para la cuenca por Aguas de Gales que suponen una reducción de las obstrucciones, los colapsos y las inundaciones internas anuales debidas a “otras causas” para el horizonte de medio plazo.

Tabla 10-5.- Five Fords-Wrexham: Objetivos para los riesgos “otras causas”

Riesgo	Media Histórica (incidentes/año)	Objetivo (incidentes/año)
Obstrucciones	505,1	440,0
Colapsos	16,7	16,0
Inundación Interna OC	3,0	2,0

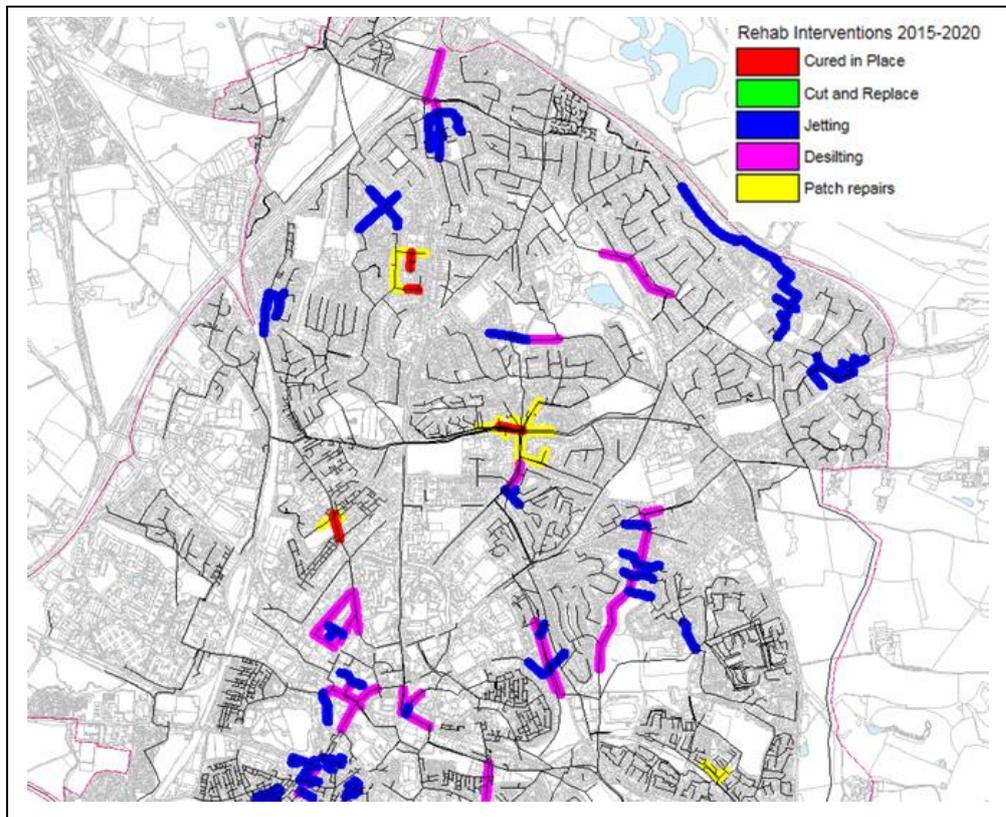
Como se ha explicado en el punto 9.2. cada una de las actuaciones de mantenimiento y rehabilitación tienen un efecto sobre la reducción de los riesgos, así que conociendo los riesgos y su evolución en el tiempo en función del deterioro y de las actuaciones planeadas calculado a través del modelo de deterioro se eligieron las actuaciones necesarias rentables año a año para alcanzar al cabo de cinco años los objetivos marcados.

En las figuras 10.7.1. y 10.7.2. se muestra el total de actuaciones planeadas y la distribución de actuaciones planeadas en el centro de Wrexham, la ciudad principal de la cuenca.

Figura 10.7.1.- Five Fords-Wrexham: Plan de Mantenimiento 2015-2020

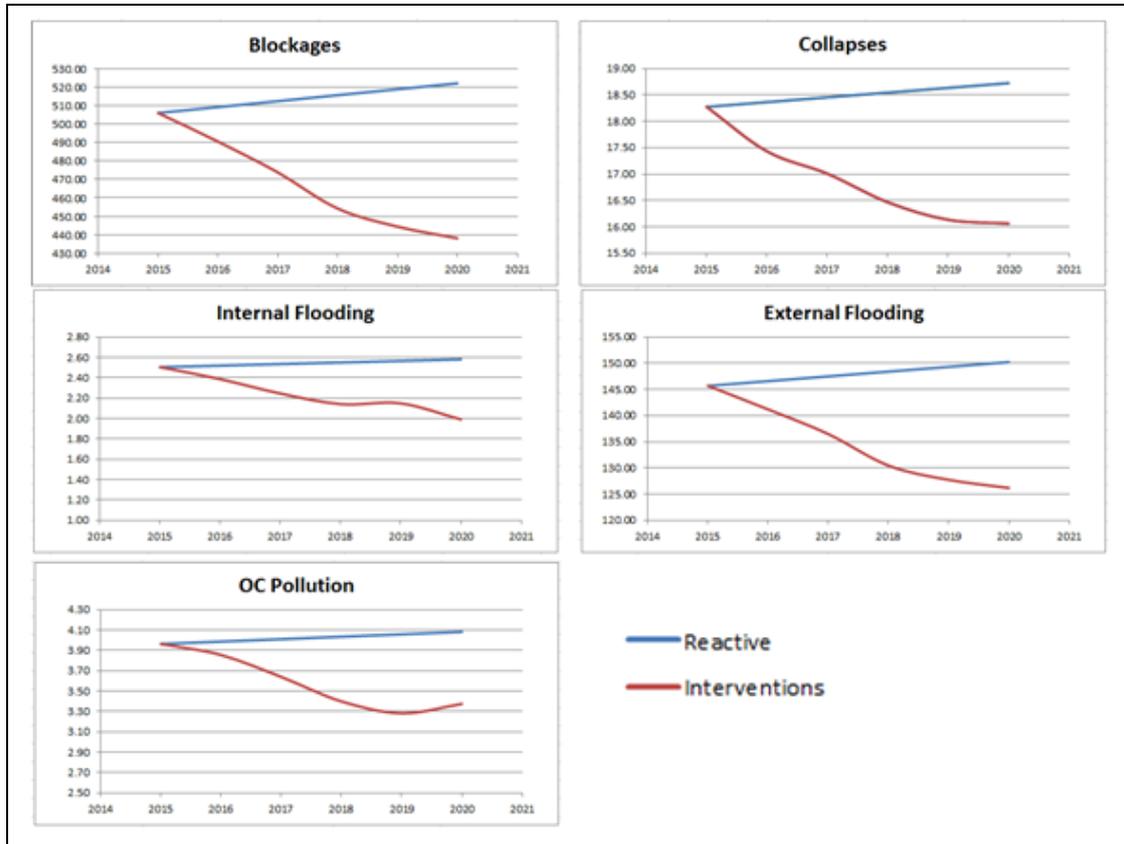
Intervention	Sum of Length (m)	Intervention	Sum of Length (m)
2015-2016 Cured in place	456	2015-2016 desilt	339
2016-2017 Cured in place	735	2017-2018 desilt	4,576
2017-2018 Cured in place	325	2018-2019 desilt	1,945
2018-2019 Cured in place	502	2019-2020 desilt	2,233
2019-2020 Cured in place	491		9,093
	2,509		
Intervention	Sum of Length (m)	Intervention	Sum of Length (m)
2015-2016 Cut and replace	235	2015-2016 Patch Repairs	695
2016-2017 Cut and replace	11	2016-2017 Patch Repairs	89
	246	2017-2018 Patch Repairs	2,757
		2018-2019 Patch Repairs	4,828
			8,369
Intervention	Sum of Length (m)		
2015-2016 Jetting	1,179		
2016-2017 Jetting	2,755		
2017-2018 Jetting	6,077		
2018-2019 Jetting	5,032		
2019-2020 Jetting	5,338		
	20,381		

Figura 10.7.2.- Five Fords-Wrexham: Actuaciones mantenimiento en Wrexham centro



La comparación entre la evolución de los riesgos con y sin actuaciones (escenario reactivo) se muestra en la Figura 10.7.3., alcanzándose los objetivos marcados para la cuenca en número de obstrucciones (blockages), colapsos (collapses) e inundaciones internas (internal flooding).

Figura 10.7.3.- Five Fords-Wrexham: Evolución riesgos OC con y sin actuaciones



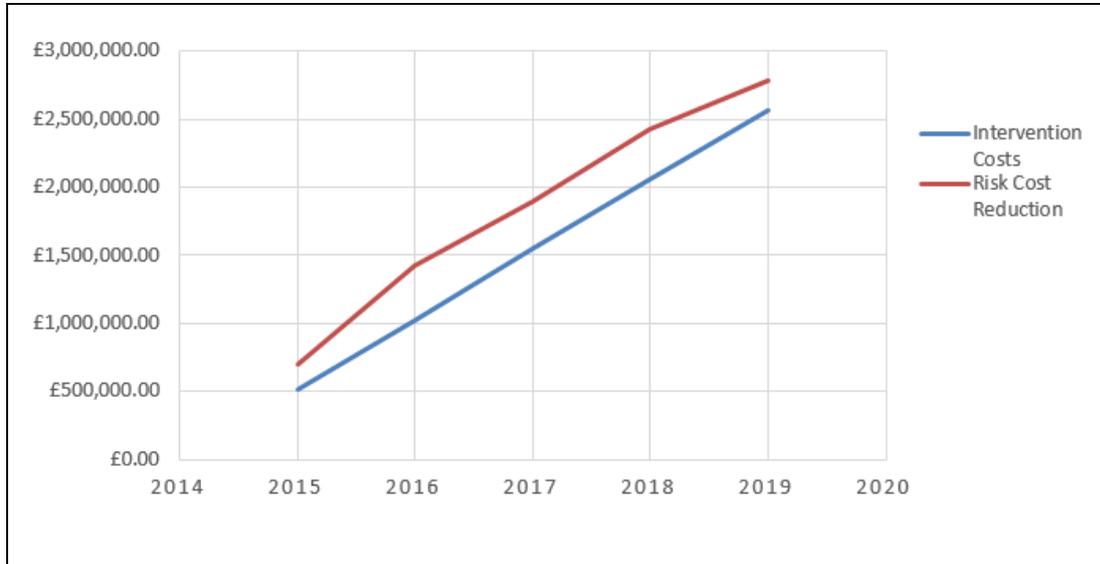
El coste de las actuaciones planeadas y la reducción de riesgo consecuencia de las intervenciones se muestra en la tabla

Tabla 10-6.- Five Fords-Wrexham: Coste Plan de Mantenimiento

Year	Maintenance	Risk cost reduction
2015-2016	£515,010.90	£698,128.76
2016-2017	£502,511.71	£725,969.47
2017-2018	£528,273.65	£467,172.87
2018-2019	£514,352.74	£529,681.51
2019-2020	£508,960.15	£367,017.00
AMP6 Total	£2,569,109.15	£2,787,969.62

Gráficamente se puede observar que el beneficio que producen las intervenciones planeadas siempre está por encima de su coste.

Figura 10.7.4.- Five Fords-Wrexham: Plan de Mantenimiento, gráfica coste-beneficio



Las intervenciones hidráulicas se planearon en base a las zonas de mayor riesgo hidráulico detectadas durante la fase de análisis de riesgos en función de los resultados obtenidos del modelo (puntos 8.1 y 9.1).

Para cada una de las zonas de riesgo se propuso una alternativa de intervención tipo “convencional” y una alternativa tipo “drenaje sostenible” o “rainscape”.

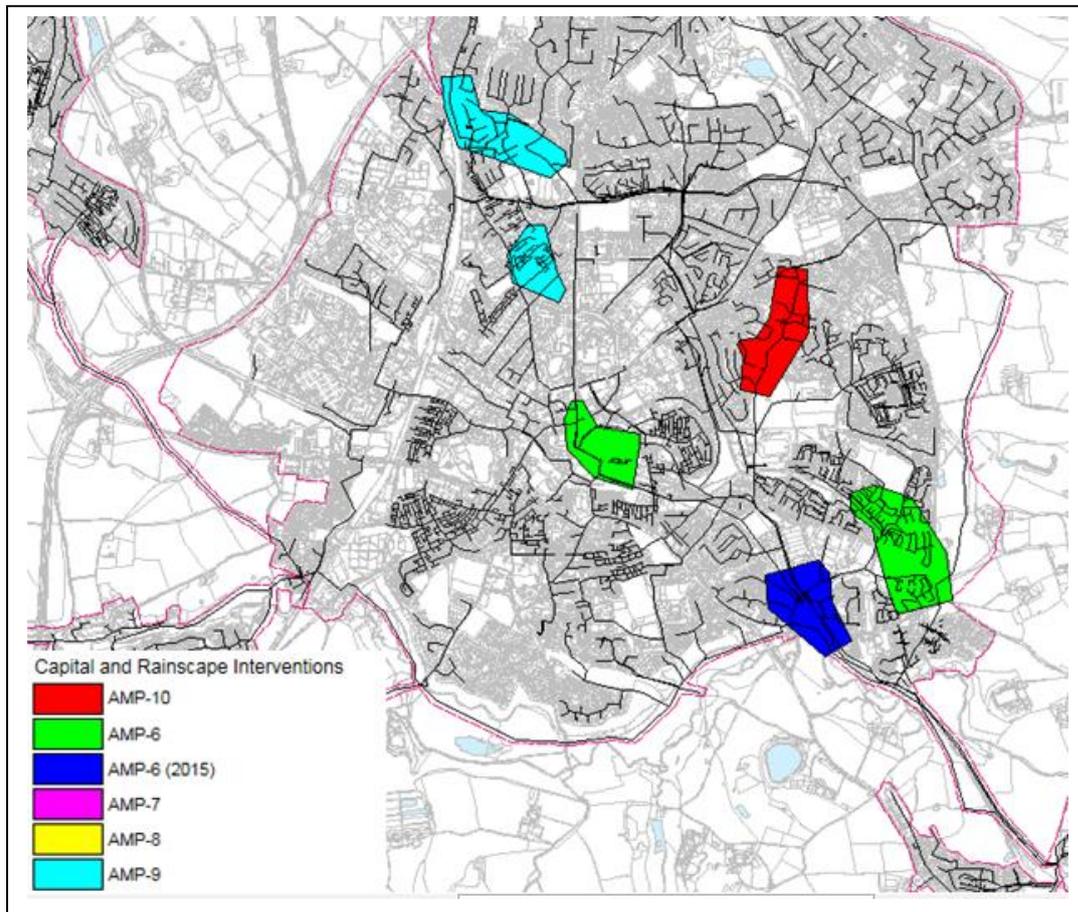
Se analizó junto con Aguas de Gales qué tipo de solución tenía una mayor viabilidad para cada uno de los casos eligiéndose en cada caso incluir en el Plan la solución “convencional” o la solución tipo “drenaje sostenible”.

Aguas de Gales tiene un objetivo que es el de reducir las áreas impermeables conectadas a la red unitaria, por lo que las soluciones en la medida de lo posible buscaban esa contribución.

Para cada una de las soluciones se presupuestaron las investigaciones necesarias a realizar en un futuro con objeto de mejorar el modelo para la etapa de diseño de detalle de los proyectos.

La figura 10.7.5. muestra la planificación de intervenciones para cada uno de los AMPs en el centro de Wrexham.

Figura 10.7.5.- Five Fords-Wrexham: Actuaciones hidráulicas Wrexham centro.



El Plan de Intervenciones se resume en la figuras 10.7.6. y 10.7.7.

Figura 10.7.6.- Five Fords-Wrexham: Plan de Intervenciones, corto y medio plazo

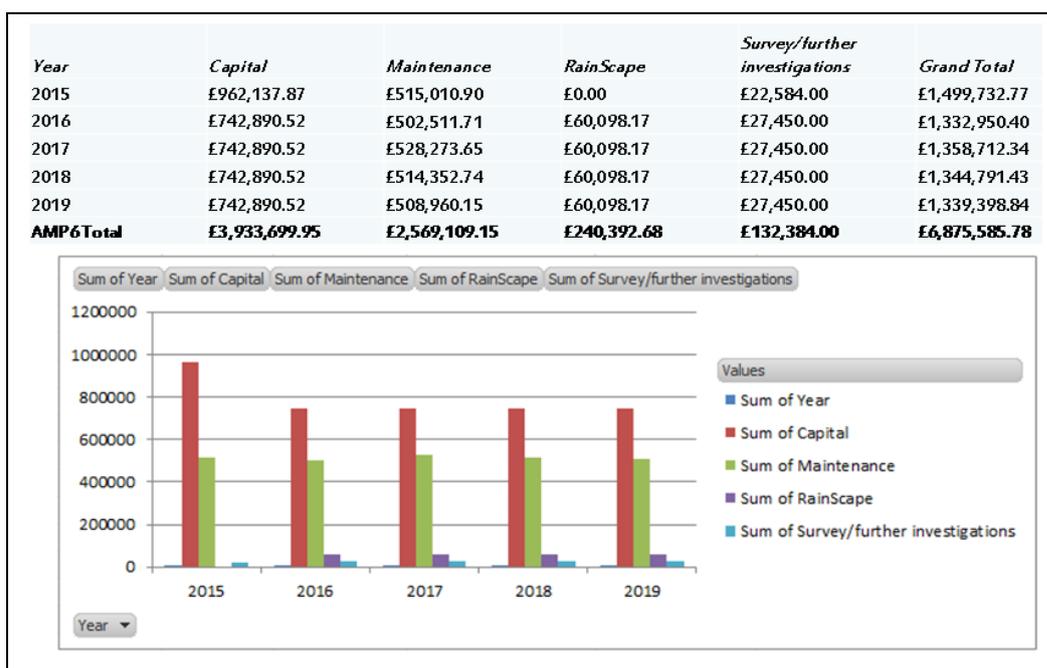
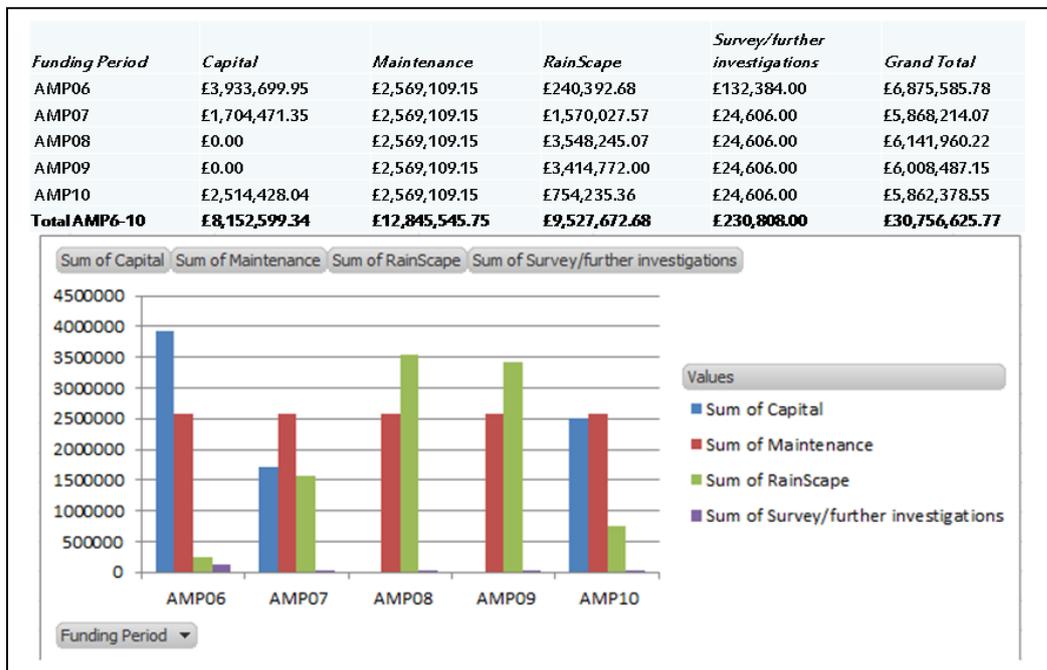


Figura 10.7.7.- Five Fords-Wrexham: Plan de Intervenciones, largo plazo



El Plan de Intervenciones propuesto, a la vez que viable ya que aporta un beneficio mayor que su coste, reduce el riesgo a los objetivos marcados por Aguas de Gales. El número de áreas inundables resuelto es de 113, y se elimina un total de 24,57 Ha de área impermeable que actualmente está drenando al sistema unitario, con el beneficio que esto ofrece sobre la reducción de costes de explotación y reducción de emisiones.

11. CONCLUSIONES

El procedimiento de estudio y análisis de cuencas urbanas propuesto pretende ser una herramienta robusta, aplicable a cualquier cuenca urbana, para la planificación de intervenciones y gestión de la cuenca a corto, medio y largo plazo.

El análisis de los problemas basado en el riesgo es una herramienta que, a diferencia de otros enfoques clásicos, no sólo se centra en las probabilidades de ocurrencia o en las causas, sino que también introduce la evaluación de las consecuencias, de manera que el análisis no se detiene en la evaluación de conceptos como “período de retorno” si no que contempla también la severidad de sus consecuencias. Esto implica una evaluación multicriterio pues las consecuencias incluyen no sólo una valoración económica, sino también social y medioambiental.

Este tipo de análisis, por tanto, permite realizar una priorización de las zonas que presentan problemas de un modo más completo que si únicamente se evaluaran las causas de los problemas.

De esta manera el procedimiento de análisis se convierte en una herramienta de ayuda a la decisión para la priorización de actuaciones y planes de mantenimiento y explotación de la cuenca, lo que va ligado al concepto de planificación.

El objetivo principal del análisis y evaluación de la cuenca es la elaboración de un Plan de Intervención. Para la elaboración del Plan es fundamental la inclusión del análisis coste-beneficio que compara la disminución de los riesgos con el coste de las actuaciones propuestas para mitigar total o parcialmente dichos riesgos. Este análisis, como se ha comentado, es multicriterio, incluyendo no sólo aspectos económicos, sino también sociales y medioambientales.

De esta manera se evita la gestión de la cuenca consistente en planear una intervención cuando se detecta un daño sin previamente valorar si esa intervención es rentable, o al menos prioritaria. Puede ocurrir que a partir del análisis coste-beneficio se obtenga como resultado que en el corto o medio plazo no sea rentable mitigar un determinado riesgo; en este caso, es posible que si no se hubiera realizado el análisis basado en el riesgo se hubiera propuesto la actuación como urgente, lo que supondría una asignación no óptima de las inversiones en la cuenca.

En el campo de las infraestructuras hidráulicas, y en el caso de las cuencas urbanas aún más si cabe, es necesario Planificar. Para Planificar es necesario primero conocer, y analizar. Debemos saber dónde estamos, y hacia dónde vamos, qué objetivos tenemos, y en función del presupuesto disponible, emplearlo de la manera más racional posible. Aunque en principio debería buscarse el óptimo, se ha empleado la expresión “más racional” debido a que el problema objeto de análisis es de una gran complejidad, recordemos que están implicados aspectos como mínimo económicos, sociales y ambientales, y dependiendo del objetivo que se quiera optimizar el resultado será diferente.

Si no existe una Planificación, la probabilidad de elegir las actuaciones que no corresponden y de emplear el presupuesto en las zonas que no son críticas es muy alta, ya que los sistemas de drenaje que componen las cuencas urbanas son en general complejos, con multitud de elementos y variables interconectados, lo que hace prácticamente imposible su estudio sin la realización de un análisis detallado.

Este “análisis detallado” por supuesto tiene un coste que no es despreciable, pero que a largo plazo es rentabilizable puesto que, como se ha demostrado históricamente, los costes de las consecuencias más críticas en el caso de las inundaciones son muy altos, y se verán incrementados en el futuro si no se disponen las herramientas de análisis necesarias para estudiar aspectos como el incremento poblacional en las áreas urbanas, el cambio de los usos del suelo o el cambio climático.

Para realizar el análisis de la cuenca se propone la construcción de dos modelos, el hidrológico-hidráulico y el de deterioro. Estos modelos hay que comprenderlos como algo vivo, en constante actualización, de manera que no queden obsoletos y puedan utilizarse en cualquier momento. Los modelos construidos para la elaboración del Plan tienen también otros usos como son:

- En el caso del diseño en detalle de actuaciones en la red de saneamiento los modelos construidos sirven como base para que actualizándolos convenientemente puedan utilizarse para realizar el dimensionamiento de las intervenciones planeadas.

- Pueden utilizarse en el caso de tener que asesorar sobre el impacto de nuevas urbanizaciones a conectar a la red de saneamiento.
- Para el análisis de la explotación de la red, pueden simularse nuevas reglas de explotación y comprobar el efecto que éstas tienen sobre el funcionamiento de la red.
- Se puede realizar un estudio de las estructuras críticas, simulando el fallo de éstas y analizándose en cada caso si es necesario reducir el nivel crítico de éstas por ejemplo estableciendo by-passes o duplicándolas.
- Los modelos pueden servir de ayuda para la elaboración de planes de evacuación y de emergencia.
- Pueden servir de comienzo para la implementación de estrategias de drenaje sostenible analizándose las consecuencias de la desconexión de áreas impermeables vertientes a la red de saneamiento.

La construcción de los modelos lleva implícita la decisión de la elección del software de simulación; en la actualidad existe un abanico de opciones que en general ofrecen unas altas prestaciones. Probablemente diferentes alternativas sean igualmente válidas; lo que sería recomendable es la utilización del mismo software al menos para el estudio de todas las cuencas pertenecientes a una misma entidad gestora, ya que en muchos casos existen incompatibilidades y distintas maneras de introducción de los datos que pueden generar problemas en las bases de datos que son generales para todas las cuencas.

En cuanto a las bases de datos, son un aspecto fundamental en la metodología de análisis propuesta. La capacidad de las bases de datos ya permite gestionar cantidades que hace unos años eran impensables y esta ventaja debe ser incluida en el análisis. Cuanto mayor número de datos se utilice, mejor será la aproximación a la realidad que conseguiremos en nuestro análisis de riesgo y construcción de los modelos.

Al avance en las bases de datos debe agregarse el avance en los sistemas de información geográfica que permiten la asimilación y evaluación tanto analítica como espacial de los datos. Por tanto es necesario invertir en la recolección y manipulación de los datos para

que resulten directamente utilizables en el análisis propuesto. De esta manera el proceso se va retroalimentando y mejorando continuamente.

Por tanto hay que entender la evaluación de la cuencas urbanas mediante el análisis de riesgos como un proceso continuo, en el que cada cierto tiempo se cierra el ciclo proponiéndose una serie de mejoras a corto, medio y largo plazo, éstas últimas revisables en la siguiente etapa de análisis.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguas de Gales (2010) Final Business Plan 2010-2015, Part A The Company Strategy
- Aguas de Gales (2011), Model Build and Verification Specification
- Aguas de Gales (2013) Surface Water Elimination and Reduction (SWEAR) Implementation Guidance
- Aguas de Gales (2013) Sustainable Drainage Planning Specification
- Aguas de Gales, ICS Consulting (2013) Consequence Modelling
- Aguas de Gales, ICS Consulting (2013) Failure Modelling
- Aguas de Gales, ICS Consulting (2013) Sewers Assets Investment Manager Report
- Ainger, C. M., Armstrong, R. J., Butler, D. (1998) Dry Weather Flow in Sewers, CIRIA
- Allitt, R. (2009) Impact of Urban Creep on Sewerage Systems, UK Water Industry Research
- Armstrong, R. J. (2011) Modelling Dry Weather Flow, WaPUG
- Balmforth, D. J. (2011) Modelling ancillaries: Orifice Coefficients, WaPUG, Sheffield Hallam University
- Balmforth, D. J. (2011) Modelling ancillaries: Weir Coefficients, WaPUG, Sheffield Hallam University
- Balmforth, D., Digman, C., Kellagher, R., Butler, D. (2006) Designing for Exceedance in Urban Drainage – Good Practice, CIRIA
- Bettess, R. (1996) Infiltration Drainage – Manual of Good Practice, CIRIA
- Chapman, R. (2009) The Wallingford Procedure Percentage Runoff Equation, Water Research Centre

Drinkwater, A. R., Stephenson, G. (1987) A Guide to Short Term Flow Surveys of Sewer Systems, Water Research Centre

Evans, D. (2003) Sewerage Design Manual, Aguas de Gales

Gill, E., Conroy, P. (2013) Drainage Strategy Framework, Environment Agency, Ofwat

Montgomery Watson Harza (2001) Guide to Infiltration Modelling: Detailed Methodology

Nguyen, C. (2013) Service Measure Framework: Guidelines, Aguas de Gales

Ofwat (2008) Development of guidance for sewerage undertakers on implementation of drainage standards

Osborne, M. P. (2009) A New Runoff Volume Model, WaPUG

Reed, D. (1999) Flood Estimation Handbook, Institute of Hidrology

WaPUG (2009) Catchment Data for the Wallingford Procedure Percentage Runoff Model

Wastewater Planning Users Group (2002) Code of Practice for the Hydraulic Modelling of Sewer Systems

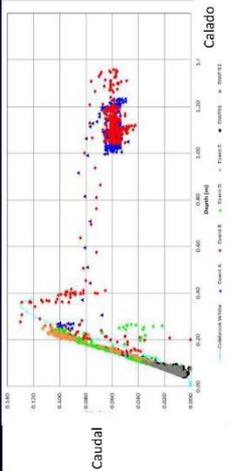
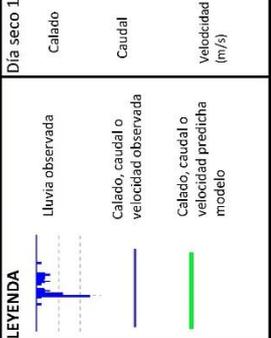
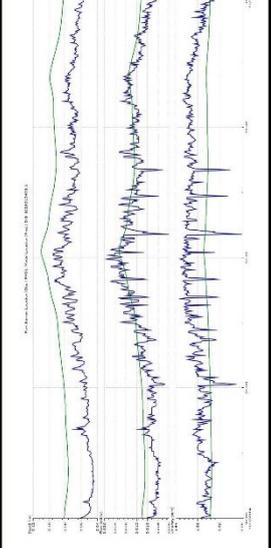
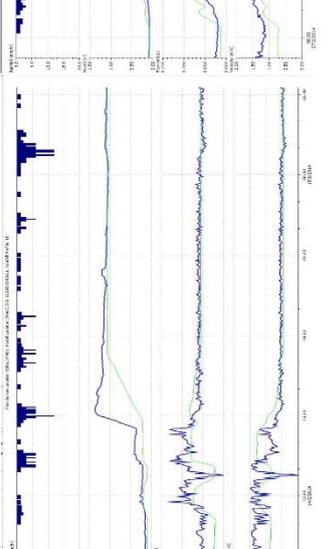
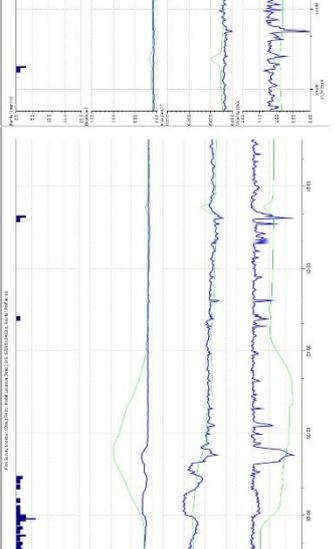
Water Research Centre (2001) Sewerage Rehabilitation Manual

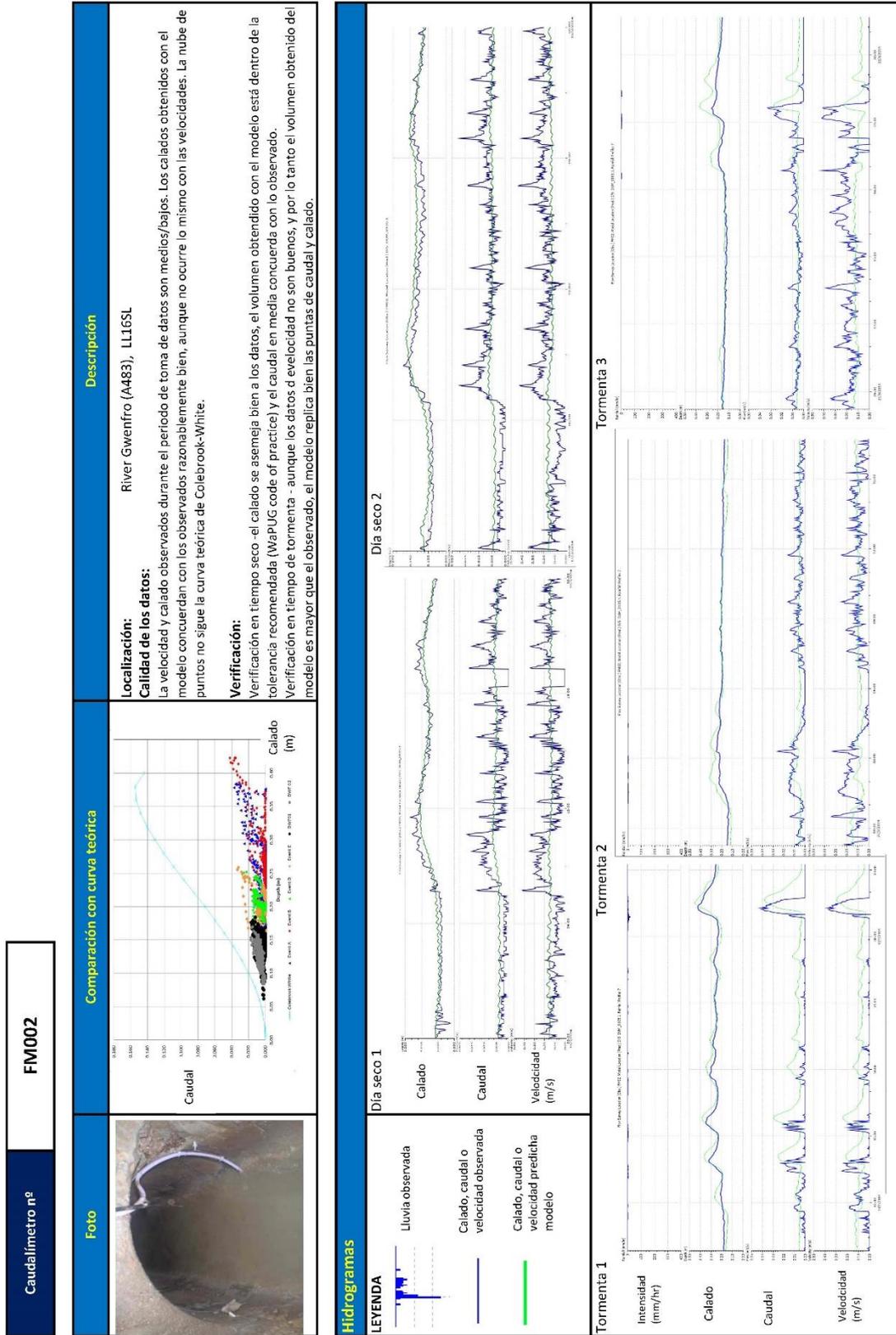
Wilson, C., Heather, A. (2011) Future Impacts on Sewer Systems in England and Wales, Ofwat, (<http://ukclimateprojections-ui.defra.gov.uk>)

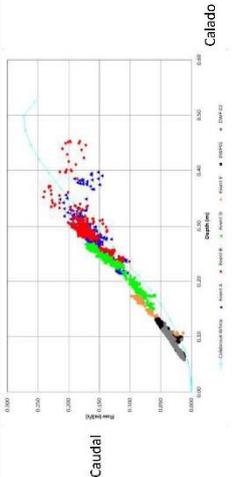
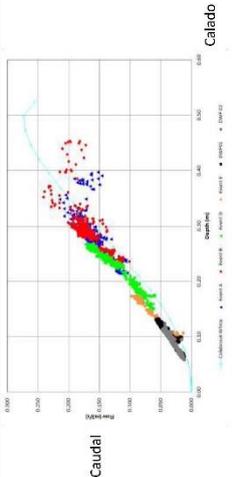
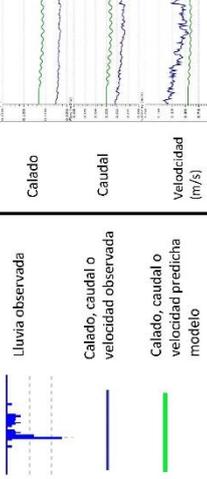
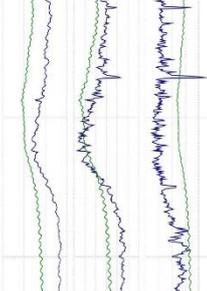
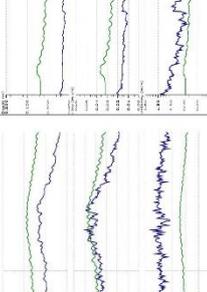
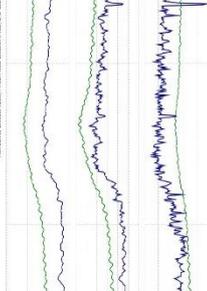
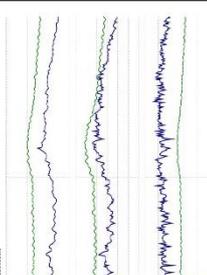
Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferles, C., Bray, R., Shaffer, P. (2007) The SUDS manual, CIRIA

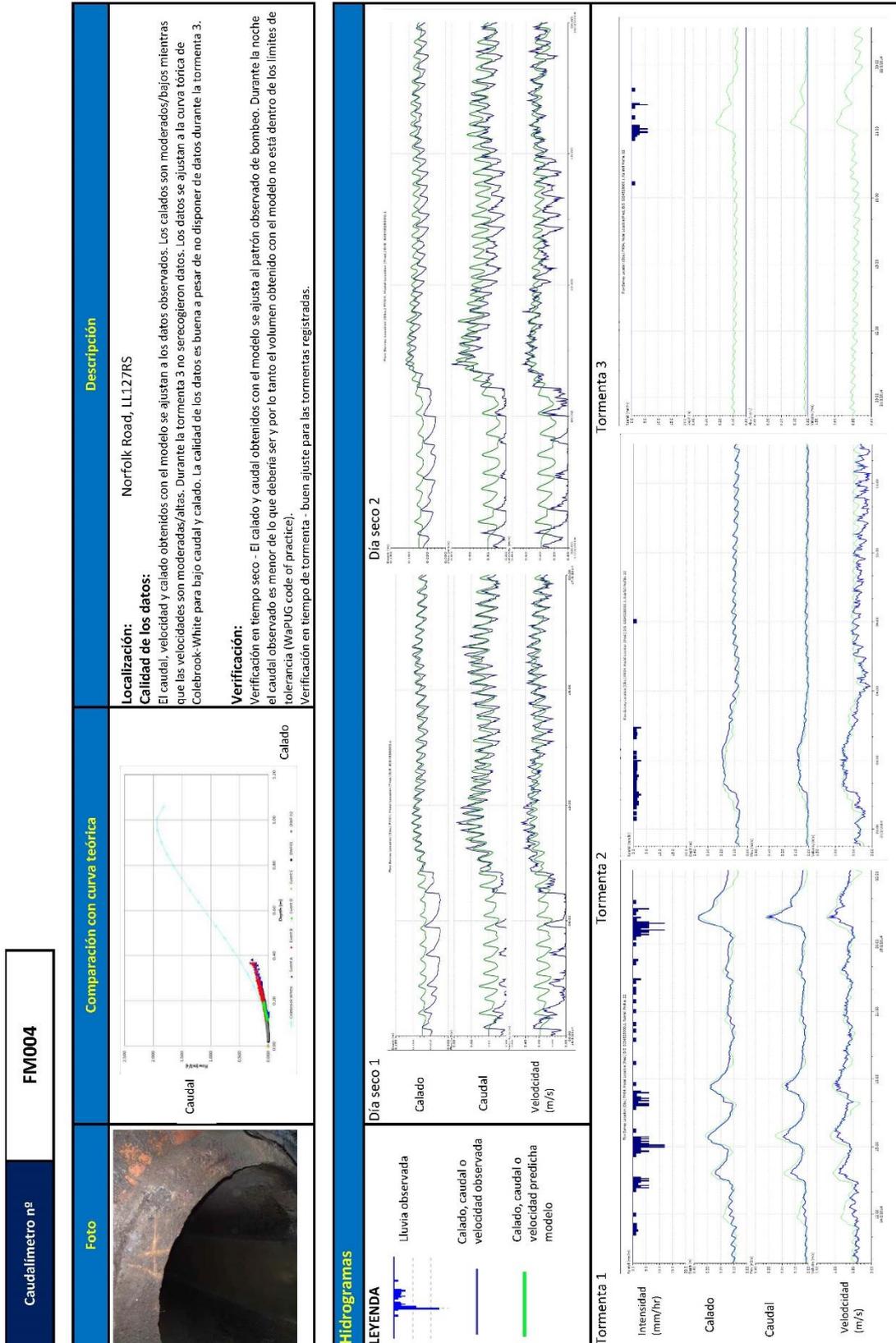
Wright, D. E., Garside, D. H., Bonsall, J., Cockbain, H. M. G., et al. (1983) Design and Analysis of Urban Storm Drainage, The Wallingford Procedure, The Standing Technical Committee on Sewers and Water Mains

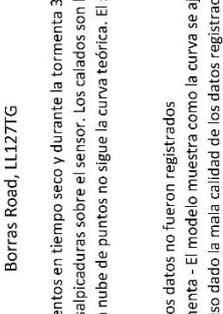
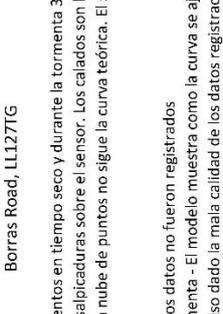
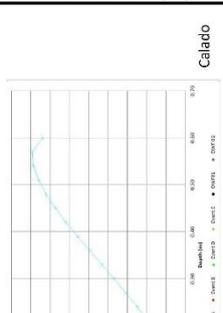
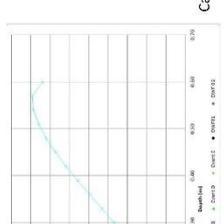
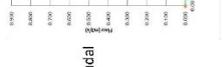
ANEJO: Fichas de verificación de caudalímetros

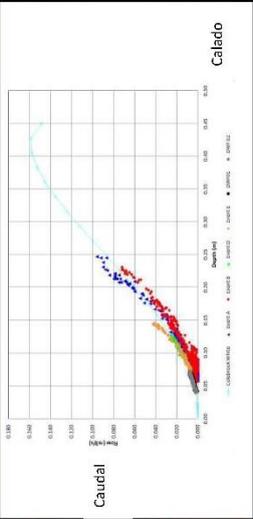
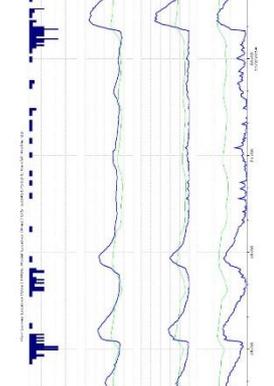
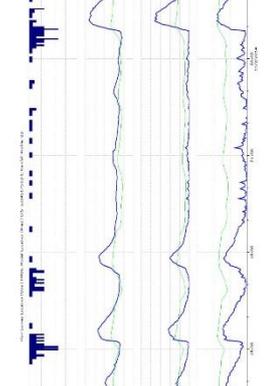
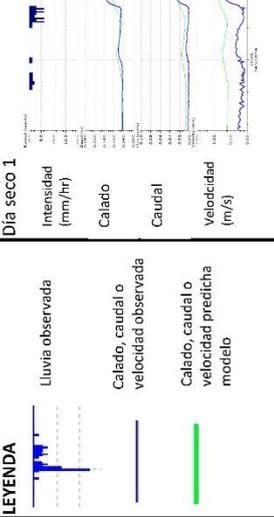
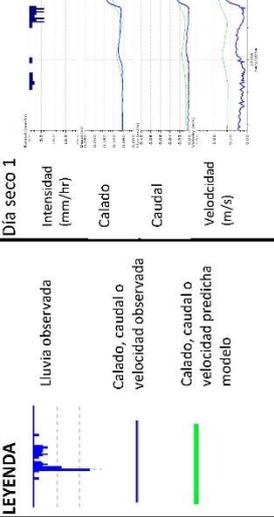
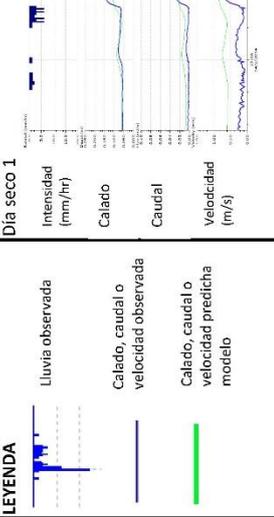
Caudalímetro nº	FM001	Descripción
Foto		
<p style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 2px;">Comparación con curva teórica</p> 		<p>Localización: Talwrn Road, LL13HY</p> <p>Calidad de los datos: Se observan velocidades relativamente altas; grandes calados asociados a la primera tormenta pero substancialmente menores durante las tormentas 2 y 3. La nube de puntos sigue razonablemente bien la curva teórica de Colebrook-White; para condiciones de tormenta el calado se ve afectado por las condiciones aguas abajo. Los datos muestran la respuesta a los eventos de lluvia.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - los calados están un poco sobrestimados pero la forma de la gráfica concuerda con los datos observados; los datos de velocidad muestran que el sensor no funcionaba correctamente y los valores son menores de lo que deberían ser. Verificación en tormenta - El volumen está dentro de los intervalos recomendados en WaPUG Code of Practice 2002. La verificación se considera aceptable en términos de calado dado que el modelo replica el máximo incremento de calado para la peor tormenta.</p>
Hidrogramas		
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> Lluvia observada Calado, caudal o velocidad observada Calado, caudal o velocidad predicha modelo 		
<p>Día seco 1</p> 		
<p>Día seco 2</p> 		
<p>Tormenta 1</p> 		
<p>Tormenta 2</p> 		
<p>Tormenta 3</p> 		

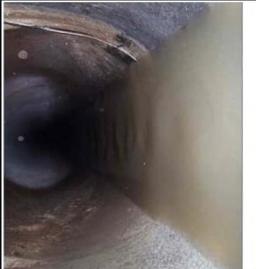
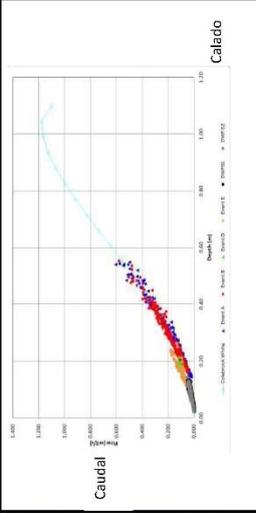
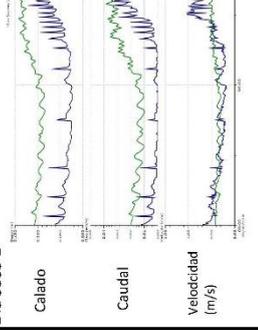
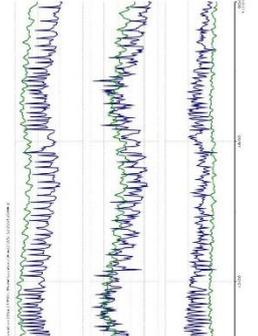
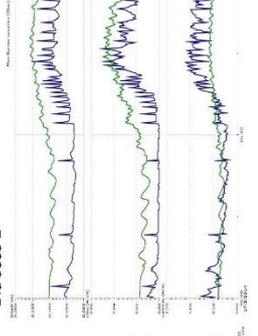
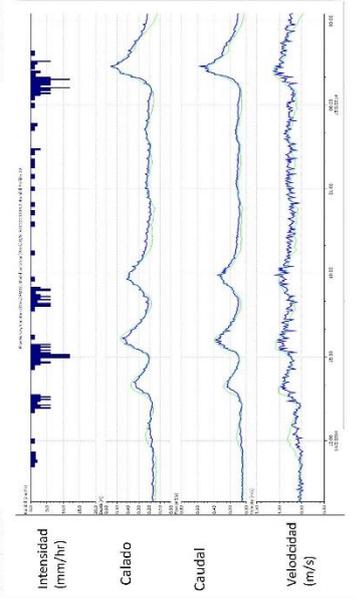
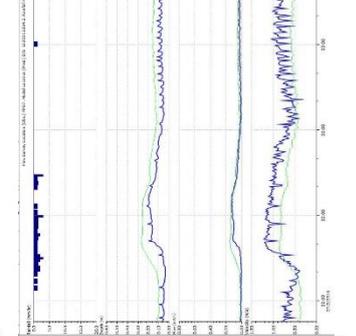
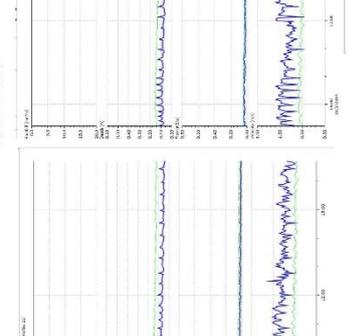
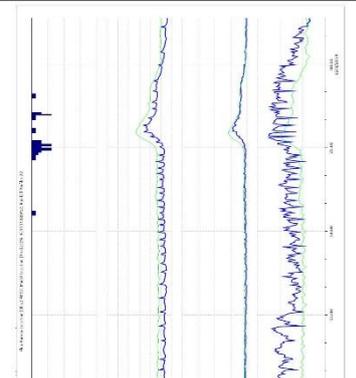


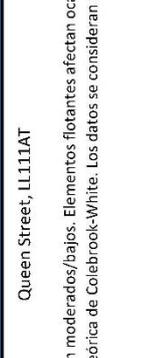
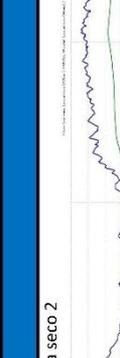
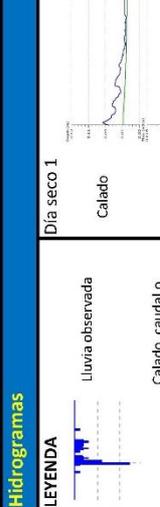
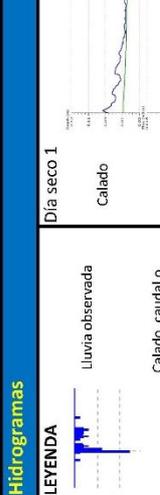
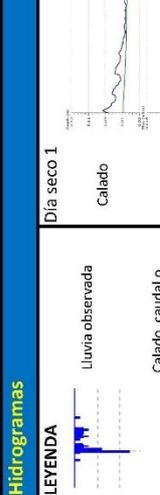
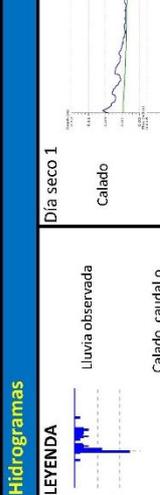
<p>Caudalímetro nº</p> <p style="text-align: center;">FM003</p>	<p style="text-align: center;">Comparación con curva teórica</p> 		<p style="text-align: center;">Descripción</p> <p>River Gwenfro (A483) LLI.6SL</p> <p>Localización: Las velocidades son moderadas/altas, los calados observados son moderados a bajos. La nube de datos sigue la curva teórica de Colebrook-White</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - La curva obtenida con el modelo se ajusta a la curva de datos observados. Aunque los calados están sobrestimados, el caudal punta está dentro de los límites de tolerancia. El volumen obtenido con el modelo es mayor que el observado pero la forma de la curva es similar que la obtenida con los datos observados. Verificación en tiempo de tormenta - El modelo replica los datos de tormenta observados. Los calados punta están dentro de los límites de tolerancia.</p>
<p style="text-align: center;">Foto</p> 	<p style="text-align: center;">Comparación con curva teórica</p> 		<p style="text-align: center;">Descripción</p> <p>River Gwenfro (A483) LLI.6SL</p> <p>Localización: Las velocidades son moderadas/altas, los calados observados son moderados a bajos. La nube de datos sigue la curva teórica de Colebrook-White</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - La curva obtenida con el modelo se ajusta a la curva de datos observados. Aunque los calados están sobrestimados, el caudal punta está dentro de los límites de tolerancia. El volumen obtenido con el modelo es mayor que el observado pero la forma de la curva es similar que la obtenida con los datos observados. Verificación en tiempo de tormenta - El modelo replica los datos de tormenta observados. Los calados punta están dentro de los límites de tolerancia.</p>
<p style="text-align: center;">Hidrogramas</p>			
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Lluvia observada  Calado, caudal o velocidad observada  Calado, caudal o velocidad predicha modelo 			
<p style="text-align: center;">Día seco 1</p> 			
<p style="text-align: center;">Día seco 2</p> 			
<p style="text-align: center;">Tormenta 1</p> 			
<p style="text-align: center;">Tormenta 2</p> 			
<p style="text-align: center;">Tormenta 3</p> 			

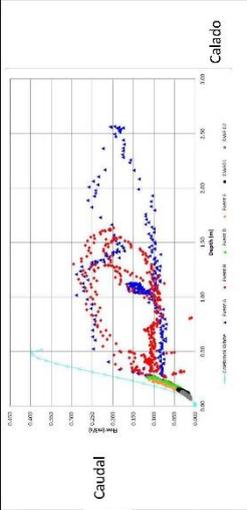
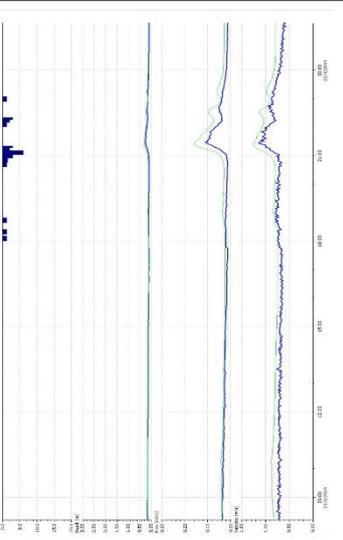
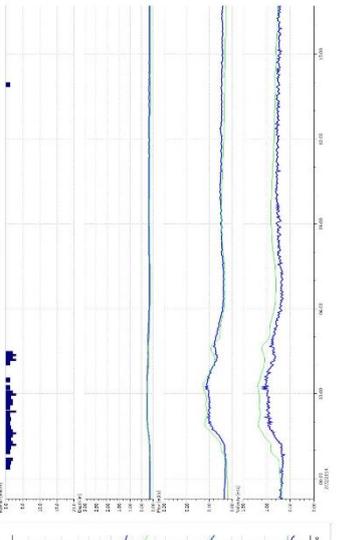
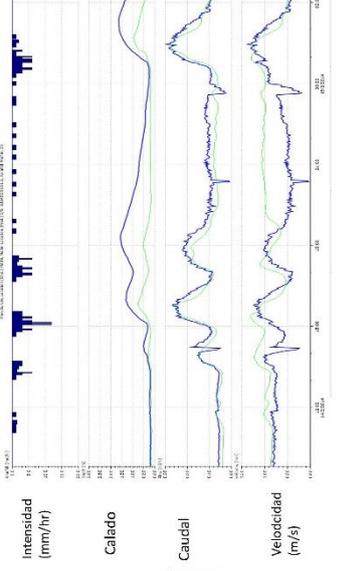
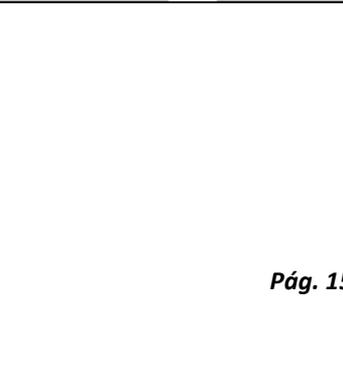


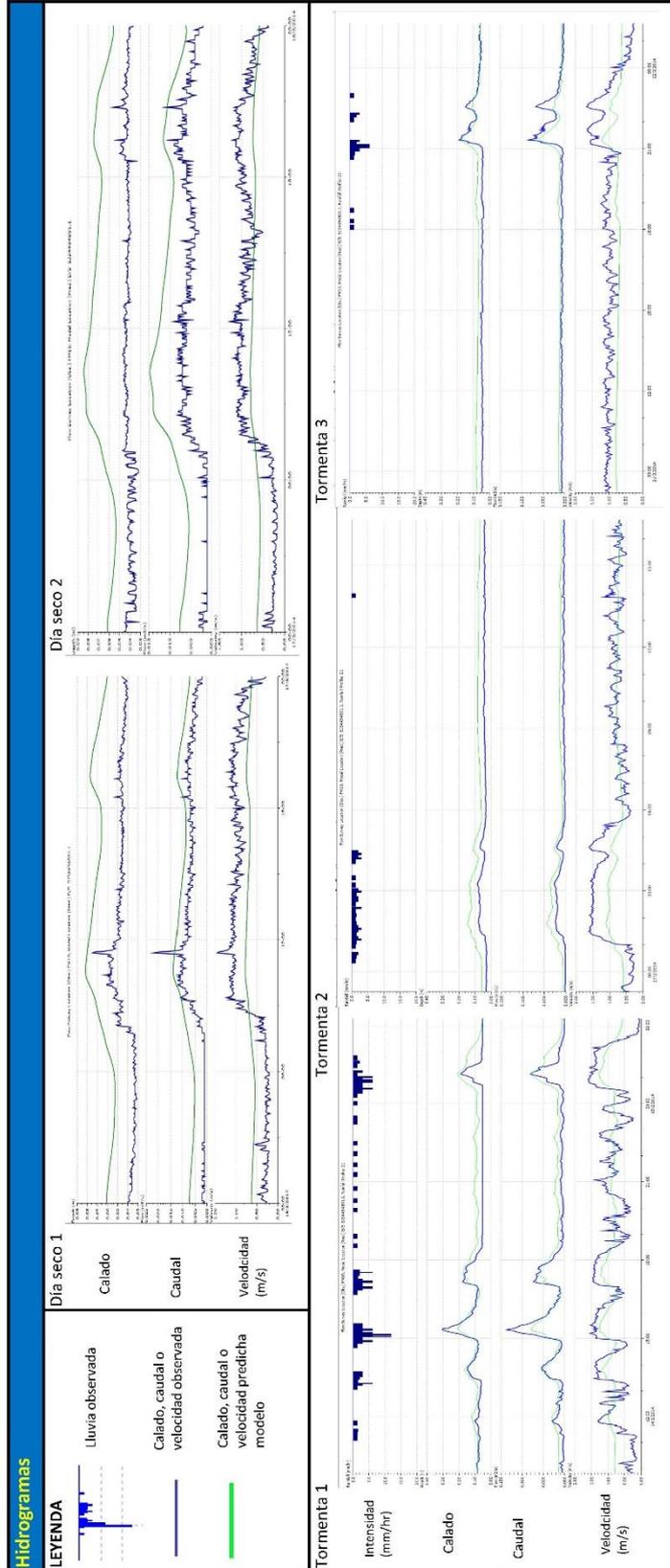
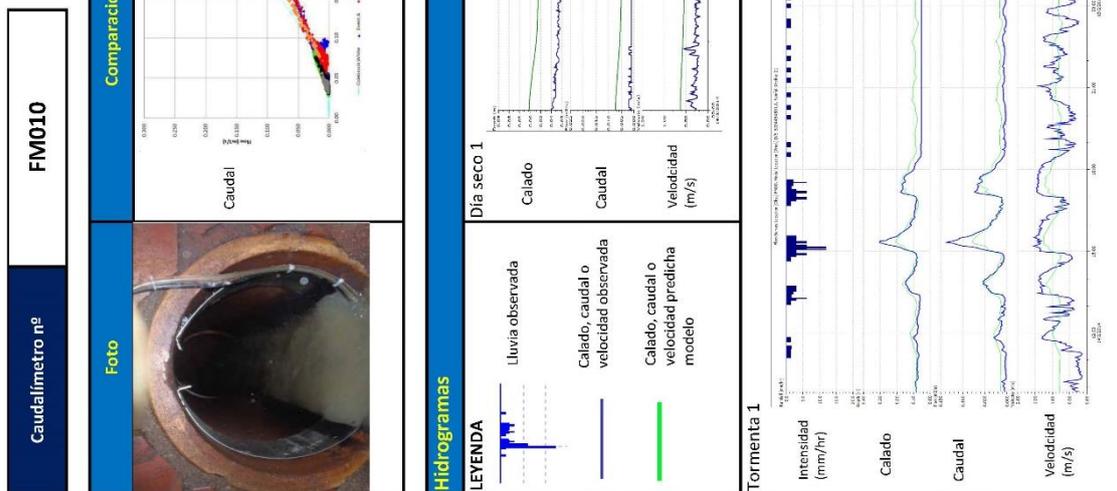
<p style="text-align: center;">FM005</p>	<p style="text-align: center;">Comparación con curva teórica</p> 		<p style="text-align: center;">Descripción</p> <p>Borras Road, LL127TG</p>
<p style="text-align: center;">Foto</p> 	<p>Localización de los datos: Sensor inactivo durante los eventos en tiempo seco y durante la tormenta 3. La velocidad es muy alta y probablemente irreal debido a fenómenos de salpicaduras sobre el sensor. Los caudales son bajos, la mayoría menores de 10 cm y probablemente no precisos. La nube de puntos no sigue la curva teórica. El sensor tuvo que ser cambiado de localización (FM023).</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - Los datos no fueron registrados Verificación en tiempo de tormenta - El modelo muestra como la curva se ajusta los datos observados, aunque no se puede realizar un análisis preciso dado la mala calidad de los datos registrados.</p>		<p style="text-align: center;">Comparación con curva teórica</p> 
<p style="text-align: center;">Hidrogramas</p>			
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> Lluvia observada Calado, caudal o velocidad observada Calado, caudal o velocidad predicha modelo 	<p>Día seco 1</p> 		
<p>Tormenta 1</p> 			<p>Tormenta 2</p> 
<p>Tormenta 3</p> 			<p>Día seco 2</p> 

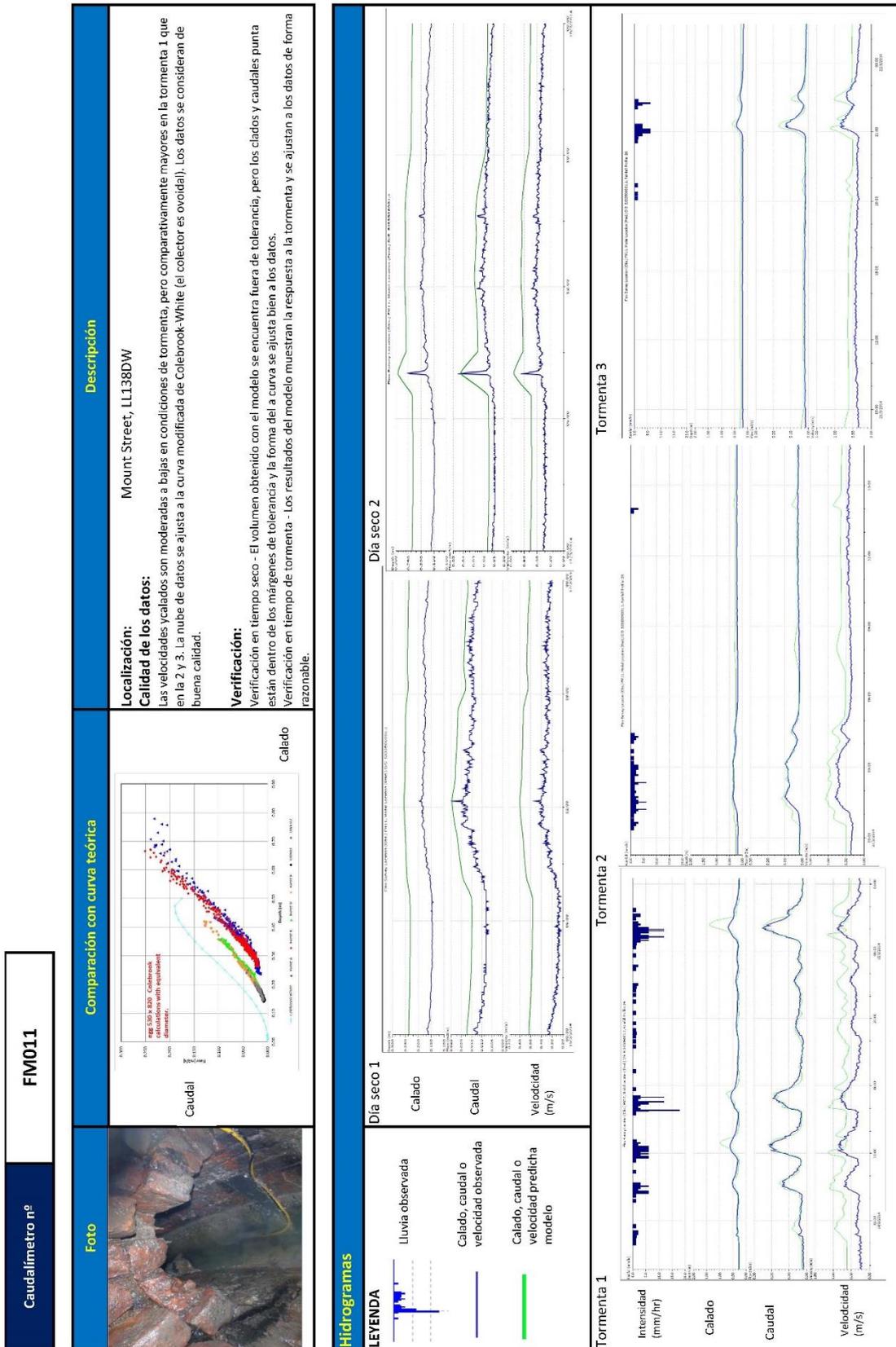
<p>Caudalímetro nº</p>	<p>FM006</p>	<p>Foto</p>	
<p>Comparación con curva teórica</p>		<p>Descripción</p>	
		<p>Localización: Borrás Road, LL12TG</p> <p>Calidad de los datos: Los caudales y velocidades observadas son moderados a bajos. Los datos de velocidad son demasiado bajos durante la noche en los días de tiempo seco. Los datos se ajustan a la curva teórica de Colebrook-White. Buena calidad de datos.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - Los caudales y calados obtenidos con el modelo se ajustan a los datos observados. Verificación en tiempo de tormenta - El volumen obtenido mediante el modelo no puede ser confirmado para la tormenta 1 ya que los datos de velocidades registrados se vieron afectados por elementos flotantes. Para las otras tormentas el volumen obtenido con el modelo está dentro del rango de tolerancia recomendado. La forma de la gráfica es razonable.</p>	
<p>Hidrogramas</p>			
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Lluvia observada  Calado, caudal o velocidad observada  Calado, caudal o velocidad predicha modelo 		<p>Día seco 1</p> 	
<p>Día seco 2</p> 		<p>Tormenta 1</p> 	
<p>Tormenta 2</p> 		<p>Tormenta 3</p> 	

<p>Caudalímetro nº</p> <p style="text-align: center;">FM007</p>	<p>Foto</p> 	<p>Comparación con curva teórica</p> 	<p>Descripción</p> <p>Carden Park Way, LL139GX</p> <p>Localización: Los caudales son bajos durante las tormentas 2 y 3 y moderados durante la tormenta 1. Los datos siguen la curva teórica de Colebrook-White. Se puede considerar que los datos son de buena calidad.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - buen ajuste de las curvas de datos observados y resultados del modelo. Los picos de caudales bombeados no se ajustan con precisión a los datos observados ya que las estaciones de bombeo se encuentran bastante alejadas aguas arriba y el patrón de bombeo obtenido con los datos observados en FM004 no se ha propagado correctamente por el modelo.</p> <p>Verificación en tiempo de tormenta - se observa lo mismo que en tiempo seco con los caudales bombeados. Se considera que la verificación es suficientemente buena.</p>
<p>Hidrogramas</p>			
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Lluvia observada  Calado, caudal o velocidad observada  Calado, caudal o velocidad predicha modelo 	<p>Día seco 1</p> 	<p>Día seco 2</p> 	<p>Día seco 3</p> 
<p>Tormenta 1</p> 	<p>Tormenta 2</p> 	<p>Tormenta 3</p> 	<p>Tormenta 4</p> 

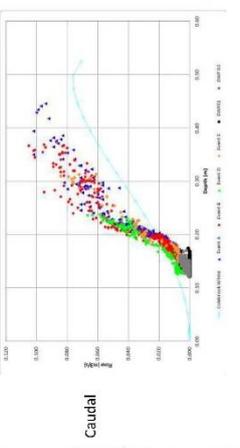
<p>Caudalímetro nº</p> <p>FM008</p>	<p>Descripción</p> <p>Queen Street, LL111AT</p>
<p>Foto</p> 	<p>Localización: Queen Street, LL111AT</p> <p>Calidad de los datos: Las velocidades y caudales son moderados/bajos. Elementos flotantes afectan ocasionalmente al sensor de velocidades. Los datos se ajustan a la curva teórica de Colebrook-White. Los datos se consideran de buena calidad.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - Los caudales punta están dentro de los límites de tolerancia y la forma de la curva de velocidad calculada se ajusta a la forma de la curva de los datos observados. Verificación en tiempo de tormenta - la curva obtenida por el modelo se ajusta razonablemente bien a los datos observados.</p>
<p>Comparación con curva teórica</p> 	
<p>Hidrogramas</p> <p>Día seco 1</p> <p>Intensidad (mm/hr)</p> <p>Calado, caudal o velocidad observada</p> <p>Calado, caudal o velocidad predicha modelo</p> 	
<p>Día seco 2</p> <p>Calado</p> <p>Caudal</p> <p>Velocidad (m/s)</p> 	
<p>Tormenta 1</p> <p>Intensidad (mm/hr)</p> <p>Calado</p> <p>Caudal</p> <p>Velocidad (m/s)</p> 	
<p>Tormenta 2</p> 	
<p>Tormenta 3</p> 	

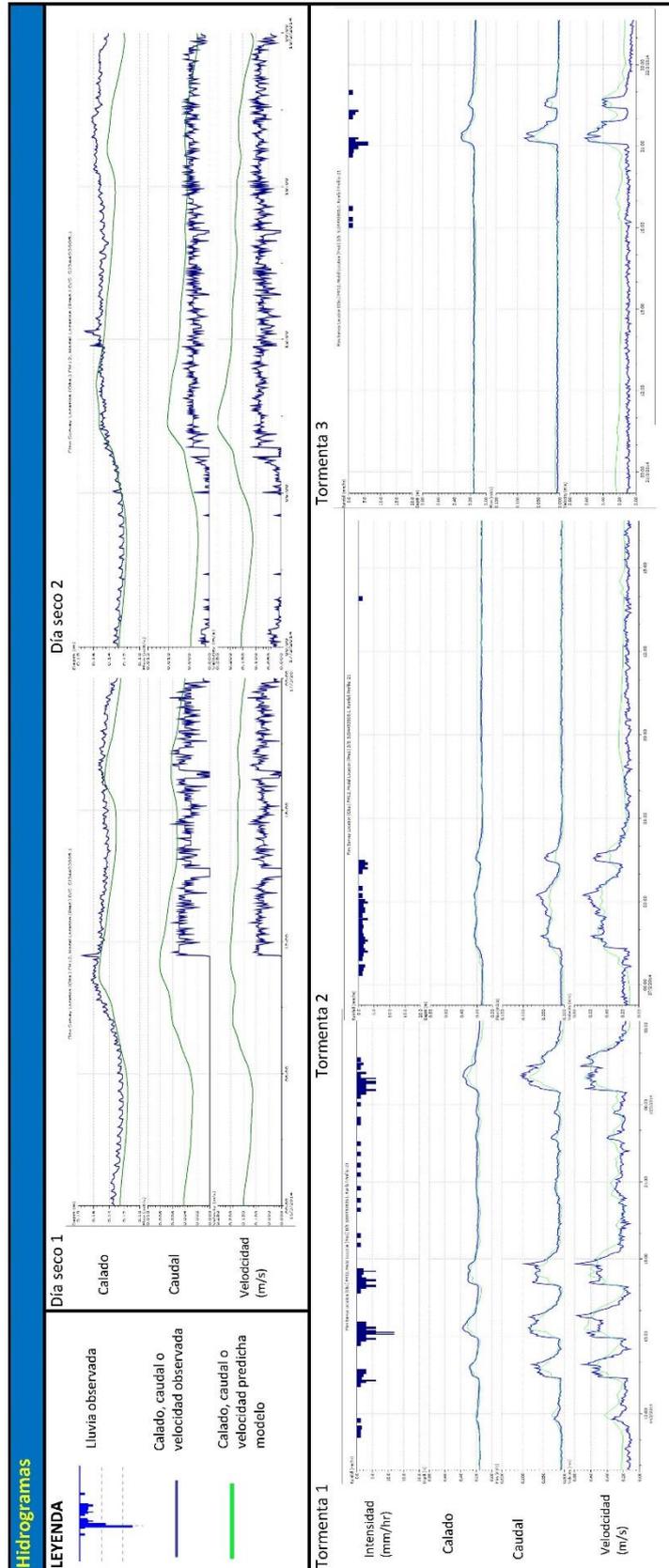
<p>Caudalímetro nº</p> <p style="text-align: center; font-weight: bold;">FM009</p>	<p>Foto</p> 	<p>Comparación con curva teórica</p> 	<p>Descripción</p> <p>Queensway Sports Complex, LL138SJ</p> <p>Localización: La velocidad es moderada/baja y tiende a descender. El calado es alto durante la tormenta 1, pero bajo durante las tormentas 2 y 3. Los datos siguen la curva teórica de Colebrook-White para caudales y caudales bajos pero se alejan para caudales mayores de 0,100 m³/s, indicando que posiblemente la localización está afectada por condiciones aguas abajo.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - La gráfica se ajusta bien a los datos observados, la verificación se considera razonablemente buena. Verificación en tiempo de lluvia - El modelo predice los caudales razonablemente bien; Aguas arriba de FM009 se produce infiltración y la respuesta lenta observada se ha replicado calibrando los parámetros de infiltración del modelo.</p>
<p>Hidrogramas</p> <p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Lluvia observada  Calado, caudal o velocidad observada  Calado, caudal o velocidad predicha modelo 			
<p>Día seco 1</p>  <p>Día seco 2</p>  <p>Tormenta 1</p>  <p>Tormenta 2</p>  <p>Tormenta 3</p>			

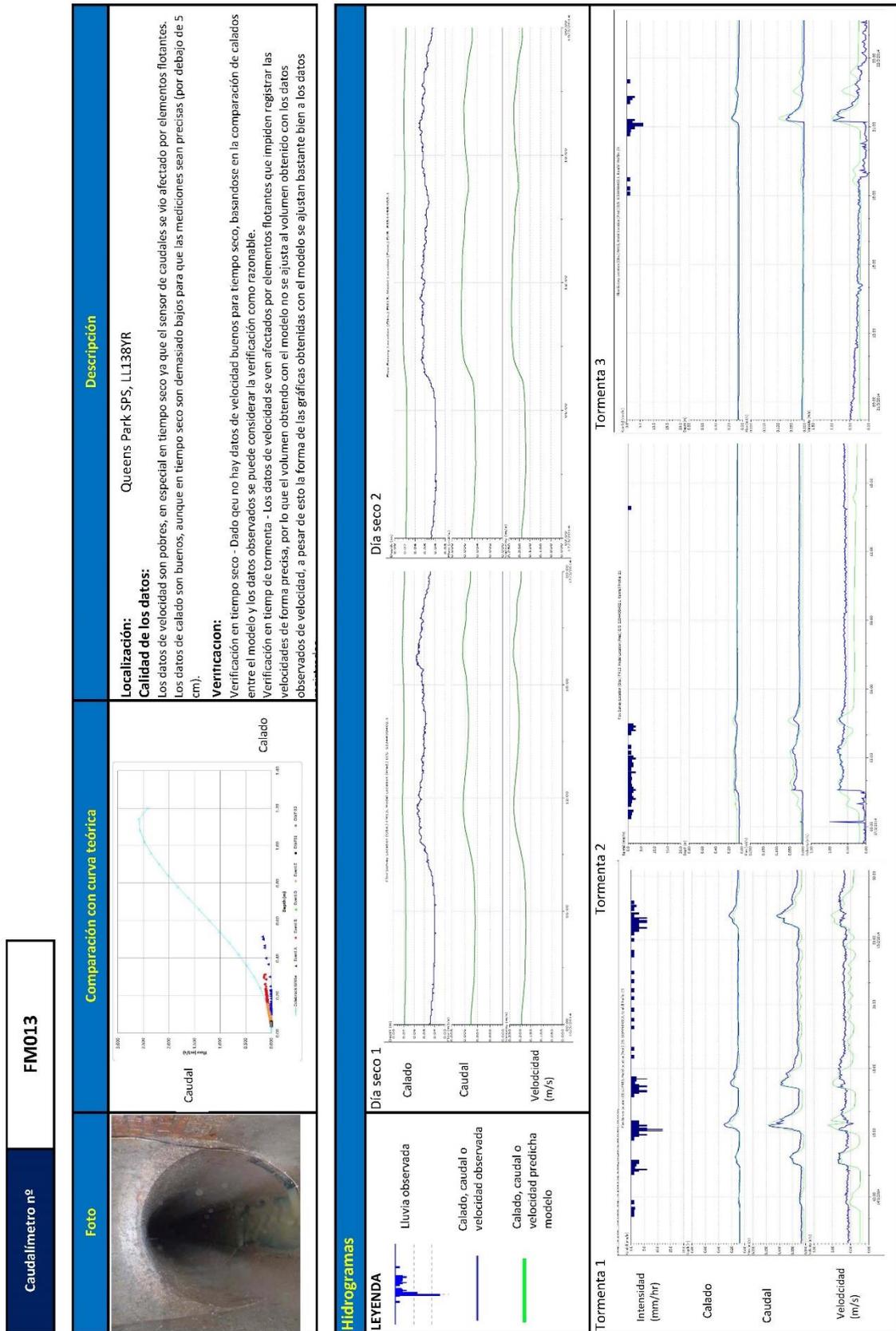


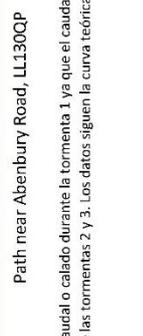
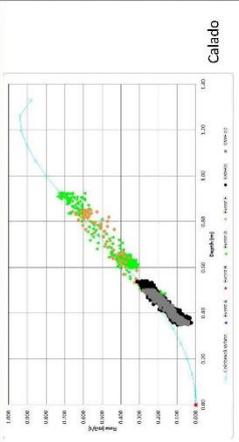
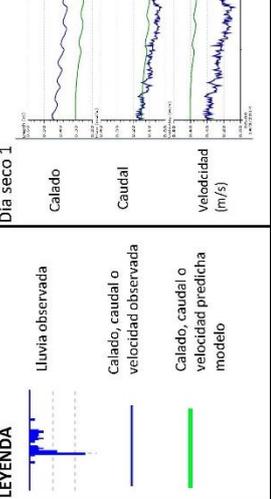
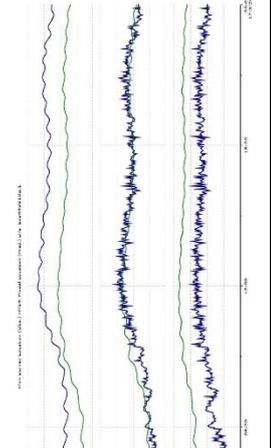
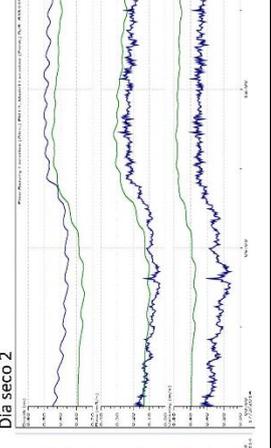


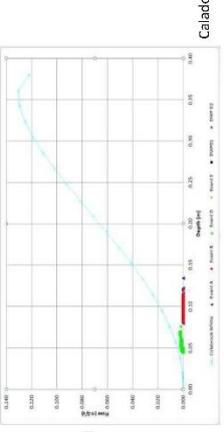
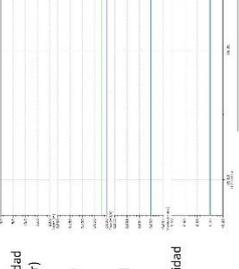
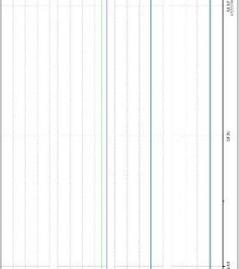
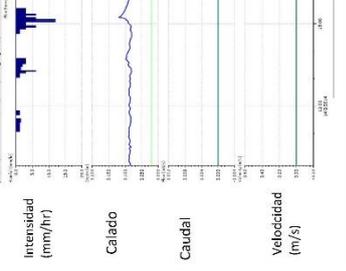
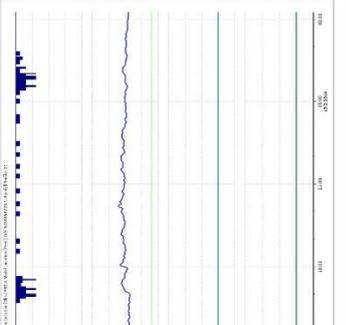
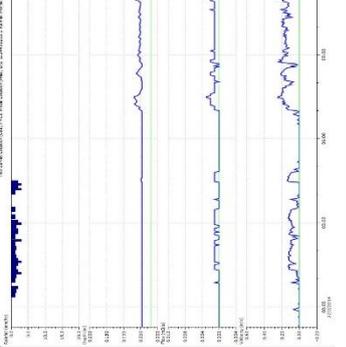
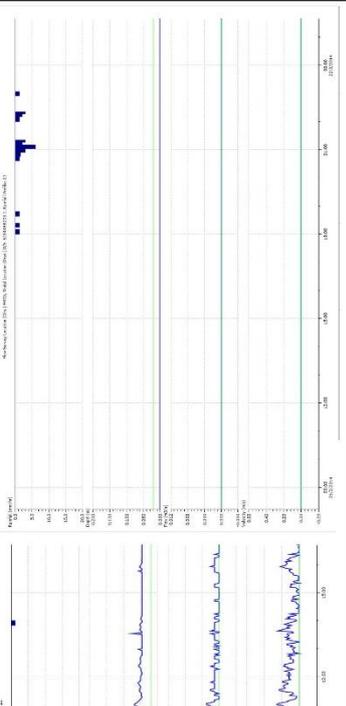
Caudalímetro nº FM012

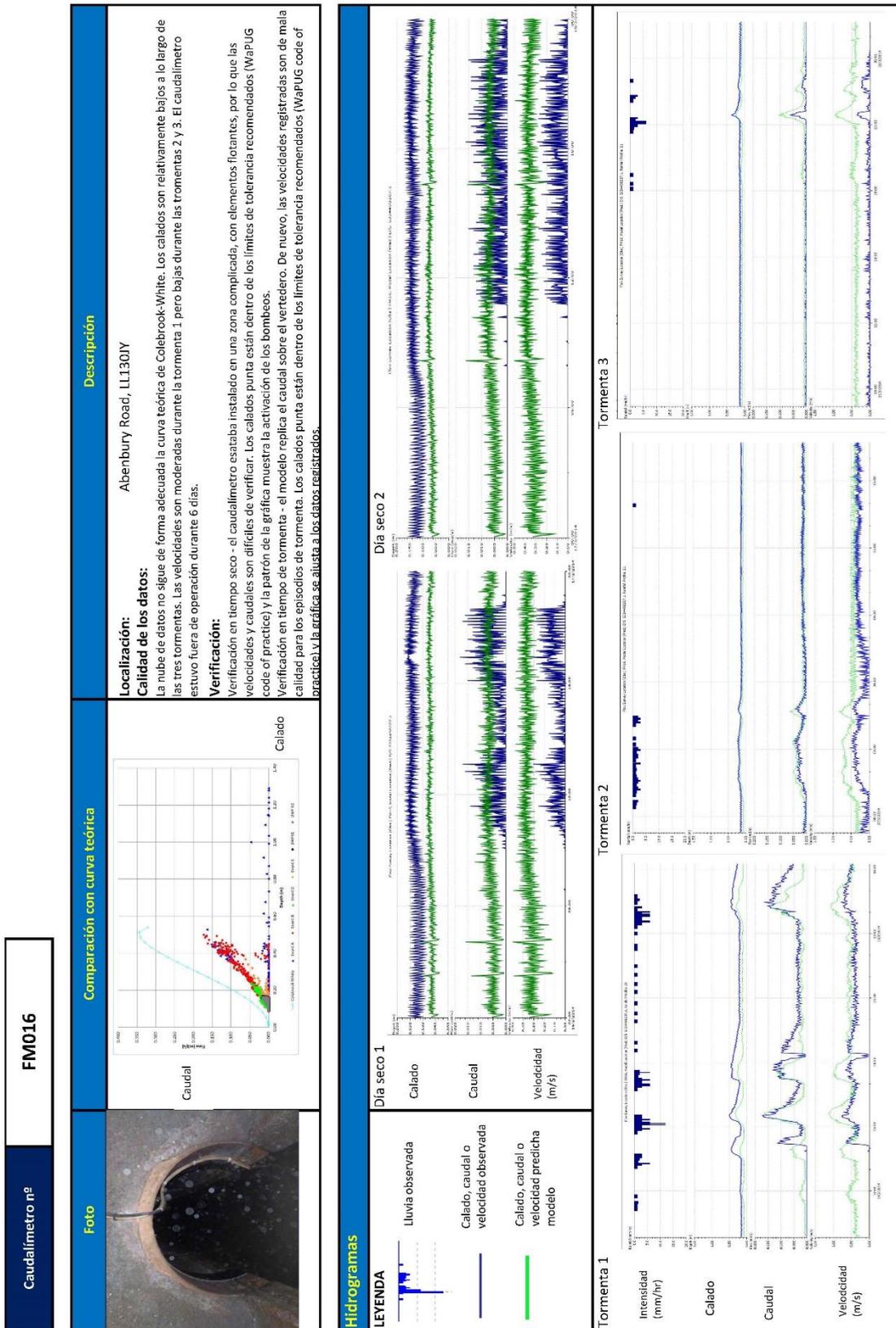
<p>Foto</p> 	<p>Comparación con curva teórica</p> 	<p>Descripción</p> <p>Pont Wen, LL138SJ</p> <p>Localización: La nube de puntos no se ajusta de forma adecuada a la curva de Colebrook-White. El caudalo y la velocidad son moderado a bajo para el tiempo de tormentas. La velocidad es muy baja durante el tiempo seco por lo que la fiabilidad de las velocidades y caudales observados es baja.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - los caudalos obtenidos con el modelo se ajustan a la curva de datos observados. Los datos de velocidad son pobres, por lo que no posible confirmar si la verificación es correcta en términos de caudal y volumen. Verificación en tiempo de tormenta - los resultados obtenidos del modelo se ajustan a los datos recogidos y el análisis numérico muestra que las predicciones se encuentran dentro de los límites de tolerancia recomendados (VAPUG code of practice).</p>
--	---	--

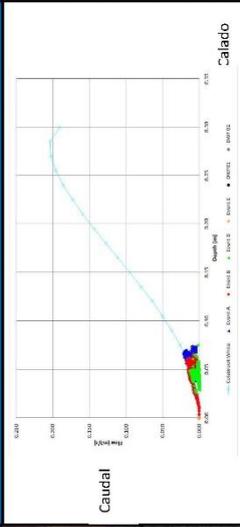
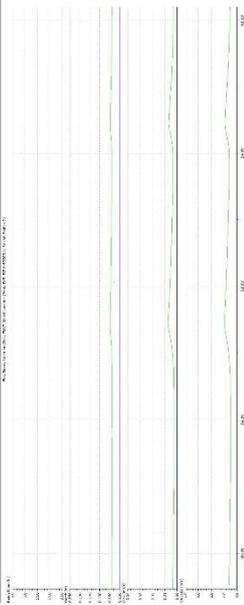
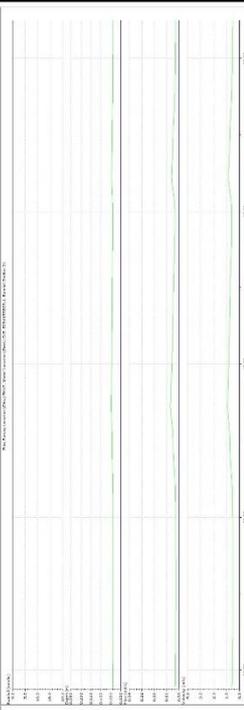
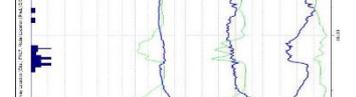
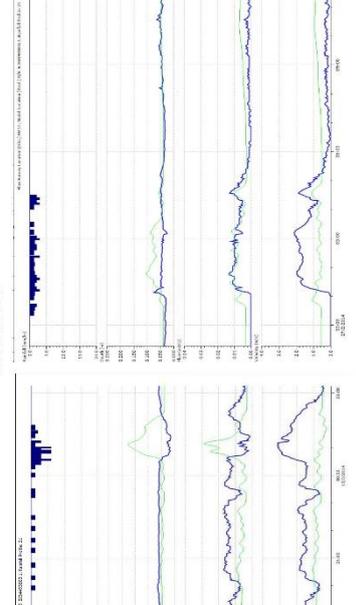
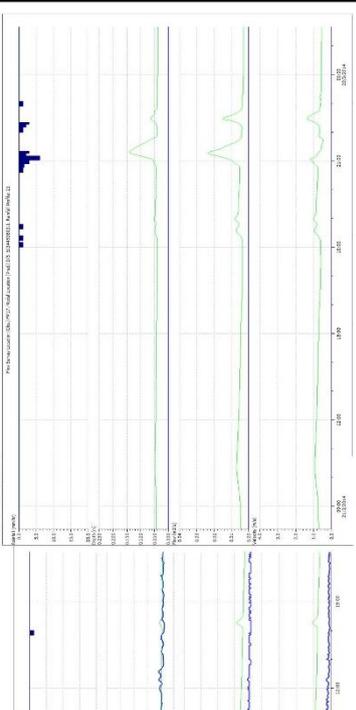




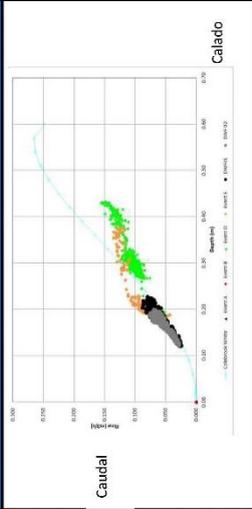
<p>Caudalímetro nº</p> <p style="text-align: center;">FM014</p>	<p>Descripción</p> <p>Path near Abenbury Road, LL130QP</p>
<p>Foto</p> 	<p>Localización: Path near Abenbury Road, LL130QP</p> <p>Calidad de los datos: No se han registrado datos de caudal o calado durante la tormenta 1 ya que el caudalímetro no estaba instalado. Se observan velocidades moderadas durante las tormentas 2 y 3. Los datos siguen la curva teórica de Colebrook-White. Los datos se consideran buenos.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo de tormenta - La verificación se considera razonable dado el ajuste de la forma de la curva a la forma de la curva de datos y el análisis numérico realizado. Verificación en tiempo de tormenta - A pesar de no haber datos para la tormenta 1, observando la tormenta 2 y 3 se puede comprobar que el modelo replica bastante bien los datos observados.</p>
<p>Comparación con curva teórica</p> 	<p>Hidrogramas</p> <p>Día seco 1</p> <p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Lluvia observada  Calado, caudal o velocidad observada  Calado, caudal o velocidad predicha modelo <p>Tormenta 1</p>  <p>Tormenta 2</p>  <p>Tormenta 3</p> 

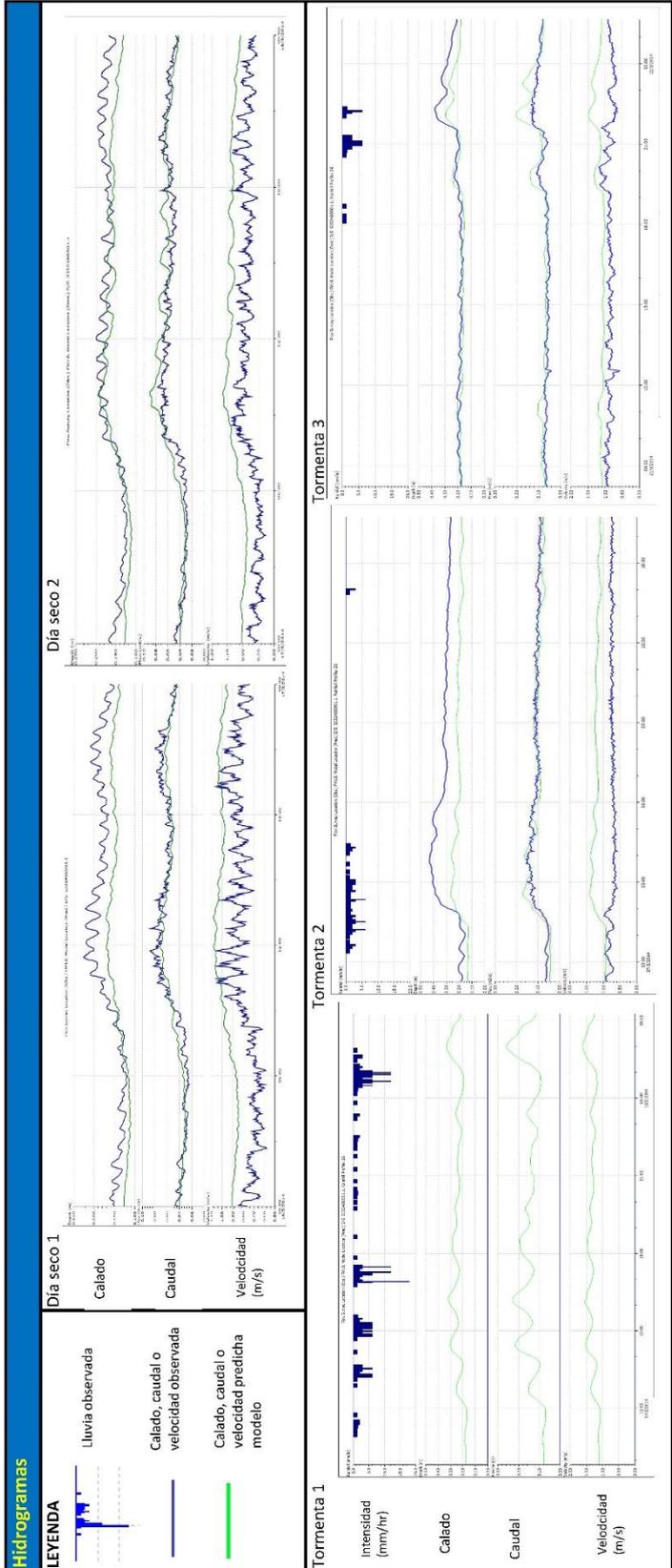
<p>Caudalímetro nº</p>	<p>FM015</p>	<p>Foto</p> 	<p>Comparación con curva teórica</p> 	<p>Descripción</p> <p>Localización: Abenbury Road, LL130JY</p> <p>Calidad de los datos: No hay datos registrados para tiempo seco ni para la tormenta 3.</p> <p>Verificación: Caudalímetro no verificado. Se confirma que no hay caudal circulando por la tubería y se elimina la misma del modelo.</p>
<p>Hidrogramas</p>				
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none">  Lluvia observada  Calado, caudal o velocidad observada  Calado, caudal o velocidad predicha modelo 	<p>Día seco 1</p> 	<p>Día seco 2</p> 	<p>Día seco 3</p> 	
<p>Tormenta 1</p> 	<p>Tormenta 2</p> 	<p>Tormenta 3</p> 	<p>Tormenta 4</p> 	

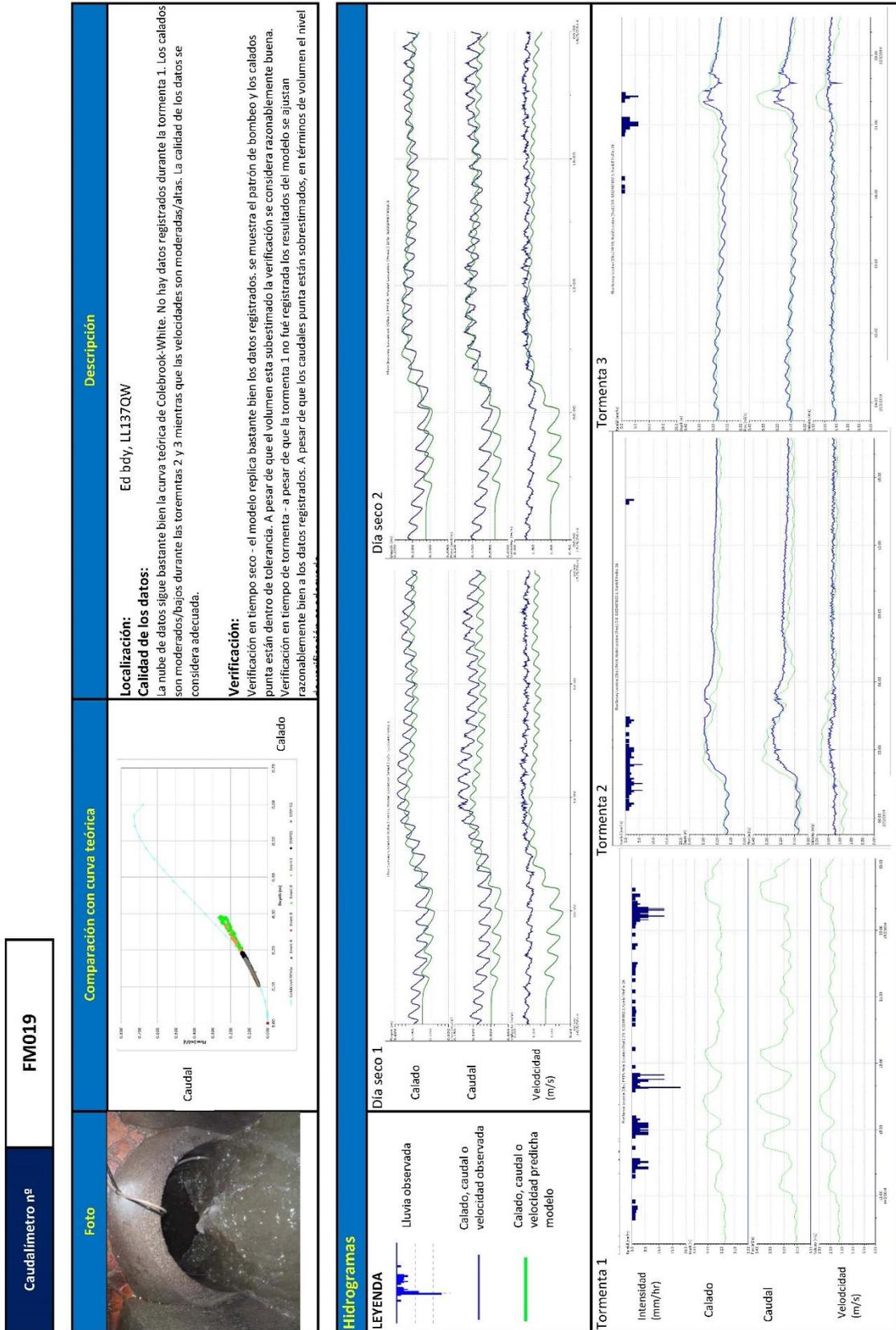


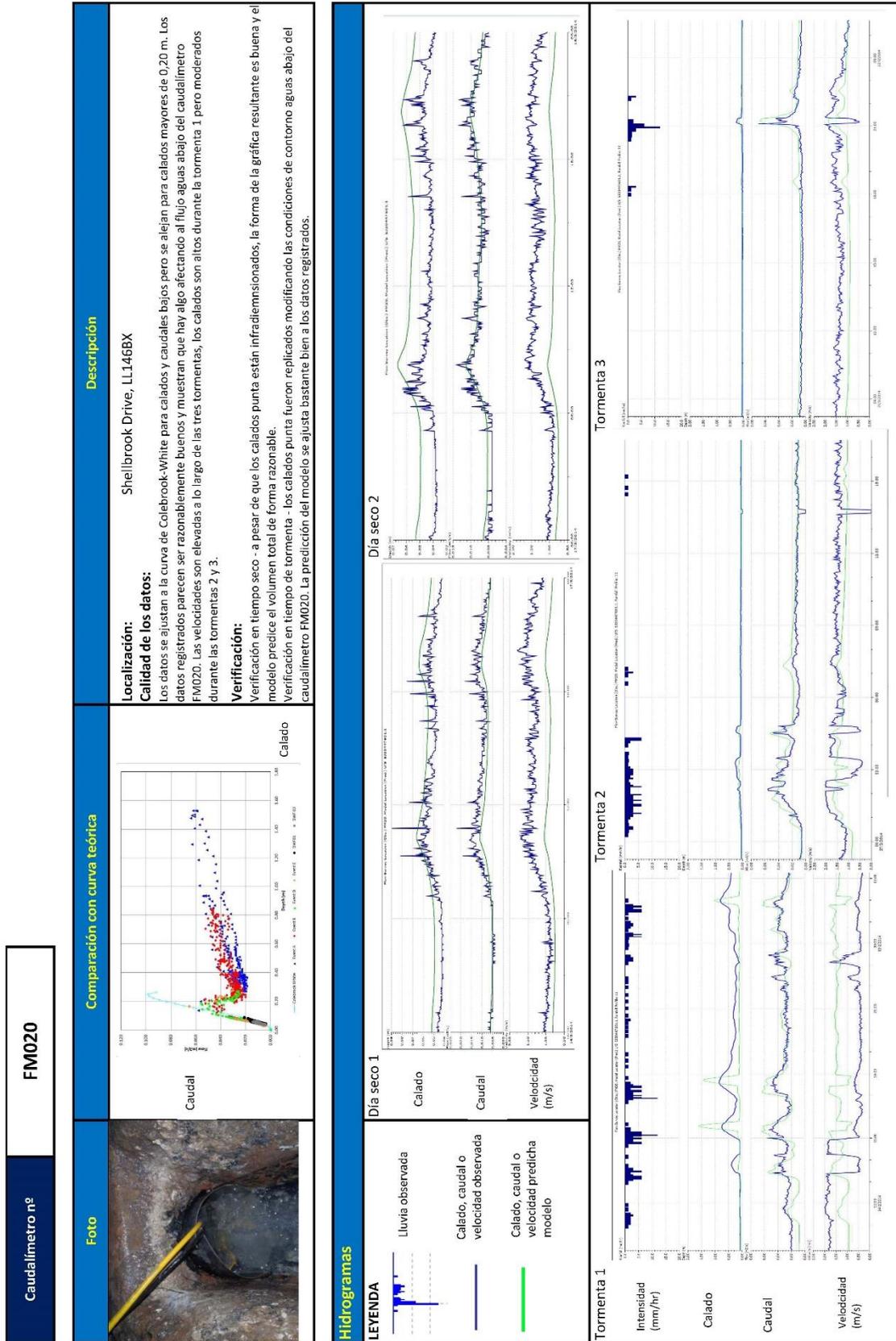
<p>Caudalímetro nº</p> <p style="text-align: center;">FM017</p>	<p>Foto</p> 	<p style="text-align: center;">Comparación con curva teórica</p> 	<p style="text-align: center;">Descripción</p> <p>Pont Wen, LL1385J</p> <p>Localización: No hay datos registrados para tiempo seco ni para la tormenta 3. Los datos no se ajustan a la curva de Colebrook-White. Las velocidades registradas son elevadas durante las tormentas 1 y 2 pero se ven afectadas por distorsiones mientras que los caudales se encuentran por debajo de las sensibilidad del sensor. El caudalímetro se desplazó a una nueva ubicación (FM022). Los datos registrados son de mala calidad.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - no hay datos registrados Verificación en tiempo de tormenta - datos pobres para la tormenta 1. Las gráficas obtenidas con el modelo se ajustan a los datos registrados bastante bien.</p>
<p>Hidrogramas</p>			
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> Lluvia observada Caudal, caudal o velocidad observada Caudal, caudal o velocidad predicha modelo 	<p>Día seco 1</p> <p>Intensidad (mm/hr)</p> <p>Calado</p> <p>Caudal</p> <p>Velocidad (m/s)</p>	<p>Día seco 2</p> 	<p>Día seco 3</p> 
<p>Tormenta 1</p> <p>Intensidad (mm/hr)</p> <p>Calado</p> <p>Caudal</p> <p>Velocidad (m/s)</p>	<p>Tormenta 2</p> 	<p>Tormenta 3</p> 	<p>Tormenta 4</p> 

Caudalímetro nº FM018

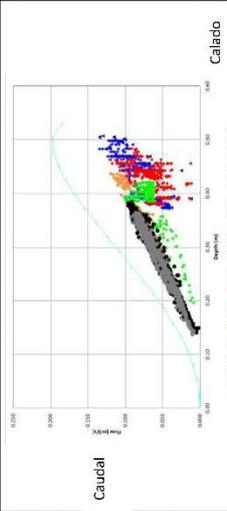
Foto	Comparación con curva teórica	Descripción
		<p>Localización: Ed bdy, LL137QW</p> <p>Calidad de los datos: No hay datos registrados durante la tormenta 1. Los caudales y velocidades son moderados durante las tormentas 2 y 3. Los datos se ajustan a la curva de Colebrook-White de forma razonable. El flujo turbulento en la unión afecta a la calidad de los datos, pero son razonablemente buenos a pesar de todo.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - la forma de las gráficas obtenidas con el modelo se corresponde con la de los datos registrados. Los volúmenes y caudales punta están dentro de los márgenes de tolerancia para los días secos considerados. Verificación en tiempo de tormenta - los resultados del modelo se ajustan bastante bien a los datos registrados. A pesar de que los caudales punta están sobrestimados, en términos de volumen la verificación es razonablemente buena.</p>

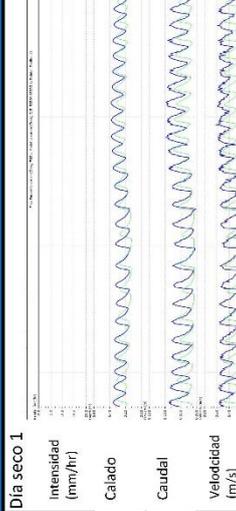
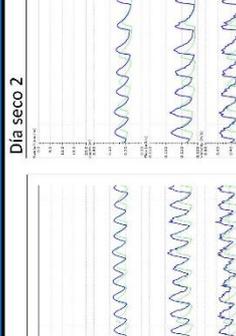
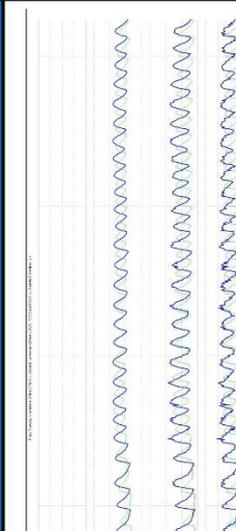
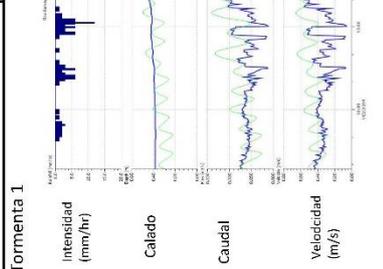
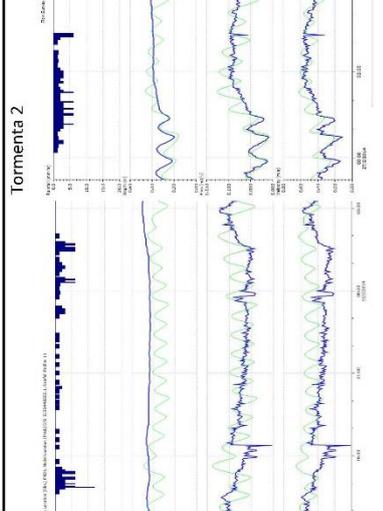
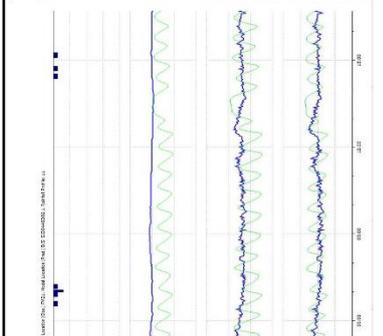






Caudalímetro nº FM021

Foto	Comparación con curva teórica	Descripción
		<p>Localización: Service Area (A438) LL146YY</p> <p>Calidad de los datos: Los datos no se ajustan al acurva teórica de Colebrook-White, mostrando la influencia de aguas abajo. Las velocidades y calados son moderados. La calidad de los datos es razonablemente buena.</p> <p>Verificación: Verificación en tiempo seco - el modelo replica el patrón de bombeo razonablemente bien. Verificación en tiempo de tormenta - el volumen está bien replicado por el modelo. Los datos registrados muestran que el caudal está afectado por las condiciones aguas abajo, lo cual no queda replicado por el modelo. Se necesitan más muestreos para aumentar la fiabilidad. A pesar de esto el nivel de verificación se considera adecuado.</p>

Hidrogramas	Día seco 1	Día seco 2	Día seco 3
<p>LEYENDA</p> <ul style="list-style-type: none"> Lluvia observada Calado, caudal o velocidad observada Calado, caudal o velocidad predicha modelo 	<p>Día seco 1</p> 	<p>Día seco 2</p> 	<p>Día seco 3</p> 
<p>Tormenta 1</p> 	<p>Tormenta 2</p> 	<p>Tormenta 3</p> 	<p>Tormenta 4</p> 