

BASES SPH 2015

Bases conceptuales
y organizativas
para los sistemas de
predicción hidrológica

Angel Luis
Aldana Valverde

2015

BASES SPH 2015

*Bases conceptuales y organizativas
para los sistemas de predicción
hidrológica*

2015

Angel Luis Aldana Valverde

© BASES SPH 2015.- Bases conceptuales y organizativas para los sistemas de predicción hidrológica

© Angel Luis Aldana Valverde. 2015

Obra registrada el 11-jun-2015 con código 1506114307725, en el Registro de Propiedad Intelectual de Safe Creative

<http://certificates.safecreative.org/15/06/11/4307725/5YNCYW.pdf>

Agradecimientos

Edición de 2013

A la hora de escribir este apartado de agradecimientos para este libro, son muchas las personas que me vienen a la mente, a la vez que el temor a dejar fuera a otros que merezcan mención. En mi caso, pienso primero en mis hijas (Sofía y Raquel), que tienen que asumir que su padre dedique gran parte de su tiempo a estas y otras labores profesionales, y en mis padres (Angel y María Luisa) y mi hermano (Jesús), que siempre me apoyaron y animaron en mi carrera, como lo han hecho en otros aspectos de mi vida.

Pero también he tenido la gran suerte de contar en el entorno profesional con el apoyo de excelentes personas que han estado siempre presentes, entre los que destaco a Florentino Santos García, quien, desde los tiempos de estudiante en la Escuela (la de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid), ha sido mi tutor, maestro y amigo.

Y también le debo una mención especial a mi amigo y compañero Fernando Toledano Sánchez, por la confianza que siempre tuvo en mí y por su apoyo en momentos difíciles.

Gran parte de mi experiencia profesional ha tenido lugar alrededor de la red PROHIMET (<http://www.prohimet.org>), la cual coordino desde su fundación en el año 2004 y gracias a la cual he aprendido bastante de lo que ahora sé. El contacto con los problemas de otros países y con los profesionales que los afrontan ha ampliado mi visión del tema, que antes estaba muy condicionada por las singularidades del caso español. Para esta línea de trabajo y otras (realmente interesantes y enriquecedoras) en el ámbito latinoamericano, he contado con el apoyo de Jorge Tamayo Carmona desde España y, desde la Organización Meteorológica Mundial, con los de Claudio Caponi y Gabriel Arduino.

Estos últimos han aportado comentarios a las versiones previas de este documento que han permitido mejorarlo, como también han hecho mis compañeros y amigos Javier Narbona Naranjo (Chile), Hebert Rivera Gonzalo (Colombia) y Luis Garrote de Marcos (España).

A todos los anteriores y a muchos más, les dedico este libro

Angel Luis, en Madrid, a 22 de julio de 2013

Edición 2015

En los últimos años estoy teniendo experiencias muy interesantes en México, donde, como siempre, aprendo enseñando. En ese maravilloso país cuento con la confianza y el apoyo de Alfredo Garza y Horacio Rubio.

También son destacables las nuevas experiencias en el sector hidroeléctrico, con Alfonso Zapatero y José Ramas, con los que también estoy aprendiendo mucho.

Angel Luis, en Madrid, a 11 de junio de 2015

Prólogo del autor

Este libro es la segunda versión del que se publicó en 2013. Se han realizado correcciones de maquetación y redacción, así como mejoras en algunas figuras y ejemplos. También se ha ampliado el texto con algunos apartados nuevos, lo que quizás sean los cambios más relevantes de esta edición con respecto a la anterior (2013).

En el capítulo 3 (Información hidrometeorológica) se ha añadido:

3.8 Herramientas y soluciones básicas

En el capítulo 4 (Sistemas de medidas hidrológicas):

4.6 Mantenimiento y operación de redes de medida

4.7 Documentación de estaciones

En el 6 (Sistemas de ayuda a la decisión y modelos):

6.5 Soluciones básicas

Y en el 11 (Error e incertidumbre en la hidrología operacional)

11.3 Necesidades en cuanto a la calidad de la información

De este modo el libro se completa, sobre todo, con más contenidos dedicados a la importancia de la calidad de la información, cuestión que ocupa y preocupa al autor.

A. Contenido

1	Introducción	1
2	Los servicios hidrológicos nacionales	3
2.1	LA RELEVANCIA DEL PAPEL DE LOS SERVICIOS HIDROLÓGICOS NACIONALES.....	3
2.2	FUNCIONES.....	4
2.3	MARCO LEGAL, COMPETENCIAS Y SITUACIÓN ORGÁNICA	5
2.4	ORGANIZACIÓN Y REPARTO DE COMPETENCIAS	6
2.5	ESTRUCTURA.....	7
2.5.1	<i>Dirección.....</i>	7
2.5.2	<i>Oficina central</i>	7
2.5.3	<i>Equipos de campo.....</i>	10
2.5.4	<i>Talleres y almacenes</i>	11
2.5.5	<i>Medios.....</i>	12
2.5.6	<i>Modo de funcionamiento 24/7.....</i>	12
2.6	GASTOS DE INVERSIÓN Y GASTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN.	13
2.6.1	<i>Cambios tecnológicos y costes de mantenimiento y operación</i>	13
2.7	APOYOS EXTERNOS. CONSULTORES, EMPRESAS, UNIVERSIDADES Y OTRAS INSTITUCIONES	14
2.8	GRUPOS DE COORDINACIÓN	15
2.8.1	<i>Interna.....</i>	15
2.8.2	<i>Interinstitucional.....</i>	15
2.8.3	<i>Internacional.....</i>	16
2.9	PROTOCOLOS Y ACUERDOS INTERINSTITUCIONALES.	16
2.10	GESTIÓN DE RECURSOS HUMANOS	17
2.10.1	<i>Capacidad humana como condición necesaria.....</i>	17
2.10.2	<i>Dirección de un SHN.....</i>	17
2.10.3	<i>Plantillas y selección de personal.....</i>	18
2.10.4	<i>Formación y entrenamiento.....</i>	18
2.10.5	<i>Seguridad y salud en el trabajo.....</i>	20
2.11	EFICACIA Y EFICIENCIA DE LA CADENA DE PRODUCCIÓN	21
2.12	GESTIÓN DE DOCUMENTOS. REGISTRO Y ARCHIVO. SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN	21
2.13	IMAGEN INSTITUCIONAL.....	22

3	Información hidrometeorológica	23
3.1	CLASIFICACIÓN DE LA INFORMACIÓN	23
3.1.1	<i>Tipos de series temporales.....</i>	24
3.2	FORMAS DE REPRESENTACIÓN	25
3.2.1	<i>Distribuciones temporales.....</i>	25
3.2.2	<i>Distribuciones espaciales</i>	26
3.3	INFORMACIÓN DE INTERÉS	28
3.4	ATRIBUTOS DE LA INFORMACIÓN (METADATOS)	29
3.5	GENERACIÓN DE PRODUCTOS Y DIFUSIÓN DE INFORMACIÓN.....	30
3.5.1	<i>Definición de productos y su uso.....</i>	30
3.5.2	<i>Modos y medios.....</i>	30
3.5.3	<i>Selección de magnitudes relevantes.....</i>	31
3.5.4	<i>Presentación de la información</i>	31
3.5.5	<i>Boletines y partes.....</i>	33
3.5.6	<i>Acceso a bases de datos.....</i>	33
3.5.7	<i>Atlas e informes especiales</i>	34
3.6	PROCESO DE GENERACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN	34
3.6.1	<i>Validación y corrección</i>	34
3.6.2	<i>Base de datos de tiempo real y base de datos histórica</i>	35
3.6.3	<i>Variables calculadas.....</i>	36
3.6.4	<i>Registro histórico de parámetros y caracterizaciones.....</i>	36
3.6.5	<i>Presentación y difusión de información</i>	36
3.7	ALGUNAS CUESTIONES ESPECIALES	37
3.7.1	<i>Discretización espacial y precisión geográfica</i>	37
3.7.2	<i>Discretización temporal</i>	37
3.7.3	<i>Base de tiempos y husos horarios.....</i>	40
3.8	HERRAMIENTAS Y SOLUCIONES BÁSICAS	40
3.8.1	<i>Bases de datos</i>	41
3.8.2	<i>Los sistemas de información geográfica</i>	42
3.8.3	<i>Modelos descriptivos de la realidad</i>	44
3.8.4	<i>Nociones de programación</i>	44
3.8.5	<i>Organización de la información.....</i>	45
4	Sistemas de medidas hidrológicas	48
4.1	CLASIFICACIÓN DE ESTACIONES DE MEDIDAS	48
4.2	DISEÑO DE UNA RED HIDROMETEOROLÓGICA	49
4.2.1	<i>Nivel de automatización.....</i>	49

4.2.2	<i>Subredes</i>	50
4.2.3	<i>Emplazamiento de las estaciones</i>	51
4.3	EL CENTRO DE PROCESO DE DATOS	51
4.4	ESTACIONES DE MEDIDA	52
4.4.1	<i>Sensores habitualmente empleados para algunos tipos de medida</i>	54
4.4.2	<i>Precisión de las medidas</i>	57
4.4.3	<i>Elementos auxiliares</i>	58
4.4.4	<i>Sistemas de comunicación de datos</i>	59
4.5	INSTRUMENTOS Y MÉTODOS PARA AFOROS DIRECTOS	60
4.6	MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DE REDES DE MEDIDA.....	61
4.6.1	<i>Programas de mantenimiento</i>	61
4.6.2	<i>Programas de operación</i>	64
4.6.3	<i>Aforos</i>	65
4.6.4	<i>Medios auxiliares</i>	65
4.6.5	<i>Reposición, sustitución y renovación de elementos</i>	65
4.6.6	<i>Mejoras tecnológicas</i>	65
4.6.7	<i>Circunstancias excepcionales</i>	66
4.6.8	<i>La importancia de los inventarios</i>	66
4.6.9	<i>Seguridad y salud en el trabajo</i>	67
4.6.10	<i>Gestión</i>	67
4.7	DOCUMENTACIÓN DE ESTACIONES.....	68
4.7.1	<i>Mantenimiento de la documentación</i>	70
5	Crecidas, avenidas e inundaciones	71
5.1	DEFINICIONES	71
5.1.1	<i>Crecida</i>	71
5.1.2	<i>Avenida</i>	71
5.1.3	<i>Inundación</i>	72
5.2	FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS INUNDACIONES	72
5.2.1	<i>Laminación</i>	73
5.2.2	<i>Histéresis</i>	74
5.2.3	<i>Saturación del terreno</i>	75
5.3	TIPOLOGÍA DE DAÑOS OCASIONADOS POR LAS INUNDACIONES	76
5.4	GESTIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES	77
5.4.1	<i>Conceptos básicos</i>	77
5.4.2	<i>Valoración y criterios de peligrosidad</i>	78
5.4.3	<i>Valoración del riesgo</i>	80

5.4.4	<i>Acciones para la reducción de riesgos.....</i>	83
5.5	LA GESTIÓN INTEGRADA DE CRECIDAS	86
6	Sistemas de ayuda a la decisión y modelos.....	88
6.1	PROCESO DE TOMA DE DECISIONES BASADO EN FENÓMENOS OBSERVADOS	88
6.2	LOS MODELOS DE SIMULACIÓN Y PREVISIÓN	89
6.2.1	<i>Representatividad de los modelos.....</i>	89
6.2.2	<i>Utilidad de los modelos.....</i>	90
6.2.3	<i>Modelos hidrológicos para estudios, diseños u operación.....</i>	91
6.2.4	<i>Exigencias prácticas a un modelo para uso en tiempo real</i>	91
6.2.5	<i>Análisis de sensibilidad y tratamiento de la incertidumbre.....</i>	93
6.3	EL CICLO DE DESARROLLO Y USO DE LOS SISTEMAS DE AYUDA A LA TOMA DE DECISIONES	94
6.4	LA IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LOS DATOS.....	96
6.5	SOLUCIONES BÁSICAS	96
6.5.1	<i>Síntesis de análisis, estudios y pruebas</i>	96
7	Vigilancia y predicción	99
7.1	DEFINICIONES.....	99
7.2	CICLO DE VIGILANCIA Y PREVISIÓN. FASES	100
7.3	LA IMPORTANCIA DE LA VIGILANCIA.....	103
7.4	TIEMPO REAL	104
7.5	HORIZONTE DE PREVISIÓN	104
7.5.1	<i>Tiempo de punta y horizonte de previsión.....</i>	107
7.6	ACCIÓN TEMPRANA, HORIZONTE DE PREVISIÓN Y MARGEN DE ACTUACIÓN	110
7.7	MODOS DE VIGILANCIA Y PREDICCIÓN	111
7.7.1	<i>Por tipos de medida</i>	111
7.7.2	<i>Por extensión de cuenca: completa o parcial</i>	112
7.8	PRÁCTICAS OPERACIONALES	112
7.8.1	<i>Validación y corrección diarias de datos.....</i>	113
7.8.2	<i>Sesiones de discusión hidrológica</i>	113
7.8.3	<i>Relación con la meteorología.....</i>	114
7.8.4	<i>Trabajo con modelos.....</i>	114
7.8.5	<i>Formación y entrenamiento</i>	115
7.9	AVANCES EN PREVISIÓN DE CRECIDAS	115
7.9.1	<i>Aplicaciones de progresos científicos y técnicos</i>	116
7.9.2	<i>La expansión de las telecomunicaciones</i>	116
7.9.3	<i>Disponibilidad de nuevos medios de observación</i>	117

8	Relaciones entre meteorología e hidrología	118
8.1	NECESIDADES COMUNES	118
8.1.1	<i>Campos de precipitaciones</i>	<i>118</i>
8.1.2	<i>Campos de temperaturas</i>	<i>118</i>
8.1.3	<i>Coberturas nivales</i>	<i>119</i>
8.1.4	<i>Evapotranspiraciones.....</i>	<i>119</i>
8.1.5	<i>Humedad del terreno.....</i>	<i>119</i>
8.2	DIFERENCIAS	119
8.3	AMPLIACIÓN DEL HORIZONTE DE PREVISIÓN HIDROLÓGICO	120
8.3.1	<i>Ejemplo de ampliación de horizonte de previsión por reducción de la incertidumbre sobre precipitaciones.....</i>	<i>122</i>
8.4	CONDICIONANTES ORGANIZATIVOS E INSTITUCIONALES.....	123
9	Presas y embalses.....	124
9.1	EFFECTOS DE PRESAS Y EMBALSES SOBRE EL RÍO	124
9.2	LAMINACIÓN DE CRECIDAS SIN OPERACIÓN DE VÁLVULAS Y COMPUERTAS	125
9.2.1	<i>Con vertedero libre.....</i>	<i>126</i>
9.2.2	<i>Capacidad de laminación de crecidas de los desagües profundos. 128</i>	
9.3	OPERACIÓN DE EMBALSES EN SITUACIONES DE CRECIDA	129
9.3.1	<i>Previsión de entrada y situación del embalse</i>	<i>129</i>
9.3.2	<i>Horizonte temporal de la decisión.....</i>	<i>130</i>
9.3.3	<i>Condicionantes específicos</i>	<i>131</i>
9.3.4	<i>Las normas de explotación</i>	<i>132</i>
9.3.5	<i>Análisis simplificado de algunas situaciones.....</i>	<i>133</i>
10	Relaciones nivel-caudal en ríos y canales.....	142
10.1	HISTÉRESIS	143
10.2	OTRAS FUENTES DE ERROR E INCERTIDUMBRE.....	146
10.3	TRABAJO CON CURVAS DE GASTO.....	147
10.3.1	<i>Los aforos directos</i>	<i>147</i>
10.3.2	<i>Definición de la curva</i>	<i>150</i>
10.3.3	<i>Análisis de sensibilidad</i>	<i>151</i>
10.3.4	<i>Referencia temporal</i>	<i>152</i>
10.3.5	<i>Soluciones para el uso en tiempo real.....</i>	<i>153</i>
11	Error e incertidumbre en la hidrología operacional	154
11.1	REALIDADES INEVITABLES	154
11.1.1	<i>Realidad inevitable 1: el error y la incertidumbre</i>	<i>154</i>
11.1.2	<i>Realidad inevitable 2: el coste de la calidad de la información..</i>	<i>155</i>

11.2	EJEMPLOS DE INCERTIDUMBRES	156
11.2.1	<i>Pluviometría</i>	156
11.2.2	<i>Modelos de previsión del tiempo</i>	156
11.2.3	<i>Hidrometría</i>	157
11.2.4	<i>Embalses</i>	157
11.2.5	<i>Respuesta hidrológica de las cuencas</i>	157
11.3	NECESIDADES EN CUANTO A LA CALIDAD DE LA INFORMACIÓN	158
11.4	LA SOLUCIÓN A TRAVÉS DEL DISEÑO Y LA ORGANIZACIÓN	159
11.4.1	<i>Asumir los órdenes de magnitud de las variables hidrológicas</i> <i>("números gordos" del problema)</i>	159
11.4.2	<i>Identificación y análisis del problema</i>	160
11.4.3	<i>Adaptación mutua de producto y uso</i>	160
11.4.4	<i>Evaluación preliminar de la incertidumbre</i>	160
11.4.5	<i>Funcionamiento cíclico</i>	161
11.4.6	<i>Medios auxiliares de observación</i>	161
11.4.7	<i>Protocolos de actuación</i>	161
11.4.8	<i>Validación y relleno de datos</i>	161
11.4.9	<i>Operación y mantenimiento de redes de medida</i>	161
11.5	CANTIDAD Y CALIDAD.- UNA REFLEXIÓN OBLIGADA	161
12	Protocolos y alertas hidrológicas	163
12.1	RIESGO Y RESPONSABILIDAD	163
12.2	NECESIDAD DE LOS PROTOCOLOS	164
12.3	LOS PROTOCOLOS Y LAS SOLUCIONES DE LA HIDROLOGÍA OPERACIONAL	164
12.4	MODOS Y MEDIOS DE DIFUSIÓN	165
12.5	GENERACIÓN DE AVISOS	165
12.6	DEFINICIÓN DE UMBRALES Y ESTADOS DE ALERTA.....	165
13	La importancia de la cooperación y la colaboración	167
13.1	ALGUNOS TÉRMINOS USADOS CON FRECUENCIA	167
13.2	INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN ENTRE AGENTES	168
13.3	PROHIMET: UN EJEMPLO DE COOPERACIÓN PARA ABORDAR LOS PROBLEMAS DE INUNDACIONES, SEQUÍAS Y CAMBIO CLIMÁTICO	170
13.3.1	<i>Principales características de la red</i>	171
13.3.2	<i>Diagnóstico de situación en lo relacionado con la cooperación y coordinación</i>	172
14	Acrónimos.....	176
15	Referencias, bibliografía y otras fuentes.....	177

B. Figuras

Figura 1: Hietograma e hidrograma	25
Figura 2: Esquema de representación en formato ráster o matricial de un malla de precipitación.	26
Figura 3: Mapa con malla de precipitación acumulada en un periodo de tiempo, sobre la que se han superpuesto entidades vectoriales.	27
Figura 4: Mapa de precipitaciones areales en subcuencas, correspondientes a un periodo de tiempo, coloreando los polígonos correspondientes según una escala cromática.	27
Figura 5: Esquema del proceso de generación de información	34
Figura 6: Comparación de un hidrograma observado con distintas discretizaciones temporales	38
Figura 7: Diferencias en volumen al integrar los hidrogramas de la figura anterior	38
Figura 8: Diferencia del aspecto de precipitaciones acumuladas en intervalos con discretización de 5 y 120 minutos, y su repercusión en las distribuciones a lo largo del tiempo.	39
Figura 9: Error de punta y fase en la simulación de la transformación lluvia-escorrentía debido a una discretización temporal inapropiada.	39
Figura 10.- Ejemplo de un proyecto SIG útil para la hidrología operacional	43
Figura 11.- Utilización de tecnología SIG en aplicaciones para uso en tiempo real. Caso de SIGAL (sistema de información para la gestión de alertas)	43
Figura 12.- GENAPROFI es un ejemplo de solución para generación de productos hidrológicos desarrollado con conceptos básicos de programación.	45
Figura 13.- Estructura principal de las carpetas de centro	46
Figura 14.- Estructura de la carpeta SIG	47
Figura 15.- Ejemplo de subcarpeta de un proyecto	47
Figura 16: Esquema de una estación de medida automática o semiautomática	53
Figura 17: Gráficas de laminación en ríos y embalses, en las que Q son caudales, V son volúmenes y t es el tiempo.	74
Figura 18: Fenómeno de histéresis observable en ríos	75
Figura 19: Hidrogramas de escorrentía en una cuenca según el estado de humedad antecedente	75
Figura 20: Criterios de peligrosidad de una inundación en función de calado y velocidad	78
Figura 21: Proceso de valoración del riesgo de inundación	81
Figura 22: Obtención de la curva daños-probabilidad	82
Figura 23: El daño anual esperado es el área encerrada por los ejes de coordenadas y la curva daños-probabilidad.	82

<i>Figura 24: Reducción de daños por disminución de caudales</i>	85
<i>Figura 25: Reducción de daños por reducción de niveles en función de los caudales</i>	85
<i>Figura 26: Reducción de daños por aumento de niveles para cada valor de daños</i>	86
<i>Figura 27: Esquema de un proceso de toma de decisiones basado en fenómenos observados</i>	89
<i>Figura 28: Esquema del ciclo de desarrollo y uso de las herramientas de ayuda a la decisión en situaciones de crecida</i>	95
<i>Figura 29.- Ejemplo de síntesis de resultados de estudios de propagación en el río Segura, bajo determinadas hipótesis (2002)</i>	97
<i>Figura 30.- Ejemplo de resultado de estudio básico para el análisis de un problema y definición de una solución: definición de zonas y circunstancias en las que puedan producirse desbordamientos</i>	97
<i>Figura 31: Esquema del ciclo de vigilancia y previsión de crecidas</i>	101
<i>Figura 32: Desfase (D) entre la lluvia y el caudal de escorrentía según el concepto de hidrograma unitario</i>	105
<i>Figura 33: Desfase (D) entre un hidrograma y su propagado aguas abajo</i>	105
<i>Figura 34: Horizonte de previsión en función del error asumible y la horquilla de previsión</i>	106
<i>Figura 35: Simulación de transformación lluvia-escorrentía con consideración de varios escenarios de precipitación futura (instante de previsión: 03 00:00) que da lugar a una horquilla de previsión de hidrogramas.</i>	108
<i>Figura 36: Horquilla de previsión para un tiempo de punta de 12 horas</i>	108
<i>Figura 37: Horquilla de previsión para un tiempo de punta de 6 horas</i>	109
<i>Figura 38: Horquilla de previsión para un tiempo de punta de 3 horas</i>	109
<i>Figura 39: Condición temporal para funcionamiento en tiempo real de un sistema de vigilancia y predicción</i>	110
<i>Figura 40: Interdependencias entre hidrología y meteorología</i>	118
<i>Figura 41: Previsión hidrológica basada en previsión de lluvias</i>	121
<i>Figura 42: Previsión hidrológica basada en previsión de lluvias y con consideración de incertidumbres</i>	121
<i>Figura 43: Comparación de horquillas de previsión hidrológica con y sin previsión de precipitaciones.</i>	123
<i>Figura 44: Ejemplo de evolución de caudales y volúmenes de un embalse que contaba con resguardo antes de la presentación de una crecida</i>	126
<i>Figura 45: Ejemplo de evolución de nivel y volumen de un embalse que contaba con resguardo antes de la presentación de una crecida</i>	126
<i>Figura 46: Dependencia del efecto de la laminación en función del volumen de embalse</i>	127
<i>Figura 47: Influencia de la longitud de vertido en la laminación.</i>	128
<i>Figura 48: Definición de desagüe triangular. Instantes representativos.</i>	133

Figura 49: Desagües equivalentes (si sus volúmenes desaguados entre tiempos característicos de la maniobra triangular son iguales)	134
Figura 50: Hidrogramas de salida de embalse resultantes de maniobras triangulares para un caudal de entrada con punta de 300 m ³ /s	136
Figura 51: Limnigramas de embalse resultantes de maniobras triangulares para un caudal de entrada con punta de 300 m ³ /s.	136
Figura 52: Presentación de caudales punta de salida de embalse para diferentes caudales de entrada	137
Figura 53: Presentación de niveles punta de nivel de embalse para diferentes caudales de entrada	137
Figura 54: Presentación de caudales punta de salida de embalse para un caudal de entrada de 600 m ³ /s. Maniobras extremas.	138
Figura 55: Presentación de niveles punta de embalse para un caudal de entrada de 600 m ³ /s. Maniobras extremas.	138
Figura 56: Relaciones entre valores punta de nivel y caudal de salida para un hidrograma de entrada con punta de 600 m ³ /s	139
Figura 57: Área de posibles maniobras fijados unos objetivos de operación en nivel y caudal.	140
Figura 58: Relación entre los tiempos de presentación de las puntas de nivel y caudal para un hidrograma de entrada con punta de 600 m ³ /s	141
Figura 59.- La medida y el cálculo de caudales requieren trabajos periódicos en campo y en oficina	142
Figura 60: Hidrograma en cabecera del canal con elevación en 12 horas	143
Figura 61: Relaciones nivel caudal en un canal de poca pendiente y con variación brusca del caudal	144
Figura 62: Hidrograma en cabecera con variaciones en tiempo más suaves	144
Figura 63: Cambios en la histéresis en función de la rugosidad, la pendiente y la variación temporal del caudal	145
Figura 64: El fenómeno de histéresis puede dar lugar a un desfase importante entre la presentación de las puntas del caudal y el nivel.	145
Figura 65: Distribución vertical de velocidades supuesta como normal o representativa	149
Figura 66: Ejemplo de varias definiciones de curvas de gasto	151
Figura 67: Ejemplo de comparación de resultados en un análisis de sensibilidad de la simulación (con Hec-Ras) del comportamiento de una estación de aforos	152
Figura 68: Ejemplo de conjunto de curvas de gasto correspondientes a situaciones hipotéticas para uso en tiempo real	153
Figura 69: Esquema de riesgo y responsabilidad ante una situación adversa	163
Figura 70: Esquema de comunicación entre agentes sociales	169

C. Tablas

<i>Tabla 1: Ejemplo de reparto de competencias en una estructura basada en una unidad central y otras periféricas</i>	7
<i>Tabla 2: Comparación de fortalezas y debilidades de diferentes tipos de institución</i>	15
<i>Tabla 3: Modos de vigilancia y predicción en función de la información disponible</i>	111
<i>Tabla 4: Resumen de diferencias entre hidrología y meteorología asociadas a las características metodológicas y de aplicación de ambas disciplinas</i>	120
<i>Tabla 5: Comparación de laminaciones con vertedero y desagüe de fondo que llevan a la misma sobreelevación</i>	128
<i>Tabla 6: Evolución de embalse si se maniobra conforme al punto marcado en la figura anterior.</i>	140

1 Introducción

Los sistemas de monitoreo y pronóstico hidrometeorológicos son la base para la solución de múltiples problemas relacionados con el agua, al proporcionar datos, análisis y previsiones. El objetivo final será la predicción, es decir, la difusión de una previsión hidrológica con apoyo en la previsión meteorológica, por lo que de forma más abreviada pueden ser denominados sistemas de predicción hidrológica.

La previsión hidrológica requiere el uso de estudios y modelos de simulación y previsión, pero la calidad de los resultados de estos dependerá de los datos, fundamentalmente de las medidas. Además, muchos casos de aplicación admiten soluciones que no exigen la previsión dada por un modelo.

La reducción del impacto negativo de las crecidas y la gestión correcta de los recursos hídricos, especialmente en caso de sequías, exigen bases de información rigurosas y métodos de análisis que sustenten tomas de decisiones basadas en procesos racionales. Las previsiones facilitan a los sujetos decisores el debido cumplimiento de sus funciones, pues les permiten promover acciones con la antelación que requieren algunos problemas.

En un mundo en el que se observan variaciones del clima a lo largo de la historia, una gestión de datos hidrometeorológicos precisa resulta obligada, de modo tal que permita detectar y valorar cambios, y con ello hacer proyecciones hacia el futuro con rigor y objetividad.

Estos sistemas requieren medios materiales, métodos y, sobre todo, capacidades humanas fuertes que se desarrollen en unas organizaciones bien estructuradas y gestionadas. Un buen equipo humano puede realizar una gran labor con recursos escasos, pero una gran dotación material es inútil sin los profesionales capaces de aprovecharla.

La ciencia y la técnica son un fundamento importante de las soluciones que aquí se tratan. Pero los aspectos organizativos son los que permiten aplicarlas de forma efectiva. Además, en ocasiones no ofrecen la respuesta deseada, por el estado del arte en el momento o por incompatibilidad con el planteamiento del problema. Es entonces cuando las soluciones organizativas adquieren una importancia especial y permiten superar las limitaciones científico-tecnológicas.

Los enfoques integrales para las cuestiones de agua y clima hacen recomendable operar a nivel territorial nacional, por lo que los servicios hidrológicos nacionales son las estructuras organizativas idóneas para la implementación de los sistemas de predicción (los cuales serán, a su vez, el instrumento principal de los anteriores).

El lector puede notar falta de muchos detalles técnicos en este libro. Pero existe una gran cantidad de publicaciones que pueden completar el contenido que aquí se ofrece, como libros de hidrología básica o especializada. En concreto, hay un conjunto de documentos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) que amplían y detallan lo que aquí se explica (ver capítulo 15). El objetivo de este libro es proveer una síntesis con visión global, aclarar conceptos fundamentales y ofrecer una base que facilite la comprensión de otras fuentes.

2 Los servicios hidrológicos nacionales

Un servicio hidrológico será algún tipo de organización o parte de la misma que proporciona información hidrológica a los interesados. Puede ser un departamento de hidrología que opera para los responsables de operación de presas de un productor hidroeléctrico, por ejemplo. Pero el concepto de servicio hidrológico que aquí se va a exponer es el que se entiende como el más exigente, el que cubre las necesidades de un país y cuyos resultados llegan a la población: el servicio hidrológico nacional. No obstante, mucho de lo que se trate en este capítulo y posteriores será de aplicación a otros servicios hidrológicos.

2.1 La relevancia del papel de los servicios hidrológicos nacionales

Los problemas relacionados con el agua, tanto en su componente recurso como en el de amenaza, exigen que cada país cuente con una serie de necesidades básicas en cuanto a obtención y manejo de información hidrológica. Los servicios hidrológicos nacionales (SHN) son las instituciones que pueden satisfacerlas y, además, proporcionar conocimiento y asesoramiento sobre la realidad del agua a todo el público y, en particular, a los responsables de las tomas de decisiones. Estos servicios pueden ofrecer el fundamento para unos procesos de toma de decisiones racionales.

“El informe de la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA), celebrada en Dublín en enero de 1992 (Naciones Unidas, 1992a), ofrece una evaluación convincente de la importancia de los recursos hídricos para el medio ambiente mundial y para la economía del planeta. Sus afirmaciones específicas en materia de políticas subrayan muy eficazmente el papel que deberían desempeñar los servicios hidrológicos en la consecución de las metas vinculadas al desarrollo sostenible” [OMM; 2011]

“Los procedimientos de alerta temprana eficaces deberían formar parte de las estructuras institucionales y legislativas nacionales y complementarse con servicios profesionales, actividades de formación y creación de capacidad y la asignación estratégica de los recursos.” (Jan Egeland. Secretario General Adjunto de Asuntos Humanitarios y Coordinador del Socorro en Emergencias. Naciones Unidas) [EIRD; 2004]

2.2 Funciones

Aunque podemos encontrar en el Reglamento de Hidrología de la OMM [OMM; 2006] una enumeración extensa y detallada de las funciones que se asocian a un Servicio Hidrológico Nacional, de forma más sintética pueden entenderse que son:

- Adquisición de datos.- Por ello tendrá responsabilidades sobre las redes de medida y estandarización de medidas.
- Proceso de datos y generación de información.- Los datos recopilados necesitan unos tratamientos básicos que les den un primer valor añadido, de modo tal que se genere información de interés para usos generales.
- Apoyo en toma de decisiones.- El conocimiento sobre la realidad hidrológica le dota de capacidad para apoyar a otros agentes (responsables de explotación de obras hidráulicas o de protección civil, entre otros) en sus toma de decisiones.
- Estudios o análisis hidrológicos.- Puede ser recomendable que el servicio hidrológico haga un esfuerzo en aumentar el valor de la información que genera con estudios y análisis hidrológicos. Estos deben ser generales y del máximo interés para el país, pero debe tenerse en cuenta que esta función es secundaria frente a las descritas en los dos primeros párrafos.
- Generación de productos de presentación de información.- Para que la información que se genera sea útil a diferentes usuarios, se deben generar productos que faciliten su interpretación y uso.
- Difusión de información.- La información será útil sólo si es difundida, por lo que la máxima difusión de la información será una de las metas finales del servicio hidrológico.
- Atención a cuestiones de índole internacional.- Puesto que las relaciones internacionales suelen ser responsabilidad de la administración central de un país, se entiende que el servicio hidrológico nacional debe asumir responsabilidades en lo relacionado a los problemas hidrológicos.

Otras funciones que también pueden ser especialmente importantes:

- Coordinación nacional de redes.- Es muy común que en cada país haya varias instituciones que cuentan con sus propias redes de medida, con lo que la concepción de una red conjunta, formada por la suma de subredes de cada organismo, llevaría a un considerable ahorro nacional.
- Imposición de estándares o buenas prácticas relacionados con la información hidrológica (instrumentación y metodologías).- La existencia

de numerosas redes hace aún más aconsejable que el servicio hidrológico imponga o, al menos, recomiende métodos de medida y cálculos a seguir dentro del territorio nacional.

- Optimización del sistema de información conjunto. –También lo relacionado con los diversos sistemas de información se podría optimizar con una coordinación de medios. Esto implica un rediseño dinámico de las redes de observación y de medida hidrológicas para responder a tiempo a las nuevas demandas.
- Intercambios de información.- El servicio hidrológico podría liderar un sistema de intercambios de información que sirviera de base para la coordinación y optimización del sistema conjunto.
- Creación, operación y mantenimiento de la base de datos hidrológica nacional que puede incorporar la información de otras instituciones
- Estadísticas oficiales.- El servicio hidrológico nacional es el responsable de obtener y difundir unas estadísticas sobre las variables que mide y colecta.

2.3 Marco legal, competencias y situación orgánica

La definición de las funciones, organización y estructura de un SHN se encontrará vinculada al marco legal y administrativo del país. Dada la importancia de su papel en la sociedad, es conveniente que la legislación fije sus responsabilidades y competencias a un nivel legislativo suficientemente alto, preferiblemente en una ley de aguas y su reglamento. Esto facilitará la solución de muchos problemas relacionados con la gestión del recurso y con la gestión de crecidas y sequías.

Pero dicha definición debe ser coherente con otras leyes, como las que regulan los servicios de protección civil y con la legislación medioambiental.

Algunos aspectos singulares deben ser coherentes con la definición de otras instituciones, como es el caso de definición de alertas y protocolos, que deben considerar los planes de emergencia de servicios de protección civil y de presas, por ejemplo.

Con el marco legal y administrativo apropiado, el SHN podrá cumplir su papel fundamental como proveedor de información y asesoramiento en procesos de toma de decisiones, y dicha función será reconocida por las otras instituciones y por todos los interesados.

2.4 Organización y reparto de competencias

Las funciones de un servicio hidrológico nacional pueden estar concentradas en una única organización o departamento, pero esta no es la única configuración posible. Cabe distinguir las siguientes posibilidades:

- Servicio completamente centralizado en una única institución
- Servicio basado en una institución con una unidad central y varias periféricas
- Servicio basado en una institución central y varias periféricas
- Servicio basado en varias instituciones centrales y varias periféricas

Lo importante es que, de un modo u otro, en un país haya equipos que desarrollen las funciones, aunque los ejecutores estén repartidos geográfica y orgánicamente.

Un factor que puede ser clave es la figura administrativa con que se defina el SHN y el lugar que ocupe en la estructura orgánica de la Administración. Es común que se encuentre vinculado al ministerio de medioambiente, en el que llevan temas de agua. Pero debe tenerse en cuenta que el SHN necesita, además de cierta autonomía funcional, una posición que le facilite independencia y objetividad. Situar a controlado y controlador en el mismo lugar lleva inevitablemente a contradicciones, tensiones y dificultades prácticas.

Función	Unidad central	Unidades periféricas
Adquisición de datos	- Métodos, estándares y normas. - Control de calidad. - Homogeneización. - Acuerdos institucionales.	- Responsabilidad en las redes de medida, pero supeditada a directrices de la unidad central. - Recopilación de datos externos.
Proceso de datos y generación de información	- Información de síntesis. - Enlace a unidades periféricas. - Intercambio de información.	- Generación, mantenimiento y gestión de bases de datos detalladas
Apoyo en toma de decisiones	- Apoyo a entidades nacionales. - Coordinación. - Guía de protocolos.	- Apoyo directo a entidades con ámbitos territoriales menores
Estudios o análisis hidrológicos	- Atlas nacional. - Guías de elaboración. - Indicadores de sequía.	- Estudios de detalle - Inundaciones
Generación de productos de presentación de información	- Recopilación, referencia y síntesis. - Estándares y guías	- Generación parcial de productos globales.

		- Generación completa de productos de su ámbito territorial.
Difusión de información	- Resumen y síntesis. - Referencia a unidades periféricas.	- Emisión directa de boletines. - Servidores propios de Internet. - Transmisión directa a medios de comunicación y otros agentes.
Atención a cuestiones de índole internacional	- Coordinación	- Participación

Tabla 1: Ejemplo de reparto de competencias en una estructura basada en una unidad central y otras periféricas

2.5 Estructura

Independientemente de que el SHN se organice con una o varias unidades, cabe plantearse una estructura como la que se describe en los siguientes apartados.

Todo lo relacionado con la operación y el mantenimiento de la red de medidas (apartado 4.6) tendrá mucha importancia en este apartado.

2.5.1 Dirección

Como cualquier otra institución u organización, un SHN necesita una dirección que tome las decisiones necesarias para, fundamentalmente, definir las políticas, estrategias, metas y objetivos. La planificación y los programas de actividades son también sus principales responsabilidades, con consideración de recursos y presupuestos.

La dirección cuenta con la oficina central como instrumento principal para todas sus responsabilidades.

2.5.2 Oficina central

La oficina central es el corazón del servicio, que puede ser complementada con unidades de apoyo o periféricas.

2.5.2.1 Administración

El área administrativa lleva, fundamentalmente, la contabilidad del servicio, aunque puede tener otras responsabilidades. Su meta principal debe ser la de facilitar medios y formas al resto de las unidades para que éstas puedan cumplir sus respectivas obligaciones, y habilitar los mecanismos para que los especialistas de la

institución participen en las tomas de decisiones que les sean competentes. Las responsabilidades de la administración serán:

- Presupuestos y contabilidad.- La elaboración de presupuestos anuales, acordes a programas y estrategias del servicio, serán competencia de la administración, aunque estos presupuestos deben elaborarse compatibilizando los parciales correspondientes a otras áreas.
- Control de ingresos
- Inventario de recursos materiales.
- Aspectos contables de los recursos humanos.- Aunque en ocasiones el área administrativa puede tener competencias en selección y contratación de recursos humanos, esta labor requiere la implicación directa de las áreas en las que vaya a operar, y, muy especialmente, requiere la participación del futuro responsable del posible empleado y la consideración, con una ponderación alta, de sus criterios.
- Contratos.- El servicio necesitará realizar contratos con terceros, tanto para adquisiciones o servicios generales como para posibles externalizaciones. Una vez más, es muy importante la implicación y la consideración de los criterios de los profesionales, cuyas funciones y responsabilidades originen la necesidad.
- Acuerdos, convenios y protocolos.- Las relaciones del servicio con otras entidades necesita una regulación, lo que puede hacerse por medio de firma de acuerdos, convenios y elaboración de protocolos. Las capacidades en aspectos legales del área administrativa la dotarán para la correcta formulación de estos documentos de relaciones con terceros.
- Gestión de documentos.- Las tareas y responsabilidades de los puntos anteriores conllevan a la necesidad de una buena gestión de documentos. Pero otras áreas del servicio pueden a su vez generar mucha documentación. La administración es la unidad más apropiada para hacer acopio de todos ellos y responsabilizarse de su registro, archivo y seguridad.

2.5.2.2 Centro de proceso

El centro de proceso es uno de los pilares más importantes de un SHN moderno. Desde él se completan procesos (ver apartado 4.3), se llevan a cabo tareas de coordinación y supervisión y se proveen medios para el cumplimiento de muchas funciones fundamentales.

2.5.2.2.1 Informática y comunicaciones

El servicio contará con necesidades en ofimática, bases de datos y geomática (sistemas de información geográfica, ver apartados 3.2 y 3.8), las cuales serán satisfechas con ayuda del centro de proceso.

2.5.2.2.2 Comunicaciones de datos y voz

Para las tareas de difusión de información y para las relaciones con terceros, es necesario contar con buenos medios de comunicación de datos y voz. Pero hay muchas tareas que implican coordinación entre unidades del servicio que exigen también buenas dotaciones para esta funcionalidad. Hay que tener en cuenta que hay personal en campo, posiblemente en oficinas periféricas y colaboradores.

2.5.2.2.3 Operación de sistema de medida y observación

Todos los datos hidrológicos tienen que ser tratados en algún momento de manera centralizada, aun cuando el sistema de información se construya a partir de una base de datos distribuida (sistema distribuido geográficamente). Por ello, buena parte de la operación del sistema de medida y observación requiere que sea responsabilidad del centro de proceso, el cual debe contar con operadores, informáticos e hidrólogos dedicados a esta labor. No obstante, hay que considerar que la calidad de la información puede depender del conocimiento de las singularidades locales y eventuales, lo que obliga a trabajar cerca del origen de la información. Esto puede obligar a esquemas con cierto nivel de descentralización.

2.5.2.2.4 Hidráulica e hidrología

La operación de la red de medida y observación requiere la participación de hidrólogos e hidráulicos. Una parte importante del trabajo a realizar por parte de un SHN estará relacionado con la calidad de la información. Mención especial merece lo relacionado a los datos hidrométricos, que requiere mucho trabajo de campo pero también de oficina, siempre bajo la responsabilidad de un profesional bien capacitado.

Las funciones de elaboración de estudios y modelos serán también competencia de esta área, las cuales exigirán especialistas con conocimientos avanzados en

- Inundaciones
- Sequías
- Recursos hídricos
- Calidad del agua

- Hidrogeología
- Ecología / ecohidráulica

2.5.2.2.5 Relaciones con usuarios

Aunque la administración tenga responsabilidades (y, en ocasiones, directamente la dirección del SHN) en las relaciones con los usuarios de la información, la difusión de información exige medios y procedimientos que implican la participación de especialistas en comunicaciones e informática, pero también de hidrólogos. Esto último es más evidente cuando a los usuarios haya que proporcionarles asesoramiento y apoyo en toma de decisiones.

2.5.3 Equipos de campo

Una buena parte del presupuesto de un SHN se dedicará a la toma de datos, y gran parte de esta partida se empleará en los trabajos de campo. Debe tenerse en cuenta que en el centro de proceso no será posible, salvo rara excepción, compensar errores o deficiencias de los dispositivos de medida o de los equipos de campo. Estos grupos de trabajo (también llamados brigadas o cuadrillas) tendrán gran responsabilidad en la puesta en práctica de programas de operación y mantenimiento de las redes de medida (apartado 4.6). Dichos programas deben tener un carácter preferentemente preventivo y no tanto correctivo. Las acciones preventivas reducen los fallos y las pérdidas de información, a la vez que aseguran la calidad de la información.

2.5.3.1 Instrumentos y comunicaciones

El equipo responsable de instrumentos y comunicaciones es, probablemente, el que exija un nivel de formación más alto a sus integrantes. Son los responsables de los instrumentos de medida, de los elementos auxiliares y de las comunicaciones de los puntos de medida (en caso de redes de telemedida, ver capítulo 4). Los sistemas de medida modernos son sofisticados, por lo que requieren profesionales cualificados con formación específica y continua.

En ocasiones puede ser conveniente o, incluso necesario, que este equipo se divida en dos, cuando el sistema de comunicaciones así lo requiera.

2.5.3.2 Aforadores

Las estaciones hidrométricas cuentan con la dificultad añadida de que su utilidad máxima se alcanza cuando se cuenta con buenas curvas de gasto para ellas

(relaciones entre niveles y caudales, ver capítulo 10). Para ello se necesitan aforos directos (medidas de velocidad en diferentes puntos de la sección transversal en la que también se miden los niveles) que se realizan con métodos y medios específicos. Esta labor también exige una formación específica, por lo que los aforadores tienen que ser entrenados periódicamente. Parte del trabajo de este equipo puede completarse en oficina, pero un método eficaz que asegure calidad de los datos implica que gran parte del trabajo se complete en el mismo lugar y momento (los del aforo directo) para realizar verificaciones.

2.5.3.3 Instalaciones

Los puntos de medida cuentan con casetas, obra civil o espacios que necesitan unas condiciones físicas determinadas. Esto implica que hay que llevar a cabo unas labores de limpieza y similares que requieren poca especialización, pero para las que es necesario un equipo de personas con cierto entrenamiento.

2.5.4 Talleres y almacenes

Los instrumentos de medida, dispositivos de comunicaciones y elementos auxiliares requieren en ocasiones reparaciones o sustituciones, parciales o totales. Algunas operaciones de mantenimiento, arreglo o sustitución pueden ser llevadas a cabo por los profesionales del SHN en el sitio, pero otras exigen un espacio físico que reúna ciertas condiciones (mesas de trabajo, herramientas, etc.).

Pero todo esto también implica disponer de piezas de repuesto que deben ser almacenadas en lugar seguro y ordenado: un almacén.

La organización territorial del SHN llevará a una situación razonable de uno o varios talleres y almacenes. Aunque también el centro de proceso y el área administrativa requiere material, por lo que al menos uno de estos espacios será común a varias áreas.

En conjunto, hay que mantener almacenes con materiales diversos:

- Recambios y herramientas específicas para reparaciones de la red de medida
- Material de oficina (papel, tinta de impresoras, ...)
- Ordenadores y periféricos
- Elementos de comunicación (dispositivos, terminales telefónicos, ...)
- Material auxiliar (ropa, calzado, protecciones, material de limpieza, ...)
- Herramientas generales (para talleres y para el campo)

2.5.4.1 Movilidad y flota de vehículos

Los equipos de campo tienen que desplazarse a los lugares donde están situadas las estaciones de medida. Esto implica una movilidad de personas y medios que implica un gasto importante, lo que exige un análisis logístico orientado a lograr unos ciertos niveles de eficiencia y eficacia. La situación de los almacenes y talleres, que sean el centro de operaciones de cada uno de estos equipos, es importante, pues hay que racionalizar los desplazamientos necesarios para atender a cada punto de medida, con consideración de los tiempos de viaje.

Serán necesarios vehículos apropiados según necesidades de cada equipo, y presupuesto para dietas de los trabajadores que cubran sus gastos de mantenimiento e, incluso, de alojamiento.

2.5.5 Medios

Todo lo anterior presupone que se satisfacen unas necesidades de medios para que cada equipo realice su función, los cuales se han apuntado ya: ordenadores, ropa, teléfonos, ...

2.5.6 Modo de funcionamiento 24/7

Un SHN tendrá un funcionamiento normal gracias al cual se mantiene en operación una red de medidas, se generan un conjunto de productos y se difunden. Además, puede realizar estudios y dar apoyo en diversas cuestiones de índole nacional o internacional. Algunas tareas son diarias y otras tienen un carácter más eventual. Son estas últimas las que dificultan el mantenimiento de un cierto ritmo de trabajo, especialmente cuando se presentan circunstancias excepcionales que imponen un funcionamiento 24/7 (24 horas al día los siete días de la semana). Tal es el caso de las situaciones de crecidas, sobre todo cuando se presentan en áreas con sistemas hidrológicos de respuestas rápidas (en aquellos en los que los niveles de los ríos suben en menos de unas pocas horas después de haberse producido la precipitación). En la medida de lo posible, debe tratar de evitarse este modo de operar, pues:

- El trabajo por turnos hace necesario contar con 6 personas para cada puesto (un gasto alto para una producción pequeña)
- Impone unas condiciones que dificultan el trabajo en equipo, muy necesario, pues sus miembros no coinciden en horarios.
- Supone un importante desgaste de cada trabajador involucrado
- Involucran al personal de oficina y al personal de campo

2.6 Gastos de inversión y gastos de mantenimiento y operación.

Con mucha frecuencia se observan acciones de inversión grandes que no son acompañadas por las dotaciones correspondientes para el mantenimiento y operación, las cuales deben mantenerse en el tiempo. Si no se llevan a cabo estas tareas, no será posible lograr medidas de buena calidad y, llevado a un extremo, se perderá la inversión por falta de mantenimiento. Es por ello que la previsión y ejecución de unos programas de operación y mantenimiento (apartado 4.6) con presupuesto suficiente son inevitables. Como orden de magnitud, cabe plantear un presupuesto anual por un importe igual al 10% o el 15% del valor de la inversión.

Es necesario realizar inspecciones y llevar a cabo unas tareas de mantenimiento básico (limpieza, pruebas y comprobaciones) y calibrar aparatos periódicamente. Algunos elementos necesitarán reparaciones a lo largo de su vida útil. Cada cierto tiempo, será inevitable reponer partes o, incluso, optar por la renovación de conjuntos mayores.

Hay que recordar algunos de los motivos de gastos ya expuestos en apartados anteriores, que hay que ampliar con otros conceptos. Todos ellos deben ser cubiertos con los presupuestos anuales y cabe agruparlos del siguiente modo, con ánimo de resaltar lo más relevante:

- Medios auxiliares y consumibles (que engloba gran parte de lo indicado anteriormente)
- Servicios de terceros (electricidad, comunicaciones, ...)
- Dietas al personal que se desplaza
- Compensaciones al personal por trabajos nocturnos por funcionamiento en modo 24/7
- Formación y entrenamiento del personal
- Renovación y actualización tecnológica

2.6.1 Cambios tecnológicos y costes de mantenimiento y operación

En la lista final del apartado anterior se ha incluido el concepto de gasto "renovación y actualización tecnológica". Debe tenerse en cuenta que en el campo de la hidrología y, más concretamente en el de los sistemas de observación y medida, se producen avances tecnológicos con mejoras en funcionamiento que, en ocasiones, llevan a reducciones de costes de mantenimiento u operación. Puede llegar el caso en que seguir trabajando con material antiguo sea más caro que sustituirlo por otro nuevo. Especialmente en estos casos, o en aquellos en los que reparar un elemento

sea casi imposible por no encontrarse repuestos en los mercados, puede ser necesaria la renovación del elemento completo.

Por supuesto, también hay que considerar las evoluciones de las tecnologías de las que dependen, como la informática y las comunicaciones, en las que estos cambios pueden ser muy frecuentes.

Estos conceptos de gasto, aunque pueden considerarse inversiones, pueden ser previstos en los presupuestos de los programas de mantenimiento y operación pues tienen un carácter continuo, no eventual.

2.7 Apoyos externos. Consultores, empresas, universidades y otras instituciones

No hay regla fija aplicable para el dimensionamiento de los recursos humanos de un SHN. Las exigencias concretas de cada servicio, las singularidades del ámbito geográfico y consideraciones socioeconómicas del país pueden recomendar unas cifras aproximadas. Los medios materiales, los métodos que se apliquen y la definición de los procesos de producción serán factores muy importantes. La experiencia derivada del funcionamiento va recomendando ajustes en las plantillas. Pero los sobredimensionamientos en estos recursos tienen asociados inconvenientes muy graves, no solo por la consideración de una baja eficiencia, sino porque puede incluso dar lugar a ambientes laborales no deseables por los repartos desiguales de las cargas de trabajo.

Además, hay que tener en cuenta que cada tipo de institución tiene capacidades especiales para determinados tipos de trabajo según sus objetivos, estructura y marco de operación (legal, administrativo, contable, etc.). Así, puede decirse que, de forma general, una empresa es flexible y tiene gran capacidad de realizar trabajos repetitivos, las instituciones públicas aseguran una continuidad y visión global, mientras que la universidad y los centros de investigación cuentan con alto nivel de conocimientos especializados. Por el contrario, las primeras se ven muy condicionadas por los objetivos empresariales, a menudo cortoplacistas, las administraciones tienen rigideces estructurales (y operativas) y están muy condicionadas por los avatares políticos, y el personal docente e investigador no suele contar con experiencia profesional.

Institución	Fortaleza	Debilidad
Pública/Administración	- Constancia - Independencia - Objetividad - Visión global	- Rigidez administrativa - Adaptación de recursos humanos a cambios - Condicionantes políticos
Empresa	- Dinamismo - Flexibilidad - Adaptación - Capacidad de realizar trabajo	- Especialización - Investigación - Estrategias empresariales cortoplacistas
Universidad o centro de investigación	- Conocimientos especializados	- Experiencia en casos prácticos - Habilidades profesionales - Visión global

Tabla 2: Comparación de fortalezas y debilidades de diferentes tipos de institución

Se cuenta, por tanto, con dos razones principales que pueden justificar que el SHN externalice parte de su trabajo contratando a otras entidades:

- Evitar sobredimensionamientos en plantillas condicionados por volúmenes de trabajo asociado a circunstancias eventuales
- Asignar tareas a la entidad que las ejecuta de la forma más eficaz y eficiente

2.8 Grupos de coordinación

El buen funcionamiento de un SHN depende de la correcta coordinación tanto interna (entre sus profesionales y áreas internas) como externa (con otras instituciones). La creación de grupos de coordinación con tareas específicas y reuniones periódicas es, por tanto, una buena práctica.

2.8.1 Interna

Las funciones de un SHN exigen una especialización y un reparto de tareas entre las diferentes áreas, dentro de las cuales puede ser necesario formar varios equipos. Esto hace conveniente crear grupos de coordinación interna que aseguren un reparto y asignación de recursos equilibrados, así como una homogeneidad de métodos y de capacidades. Esto es casi obligado cuando el SHN se organiza con varias unidades (apartado 2.4).

2.8.2 Interinstitucional

El objetivo final del SHN es proveer información y asesoramiento al público en general, pero con consideración especial para algunas entidades. Tal es el caso de los servicios de protección civil, gestores de obras hidráulicas o consumidores de agua.

Pero el SHN tiene dependencias de otras instituciones, entre las que se destacan:

- Servicios meteorológicos.- Las interdependencias funcionales entre los servicios hidrológicos y meteorológicos (ver capítulo 8) aconsejan una buena coordinación entre ambos, o entre las áreas correspondiente cuando ambos se encuentran en la misma institución.
- Propietarios o gestores de otras redes de medida.- Tanto por su función como responsable de una red de redes como por su liderazgo en cuanto a estándares de medidas (ver apartado 2.2), un SHN tendrá que relacionarse con múltiples instituciones adoptando un papel de coordinador.

2.8.3 Internacional

Para todo aquello que tenga que ver con hidrología y se trate de un problema de ámbito internacional, como es el caso de cuencas transfronterizas (transnacionales o internacionales), es necesario contar con una institución de ámbito nacional: el SHN.

El caso más evidente que aconseja crear grupos de trabajo (internacionales, en este caso) es la cuestión de los intercambios de datos, pero también pueden ser útiles para aplicación de metodologías o para afrontar soluciones de entrenamiento y formación.

En general, el SHN participará en cuestiones de índole internacional dando apoyo a otras instituciones nacionales.

2.9 Protocolos y acuerdos interinstitucionales.

En muchos casos, el establecimiento de unos acuerdos, que regulen el modo en que se llevan a cabo trabajos coordinados entre equipos o instituciones, es conveniente. Aunque en el caso de grupos creados para abordar cuestiones estrictamente técnicas, dicha regulación no es necesaria o puede reducirse a su mínima expresión (lo importante es que el grupo realice trabajos concretos). Sin embargo, definir acuerdos más detallados para otros tipos de relaciones entre instituciones es muy conveniente, especialmente en caso de tener que afrontar problemas que impliquen responsabilidades importantes. Tal es el caso de cuanto está relacionado con las actuaciones ante situaciones de crecidas (ver capítulo 12). En tales circunstancias se requieren protocolos que definan funciones, responsabilidades y detalles operativos (circunstancias de aplicación, vías y modos de comunicación, formatos de comunicados y datos, etc.).

2.10 Gestión de recursos humanos

2.10.1 Capacidad humana como condición necesaria

La fortaleza de las instituciones depende de recursos materiales, marcos legislativos y administrativos, relaciones con otras instituciones... Pero todo lo anterior es inalcanzable sin recursos humanos suficientes en número, con formación y entrenamiento acordes al nivel de exigencia y suficientemente estimulados. Un buen equipo de profesionales puede realizar una labor excelente con medios escasos, pero toda la inversión material imaginable es absolutamente inútil sin personas capacitadas y estimuladas para usarla

2.10.2 Dirección de un SHN

El perfil del director de un SHN debe cumplir unas exigencias acordes a la complejidad y responsabilidad de su función:

- Formación técnica y experiencia profesional.- La naturaleza compleja de los problemas de los SHN requiere que su dirección tenga conocimientos técnicos y científicos y experiencia en el sector de varios años.
- Relaciones interinstitucionales e internacionales.- Se requieren habilidades para relacionarse con otras instituciones, lo que exige capacidades negociadoras y cierto conocimiento de los ámbitos relacionados.
- Planificación y programación.- El funcionamiento de un SHN requiere una planificación, con visión a diferentes horizontes futuros, y una programación de presupuestos y actividades difícil por exigir el encaje de responsabilidades operativas, necesidades de capacidades humanas y medios materiales variados y dispersos.
- Políticas y estrategias.- La dirección es el máximo responsable de la definición de metas y objetivos del SHN, que debe fijar la orientación de planes y programas.
- Comunicación.- La dirección de un SHN debe contar con una persona con habilidades como comunicador, pues tendrá que transmitir mensajes claros a autoridades diversas y al público en general.
- Control y motivación.- Al ser los recursos humanos la principal fuerza para el funcionamiento de un SHN, la dirección debe ser capaz de llevar un control de los mismos y lograr la motivación de sus subordinados.

2.10.3 Plantillas y selección de personal

Un SHN requiere una estructura organizativa clara, con una definición de cada puesto. Tal y como se indicó anteriormente, no hay regla fija para el tamaño de la plantilla, pero tampoco lo hay para fijar las condiciones a cumplir por la persona que ocupa cada posición. Cada caso requiere tener en cuenta las exigencias singulares de su función dentro del servicio, pero también las características del país, fundamentalmente en cuanto a formación y titulaciones.

La experiencia de un candidato para un determinado puesto será importante, pero la función de cada profesional en el SHN es muy específica, por lo que posiblemente haya que asumir que el aspirante no cuente con experiencia previa. Sí será necesario que cuente con conocimientos de hidráulica, hidrología y de herramientas y soluciones básicas (apartado 3.8).

No es fácil lograr profesionales bien capacitados para el desarrollo de su carrera en un SHN, por lo que la institución debe garantizar cierta estabilidad de plantillas, que facilite el tiempo necesario para la adquisición de las capacidades, y ofrecer expectativas que sean un estímulo para su permanencia.

2.10.4 Formación y entrenamiento

Los programas de formación y entrenamiento son el instrumento para el aumento de capacidades personales y, en consecuencia, institucionales.

La función de gran parte de la plantilla de un SHN es muy específica, requiere mucha especialización. El nivel profesional necesario requiere años de experiencia pero también formación y entrenamiento. Puesto que debe ser una actividad continua con visión a largo plazo, es conveniente la puesta en práctica de programas de formación y entrenamiento.

2.10.4.1 *Análisis de necesidades*

Dicho programa debe empezar por el análisis de deficiencias organizativas, de las funciones de SHN no bien desarrolladas y de las debilidades profesionales. El conjunto de éstas definirán las necesidades de formación y entrenamiento

2.10.4.2 Temporalidad

Un periodo inicial de formación y entrenamiento del personal, cuando éste se integra a la plantilla del servicio, es necesario. Pero es ineludible que esta labor sea continua.

2.10.4.3 Tipo

Los cursos presenciales, en línea o mixtos son todos útiles, pero cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes que deben ser considerados en cada caso. Por razones prácticas y por los resultados que suelen dar, los talleres o grupos de trabajo en los que se abordan problemas reales específicos son muy recomendables, siempre que los participantes sean tutelados por un entrenador experto.

2.10.4.4 Relaciones externas

Todo grupo aislado tiende a caer en rutinas y faltas de perspectiva que repercuten muy negativamente en sus capacidades.

La participación del personal en asociaciones profesionales y grupos externos enriquece notablemente sus capacidades.

La realización de visitas técnicas a SHN de otros países o servicios hidrológicos de otras instituciones es más que recomendable. Incluso, al menos para algunos puestos y en cierta etapa del desarrollo de cada carrera profesional, puede ser aconsejable (a pesar del coste que ello tiene) que el especialista desempeñe algún trabajo en otro servicio durante algún tiempo (pasantías).

2.10.4.5 Aplicación de lo aprendido

Los aumentos de capacidades individuales que se logren gracias a la formación y el entrenamiento deben aplicarse lo antes posible en la búsqueda de mejoras institucionales. Esto implica un planteamiento coherente por parte de la dirección que lleve a la redefinición de métodos y procedimientos que permitan aprovechar las nuevas capacidades.

Esta puesta en práctica de los nuevos conocimientos y habilidades también es un estímulo para el profesional, especialmente si éste ve posibilidades de progreso y recompensa por el esfuerzo.

2.10.4.6 Adaptación

Las actividades de formación tienen que adaptarse al perfil de cada persona y a su función dentro del SHN. El hecho de que un curso o actividad de formación concreta pueda repetirse, con igual contenido y formato en distintos SHN, y resultar exitoso será raro. Esto puede aplicarse incluso en unidades o áreas de un mismo país.

2.10.4.7 Simulacros

Las tareas de entrenamiento tienen como objetivo la mejora de habilidades por parte del personal en casos prácticos. Pero algunas funciones se desempeñarán en situaciones no cotidianas, con carácter eventual o en ciertas épocas el año. Este es el caso de los trabajos en situaciones de crecida. Antes de que se den estas circunstancias, cada persona debe contar con experiencia en el uso de herramientas, lo que obliga a realizar simulacros.

Un simulacro puede consistir simplemente en que el sistema informático proporcione datos de episodios pasados y que el personal trabaje como si se tratase de una situación real. Por supuesto, en estos casos los tiempos de refresco o actualización pueden ser distintos a los reales (en general serán más cortos). Para ello, las bases de datos y todas las utilidades que conforman el sistema informático conjunto tienen que estar preparadas para operar en este modo, lo que debe ser considerado desde las fases de diseño de dicho sistema.

2.10.5 Seguridad y salud en el trabajo

Es común que el país cuente con un marco legal relativo a la seguridad y salud en el trabajo. Esta legislación tiende a ser cada vez más exigente. En cualquier caso, muchos de los trabajos, especialmente los de campo, se realizan en condiciones que incluyen un cierto peligro para el que los lleva a cabo. Hay ocasiones en que la valoración del riesgo obliga a no realizar una determinada tarea, como es el caso de algunos aforos directos en situaciones de crecida, especialmente cuando ésta es repentina.

El riesgo de que un trabajador sufra daños se reduce considerablemente cuando éste está bien formado, lo que requiere método y entrenamiento, pero también cuando se usan los medios adecuados.

Es conveniente prever mecanismos de supervisión del modo en que se realizan los trabajos, labores que pueden coincidir con otras de propósitos más amplios que

estén orientadas al control de calidad. Tampoco debe descartarse la posibilidad de poner en práctica algún tipo de régimen sancionador interno de aplicación para aquellos que no respeten las buenas prácticas en materia de seguridad y salud en el trabajo.

2.11 Eficacia y eficiencia de la cadena de producción

El buen aprovechamiento de los recursos humanos va a depender de una buena organización. Con una buena definición de procesos y métodos, la productividad de cada hidrólogo podrá ser satisfactoria. Se resaltan algunos puntos importantes para la eficacia y eficiencia de un SHN (cuyo funcionamiento puede asumirse a una cadena de producción que genera información como resultado):

- Limitación de productos.- Hay que definir un conjunto lo más reducido posible de productos a generar, tratando que sean de uso general.
- Periodo de emisión largos.- Debe ser lo más largo posible compatible con el uso que se vaya a dar. Así, por ejemplo, cabe definir un boletín hidrológico semanal completo, que puede complementarse con partes diarios o con información en Internet. Puede no tener sentido la emisión de boletines completos diarios para hacer referencia a una realidad hidrológica sin cambios significativos en estos periodos. Esto se completaría con boletines con carácter eventual o circunstancial (caso de las crecidas)
- No generar productos a la demanda.- La cadena de producción se rompe si se pretende que el equipo de hidrólogos genere productos a la demanda de alguna autoridad concreta en un momento dado. El resultado es una drástica pérdida de eficiencia y eficacia. Esto hay que evitarlo por dos vías: con una buena definición de productos genéricos e imponiendo una disciplina a los usuarios de información (deben aprender a aprovechar lo que se les pone a disposición). Por supuesto, la difusión libre e inmediata de toda la información reduce mucho las posibilidades de que dichos productos a la demanda sean reclamados.

2.12 Gestión de documentos. Registro y archivo. Seguridad de la información

Un servicio hidrológico puede estar involucrado en responsabilidades importantes de la Administración Hidráulica. Tal es el caso de permisos de obras o concesiones de uso de agua. Esta participación obliga a llevar un registro histórico de informes, estudios y, por supuesto, de los datos.

En cualquier caso, la información hidrológica histórica tiene un valor muy alto. La hidrología depende en muchos aspectos del buen conocimiento del pasado, pues es indispensable para comprender la realidad actual y para hacer previsiones o proyecciones. Lamentablemente, se observan con frecuencia prácticas que no demuestran una sensibilidad suficiente con respecto a la importancia de los datos históricos.

Los estudios realizados a lo largo del tiempo, por sucesivas generaciones de hidrólogos, son igualmente muy importantes, y aportan gran conocimiento al hidrólogo del presente, al que le transmiten experiencia por vía escrita.

Todo esto aconseja llevar a la práctica actuaciones que aseguren la integridad y permanencia de toda la información pasada. Esto incluirá registros, índices, almacenamiento seguro y redundante... Incluso es conveniente mantener copias en lugares físicos distintos, de tal modo que si uno sufre, por ejemplo, un incendio, la información perdure gracias a la copia almacenada en otro lugar.

2.13 Imagen institucional

Actualmente se observa una preocupación creciente por la transparencia de gobiernos e instituciones, entendiéndose que las prácticas coherentes con esta exigencia son intrínsecas a la democracia. Según esto, las instituciones tienen que justificar sus acciones y medidas.

En cualquier caso, la efectividad de los sistemas de información hidrológica, valorada según sus efectos positivos en la sociedad, está relacionada con aciertos en la educación pública y la difusión de información y de documentos. El desempeño de un buen papel en estas tareas por parte del SHN, le llevará a una buena imagen institucional y servirá, además, para justificar el consumo de los recursos necesarios para el cumplimiento de su función.

Por supuesto, la interacción con medios de comunicación masiva es necesaria, no solo para transmitir datos o mensajes, sino que el SHN debe usarlos también como vía para contribuir a la educación pública.

El conocimiento por parte de la población de la realidad de la hidrología contribuye de forma importante a un buen uso de los recursos hídricos y a la reducción de los riesgos asociados al agua.

3 Información hidrometeorológica

Un sistema de información hidrometeorológica es necesario para todas las acciones a considerar para la solución de problemas relacionados con el agua. Algunas de estas medidas se adoptarán con anticipación a la presentación o el agravamiento de los problemas, en fases de estudios y planificación, mientras que otras se compondrán en ejecución y operación. Ejemplo de las primeras son los estudios para el análisis de recursos y demandas, evaluaciones de garantías de suministro y cálculos para el dimensionamiento de infraestructuras, tanto para defensa frente a inundaciones como para el almacenamiento y distribución de recursos. En el campo de la ordenación del territorio, la información y los estudios son necesarios para la zonificación de áreas inundables. En el segundo grupo de tareas cabe citar a los sistemas de alerta temprana y a las herramienta de apoyo para la operación de infraestructuras hidráulicas (entre las que se incluye a las destinadas a la producción hidroeléctrica), aunque la información es también es necesaria para otros aspectos de la gestión de recursos hídricos (como el control de consumos o de concesiones), para la gestión medioambiental o para la navegación fluvial. El establecimiento de resguardos de embalses que sirvan para la toma de decisiones sobre desembalses, extracciones y trasvases, y la definición y uso de indicadores de sequía son otros ejemplos en los que son necesarias buenas bases de datos y estudios basados en ellas. También las actuaciones de emergencia en situaciones adversas, de sequía o crecida, requieren información en el momento y estudios previos para su planificación.

La información hidrometeorológica cuenta con un conjunto de singularidades que tienen que ser consideradas en la práctica de su uso en cualquier ámbito. Estarán ligadas a su naturaleza o a las formas y medios empleados para su obtención y manejo, pero, en cualquier caso, impondrán limitaciones prácticas en la precisión y disponibilidad la información.

3.1 Clasificación de la información

En general, la información hidrológica puede clasificarse en:

- Variables: niveles, caudales, ...
- Atributos de caracterización: áreas de subcuencas, usos del suelo, ...
- Parámetros de comportamiento / modelación: números de curva, ...

Por su naturaleza, la información suele ser de tipo:

- Serie temporal.- Las variables se suelen manejar en forma de series temporales. Las medidas se realizan cada cierto intervalo de tiempo, por ello las variables correspondientes y derivadas no se tratan de forma continua en el tiempo sino discreta. Las series temporales son, por ello, sucesiones de valores ordenados cronológicamente, o pares instante-valor. Se suelen gestionar con bases de datos alfanuméricas (ver apartado 3.8.1). En conjunto, sirven para representar el comportamiento hidrológico del sistema. Pueden ser dato o resultado de cálculos. Las técnicas de cálculo numérico habituales en hidrología también recurren al tratamiento discreto de la información.
- Información geográfica.- Se usa para la descripción física del sistema hidrológico con el que se trata, incluyendo características del terreno (tipos y usos del suelo, elevaciones). A partir de algunos atributos básicos se obtiene una caracterización de redes hidrográficas y subcuencas, y una primera estimación de parámetros de comportamiento hidrológico, como los de infiltración o tiempos de propagación. Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas muy útiles en la hidrología (ver apartado 3.8.2), pues facilitan la gestión de datos asociados a entidades que tienen una relación con el espacio.

También cabe distinguir entre:

- Información de origen externo: datos como los ámbitos administrativos serán útiles o necesarios pero no se tiene responsabilidad sobre ellos.
- Información generada: el objetivo final es producir información (niveles en ríos, por ejemplo).

Cada tipo de información requerirá herramientas y métodos específicos para su manejo y la definición de unos procesos para su tratamiento.

3.1.1 Tipos de series temporales

Las series temporales pueden clasificarse de acuerdo al tipo de valor que corresponda a cada intervalo:

- Valores instantáneos: cada valor reflejará la magnitud instantánea en el instante final de cada intervalo (aunque también puede asociarse al inicio)
- Valores medios: cuando se forma a partir de valores medios en el periodo de tiempo de cada intervalo
- Valores acumulados: se acumula la magnitud en cada intervalo de tiempo.

También, de modo análogo al caso de las series de valores medios, pueden definirse series de valores máximos o mínimos. Generalmente, los niveles y caudales, en ríos y en embalses, se caracterizan con series de valores instantáneos, mientras que los de las precipitaciones suelen ser acumulados.

3.2 Formas de representación

En este apartado se explican las formas de representación habituales para la información hidrológica.

3.2.1 Distribuciones temporales

Las magnitudes más comunes y sus formas de representación son:

- Hietograma: series temporales de lluvia por unidad de área acumulada por intervalos de tiempo. Suelen representarse en gráficos de barras, pero también puede hacerse en gráfico de líneas. Los valores se expresan en mm (milímetros).
- Hietograma de intensidades: hietograma en el que los valores se corresponden a precipitaciones por unidad de tiempo, con lo que se expresan en mm/h (milímetros por hora).
- Limnigrama: sucesión de valores de nivel de la lámina de agua en un embalse, en un río o en un canal. Se expresan en m (metros) o cm (centímetros). Se representan con gráficos de líneas.
- Hidrograma: sucesión de valores de caudal (volumen por unidad de tiempo) de agua en un río, canal o conducción. Se expresan en m^3/s (metros cúbicos por segundo). También se dibujan con líneas.

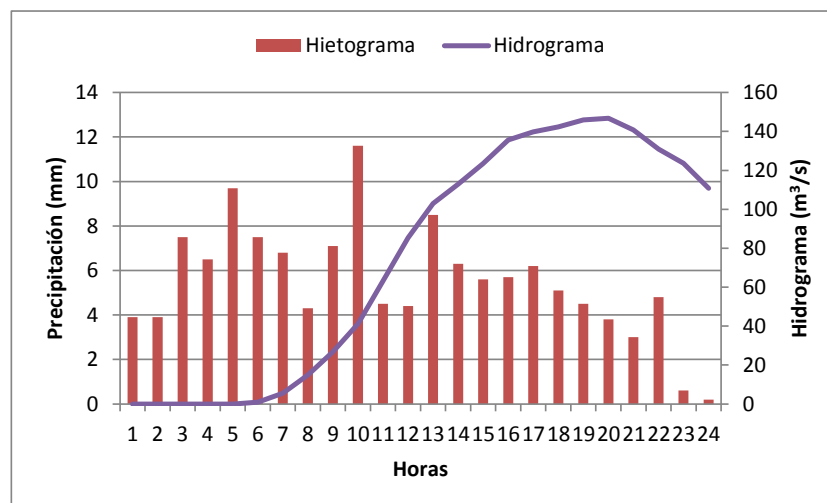


Figura 1: Hietograma e hidrograma

3.2.2 Distribuciones espaciales

Hay variables, como las precipitaciones, para las que es conveniente buscar una representación de su distribución espacial, mostrando en un mapa el valor en cada punto correspondiente a un instante o intervalo de tiempo. Para ello se recurre a las mallas, que dividen el territorio en celdas iguales. A cada celda se le asigna un valor de precipitación, que se obtiene por interpolación u otro método de cálculo. Y esta malla se representa en formato matricial (también denominado ráster) asociando un color a un valor o rango de valores, usando una tabla de colores (paleta) que asigna el color de representación de cada celda.

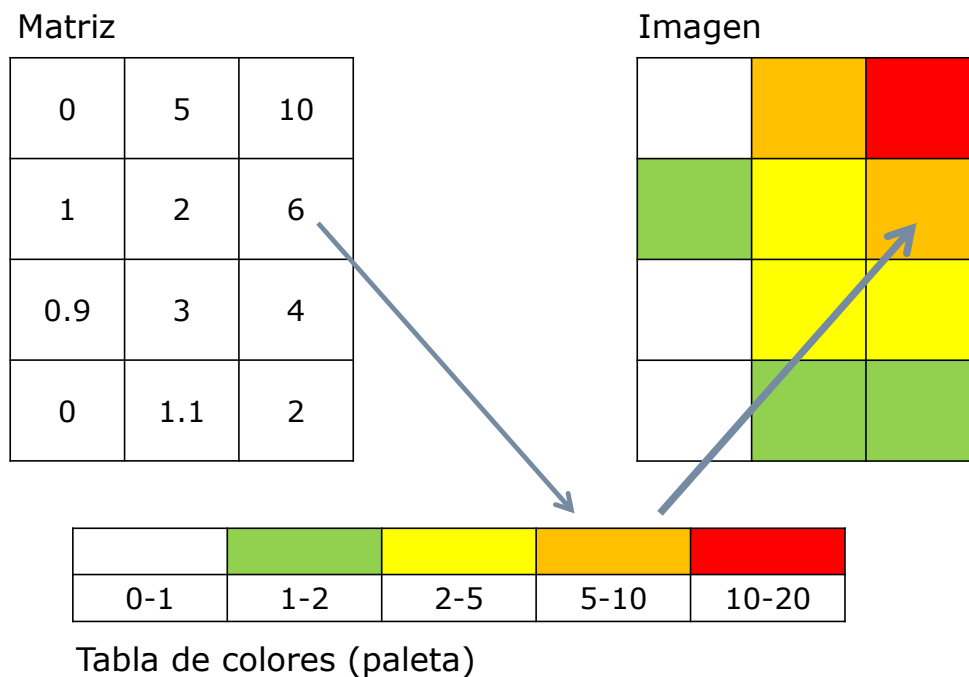


Figura 2: Esquema de representación en formato ráster o matricial de un malla de precipitación.

A menudo, se generan capas con estas mallas sobre las que se superponen otras representaciones (capas), generalmente recurriendo a los formatos vectoriales (terminología de los sistemas de información geográfica para entidades representadas con puntos, líneas o polígonos). Así, los ríos pueden aparecer representados con líneas, las subcuencas (áreas receptoras de lluvias) con polígonos y la situación de los pluviómetros con puntos (Figura 3).

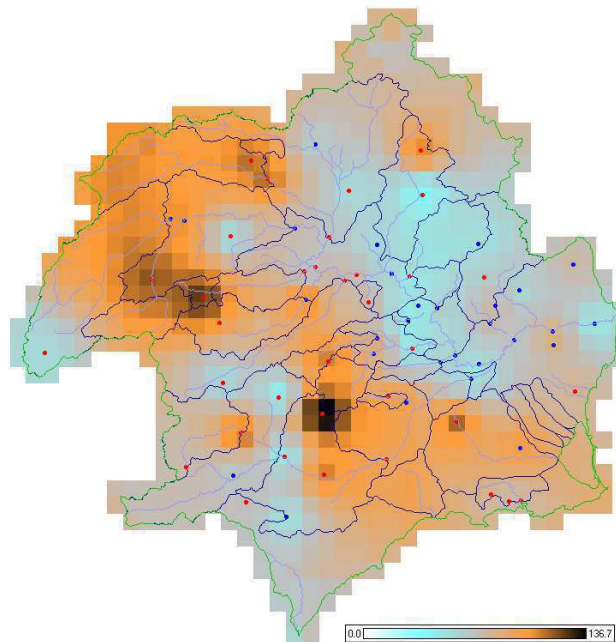


Figura 3: Mapa con malla de precipitación acumulada en un periodo de tiempo, sobre la que se han superpuesto entidades vectoriales.

Puede recurrirse a mapas constituidos con todos sus elementos de tipo vectorial, de modo que también expresen la distribución espacial de una magnitud. Un ejemplo de ello se ilustra con un mapa de precipitaciones medias areales en cada subcuenca (Figura 4).

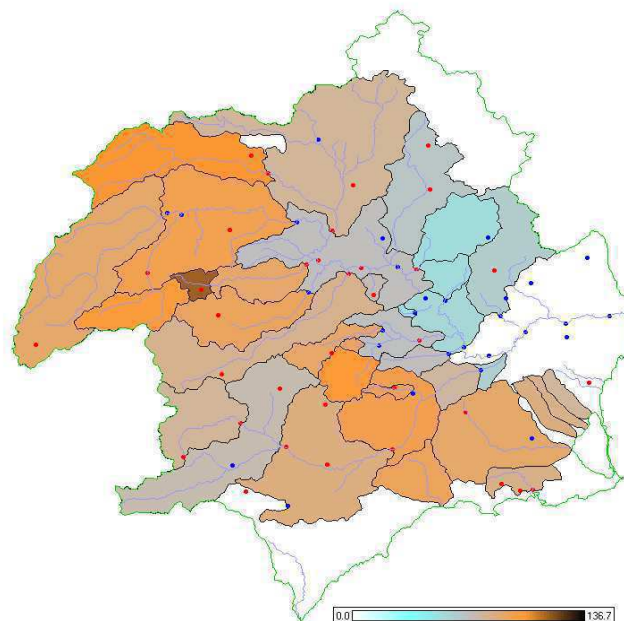


Figura 4: Mapa de precipitaciones areales en subcuencas, correspondientes a un periodo de tiempo, coloreando los polígonos correspondientes según una escala cromática.

3.3 Información de interés

Son muchas las variables que pueden tener interés en la hidrología operacional. El listado completo dependerá de las funciones concretas de cada sistema, pero la información más relevante puede ser la siguiente:

- Pluviométrica
 - Acumulaciones por periodos
 - Mallas e isoyetas (líneas de igual precipitación)
- Hidrométrica
 - Niveles y caudales
- Embalses
 - Niveles, entradas, salidas, almacenamiento
 - Clasificación por usos
 - Reservas por sistemas de explotación
- Masas de agua
 - Superficiales naturales.- Niveles, volúmenes, balances.
 - Subterráneas.- Niveles piezométricos
- Calidad de agua
- Recursos nivales
 - Extensión, manto y su equivalente en agua
 - Reservas y aportaciones
- Referencias a valores históricos
 - Estadísticas.- Medios, extremos, distribuciones, intervalos de confianza.
- Magnitudes especiales
 - Umbrales de crecidas
 - Indicadores de sequías

Hay datos de gran interés aunque tenga un carácter complementario:

- Ámbitos territoriales administrativos
 - Cuencas
 - Subdivisiones políticas
 - Provincias, municipios, núcleos de población, ...
- Subcuencas y red hidrográfica
 - Naturales (con divisorias asociadas a una escala de trabajo y, por tanto a un nivel de desagregación)
 - Sistemas de explotación
- Características del terreno

- Geología
- Usos del suelo
- Infraestructuras
- Delimitación de masas de agua
 - Subterráneas
 - Superficiales

Hay otra información adicional que debe ser generada y bien gestionada, pues es importante para lograr un funcionamiento ordenado y para informar de manera completa a los usuarios finales, como:

- Descripción de estaciones de medida
 - Localización, esquema e instrumentación.
- Explicaciones
 - Error e incertidumbre.- asociado a medidas y a cálculos.
 - Proceso
 - Validación.- descripción del proceso de la validación de datos y una caracterización de su calidad
 - Cálculos.- descripción de los cálculos
 - Interpretación y discusión de resultados

3.4 Atributos de la información (metadatos)

Un valor numérico asociado a un parámetro o una referencia a una serie temporal no es suficiente para una descripción completa de un dato. La información será completa cuando se disponga de un conjunto de atributos que expliquen sus características importantes. Esto facilitará un uso acertado de la información. Estos atributos (que en ocasiones son denominados metadatos) pueden ser de diferente tipo, pero se resaltan los siguientes

- Temporales
- Espaciales
- Sobre calidad
- Acerca de la disponibilidad

Una variable estará caracterizada, entre otras, por su discretización temporal (intervalo de tiempo entre dos valores consecutivos de la serie), la cual condicionará el uso que se pueda hacer de ella (apartado 3.7.2). La discretización espacial o la precisión geográfica de otras variables también puede ser importante (apartado 3.7.1).

Por otra parte, los atributos de calidad, algunos de carácter constante, como la precisión o el error sistemático, y otros eventuales, como asignación de estado de fallo, deben ser explícitos y manejados habitualmente. La utilidad del dato estará unida al conocimiento de su calidad, pues es inevitable la consideración de la incertidumbre en un proceso de toma de decisiones (ver capítulos 6 y 11).

En la hidrología operacional, todo cuanto tiene que ver con la disponibilidad del dato es importante. Especialmente lo siguiente: si el acceso es libre (público) o no, cuales son los medios necesarios para obtenerlo, las herramientas necesarias para su manejo y el retraso mínimo (desfase entre instante de medida y el de disponibilidad en un lugar determinado).

3.5 Generación de productos y difusión de información

La difusión de información es el objetivo final de un servicio hidrológico, buscando satisfacer unas necesidades de los usuarios. El diseño de los productos a difundir tiene mucha importancia en la consecución de esta meta.

3.5.1 Definición de productos y su uso

La definición de cada producto a generar estará muy condicionada por su uso previsto. Así, un producto orientado hacia problemas de recursos hídricos, puede ser extenso, se puede admitir un retraso de días o semanas y cabe la posibilidad de la difusión en papel. Por el contrario, nada de esto podría admitirse para un producto de información sobre crecidas de evolución rápida.

Las condiciones de disponibilidad, es decir, las posibilidades de acceso y los retrasos, serán otros de los datos de partida en el diseño de los productos de difusión.

En la fase de diseño de un producto de difusión se debe identificar a los usuarios potenciales de la información y analizar sus posibles necesidades, y tener en cuenta las posibilidades reales de generación según los recursos disponibles. Debe evitarse, por razones de eficacia y eficiencia, la generación de un alto número de productos. Estos deben elaborarse en una cadena de producción que, como tal, no debe pretender ajustarse a necesidades eventuales sino proveer información multipropósito.

3.5.2 Modos y medios

Tradicionalmente, la información hidrológica se ha difundido en formato impreso, lo que va cayendo en desuso. La posibilidad de difusión en formato digital, haciendo

uso de Internet, aconseja reducir al mínimo la producción en papel, mucho más cara. Pero, el uso de estas tecnologías no es del todo universal, por lo que hay que difundir una cierta cantidad de documentos impresos que deben distribuirse por lugares de acceso público (oficinas de las administraciones, por ejemplo). Los medios de difusión amplia (masiva) pueden jugar un papel importante en la difusión de la información hidrológica, que no siempre son aprovechados.

- Activa, directa o dirigida
 - A un destinatario concreto usando fax, teléfono, SMS o correo electrónico.
 - A un destinatario no específico con paneles y señalizaciones situados en un lugar de interés, tales como avisadores acústicos y luminosos, útiles para situaciones de crecida
- Pasiva, por publicación
 - Librerías y bibliotecas
 - Servidores web o ftp.
 - Medios de difusión amplia (radio, televisión, prensa escrita)

3.5.3 Selección de magnitudes relevantes

Un servicio hidrológico maneja mucha información, parte de la cual no es de gran importancia para los usuarios. En cualquier caso, algunos modos y medios obligan a difundir bloques pequeños de información, por lo que ésta debe ser seleccionada. Para ello, puede recurrirse a publicar síntesis basadas en agregaciones temporales y espaciales, en lugar de todos los datos.

Hay que tener en consideración las necesidades de los usuarios, y analizar cuáles pueden ser las mejores variables de decisión ante diferentes situaciones posibles. Igualmente, hay que tener en cuenta que los hidrólogos están habituados a trabajar con magnitudes como los caudales y pueden superar las dificultades de interpretación que tienen, lo que no es esperable de un usuario cualquiera. Por ello, en la mayoría de los casos será preferible proporcionar niveles en lugar de caudales, pues es algo observable y que puede relacionarse fácilmente con otras magnitudes, como pueden ser niveles de desbordamiento o alturas de puentes.

3.5.4 Presentación de la información

Las posibilidades gráficas de los medios actuales permiten presentar la información empleando todo tipo de recursos editoriales, como gráficos, imágenes o

mapas. Por supuesto, las tablas de datos alfanuméricos tendrán presencia en la mayoría de las publicaciones.

3.5.4.1 Referencia a valores históricos

Los valores numéricos cuantifican las variables hidrológicas, pero son necesarias unas referencias para que el usuario de la información los evalúe cualitativamente. Para calificar un valor de caudal como alto o bajo es necesario referirlo a unos caudales de referencia, que variarán mucho de unos ríos a otros o a lo largo de cualquiera de ellos. Estas referencias pueden ser obtenidas a partir de unos descriptores estadísticos de las variables correspondientes: valor medio, máximo registrado, media de los extremos anuales, etc.

3.5.4.2 Referencia a valores descriptivos

En otras ocasiones, la interpretación de un valor numérico puede hacerse por referencia a un valor descriptivo, como puede ser el nivel de vertido de un embalse o el nivel de desbordamiento de un tramo de río.

3.5.4.3 Ventana de tiempo

La presentación de variables en gráficos con el tiempo en las abscisas (limnigramas, hidrogramas, etc) estará referida a un periodo de tiempo, que se denomina ventana de tiempo. Dicho intervalo deberá ser coherente con

- La periodicidad de las emisiones.- Debe abarcar, al menos, un periodo completo entre dos emisiones. Por ejemplo, si se difunde información con periodicidad diaria y discretización horaria, cada refresco de datos debe tomar como inicio la hora final (o anterior) de la emisión previa y como fin la actual (o más reciente), es decir, una ventana de 24 horas (mínimo).
- Los tiempos de respuesta del sistema hidrológico.- La información se debe presentar de modo tal que permita detectar las relaciones causa-efecto con suficiente grado de detalle. Así, si se trata de un sistema que responde a la lluvia en 12 horas, si la ventana de tiempo es de 8 horas, no será posible identificar de manera completa la transformación lluvia-escorrentía, mientras que si la ventana es de 2 meses, se perderán los detalles.
- Las necesidades de uso.- A veces es conveniente presentar más información de la estrictamente necesaria, con una ventana de tiempo mayor, pues puede facilitar el análisis (ofreciendo la posibilidad de relacionar sucesos de periodos anteriores).

Cuando la presentación de la información sea en forma de tablas o listados alfanuméricos, puede aplicarse lo anterior pero, preferiblemente, con valores agregados en el tiempo, con la finalidad de que no se incluyan muchos valores, lo que haría que la consulta no sea cómoda ni rápida.

3.5.4.4 Resúmenes

La presentación de información en forma de tablas alfanuméricas es especialmente apropiada para los resúmenes de datos, en la ventana de tiempo, elaborados a partir de valores medios, mínimos y máximos. Es aconsejable en muchas ocasiones incluir el resumen de la emisión anterior, es decir, de la ventana de tiempo cronológicamente anterior, en el caso de publicaciones con bastante contenido.

3.5.5 Boletines y partes

Los boletines hidrológicos son uno de los documentos que tradicionalmente han sido elaborados por los servicios hidrológicos. Su carácter es de publicación periódica, pero el intervalo entre ediciones sucesivas puede ser variable. Es común la emisión de boletines semanales, mensuales y anuales, cada uno de los cuales incluye los datos, resúmenes y análisis en los periodos correspondientes. Puesto que el boletín, cuya presentación visual es de documento que puede ser impreso en papel, necesita intervención humana en su elaboración, aún en el caso de un sistema altamente automatizado, no es recomendable emitirlo diariamente. Además, en la mayoría de las ocasiones el sistema hidrológico cambiará poco de un día a otro, por lo que no se aportará información de interés. Un complemento puede ser un boletín simplificado que solo incluya datos, que se emita diariamente y al que se puede denominar parte diario. Para situaciones excepcionales, como las de crecidas, se tendrán preparados boletines especiales y unos protocolos que fijen contenidos y periodicidades.

3.5.6 Acceso a bases de datos

Los medios informáticos y de comunicaciones actuales facilitan proveer al ciudadano de acceso remoto a los datos a través de Internet. Puede optarse por servidores web, con sofisticadas páginas de acceso con mapas interactivos y utilidades de búsquedas alfanuméricas, o, simplemente, hacer público un directorio con un sistema de archivos al que se pueda acceder vía ftp.

3.5.7 Atlas e informes especiales

Una de las funciones de un servicio hidrológico puede ser la de generar información muy elaborada, que pueda considerarse un atlas hidrológico, cuyo contenido ofrezca una caracterización completa del ámbito geográfico de aplicación. Si también los estudios son responsabilidad de la institución, se deben difundir los correspondientes informes especiales.

3.6 Proceso de generación y automatización

El proceso de generación de información dependerá de los medios disponibles y de las necesidades a cubrir. Se pueden dar diferentes niveles de automatización, tanto en las tareas iniciales de medidas (ver apartado 4.2.1) como en las siguientes, pero siempre será necesaria la intervención humana en las labores de supervisión del sistema y en la validación de datos.

En la medida de lo posible, debe buscarse la máxima automatización de subprocesos, sobre todo para evitar que se empleen recursos humanos en tareas repetitivas que un ordenador puede realizar fácilmente.

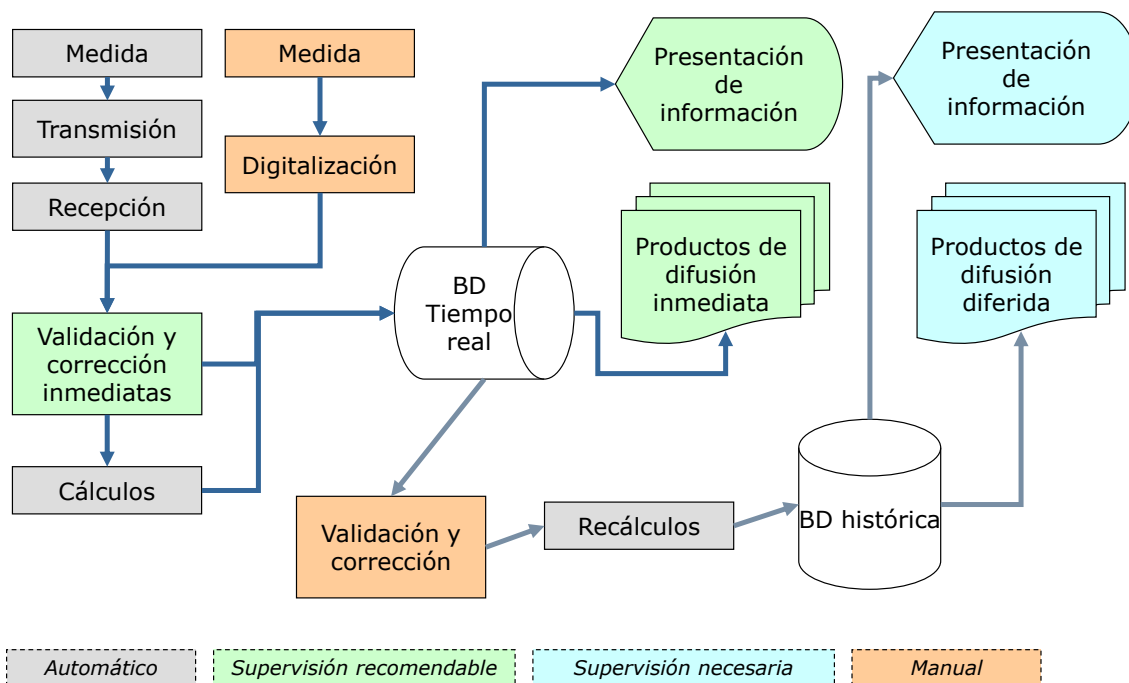


Figura 5: Esquema del proceso de generación de información

3.6.1 Validación y corrección

La calidad de la información dependerá de la aplicación de un programa de mantenimiento y operación de la red de medida que asegure buenas condiciones y prácticas en el origen de los datos, pero serán necesarios, además, unos

procedimientos de detección de fallos y corrección de los mismos, cuando sea posible, dando a los datos una confianza según el nivel de validación. A este respecto, cabe distinguir dos niveles:

- Validación inmediata.- Una primera validación realizada de forma lo más inmediata posible, que implique un consumo de tiempo compatible con la condición de sistema en tiempo real (ver apartado 7.4) más exigente (que se asuma). Este proceso puede admitir cierta automatización, al menos en la detección de fallos, basándose en los rangos de medidas posibles o empleando criterios más sofisticados.
- Validación diferida.- Cuando se cuenta con periodos de tiempo suficientemente largos, es posible hacer comprobaciones en campo y contraste con otras medidas u otras fuentes de información. Así, se puede realizar una validación más completa y rigurosa, y hay posibilidad de poner en práctica más procedimientos de corrección.

Estas etapas darán lugar a tres conjuntos de datos:

- los brutos (antes de cualquier validación),
- los revisados (con una validación inmediata) y
- los validados (con una validación diferida).

En cualquier caso, una corrección de datos debe ser siempre reversible. Es decir, los datos brutos deben conservarse.

3.6.2 Base de datos de tiempo real y base de datos histórica

Actualmente, dados los costes de los recursos informáticos y las ventajas que aportan, un sistema de información hidrológica sin base de datos digital carece de sentido.

El proceso de validación y corrección aconseja la distinción de dos bases de datos, la de tiempo real y la histórica. Otras cuestiones prácticas, como los tiempos de acceso a los datos o de cálculo, también aconsejan este criterio de diseño.

Los datos brutos y con una validación inmediata se almacenarán en la base de datos en tiempo real. Después, en periodos anuales o inferiores y tras realizarse la validación diferida, los datos brutos (nunca deben perderse) y los validados se almacenarán en la base de datos histórica, siendo opcional (aunque recomendable) el almacenamiento de la revisión de datos intermedia.

3.6.3 Variables calculadas

Algunas de las variables que se generan proceden directamente de una medida en campo, pero muchas otras serán resultado de algún tipo de cálculo: caudales calculados a partir de los niveles medidos y una curva de gasto (relación nivel-caudal), valores agregados en el tiempo como las precipitaciones horarias, volúmenes obtenidos por integración de caudales o por balances, etc. Esto lleva a una cadena de generación de variables que empieza por las que son medidas. Cualquier corrección de cualquier dato implica un conjunto de otras correcciones en cascada según las relaciones de dependencia. El diseño del sistema conjunto debe tener esto en cuenta.

3.6.4 Registro histórico de parámetros y caracterizaciones

Las variables calculadas serán función de parámetros y atributos que caractericen la realidad a la que representan. Estos valores de representación pueden ser modificados a lo largo del tiempo, bien por cambios observados o por mejoras en los procesos de cálculo. Es necesario mantener un registro histórico de los mismos.

Un caso especial es el de las curvas de gasto en las estaciones de aforos (capítulo 10). La definición completa de las curvas que se han empleado en el pasado debe mantenerse en el tiempo, cada una debe tener como atributos los instantes inicial y final en los que se ha usado y en los que se pueda usar. Esta práctica garantiza que los hidrólogos dispongan de información necesaria para muchos análisis históricos y, además, se garantiza la posibilidad de generar en cualquier momento los caudales de un periodo de tiempo a partir de los niveles, posibilitando así mejoras en los registros históricos por validaciones posteriores que resulten de estudios más minuciosos.

3.6.5 Presentación y difusión de información

El sistema de información debe proporcionar formas ágiles y flexibles de presentación de información a todos los profesionales involucrados en la generación de la información, en primer lugar, pero también a otros usuarios, para los que se preparan los productos de difusión.

Es recomendable que el nivel de validación resulte muy claro para el usuario, por lo que diferenciar claramente entre la difusión de datos en tiempo real y la difusión de datos históricos es una buena práctica. Además, para este último fin se cuenta con tiempo para generar productos más elaborados, completos y complejos, mientras

que para los usos en tiempo real se imponen criterios a favor de la rapidez y la simplicidad.

3.7 Algunas cuestiones especiales

Hay muchos aspectos específicos de la información hidrometeorológica que merecen una atención especial en la práctica profesional, algunos relacionados con detalles técnicos. Pero hay cuestiones que deben ser claras para todo usuario de este tipo de información, y aquí se resaltan algunas que se consideran muy importantes (aunque ya han sido mencionadas o tratadas anteriormente).

3.7.1 Discretización espacial y precisión geográfica

La información geográfica de tipo matricial cuenta una discretización espacial dada por el tamaño de celda. Representa el límite de precisión o detalle. El tamaño de la celda de una malla será determinante para sus posibles aplicaciones. Así, carece de sentido la utilización de una malla de precipitaciones previstas por un modelo de previsión numérica del tiempo de celda de 100 km (10.000 km²) como entrada de un modelo hidrológico de previsión de caudales para una cuenca de 10 km².

La precisión de la información geográfica en situación horizontal o en altitud puede condicionar el uso de la información. Así, en el caso de estudios hidráulicos, la precisión de la cartografía (generalmente asociada a su escala "nominal") determina el grado de detalle del análisis que puede hacerse. Especialmente en zonas llanas, diferencias o errores de altura de decímetros pueden implicar cambios sustanciales en los resultados de modelos de simulación de inundaciones.

3.7.2 Discretización temporal

Los datos son habitualmente registrados a intervalos regulares de tiempo. Dicho intervalo es lo que define la discretización temporal y se caracteriza por su longitud, y debe ser el apropiado a cada caso, en función de las variaciones en el tiempo que tengan, más frecuentemente, las magnitudes de los fenómenos que se desean analizar en el área de aplicación.

3.7.2.1 Pérdidas de puntas y errores volumétricos con hidrogramas

Si los hidrogramas de los ríos que se desean vigilar tienen variaciones significativas en intervalos de una hora, el uso de discretizaciones de longitudes mayores llevará probablemente a pérdidas de puntas, pues pueden darse entre dos instantes de registro (Figura 6). Este error en la apreciación de las oscilaciones de

la variable en el tiempo implicará un error en el cálculo de volúmenes al integrar en el tiempo (Figura 7).

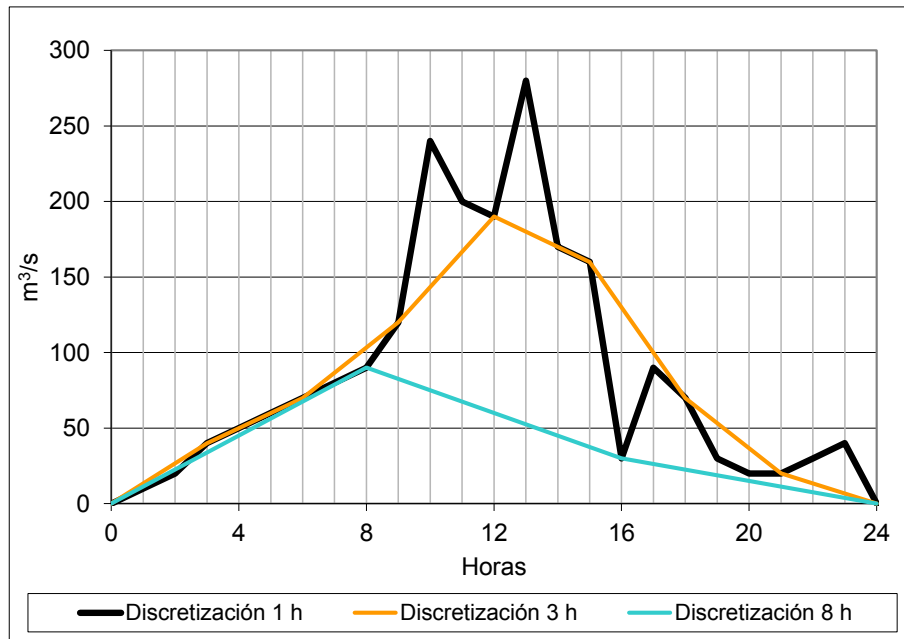


Figura 6: Comparación de un hidrograma observado con distintas discretizaciones temporales

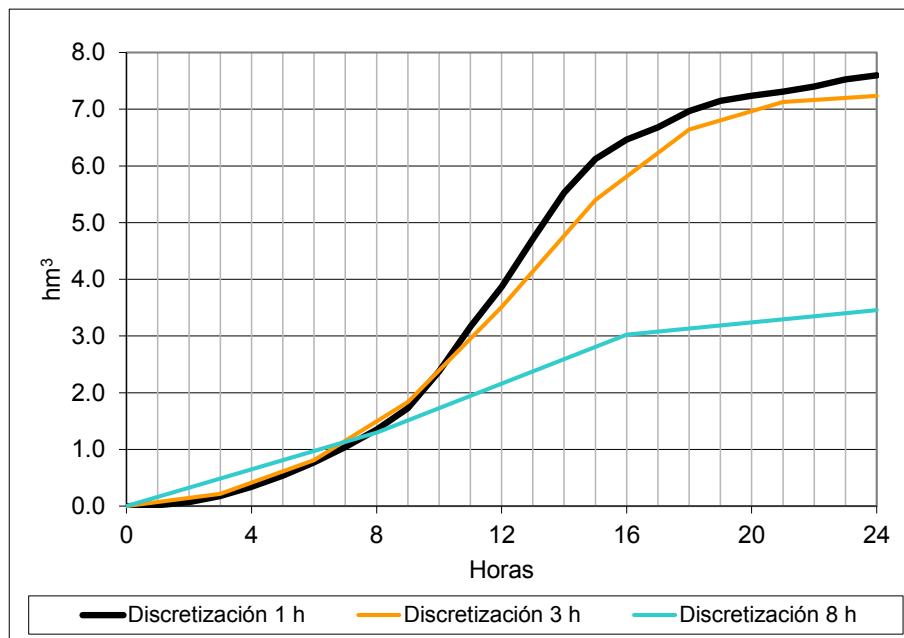


Figura 7: Diferencias en volumen al integrar los hidrogramas de la figura anterior

3.7.2.2 Error de valores punta y de desfase en la transformación lluvia-escorrentía

En el caso de los registros de precipitaciones, aunque se pierdan detalles, no hay problemas significativos con los volúmenes acumulados en el tiempo, pues cada uno de los valores que se registran se refiere a un volumen acumulado en el

correspondiente intervalo de discretización. Sin embargo, esa pérdida de información de distribución temporal de los volúmenes acumulados puede llevar a la imposibilidad de realizar la transformación lluvia escorrentía (por cálculo) correctamente. Por una parte, al perder información de los valores punta de la precipitación, no será posible reproducir los correspondientes valores máximos en el hidrograma de respuesta. Además, el caudal punta aparecerá desplazado en el tiempo.

En las figuras se muestra un ejemplo de transformación lluvia-escorentía para una pequeña cuenca (200 km²), con un hidrograma unitario de 2 horas de tiempo de punta y realizando cálculos con unas discretizaciones de 5 minutos y 120 minutos. Esto ilustra la necesidad de que el intervalo de discretización debe ser un submúltiplo del tiempo de respuesta del sistema que se desea observar.

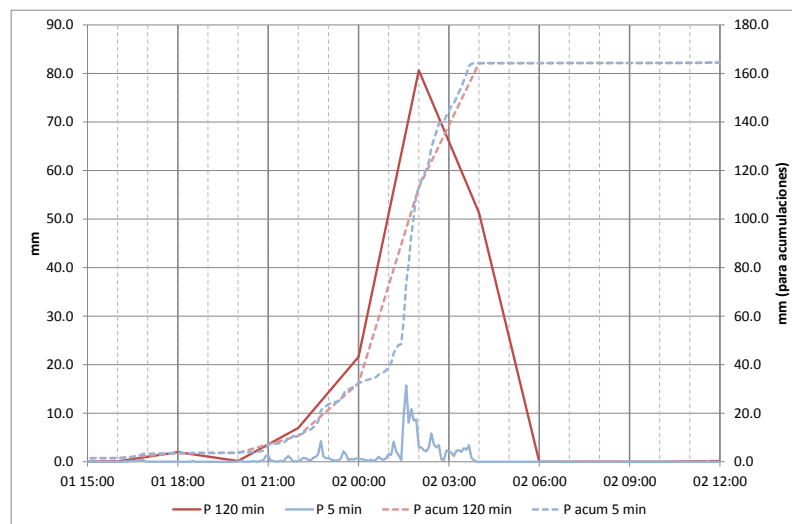


Figura 8: Diferencia del aspecto de precipitaciones acumuladas en intervalos con discretización de 5 y 120 minutos, y su repercusión en las distribuciones a lo largo del tiempo.

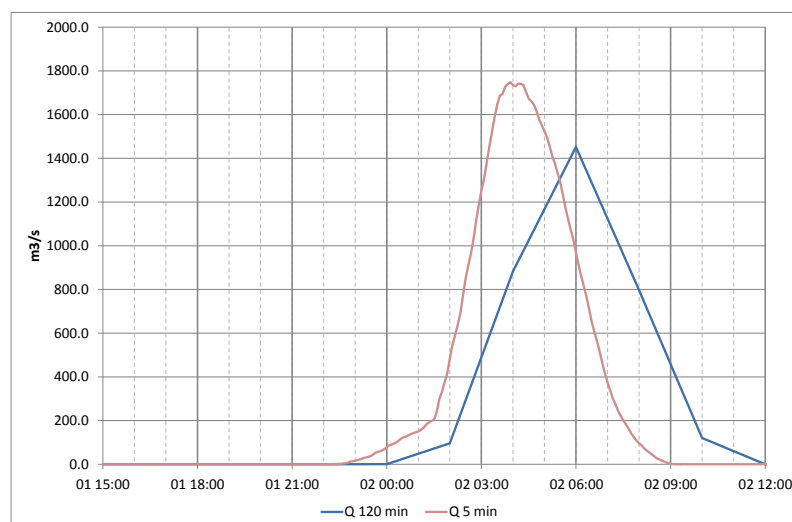


Figura 9: Error de punta y fase en la simulación de la transformación lluvia-escorentía debido a una discretización temporal inapropiada.

3.7.3 Base de tiempos y husos horarios

Muchos países tienen un horario de verano y otro de invierno, con cambios que implican que un día al año tenga 23 horas y otro 25. Esto supone que una variable que acumula una magnitud diariamente tenga un error de un 4 % en los registros históricos en los días de cambio de hora, si se almacenan los datos con referencia a la hora local. Por ello, es preferible almacenar las series temporales con referencia a un horario invariable, preferentemente usando el tiempo universal coordinado (UTC.- Universal Time Coordinated), que es el estándar de tiempo internacional. Es equivalente al tiempo solar medio en el meridiano primero (longitud 0°), expresado antes en el GMT (Greenwich Mean Time) y es también equivalente a la hora Z (Zulu time). Ejemplo: La hora estándar española en la península y Baleares es UTC+1, siendo UTC+2 en horario de verano. El horario de verano en la península abarca desde el último domingo de marzo a las 02:00 (UTC+1=01:00) hasta el último domingo de octubre a las 03:00 (UTC+2=01:00 UTC).

Hay que tener en cuenta que en algunos países se han observado cambios en la reglas de definición de horarios a lo largo de su historia, lo que complica las estadísticas y lleva fácilmente a errores si se trabaja con horario local.

Además, el uso de esta referencia facilita el intercambio de datos entre países, al contar con una referencia temporal común.

3.8 Herramientas y soluciones básicas

La hidrología operacional requiere manejo de volúmenes importantes de información, la cual puede clasificarse en dos grandes grupos (apartado 3.1): series temporales e información geográfica. La información geográfica se trata con sistemas especializados, los sistemas de información geográfica (SIG), y las variables con bases de datos o, en su defecto, algún sistema de archivos.

A esto hay que añadir que los sistemas en tiempo real, basados en telemetría y que pueden incluir sistemas de telecontrol de las estaciones de medida, dependen de sistemas de comunicaciones.

Lo anterior indica que el hidrólogo que desempeña su actividad en la hidrología operacional necesita unos conocimientos, al menos básicos si no avanzados, sobre las tecnologías de la información y comunicaciones.

3.8.1 Bases de datos

Una base de datos (BD) puede entenderse como un sistema (o parte fundamental del mismo) para la colecta, mantenimiento y presentación de datos basado en ordenadores. Sus componentes son:

- Los mismos datos.- Representan entidades y sus relaciones entre ellas. Deben manejarse de modo tal que se evite la existencia de datos dispersos e incontrolados, y facilitar que se compartan entre diferentes usuarios y aplicaciones.
- Hardware.- El manejo y almacenamiento de datos requerirá unas ciertas capacidades de cálculo en los ordenadores y memoria para almacenamiento de datos. Ambos, capacidad de proceso y de almacenamiento, se dimensionarán según el volumen de información y la aplicación del sistema.
- Software: Para realizar todas las tareas necesarias para manejar la base de datos se desarrolla un software que aísla al usuario de los detalles del hardware, denominado sistemas de gestión de bases de datos (SGBD). Sus funciones principales son crear la base de datos, mantenerla e interpretar los comandos o acciones del usuario y proporcionar los resultados adecuados.

Además, hay que considerar a los usuarios:

- Administrador de la base de datos (ABD).- Su responsabilidad estará definida por decidir la estructura de almacenamiento y las estrategias de acceso, analizar las necesidades de los usuarios para garantizar que reciben un servicio completo, definir controles de acceso y autorizaciones, y definir una estrategia de respaldo y recuperación.
- Usuario programador de aplicaciones.- La base de datos debe proporcionar una serie de utilidades para realizar programas que operen con los datos en ella contenida.
- Usuario final.- El que hace uso de la información.

Las bases de datos de tipo relacional se han impuesto al presentar grandes ventajas respecto a otras, como las jerárquicas o reticulares. Cuentan con una gran facilidad de representación lógica utilizando tablas separadas para cada entidad; ofrecen la posibilidad de operar con grupos de registros y no únicamente registro a registro, y permiten acceder a subconjuntos de campos de varios registros de tablas diferentes. Cuentan con un lenguaje estándar, el SQL (Standar Query Language) que, aunque partió como un lenguaje de interrogación, ha llegado a ampliarse hasta

permitir la manipulación de la BD en todos los niveles ofreciendo todas las funcionalidades necesarias. Además, se ha desarrollado una metodología sistemática, denominado proceso de normalización de Codd, que transforma un diseño inicial de base de datos en otro que garantiza que se evitan anomalías de redundancia (información repetida), inconsistencia (referencia a dato inexistente) e integridad (datos válidos).

3.8.2 Los sistemas de información geográfica

Las bases de datos surgen como herramientas especializadas en el manejo de información alfanumérica, aunque algunas se extienden para dotar al sistema de capacidad de gestión de datos de otra naturaleza (gráficos, por ejemplo). En cierto modo, un sistema de información geográfica puede ser entendido como una base de datos con capacidades especiales para tratar con información geográfica, es decir, con entidades que pueden ser representadas con coordenadas cartográficas. De modo quizás algo más riguroso pero más abstracto, cabe definirse un SIG como un sistema de hardware, software y procedimientos diseñados para la captura, administración, manipulación, análisis, modelación y exposición de datos relacionados con su distribución espacial.

En la hidrología, los SIG se han convertido en herramienta indispensable, y el hidrólogo debe tener ciertas capacidades para usarlas, especialmente para el análisis y la modelación, e incluso para la exposición (para la presentación de datos y resultados).

En el apartado 3.2.2 se hizo mención a formas de representación geográfica de tipo vectorial básicas (punto, línea como secuencia de puntos y polígono como una línea que empieza y acaba en el mismo punto), las cuales a veces se extienden con otras compuestas (polilíneas, como conjunto de líneas, y regiones, como unión de polígonos). La representación vectorial se completa con la matricial (ráster). En ocasiones se usan representaciones del terreno en mallas de triangulación irregular (TIN- Triangulated Irregular Network), que facilitan una representación de la orografía bien ajustada a la realidad, y suelen ser un paso intermedio para la obtención de los modelos digitales del terreno (MDT), los cuales se representan en formato matricial.

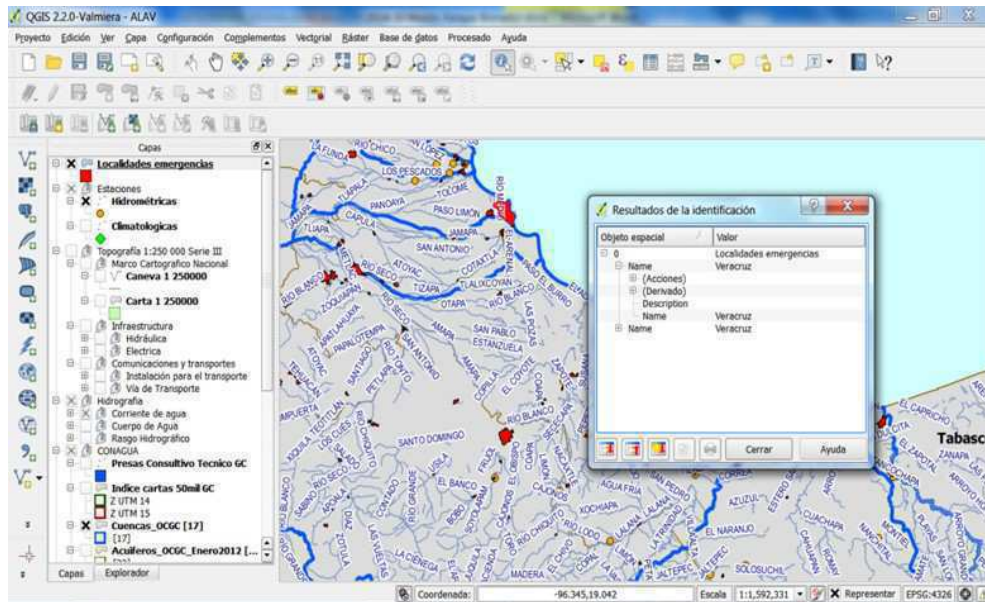


Figura 10.- Ejemplo de un proyecto SIG útil para la hidrología operacional

Los SIG se usan habitualmente como base de trabajo para gestionar la información fundamental, la caracterización del sistema hidrológico. Pero también hay aplicaciones que operan en tiempo real sobre fundamentos SIG, presentando resultados o realizando cálculos.

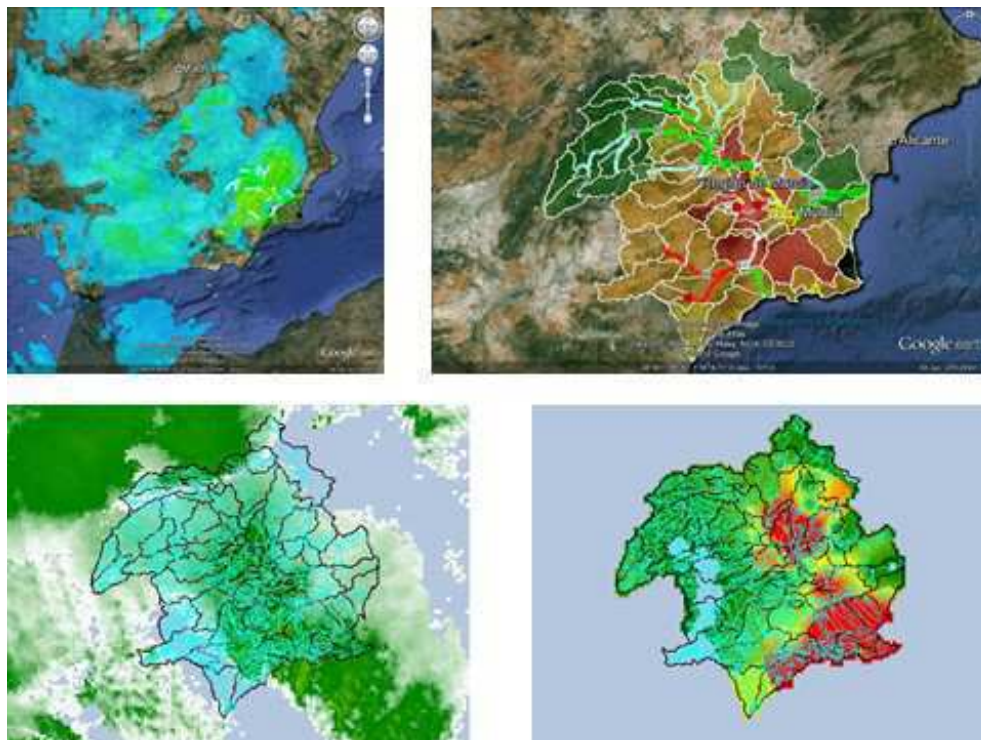


Figura 11.- Utilización de tecnología SIG en aplicaciones para uso en tiempo real. Caso de SIGAL (sistema de información para la gestión de alertas)

3.8.3 Modelos descriptivos de la realidad

Una base de datos y un SIG representan una realidad como modelos descriptivos de la misma, pero no alcanzan a ser retratos perfectos. Así, por ejemplo, al representar un tramo de río en un SIG con una línea, se está asumiendo una simplificación clara. Por ello, la solución a un problema, especialmente si desea basarse en algún tipo de modelación numérica de simulación o previsión, debe iniciarse por una reflexión sobre la representación que se hace del sistema hidrológico. Todo esto, con consideración de las cuestiones de error e incertidumbre en hidrología (capítulo 11) o con lo indicado en el apartado 3.7.1.

3.8.4 Nociones de programación

Aun cuando se cuente con un número elevado de herramientas informáticas para la solución de diferentes tipos de problemas, el hidrólogo siempre encontrará situaciones en las que tenga que llevar algunos trabajos no previstos. Cuando estas tareas impliquen manejos de grandes volúmenes de información o acciones repetitivas, la capacidad de programar dota al hidrólogo de una gran aptitud de solventar problemas que, sin esa habilidad, implicaría mucho tiempo.

A lo largo del tiempo los lenguajes de programación han ido evolucionando hacia formas que facilitan la escritura de algoritmos en un modo más "humano" y menos "digital". El programador puede describir procesos y trabajar con entidades en el código en correspondencia directa con las entidades del mundo real o de un modelo de la realidad. Así, los lenguajes de programación orientados a objetos están siendo muy usados. Se trata de programar con unas unidades de programación (los objetos) que cuentan con atributos (propiedades), métodos (acciones que pueden realizar) y eventos (sucesos a los que puede reaccionar, como acciones de teclado o una modificación en un archivo). El lenguaje dispone de una sintaxis que permite la comunicación entre objetos, tipo "[receptor mensaje: argumento]", y de posibilidades de herencia, mediante la cual un objeto se define a partir de otro, heredando sus propiedades y comportamiento (a través de sus métodos y eventos). El código aparece con partes abstractas "encapsuladas" en objetos sin necesidad de conocer los detalles de programación, de modo tal que al programador que usa un objeto le basta conocer para qué sirve y cómo se comporta. Estos lenguajes deben permitir el polimorfismo, gracias al cual objetos distintos respondan de modo al mismo mensaje (por ejemplo, el método "imprimir" puede ser reconocido por diferentes objetos).

Estos lenguajes pueden ser usados por programadores de niveles de especialización muy diversa, así que no es difícil que un hidrólogo adquiriera las capacidades suficientes como para estar en condiciones de solucionar muchos problemas programando.

En la siguiente figura se ilustra un ejemplo de solución para generación de productos hidrológicos (boletines y páginas web) desarrollado con conceptos básicos de programación. Se le denominó GENAPROFI (generador automático de productos hidrológicos basados en ofimática), se programó con VBA (Visual Basic para aplicaciones) y HTML (siglas de HyperText Markup Language, que se refieren a un lenguaje de definición de páginas web), y fue puesto en operación durante 2014 en el Centro Hidrometeorológico Regional de Tuxtla Gutiérrez (México).

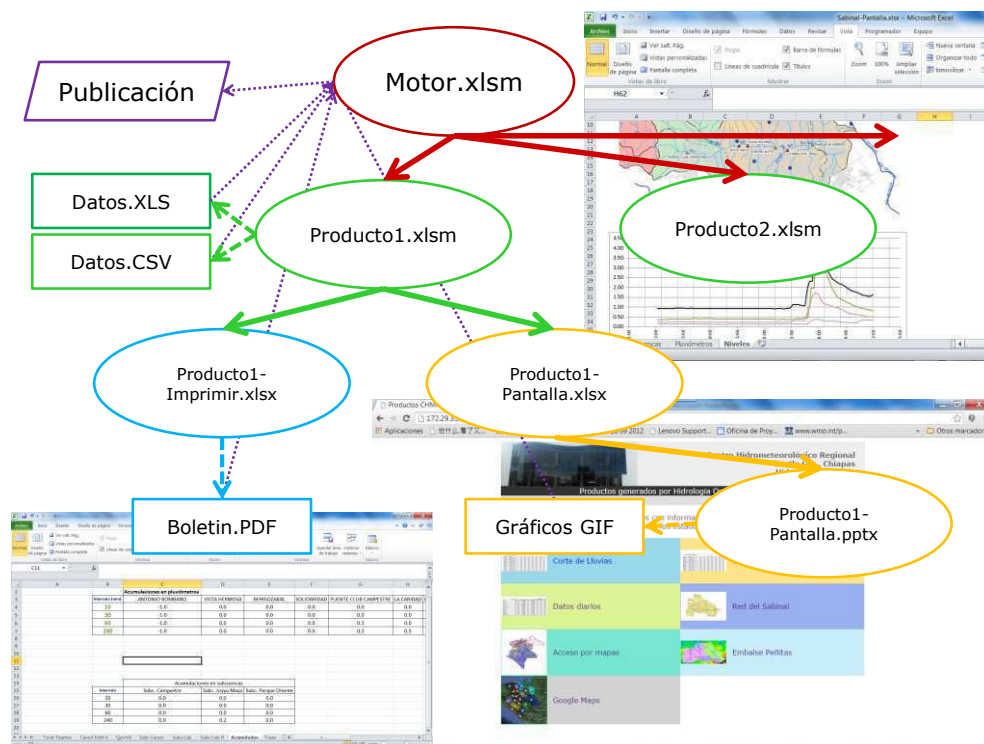


Figura 12.- GENAPROFI es un ejemplo de solución para generación de productos hidrológicos desarrollado con conceptos básicos de programación.

3.8.5 Organización de la información

La organización de la información y su correcta gestión es muy importante en hidrología operacional, principalmente por lo siguiente:

- Volumen de información.- El orden es una exigencia pues se requiere trabajar con grandes volúmenes de información y ésta debe estar fácilmente accesible.

- Coordinación.- La primera condición para coordinar un equipo de trabajo es que compartan información y herramientas, tratando de evitar, además, que se den "islas de información y recursos"
- Documentación.- Todos los trabajos deben ser debidamente documentados, para así asegurar su continuidad y su rigor. Además, la documentación tendrá valor en caso de que sea necesario justificar algo
- Eficacia y eficiencia.- Todo lo anterior se traducirá en eficacia y eficiencia elevadas.

Es común observar muchas dificultades, retrasos o errores en el desarrollo de trabajos que pueden evitarse con una buena organización de la información.

La información se puede organizar en una carpeta de centro, con sus correspondientes subcarpetas de modo tal que se estructuren todos los archivos de manera ordenada. Esta carpeta debería situarse en un dispositivo de almacenamiento accesible a todos los miembros del equipo de trabajo. Es importante que todos compartan esta información.

Las siguientes figuras reflejan, de manera orientativa, la organización que puede seguirse.

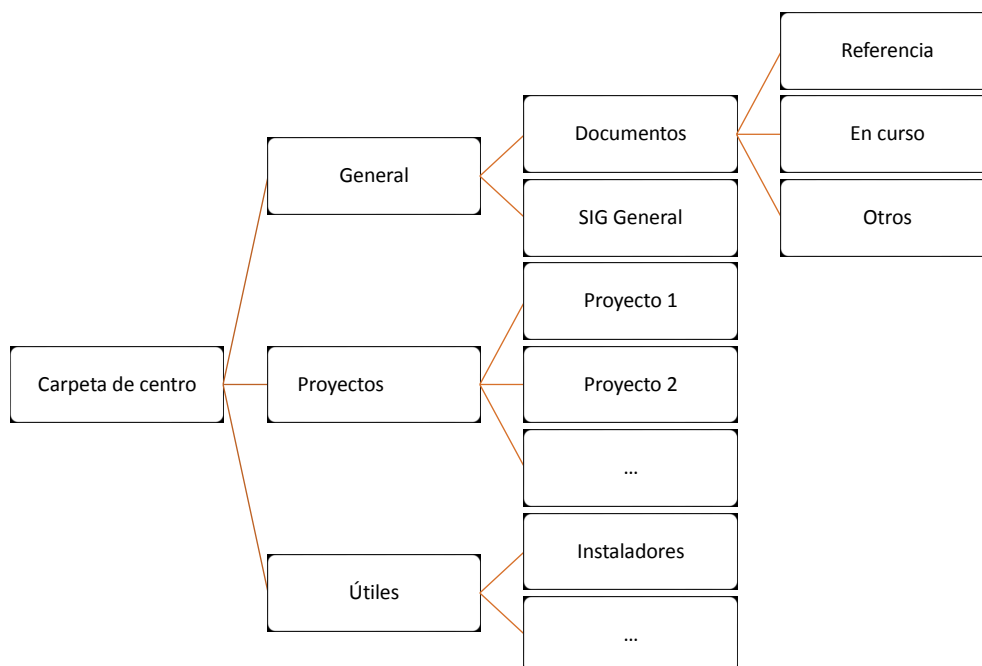


Figura 13.- Estructura principal de las carpetas de centro

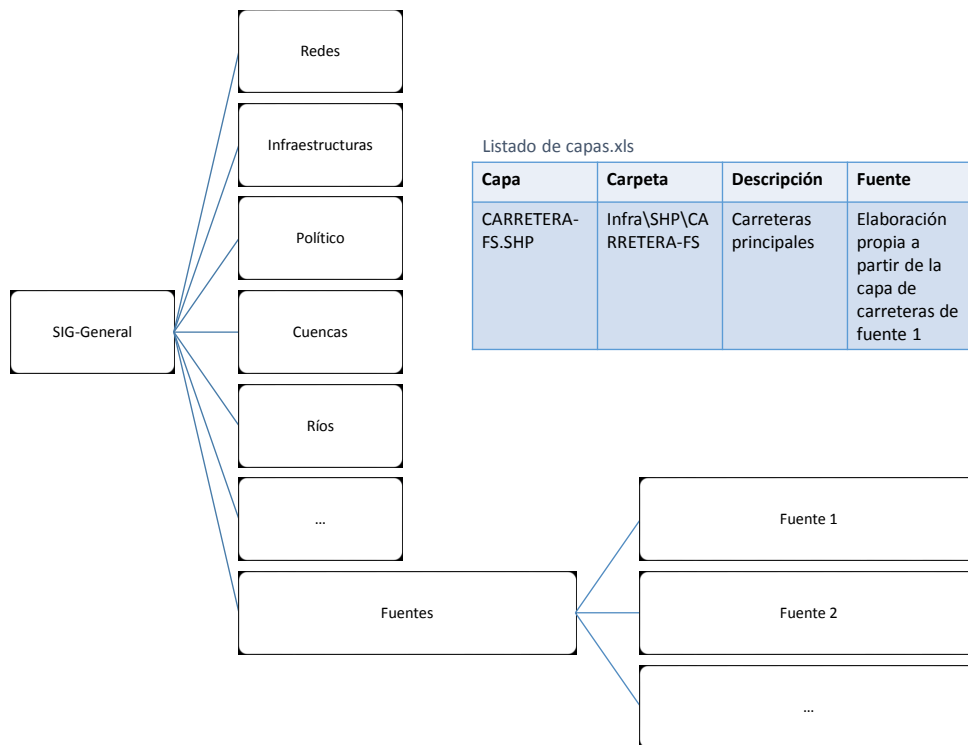


Figura 14.- Estructura de la carpeta SIG

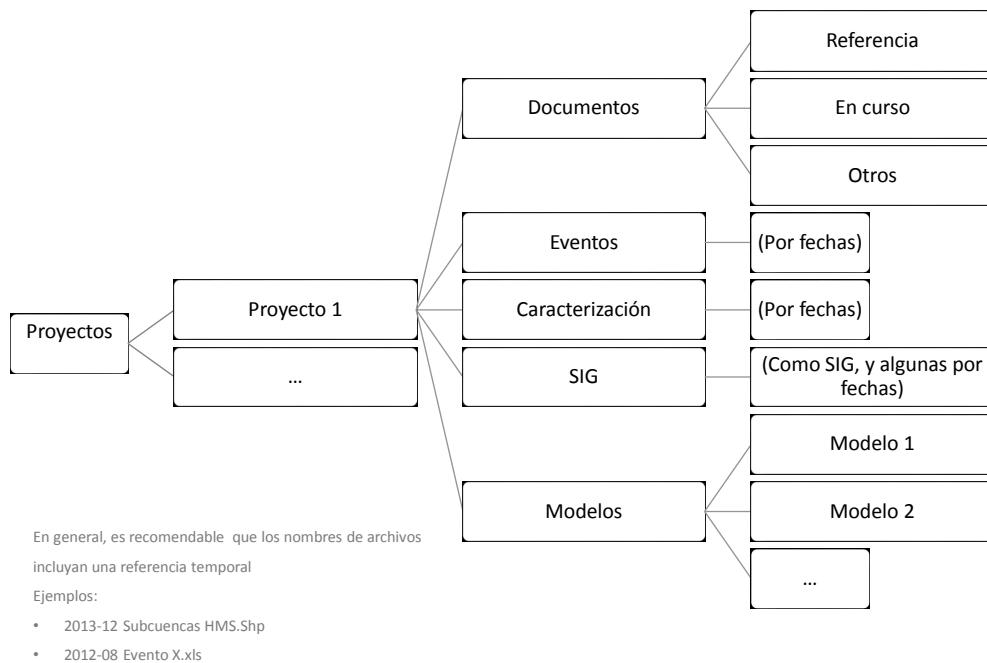


Figura 15.- Ejemplo de subcarpeta de un proyecto

4 Sistemas de medidas hidrológicas

En la base de todo sistema de información hidrológico está el sistema de medidas. La calidad y la utilidad de la información estarán determinadas por las características de esta base, por lo que debe ser bien diseñado y correctamente gestionado. Gran parte de las tareas del centro de proceso (apartado 2.5.2.2) y de los equipos de campo (apartado 2.5.3) estarán dedicadas a las labores de obtención de medidas y a sus tratamientos primarios. Los programas de operación y mantenimiento tratados en el apartado 2.6 se centrarán en este mismo objetivo: un buen sistema de medidas hidrológicas.

4.1 Clasificación de estaciones de medidas

Una estación de medida es una instalación en la que se pueden medir una o varias variables, en función de los elementos de medida con que se equipe.

El reglamento de la OMM [OMM, 2006] incluye la siguiente clasificación: a) estaciones hidrométricas; b) estaciones de aguas subterráneas; c) estaciones climatológicas y estaciones pluviométricas para fines hidrológicos, y d) estaciones hidrológicas para fines especiales.

Pero por razones prácticas en el diseño, mantenimiento y operación de redes, se recomienda la siguiente:

- Presas y embalses.- En las que se miden nivel de embalse y los caudales de salida (vertederos, desagües y tomas)
- Ríos.- Con el objetivo de medir nivel de la lámina de agua en cauces y calcular los caudales fluyentes.
- Conducciones.- Tanto en lámina libre (canales) como en conducciones cerradas
- Piezométricas.- Para el control de aguas subterráneas sobre la base de la medida de los niveles freáticos.
- Nivelógicas.- Incluyendo las distintas soluciones para medir precipitación sólida, y también las que se destinan a medir el espesor del manto de nieve y su densidad.
- Pluviométricas para fines hidrológicos.- Entendiendo que este tipo de estaciones tendrá únicamente un pluviómetro pues, dado el bajo coste de estos aparatos, es recomendable situar uno de estos aparatos en cualquiera de los otros tipos de estaciones anteriores.

- Climatológicas para fines hidrológicos.- En ocasiones, el conjunto de medidas necesarias para algunas aplicaciones hidrológicas puede incluir, además de precipitaciones, temperaturas u otras variables meteorológicas o climatológicas.

4.2 Diseño de una red hidrometeorológica

El diseño de una red hidrometeorológica debe tener en cuenta un gran número de condicionantes. Se trata de una tarea complicada que puede resultar en muchas soluciones posibles, todas ellas de igual utilidad. Antes de pasar a la fase de emplazamiento concreto de estaciones de medida, es necesario:

- Definir las funciones y objetivos de la red, puesto que el objetivo no será medir por medir, sino satisfacer algunas necesidades de información.
- Ajustar la solución a las posibilidades presupuestarias, no solo para la inversión inicial sino, muy especialmente, para el mantenimiento y operación (ver apartado 2.6)
- Profundizar en el conocimiento del área geográfica y del problema a solucionar, con especial dedicación a los rasgos climáticos y las características fluviales (transporte de sólidos, estabilidad de cauces, vegetación, etc.), pero sin olvidar infraestructuras hidráulicas, demandas, concesiones y regímenes de uso del agua. Debe tenerse en cuenta que las características de las infraestructuras de transportes, de comunicaciones y de suministro de energía serán condicionantes importantes al definir concretamente la red de medida, tanto en sus aspectos tecnológicos como en el emplazamiento de las estaciones.
- Considerar las características institucionales, con especial atención a lo relacionado con los recursos humanos (número, perfil, formación y experiencia), a los medios auxiliares con que se cuenta (informáticos y de comunicaciones, electrónicos, mecánicos y vehículos), incluso a los estudios hidrológicos que se dispongan.

Lo anterior será también condicionante para una de las decisiones fundamentales importantes en cuanto a los principales rasgos de la red de medidas: el nivel de automatización.

4.2.1 Nivel de automatización

Cabe distinguir la siguiente clasificación de estaciones en función del nivel de automatización:

- Manual.- Las lecturas se realizan de forma manual, con anotación en papel o transcripción a un ordenador
- Semiautomática.- Cuenta con sensores automáticos que almacenan datos en un soporte de almacenamiento digital de información en la estación. Es decir, cuentan con lectura y almacenamiento local automatizado, pero requieren recolección manual de los datos almacenados, mediante una visita al lugar y descarga de datos a un soporte de almacenamiento informático transportable.
- Automática.- Una estación es automática cuando, además de la lectura y el almacenamiento local (que puede ser mínimo), incorpora un sistema de comunicaciones que le permite transferir los datos a un centro de proceso de datos.

Los tres tipos de estaciones dan lugar a tres tipos de redes que pueden denominarse del mismo modo (aunque una red de estaciones automáticas es lo que habitualmente se denomina red de telemetria). La automatización total puede no estar completamente justificada (si la comunicación de datos implica un sobrecoste importante), y cabe distinguir un tipo de red mixta que incluye estaciones con distintos niveles de automatización según necesidades. Así, por ejemplo, las exigencias de muchos casos prácticos obligan a recurrir a sistemas de telemetria (completamente automatizados) por argumentos basados en el concepto de tiempo real (apartado 7.4), pues en otro caso no se tendría capacidad de respuesta temprana.

4.2.2 Subredes

Una red de medida puede concebirse como un conjunto de subredes, con estaciones que pueden considerarse como pertenecientes a una o a varias subredes a la vez. De forma general, cabe plantear dos subredes:

- Subred de recursos hídricos
- Subred de crecidas

Cada una de ellas estará asociada al seguimiento de fenómenos y problemas con diferencias claras en cuanto a escalas temporales, necesidad de tiempo de respuesta y densidad de estaciones. La red de crecidas puede exigir una automatización completa, para lograr los tiempos de respuesta que exijan los problemas reales. La subred de recursos exigirá, en general, un elevado número de estaciones pero sus datos no requieren una disponibilidad inmediata, por lo que las estaciones pueden ser semiautomáticas o manuales, o también automáticas pero con un sistema de

comunicaciones de menores prestaciones (y coste) que el que se exige a las aplicaciones para crecidas.

Las manuales tienden al desuso por el coste de la mano de obra (variable de unas zonas geográficas a otras) necesaria para su funcionamiento. Pero también las comunicaciones tienen un coste que puede ser considerable si dependen de un sistema propio (por inversión, operación y mantenimiento), aunque puede contratarse este servicio a precios que tienden a la baja a lo largo del tiempo.

4.2.3 Emplazamiento de las estaciones

La decisión sobre la situación geográfica de una estación de medidas es compleja, pues hay que atender a múltiples condicionantes. Hay herramientas informáticas o de cálculo, como los sistemas de información geográfica o la geoestadística, que pueden ser útiles, pero no proporcionarán la solución, pues no se trata de un problema científico y no admite solución matemática exacta, sino que se trata de un problema ingenieril que requiere el arte de la profesión.

En primer lugar, hay que partir del objetivo de la red que se diseña y del papel que desempeña en ella la estación concreta que se analiza, considerando la representatividad de la medida y la coherencia con la solución tecnológica que se elija para el caso. Pero también hay que tener en cuenta la accesibilidad del emplazamiento, que facilite el mantenimiento de la estación sin altos costos por transporte de personas y medios. Las condicionantes de comunicaciones (si la estación va a ser automática) y de energía pueden tener gran importancia, así como la estabilidad del lugar (fluvial, geológica o geotécnica), pues pueden repercutir en los costes de inversión, de mantenimiento y en la calidad de la información que se pueda obtener.

4.3 El centro de proceso de datos

Independientemente del tipo de red y del nivel de automatización de las estaciones, es necesario un centro de proceso al que se deriven todos los datos y donde se procesen. Sus funciones básicas serán:

- Recepción, validación y almacenamiento de datos.
- Gestión de los datos mediante diversas aplicaciones informáticas que permite analizar la evolución y estado actual del sistema hidráulico-hidrológico.
- Generación de productos para el apoyo en toma de decisiones

Se destacan las siguientes tareas:

- Cálculo de variables: los datos brutos enviados desde los sensores, se transforman en variables hidrometeorológicas utilizables por los especialistas.
- Almacenamiento de curvas asociadas y fórmulas: muchas variables se deducen a partir de curvas de relación de diferentes magnitudes físicas (por ejemplo, el caudal a partir del nivel en una estación de aforo). Estas curvas han de mantenerse actualizadas y calibradas.
- Validación y filtrado de datos, de modo que se pueda determinar si un dato recibido es correcto o no.
- Corrección de datos, cuando sea posible.
- Almacenamiento, acceso rápido y creación de copias de seguridad de información.
- Análisis y mantenimiento de episodios hidrológicos singulares.
- Procesado y cálculo de variables hidráulicas y de comportamiento del sistema a partir de modelos matemáticos.
- Recuperación rápida de la información, consulta y elaboración de informes.
- Presentación comprensible de la información, tanto de forma numérica como, sobre todo, gráfica.
- Difusión de la información, o disposición de medios para que los usuarios puedan acceder a los datos.
- Funciones de índole administrativa que posibilitan la coordinación entre el personal del centro de proceso y el personal exterior de mantenimiento y operación.
- Funciones de acceso remoto a datos desde cualquier punto exterior al centro de proceso. Aparte de lo relacionado a la difusión pública de datos, puede ser necesario habilitar el acceso a variables de control del sistema para facilitar labores de operación y mantenimiento.
- Supervisión y diagnóstico de la red de comunicaciones de modo que se puedan detectar averías o un posible funcionamiento anómalo del sistema.
- Funciones de vigilancia del entorno del propio centro: control de temperatura, control de incendios, control de alimentación eléctrica, control de intrusismo, etc.

4.4 Estaciones de medida

Las estaciones tradicionales que se operan manualmente cuentan con instrumentos simples, como pluviómetros con colector (en el que se mide la altura de agua almacenada) o reglas graduadas parcialmente sumergidas en ríos o en

embalses para medir el nivel de agua. Los datos que se recopilan así son acumulaciones diarias, caso de las precipitaciones, o valores instantáneos en una hora determinada del día, caso de los niveles. El siguiente paso en la evolución de los sistemas de medidas hidrológicas fueron instrumentos de registro continuo en papel, como los limnógrafos y los pluviógrafos. Los datos almacenados por escritura de un gráfico sobre un tambor giratorio con papel podían traducirse a valores de medida. Actualmente, la electrónica no justifica el empleo de estos instrumentos, aunque por causas legales o administrativas han perdurado coexistiendo con sistemas de digitalización automática. En un apartado posterior se indican algunos sensores para medir éstas y otras magnitudes.

Aunque se opte por sistemas automáticos para la medida de niveles de agua, el empleo de reglas graduadas es aconsejable, pues son útiles para comprobar el funcionamiento de los sensores automáticos, por simple inspección visual, y para mantener el cero de la escala.

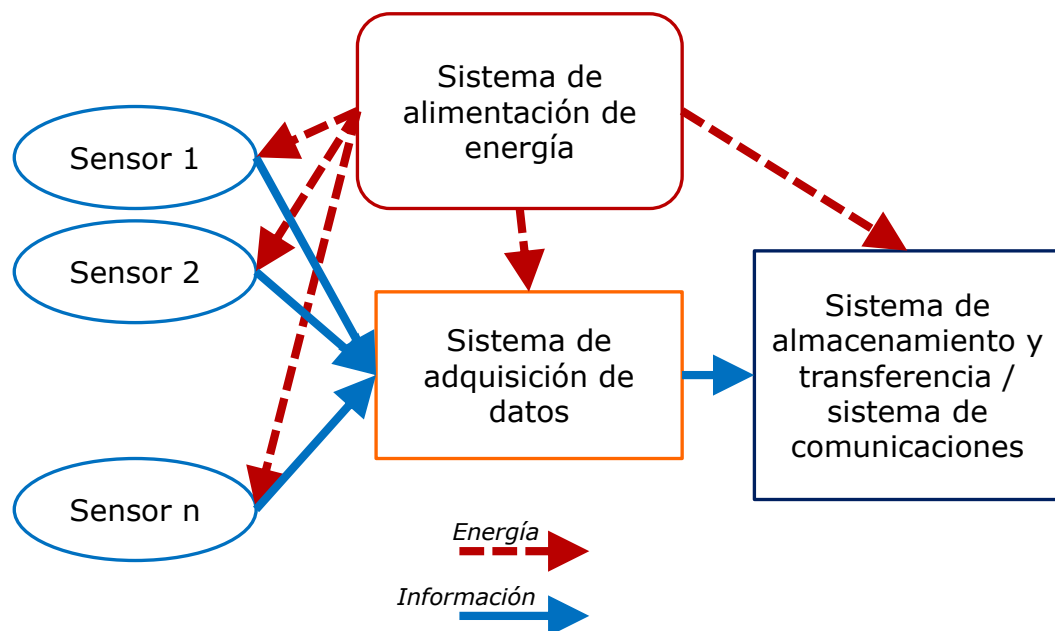


Figura 16: Esquema de una estación de medida automática o semiautomática

Las estaciones pueden estar dotadas de uno o varios sensores, según las magnitudes que se desee medir, cuyas medidas son recogidas gracias a un sistema de adquisición de datos. Los valores se almacenan en un sistema, denominado "data logger", que admite después su transferencia a algún dispositivo u ordenador, o bien son enviados directamente a un centro de proceso por medio de algún sistema de comunicación de datos (Figura).

4.4.1 Sensores habitualmente empleados para algunos tipos de medida

Cada magnitud hidrológica puede ser medida de diversos modos. En general, hay gran número de dispositivos o elementos para medir. A continuación se describen algunos de los sensores que pueden encontrarse en estaciones automáticas. Algunos de los que aquí se incluyen pueden considerarse raros u obsoletos, pero sirven a modo de ejemplo y pueden encontrarse en funcionamiento. Las soluciones basadas en microondas y en radar, que se usan tanto para medir longitudes como para velocidades, son ejemplos destacables de la importancia de los avances tecnológicos en esta disciplina. Ambos han estado relacionados con la evolución de la electrónica y con el abaratamiento de la misma, en particular la de la electrónica de alta frecuencia que ha facilitado que el radar sea utilizado en la hidrología con costes relativamente bajos.

4.4.1.1 Medida de giros y desplazamientos. Posición de válvulas y compuertas

Por lo general, la medida de desplazamientos de algún elemento se realiza convirtiendo mecánicamente estos movimientos en giros, por lo que suelen emplearse soluciones del tipo pendular: una carcasa se fija en el elemento cuyo giro se desea medir, en cuyo interior hay un disco que se mantiene en la misma posición gracias a una masa pendular. El giro puede medirse de diferentes formas:

- Sistema potenciométrico: Mide la posición de la carcasa en función del valor de la resistencia eléctrica del potenciómetro.
- Mecánicos: Formados por un conjunto de levas que accionan unos contactos.
- Ópticos: Detectan la posición del elemento giratorio por un mecanismo electroóptico.
- Capacitivos: El cambio en la posición angular del elemento giratorio se transmite a un condensador diferencial cuya capacidad, magnitud que se mide, es función del ángulo.
- Potenciométrico: Miden la posición de un elemento giratorio en función de la resistencia eléctrica del potenciómetro regulado por el giro de dicho elemento.

4.4.1.2 Alturas de lámina de agua en embalses

En los embalses hay que realizar medidas de alto rango, de decenas metros, y también de precisión, del orden del centímetro, por lo que a los sensores de nivel en embalses se les exige más que a los de medidas en ríos.

- Sondas de cuarzo sumergidas: Cuentan con un oscilador de cuarzo cuya frecuencia varía con la presión que se ejerce sobre él.
- Sondas de cuarzo con instalación hidrostática y neumática: Una instalación neumática con un compresor proporciona suministro de aire a un tubo, uno de cuyos extremos está sumergido y el otro transmite la presión a la sonda de cuarzo, que se encuentra en el exterior.
- Balanzas con instalación hidrostática: Un contrapeso se desplaza por el brazo de una balanza para equilibrar el efecto de la presión de la columna de agua.
- Sistema de flotador y contrapeso: Sistema de poleas en el que un tambor con contrapeso adopta una posición en función del giro de otro tambor, de mayor diámetro para evitar la inmersión del contrapeso, en el que se enrolla el cable unido al flotador.

4.4.1.3 *Altura de lámina de agua en ríos*

El nivel de exigencia para los instrumentos de medida en los ríos suele ser algo menor que para las medidas en embalses, aunque se usan las mismas tecnologías o similares:

- Sistemas de boya y contrapeso: Un sistema simple de boya y contrapeso unidos por una cadena que rodea una polea, con un sensor que mide su posición. Necesita un pozo tranquilizador.
- Piezorresistivos: La presión del agua modifica la curvatura de una membrana de silicio cristalino, lo que afecta a su conductividad eléctrica. Generalmente miden presiones absolutas, por lo que ha de descontarse la presión atmosférica, aunque hay sistemas de este tipo que miden de forma diferencial.
- Neumáticos compactos: La presión es transmitida a la membrana de silicio cristalino a través de un sistema neumático de aire comprimido por burbujeo en el extremo de un tubo sumergido.
- Ultrasonidos: Una unidad electrónica calcula la distancia entre el sensor de ultrasonidos y la lámina de agua, en función del tiempo que tarda una onda de ultrasonidos desde que es emitida hasta que es de nuevo recibida, tras la reflexión en el agua, y de su velocidad de propagación. Hay que tener en cuenta que la velocidad de propagación del sonido en el aire depende de la temperatura de éste, por lo que son necesarias correcciones (con el uso de un termómetro o con un arco de corrección)
- Radar: De funcionamiento análogo al del sensor de ultrasonidos, pero con la ventaja de usar ondas de longitud menor, con lo que la medida es más precisa

y no se ve afectada por las condiciones meteorológicas (niebla, polvo, viento, etc).

Tanto la solución de ultrasonidos como la de radar pueden ser usadas también en embalses. Hay que tener en cuenta que la precisión de las medidas es proporcional a la distancia que recorre el haz y a la longitud de onda. Como orden de magnitud y en la práctica hidrológica, cabe esperar errores del 0.1 % del camino del haz en el caso de los ultrasonidos y del 0.05 % en el caso del radar.

4.4.1.4 *Medida de velocidad del agua en ríos y canales*

El cálculo de un caudal puede realizarse a partir del dato de nivel y suponiendo una relación entre ambas magnitudes. Pero, en muchas ocasiones, esta relación puede no ser bien establecida o no ser biunívoca, lo que obliga a medir la velocidad del flujo.

- **Ultrasónicos:** se basan en el cálculo de la velocidad en función de la diferencia del tiempo de propagación de una onda de ultrasonidos en el sentido del flujo y en el contrario. Necesitan por tanto dos sondas emisoras-receptoras. Cada par de sondas mide la velocidad para una cota, por lo que suele ser necesario instalar varios pares para cotas diferentes, además del siempre necesario sensor de nivel para calcular el caudal.
- **Perfiladores ultrasónicos:** se usan para aforos directos (ver apartado 4.5) y también en instalaciones fijas. Emplean una tecnología de pulsos en varias frecuencias que les permite estimar velocidades medias en celdas de la sección transversal del flujo.
- **Radar sin contacto:** la emisión de un haz de ondas de alta frecuencia con un cierto ángulo con respecto al flujo de agua permite estimar la velocidad superficial (en un área pequeña), al compararla con el rebote. Una tecnología similar puede usarse con emisiones láser.
- **Electromagnéticos:** se basan en el principio de la ley de Faraday de la inducción, calculando la velocidad en función de la corriente inducida en el seno del líquido (que debe ser algo conductor) por un campo magnético perpendicular a la corriente. La medición se realiza con una espira paralela a la corriente.

4.4.1.5 *Medida de velocidad del agua en conducciones cerradas*

Las dimensiones o material de la conducción aconsejará un tipo de instrumento, pero los más usados son:

- **Ultrasónicos:** Tienen el mismo principio de funcionamiento que los sensores ultrasónicos en conducciones abiertas, necesitando para su instalación un tramo recto de conducción en el que se sitúan emisor y receptor a cierta distancia y ángulo.
- **Electromagnético:** La medida de la inducción se realiza con un carrito que sustituye a un tramo de conducción.

4.4.1.6 Medida de precipitaciones

- **Pluviómetros de balancín:** La precipitación líquida es recogida sobre una superficie cónica y dirigida a través de un orificio a un recipiente que bascula. El llenado y vaciado sucesivo obliga a la oscilación del balancín, lo que proporciona la medida del volumen de precipitación en función del tiempo.
- **Pluvionivómetros por calefacción:** Para poder medir precipitaciones sólidas se dota al pluviómetro de un sistema de calefacción que caldea la superficie receptora y la funde, lo que permite medir la cantidad de agua equivalente. Tienen un alto consumo energético.
- **Pluvionivómetros por peso:** Se sustituye el cono de recepción por un depósito con solución anticongelante. La medida de la precipitación se realiza por el incremento de peso.

4.4.2 Precisión de las medidas

Los aparatos de medida cuentan con especificaciones del fabricante sobre la precisión de la medida. Esta precisión se obtiene en circunstancias especiales de laboratorio que sirven para comparar dispositivos, pero nunca deben confundirse con la precisión real de la medida que puede obtenerse en campo, en un caso real de aplicación. Deben considerarse tanto la naturaleza de aquello que se desea medir como las condiciones en que se haga.

La naturaleza de la precipitación es muy variable en espacio y las medidas se realizan sobre una superficie muy pequeña que después se extrapola a un área mucho más grande (millones de veces mayor). Es decir, el valor de una medida puntual se aplica a una gran superficie. Aunque fuese posible medir exactamente en un punto, la naturaleza aleatoria de la precipitación lleva a un error considerable. Se asume que es imposible medir con un error inferior al 10 %.

El nivel de un río o de un embalse en un punto está afectado por ondulaciones en superficie de varios tipos, desde las provocadas por el viento hasta las asociadas al

flujo. Hay que empezar por plantear la cuestión relacionada con el nivel que se mide y el que se desea medir: un valor medio en el tiempo, un valor máximo, ... También hay que tener en cuenta la naturaleza puntual de esta medida que será representativa de un área o tramo. Incluso la lámina de un embalse puede no ser completamente horizontal, como generalmente se supone.

La medida de velocidad es aún más compleja, y hay que asumir que se cuenta solo con la posibilidad de conocer valores medios a lo largo de una línea o en una cierta área, o medir valores puntuales. También hay métodos que se basan en medir la velocidad superficial. En cualquier caso, son muchas las hipótesis en que se basan los cálculos de velocidad y hay gran incertidumbre e imprecisión.

También hay que tener en cuenta que en un río pueden darse circunstancias concretas que añaden otras fuentes de errores. La geometría del cauce no es invariable, las secciones transversales y el perfil longitudinal cambian por arrastres, sedimentaciones y cambios en la vegetación. En situaciones de crecida, estos cambios son rápidos, imprevisibles e imposibles de medir. Y en el caso de que el transporte de sólidos sea importante, el flujo de líquido será alterado sensiblemente.

4.4.3 Elementos auxiliares

Los elementos principales de una estación de medida son los sensores, pero otros forman parte de la estación, entre los que se destacan los de los siguientes apartados.

4.4.3.1 *Sistemas de alimentación de energía*

El instrumental de la estación de medida tiene un consumo energético que ha de ser satisfecho de alguna forma. Cuando ello es posible, suele efectuarse un enganche a la red eléctrica convencional, pero en otros casos se recurre al empleo de paneles fotovoltaicos o a pequeños generadores eólicos.

En cualquier caso, se dispone un conjunto de baterías que garantizan una reserva energética, a usar durante un cierto periodo de tiempo en caso de fallo en el sistema de alimentación. Incluso algunas estaciones pueden funcionar sólo que baterías que hay que sustituir o recargar cada cierto tiempo.

4.4.3.2 *Sistemas de protección*

Las estaciones han de contar con protección ante el efecto de los rayos, lo que se consigue con soluciones de tipo pararrayos, tomas de tierra y sistemas de desconexión de la red manual o automático.

Quizás en este punto hay que incluir el problema del vandalismo, ante el que no caben soluciones preventivas realmente efectivas. En la práctica habrá que conformarse con alarmas de aperturas de puerta o similares que, al menos, dejen constancia instantáneamente del hecho ocurrido.

4.4.4 Sistemas de comunicación de datos

Las primeras redes de telemedida fueron implementadas a menudo con una red de telecomunicaciones terrestres vía radio creadas específicamente para este fin (con los consiguientes costes de inversión y mantenimiento). También han sido usados los satélites de comunicaciones y los geoestacionarios de observación meteorológica. Más recientemente, la expansión de Internet y de la telefonía móvil ha abierto la posibilidad de transmitir los datos por medio de las redes públicas.

A la hora de elegir una solución, debe tenerse en cuenta el uso que se va a dar a cada estación, las exigencias en cuanto a disponibilidad (desfase temporal y garantía de no fallo, principalmente) y los costes de inversión, operación y mantenimiento. En el caso de que la estación esté destinada a aplicaciones en situaciones de crecida, también debe tenerse en cuenta que los sistemas de comunicaciones pueden verse saturados por el uso o afectados por las condiciones meteorológicas.

4.4.4.1 Vía radio

Estas redes se basan en enlaces entre puntos con conexiones a través de ondas en las bandas VHF o UHF (enlaces de microondas). A menudo, son necesarios puntos de concentración o repetidores para lograr enlaces de distancias largas. Una red de este tipo adquiere una topología arborescente, aunque en ocasiones dicho esquema se rompe para lograr varios caminos posibles para el flujo de información (creando un cierto mallado de la red).

Estas redes vía radio ofrecen la posibilidad de contar con un sistema propio e independiente de comunicación de voz.

4.4.4.2 Vía satélite

Los volúmenes de información que genera una estación de medidas hidrológicas son pequeños para justificar ciertos enlaces vía satélite. Incluso los terminales VSAT (very small aperture terminal) ofrecen un ancho de banda muy grande que es infrutilizado, aunque van apareciendo sistemas cada vez más económicos para flujos pequeños.

Algunos satélites meteorológicos ofrecen comunicaciones de datos que son muy usadas en algunas regiones.

Este sistema se configura topológicamente a modo de estrella, en la que la comunicación de cada estación con el centro de proceso es independiente.

4.4.4.3 *Conexión directa a redes públicas*

La conexión por cable a través de las redes públicas puede tener grandes ventajas económicas y de operación. Puede que en algún caso se pueda optar incluso conectar la estación a una red sin cables (wi-fi). Aunque esto puede no ser posible en la mayoría de los casos por la situación geográfica de la estación, un enlace intermedio puede ser una solución. No obstante, la extensión de la telefonía móvil hace posible conectar, con algunas de las tecnologías que ofrece (GSM, 3G, etc), puntos lejanos de los núcleos de población.

4.4.4.4 *Soluciones mixtas*

No es necesario concebir una red de telemedida con un sistema de comunicaciones de datos común a todas las estaciones. Al contrario, la selección del sistema de transmisión de datos de cada estación debe ser evaluado según las características de ésta, de su situación geográfica y de las opciones disponibles para ella, y, sobre todo, de la responsabilidad o importancia de las medidas que proporciona, es decir, del objetivo específico de la estación. La racionalidad aplicada a la concepción de una red de medidas hidrológicas llevará a un tratamiento singular de cada estación.

4.5 **Instrumentos y métodos para aforos directos**

Los sensores para las estaciones de medidas tienen un carácter de emplazamiento fijo y funcionamiento continuo. Pero en las estaciones hidrométricas más comunes, por razones técnicas o económicas, se miden niveles y después se calculan los caudales con el uso de una curva o tabla que relaciona niveles y caudales, que se suele denominar curva de gasto. Las soluciones teóricas no proporcionan un buen ajuste de dicha curva de gasto, por lo que es necesario realizar medidas de velocidades en la sección y con ellas calcular el caudal, aunque sea de forma puntual en el tiempo y los resultados se correspondan con unas condiciones concretas (eventuales) del flujo. Esta operación (aforo directo) requiere instrumental específico para el trabajo de campo y material auxiliar en oficina para los cálculos correspondientes.

Los instrumentos de campo más usados son:

- Molinetes.- Los instrumentos tradicionales de fundamento mecánico, con una hélice cuyas revoluciones se asocian a una velocidad de flujo. La hélice puede ser de eje vertical u horizontal
- Perfiladores Doppler.- Son instrumentos modernos, denominados ADCP (acoustic Doppler current profiler), basados en ondas ultrasónicas y con importantes ventajas prácticas con respecto a los molinetes. Se puede realizar el trabajo de forma muy rápida, por lo que son especialmente interesantes en cauces grandes. Cuentan con dificultades en caso de transportes sólidos importantes, tanto en suspensión como en fondo (caso de ríos con gran proporción de arenas en el lecho), y también, en el caso extremo, cuando el agua está muy limpia.

El problema de la estimación de la relación nivel-caudal y su manejo encierran grandes dificultades (ver capítulo 10).

El conjunto de herramientas para los aforos directos requieren ajustes y revisiones periódicas. Así, los molinetes necesitan tarados, los cuales pueden hacerse en canales de ensayos hidráulicos.

4.6 Mantenimiento y operación de redes de medida

Las redes de medida exigen programas de mantenimiento, con tareas que pueden ser calificadas como acciones de operación, pero ambos tipos (operación y mantenimiento) están fuertemente vinculados por su naturaleza y porque ambos son necesarios. Estas funciones son las que consumen la mayor parte de los recursos de un servicio hidrológico y condicionan en buena parte su estructura y organización (capítulo 2). Por ello, su análisis merece esfuerzos especiales que concluya en el acierto derivado de decisiones importantes.

4.6.1 Programas de mantenimiento

La calidad de la información y la garantía de disponibilidad de datos, cuando se necesitan, dependerán mucho del acierto en la implementación de programas de mantenimiento.

El objetivo final del mantenimiento es asegurar el perfecto estado de todos los elementos del sistema.

Algunas soluciones tecnológicas para el diseño de redes de medida pueden tener sentido cuando se considera el mantenimiento, pues algunas inversiones iniciales en la instalación pueden implicar ahorros considerables posteriores (apartado 2.6).

4.6.1.1 Tipos de mantenimiento

Hay dos tipos de acciones o tareas de mantenimiento:

- Preventivas o programables
- Correctivas o no programables

La programación de actuaciones se hace sobre la base de aquellas que tienen carácter preventivo, que son especialmente importantes pues tratan de evitar que se produzcan averías o mal funcionamiento. Las acciones correctivas son aquellas que responden a una incidencia no prevista de avería o daño. Los presupuestos y la definición de prioridades en las tareas deben contemplar ambos tipos de actuaciones.

4.6.1.2 Singularidades del mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo incluirá actuaciones de tipo reparación o de tipo reposición. Aunque, en ocasiones, la reparación puede consistir en tareas tan simples como reiniciar un elemento electrónico (que se realizará in situ si no hay posibilidad de telemando).

En general, son inevitables, como lo son las causas imprevistas que lo motivan: robos, vandalismo, efecto de tormentas, etc.

El mantenimiento correctivo tendrá prioridad siempre sobre el preventivo, por lo que alterará el programa de este último.

La detección de la necesidad de actuación es muy importante en el mantenimiento correctivo, lo que puede lograrse por:

- Medios automáticos de autodiagnóstico
- Detección de problema en mantenimiento preventivo
- Por aviso de personal propio o ajeno
- Por otro medio de información

4.6.1.3 Tiempos de respuesta

Las singularidades del problema hidrológico para el que se toman las medidas, especialmente en cuanto a las necesidades de información y de su inmediatez, serán condicionantes importantes en el establecimiento de los tiempos de respuesta

exigibles al mantenimiento correctivo. Pero hay que considerar que tiempos menores tendrán costes mayores. Por ello, es conveniente un análisis de este aspecto, y definir niveles de importancia de los elementos del sistema y calificaciones de la avería. La combinatoria de ambos atributos puede dar lugar a unas tablas de tiempos de respuesta para zonas o subsistemas, o bien una única regla general a aplicar a toda la red de medidas y sistemas asociados.

4.6.1.4 Taller, almacén y laboratorio

La única forma de asegurar una capacidad de respuesta en situaciones de avería es disponiendo de materiales de repuesto en un almacén (ver también el apartado 2.5.4). Es recomendable que este almacén cuente con posibilidades de realizar algunas reparaciones, al menos de algunos elementos, y puede servir también como laboratorio de pruebas.

En ocasiones es conveniente situar varios almacenes, repartidos por el territorio, según los tiempos de respuesta que se desee en caso de avería. Esto puede definirse considerando zonificaciones con distintos tiempos, en función de la naturaleza del problema. Las infraestructuras de transporte por carretera son un factor clave en la logística de este problema.

La solución final se basará en equilibrar un presupuesto con unas garantías de funcionamiento. Unas exigencias altas en cuanto a disponibilidad de información y tiempos de respuesta implicarán unos costes mucho más altos que con propósitos más moderados. En esto debe tenerse en cuenta que las relaciones no son lineales.

4.6.1.5 Movilidad y flota de vehículos

No sería raro encontrar una interrupción en el mantenimiento de infraestructura, de una administración, porque no se cuenta con fondos para dietas (para el desplazamiento del personal que tiene que viajar para hacer la visita que corresponda). Esta penosa situación, cuya consecuencia es una deficiencia funcional importante, debe evitarse a toda costa. Es un suceso obviamente inadmisiblesi se desea contar con un servicio hidrológico capaz.

Por lo mismo, es necesario contar con vehículos del tipo apropiado y en cantidad suficiente para realizar los trabajos de campo. Para algunas visitas puede bastar un vehículo utilitario normal, pero para otras (dependiendo de la situación, tipología del punto y de la labor a realizar) es necesario un vehículo especial (un todoterreno con suficiente capacidad de carga y arrastre en remolque, por ejemplo).

Estos gastos y medios deben ser previstos y, en caso de externalización, deben aparecer claramente especificados en número y coste.

4.6.1.6 Equipos de trabajo (brigadas)

Es conveniente diferenciar entre grupos de trabajo en campo según las labores encomendadas, las cuales exigirán a su vez unos perfiles profesionales específicos. Dentro de un programa de operación y mantenimiento cabe recomendar los siguientes:

- Mantenimiento de equipos
 - Preventivo
 - Correctivo
- Aforos
- Mantenimiento de instalaciones

Para la totalidad de un servicio hidrológico hay que considerar lo indicado en el capítulo 2

4.6.1.7 Especificaciones de tareas por puntos de medida

Las tareas a realizar en las labores de mantenimiento preventivo (limpieza, pruebas, calibraciones, ...) deben ser claramente especificadas según el punto que haya que visitar. Al menos, aunque no se especifique por cada estación de medida, sí deben darse especificaciones por grupos que atiendan a los tipos de sensores que incorpora, a sus equipos auxiliares y a su obra civil asociada.

4.6.2 Programas de operación

En las tareas de operación suelen considerarse las de captación, recepción, proceso, tratamiento y validación de los datos hidrológicos recibidos a través del sistema, como las más básicas. Pero también la elaboración de informes, la calibración y uso de modelos, la gestión de la información geográfica y los trabajos topográficos se consideran parte importante.

En caso de externalización (terciarización), se buscará apoyo a las labores propias del departamento, tanto en situaciones ordinarias como en las extraordinarias. De este modo pueden solventarse limitaciones en las plantillas fijas o estatutarias.

4.6.3 Aforos

Los aforos directos (capítulo 10) pueden considerarse parte de las tareas de operación y mantenimiento. Debe asegurarse, al menos, la realización de 2 aforos al año en cada estación (dependerá de sus características). Los trabajos completos incluyen tareas en campo y en oficina, para la definición de las curvas de gasto. En el caso de que las estaciones incluyan medidor de velocidad, los aforos directos facilitarán la comprobación y el ajuste (si procede) de los parámetros correspondientes para el cálculo de caudales.

4.6.4 Medios auxiliares

En un programa de operación y mantenimiento hay que contar con un elevado número de medios auxiliares que deben ser valorados previamente a la asignación de recursos. Además de lo relacionado a vehículos, hay que considerar que hay necesidad de elementos eléctricos, electrónicos, mecánicos, útiles de limpieza o consumibles y auxiliares de informática y comunicaciones. Y también hay que incluir vestuario o elementos auxiliares de trabajo que contribuyan a la seguridad y salud en el trabajo.

4.6.4.1 Medios para la hidrometría

En este apartado tiene gran importancia todo lo relacionado con el material necesario para la hidrometría, que puede incluir barcas, tornos, perfiladores, molinetes, remolques, cabrestantes, vestuario, ...

4.6.5 Reposición, sustitución y renovación de elementos

En ocasiones, será necesario reponer elementos sustraídos o perdidos (por efecto de una avenida, por ejemplo). En otras, un elemento averiado tendrá que ser sustituido por otro que funcione correctamente. Pero hay que tener en cuenta que la tecnología de las medidas hidrológicas evoluciona, por lo que cabe la posibilidad de la obsolescencia de alguna parte. Incluso cabe la posibilidad de que mantener un equipo antiguo durante un tiempo (un año, por ejemplo) sea más caro que comprar otro nuevo que lo sustituya, por lo que puede ser recomendable la renovación. Esto no es raro en el caso de equipos electrónicos.

4.6.6 Mejoras tecnológicas

En un mundo en continua evolución tecnológica (apartado 2.6), es recomendable considerar unas partidas anuales para mejoras tecnológicas del sistema, con motivo

tanto de mejorar su eficiencia y su eficacia, como para evitar cambios drásticos en un futuro (causados por una obsolescencia que lleve a un funcionamiento deficiente o a unos costes absurdos). Esta necesidad de adaptación puede ser satisfecha con la inclusión de una solución en los programas de operación y mantenimiento.

4.6.7 Circunstancias excepcionales

La definición de circunstancia excepcional que justifique un servicio 24/7 (ver apartado 2.5.6) debe ser establecida teniendo en consideración el coste de mantener esta disponibilidad de recursos humanos. Esto puede hacerse en función de un protocolo que se base en medidas o previsiones, aunque siempre habrá que asumir la necesidad de la decisión de un sujeto con responsabilidad asociada a sus funciones.

4.6.8 La importancia de los inventarios

En la puesta en práctica de programas de operación y mantenimiento se evidencian las malas consecuencias de las deficiencias en orden y método. Por ello se le concede una gran importancia a la gestión de la información y la documentación (ver apartados 2.12, 3.8 y 4.7). Los inventarios de medios y recursos son necesarios para mantener el orden. Además, en caso de externalización, formarán parte muy importante del contrato en protección de ambas partes: del propietario (la administración) para que se mantenga la calidad de las instalaciones, y del adjudicatario (la empresa) para no asumir gastos que no le corresponde por medios inexistentes o en malas condiciones. Por ello, el inventario debe ser detallado e incluir información del estado de los elementos. Al menos, se especificarán los siguientes:

- Puntos de medida
 - Sensores
 - Comunicaciones
 - Sistemas de alimentación de energía y de protección eléctrica
- Red de comunicaciones
 - Datos
 - Voz
- Obra civil
 - Casetas, postes de conducción eléctrica, soportes de sensores, pasarelas, cerramientos, estructuras de paneles solares,...
- Centro de proceso de datos
 - Ordenadores, almacenamiento y software
 - Comunicaciones

- Sistemas antiincendios, control de temperatura, aire acondicionado
- Laboratorio-taller
 - Repuestos
 - Herramientas

4.6.9 Seguridad y salud en el trabajo

Sobre todo en el caso de las labores de mantenimiento, es recomendable tener en consideración la posibilidad de que algunas labores impliquen algún riesgo para la seguridad o la salud de los trabajadores. Por ello, es recomendable la elaboración de estudios de seguridad y salud en el trabajo, lo que puede ser obligatorio por ley en algunos países. Sin entrar en detalles de esta tarea (que pueden estar condicionados por normativa específica de cada país), se debe desarrollar sobre una base como la reflejada en los siguientes puntos:

- Identificación de riesgos
 - Según tipo de trabajo
- Medidas de protección y normas básicas
- Evaluación de riesgos
 - Tabla de actividad y graduación de riesgos
- Formación
- Medicina preventiva y primeros auxilios
 - Botiquines
 - Asistencia a accidentes
 - Reconocimiento médico
- Trabajos especiales

4.6.10 Gestión

La gestión de un programa de operación y mantenimiento es compleja y requiere una buena organización (orden y método). La documentación del proceso es necesaria y requiere al menos de un informe mensual con información como la siguiente:

- Partes de actuaciones diarios
 - Ajustes, reparaciones o sustituciones
 - Detalles del elemento
 - Fecha y hora
 - Autores

- Documentación de eventualidades (ejemplo: cortes de carreteras)

Pero el responsable del sistema debe estar al tanto de los detalles del día a día de la operación, con acceso a información de cualquier detalle, para lo que es conveniente un sistema asistido por ordenador (que puede consistir en un sistema de archivos de ofimática o resolverse con software específico), en el que se incluyan:

- Fichas de elementos (inventario)
 - Instalados
 - En almacenes
- Trabajos
 - Realizados
 - En curso (indicando retrasos)
 - Programados (indicando prioridades)
 - Tiempo estándar de cada actuación
- Personal
 - Turnos de trabajo.
- Fallos o averías.
- Costes (desglosados, material / mano de obra)
- Especificaciones de acceso al sistema informático (modos, usuarios, contraseñas y privilegios).

El periodo de actualización de la información de un sistema así debe ser semanal o inferior, lo que implica cierta disciplina en el trabajo.

4.7 Documentación de estaciones

Una documentación completa de las estaciones, que recoja los datos descriptivos y la historia de cada una, es relevante para la calidad de la información, pues es básica en los procesos de mantenimiento y operación de las redes. Debe incluir información como la siguiente:

- Datos de situación.- Coordenadas, croquis y mapas, fotos.
- Instrumentación y equipos auxiliares.- Sensores, comunicaciones, escalas, casetas, etc.
- Especificaciones del sistema comunicaciones.- Descripción de los detalles de la codificación de datos para transmisión vía satélite, por ejemplo
- Calibraciones (Ejemplo: Aforos directos.- Ficha completa de cada aforo directo, con detalles, fotos y resultado).

- Mantenimiento.- Ficha de cada actuación de mantenimiento, ya sea una simple inspección visual en una visita a la estación, una limpieza, reparación o sustitución de algún elemento.
- Operación.- Análisis de recepción de datos, calibraciones, validaciones de datos, etc.
- Otra información relevante relacionada con la estación.

Cualquier información añadida a la documentación de la estación debe llevar su referencia temporal (sensor con su fecha de instalación, día de la operación de mantenimiento, del aforo directo, etc.)

Esta información será complementada con otras de operación y uso de sus datos, los cuales pueden proceder de otras actividades de control de fallos y disponibilidad que pueden realizarse desde el sistema informático (SCADA o similar). Serán especialmente relevantes los porcentajes de recepción dentro de unas tolerancias temporales y el porcentaje de datos inválidos en periodos de tiempo (anuales, por ejemplo).

Los pliegos o términos de referencia de las nuevas adquisiciones deben incluir unas especificaciones relativas a esta documentación que debe preparar el proveedor. El contenido y el formato será el que se fije para este sistema de documentación de estaciones.

El sistema de documentación puede organizarse del siguiente modo:

1. Elaboración de las fichas base en las estaciones ya existentes.
2. Exigencia a los proveedores de que elaboren los documentos conforme a las especificaciones de la ficha modelo
3. Definición y uso de ficha de actuación de mantenimiento. Aquellos que se encarguen de mantenimiento tendrán que informar periódicamente de sus actuaciones de acuerdo a los modelos que se preparen.
4. Definición y uso de ficha de operación, en la que reflejen los aforos directos, definiciones de curvas de gasto, análisis de recepción y de errores, u otras cuestiones relacionadas con el uso y gestión de datos
5. Inscripción en el registro de cada estación de cada ficha de mantenimiento u operación, y modificación, si procede, del campo correspondiente en la ficha base. En el mismo registro se hará también referencia a análisis realizados de cada estación tales como los de recepción de datos.

Es decir, por cada estación se mantendrán los siguientes documentos:

1. Ficha base
2. Fichas de actuación de mantenimiento
3. Fichas de operación
4. Registro (bitácora sintética)

4.7.1 Mantenimiento de la documentación

Con una documentación apropiada se avanzará en lo relacionado a la calidad de la información y, en general, a racionalizar la gestión de las redes y su información. Facilitará la coordinación de equipos y contribuirá de manera importante a evitar muchos errores.

Pero la documentación requiere un mantenimiento y unos procedimientos asociados. Cada acción relevante, cada cambio, debe ser reflejada en la documentación.

5 Crecidas, avenidas e inundaciones

Los daños causados por el agua, fuente de vida que puede transformarse en peligro, tienen gran importancia a nivel mundial, pues es, entre los desastres naturales, la causa principal de pérdidas de vidas humanas y tiene asociadas pérdidas de bienes económicos de gran magnitud. Se trata pues de una realidad que debe ser bien comprendida, especialmente por aquellos que desarrollan su actividad profesional en la hidrología, la meteorología y la protección civil, y también por muchos otros profesionales que desarrollan una actividad relacionada con infraestructuras, el urbanismo y la ordenación del territorio.

5.1 Definiciones

Aunque no en todos los idiomas se cuenta con la diferenciación clara de los conceptos que se exponen a continuación, su empleo riguroso es recomendable.

5.1.1 Crecida

Es común aceptar las definiciones incluidas en el Glosario Hidrológico Internacional [GHI; 2013]:

- Elevación, generalmente rápida en el nivel de las aguas de un curso, hasta un máximo a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor.
- Flujo relativamente alto medido como nivel o caudal.
- Marea creciente.

Este autor tiene preferencia por la primera, y debe entenderse como la referencia a un fenómeno normal en los ríos, frecuente y nada extraordinario.

5.1.2 Avenida

Por el contrario, el término avenida tiene asociado un carácter de inusual, tal y como recoge la definición adoptada en la legislación española (Directriz Básica de Planificación de Protección Civil [BOE; 1995] y también recogida por el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación [BOE; 2012]):

- Aumento inusual del caudal de agua en un cauce que puede o no producir desbordamiento e inundaciones

5.1.3 Inundación

Recurriendo a la última referencia del párrafo anterior, nos encontramos que, mientras los conceptos de crecida y avenida son independientes de las consecuencias posibles, el fenómeno de inundación es precisamente uno de sus efectos:

- Inundación: Anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos de agua ocasionadas por desbordamiento de ríos, torrentes de montaña y demás corrientes de agua continuas o intermitentes, así como las inundaciones causadas por el mar en las zonas costeras y las producidas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición.

Además, esta misma fuente recomienda el uso del siguiente término

- Inundación en las zonas costeras: Anegamiento temporal o permanente de terrenos que no están normalmente cubiertos de agua a causa de mareas, oleaje, resacas o procesos erosivos de la línea de costa, y las causadas por la acción conjunta de ríos y mar en las zonas de transición.

5.2 Factores que influyen en las inundaciones

De forma general podría asegurarse que la mayoría de las inundaciones tienen su origen en las crecidas, las cuales pueden tener su origen en lluvias intensas o deshielos, pero hay otros factores o fenómenos asociados que pueden influir en sus consecuencias:

- Acciones del mar
- Obstrucciones en los cauces
- Efectos de presas y embalses
- Insuficiencia de drenaje

La marea astronómica puede dificultar el drenaje de un río hacia el mar durante la pleamar, al elevarse el nivel de agua que supone la condición de contorno aguas abajo, generando una curva de remanso que se propaga hacia aguas arriba por el río. Esto favorece la inundación de las zonas próximas al mar, lo que tiene gran importancia en aquellas zonas finales de algunos ríos denominadas llanuras de inundación. Esta situación puede agravarse si, a la marea astronómica, se le superpone una sobre elevación del nivel del mar causada por una depresión atmosférica, lo que suele denominarse marea meteorológica. Este fenómeno es frecuente, pues las bajas presiones atmosféricas están asociadas a distintos situaciones de lluvia. Pero también, estas mismas condiciones de la atmósfera suelen

tener asociados vientos importantes que generan oleaje. Las olas pueden favorecer la intrusión del mar en tierra por las sobreelevaciones. Además, cuando el viento circula desde el mar hacia tierra, causa un almacenamiento de agua en la costa, con una cierta pendiente en la superficie del agua con cotas crecientes hacia tierra, que facilita la penetración del agua del mar. En cualquier caso, además de factores como estos, hay que tener en cuenta que el río puede desembocar en el mar con un resalto hidráulico a cierta distancia de la costa, lo que supone una barrera hidráulica que evita la propagación hacia aguas arriba de algunos de los posibles efectos del mar sobre el río.

Las obstrucciones en los cauces implican una dificultad de paso del agua, obligando al nivel del río a una sobreelevación que se propaga hacia aguas arriba. Pueden ser artificiales (es el caso de los puentes o de la invasión de cauces por la agricultura) o naturales (caso de estrechamientos por cambios en la geología que atraviesa el río). Pero también pueden diferenciarse atendiendo a la temporalidad, pues hay obstrucciones permanentes (asociados generalmente a la morfología) y eventuales (arrastres y flotantes). Los objetos flotantes que transporta el agua, tales como troncos de árboles o bloques de hielo, pueden llegar a constituir obstáculos que, en general, se producen al verse atrapados en algún tipo de estrechamiento (natural o artificial). Algo similar puede darse con materiales arrastrados por la corriente en el fondo del cauce.

5.2.1 Laminación

El fenómeno de la laminación de las crecidas (Figura) tiene gran importancia en la práctica, pues gracias a ellas se reducen los caudales y niveles máximos. En un punto aguas abajo de otro se observa que el hidrograma (curva de caudales en función del tiempo), y el limnigrama (curva de niveles) se estiran, con lo que la duración total de la crecida es mayor pero los valores máximos se reducen. Esto se produce gracias al retardo de la propagación de la crecida a lo largo de un río y a la capacidad de almacenamiento de agua en el tramo definido por los dos puntos entre los que se analiza el fenómeno. Esta laminación puede ser muy significativa cuando se cuenta con una presa y su embalse, cuando el volumen que éste puede almacenar es grande en comparación con el volumen de la crecida (ver capítulo 9). El efecto laminador del embalse puede ser aún mayor si se mantiene un volumen disponible para almacenar agua en caso de crecida (resguardo de laminación).

En la ilustración se muestran en color naranja las magnitudes volumen (V) y caudal (Q) en un punto, en azul las de un punto situado aguas abajo del anterior, y en verde el volumen que se ha ido almacenando entre los dos puntos. Los marcadores con flechas rojas indican la diferencia entre volúmenes de entrada y salida del embalse (el volumen de crecida almacenado).

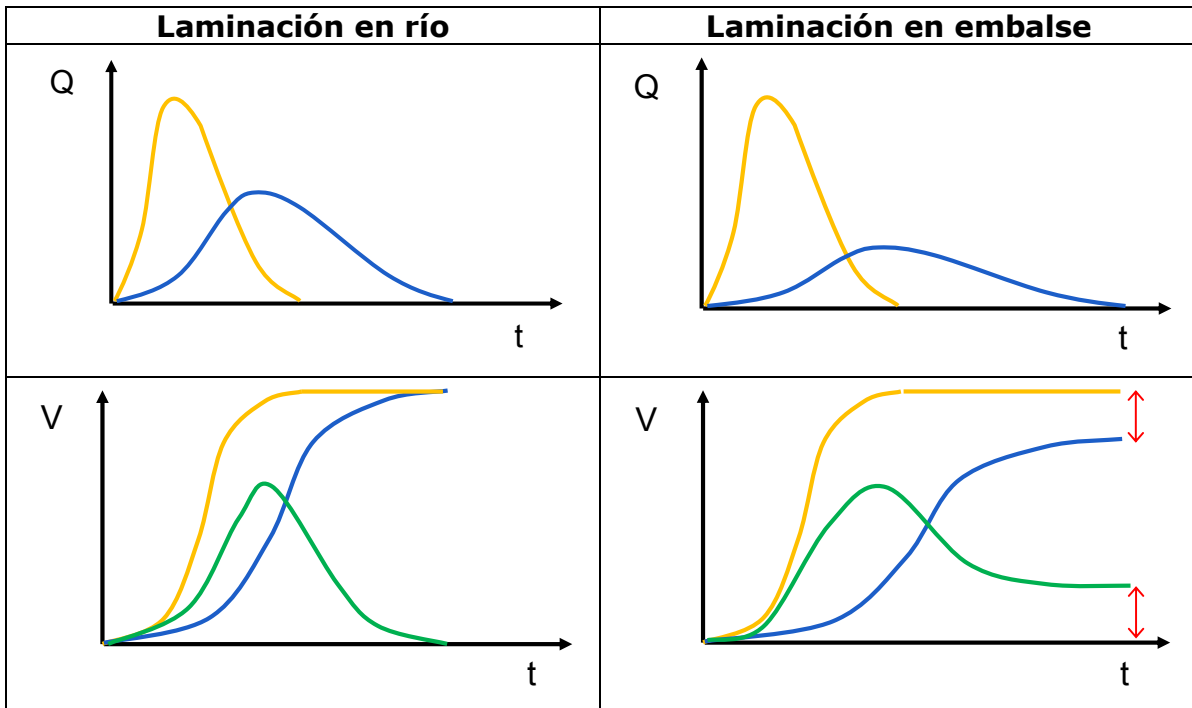


Figura 17: Gráficas de laminación en ríos y embalses, en las que Q son caudales, V son volúmenes y t es el tiempo.

5.2.2 Histéresis

Con mucha frecuencia se asume una relación biunívoca entre los niveles y caudales en un flujo de agua en lámina libre, como es el caso de las corrientes en un río. Esta relación simple no es del todo cierta, pues puede observarse que un determinado nivel tiene asociado varios caudales. Esto puede ser acusado en algunas crecidas, pues en algún punto del río se dará que el nivel que corresponde a un caudal cuando ambos están aumentando en el tiempo (rama ascendente de la crecida) será menor que el que (para el mismo caudal) le correspondería en la rama descendente (Figura 18). Este fenómeno, conocido como histéresis (ver también apartado 10.1), puede ser muy acusado en tramos de río con pendiente geométrica pequeña en su perfil longitudinal, y tanto más cuanto mayores sean el ritmo de crecimiento y las diferencias entre éste y el de decrecimiento del hidrograma. Del fenómeno de histéresis también deriva el hecho que el máximo valor de nivel no llega con el máximo valor de caudal.

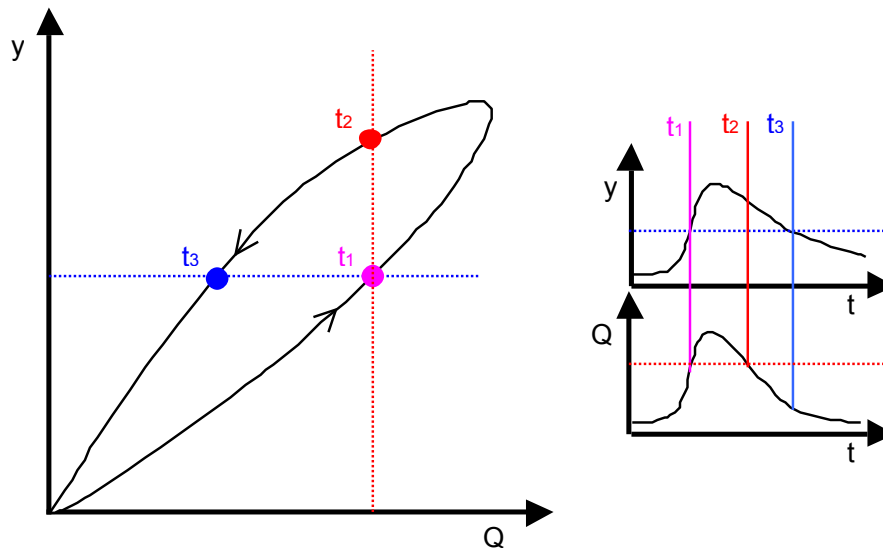


Figura 18: Fenómeno de histéresis observable en ríos

5.2.3 Saturación del terreno

La respuesta de una cuenca a la precipitación, en forma de hidrograma, depende del estado de saturación del terreno, de lo que se conoce como estado de humedad antecedente. El terreno, en función de su geología y del tipo de cobertura, tiene una respuesta característica que se denomina normal en hidrología de diseño. Pero el estado de saturación del terreno varía mucho a lo largo del año y depende de las precipitaciones ocurridas en los días previos. Esto tiene como consecuencia que el hidrograma resultante de la transformación lluvia-escorrentía en condiciones secas puede diferir en casi un 50 % del que corresponda a un estado de humedad antecedente alto (Figura 19).

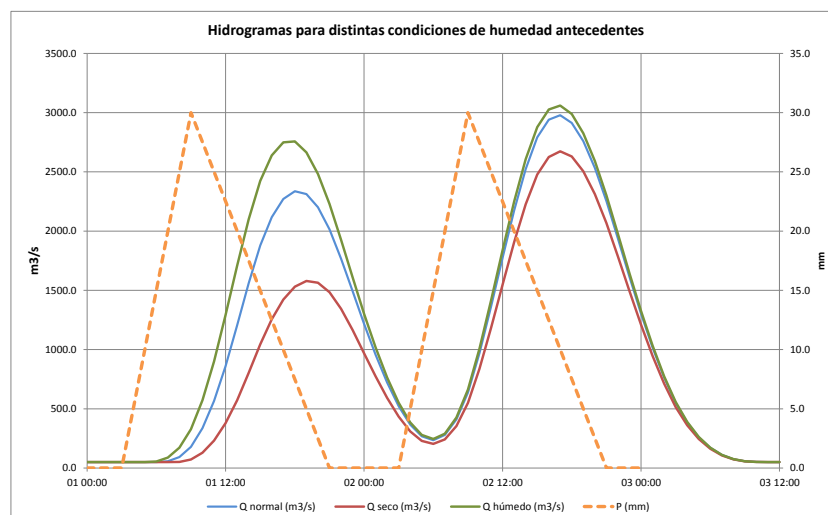


Figura 19: Hidrogramas de escorrentía en una cuenca según el estado de humedad antecedente

A medida que se acumula la precipitación, el suelo se va saturando, y las divergencias van siendo menores. En la práctica, esto tiene gran importancia al tratar de simular y predecir los primeros hidrogramas, pues no es fácil cuantificar el estado de humedad antecedente inicial. Además, puede ocurrir que se fuercen parámetros de simulación para lograr buenos ajustes en la primera crecida, los cuales proporcionarán malos resultados en las siguientes.

5.3 Tipología de daños ocasionados por las inundaciones

Entre los daños que causan las inundaciones, cabría incluir todos aquellos que supongan algún coste para la sociedad, que admitirían una clasificación tal como la siguiente:

- Pérdidas de vidas humanas.- Suponen el coste que más preocupa en las sociedades más desarrolladas. Desde hace ya bastante tiempo, se rechaza la idea de valorar estas pérdidas en costes monetarios, aunque esto sea posible metodológicamente. El objetivo en toda medida de lucha ante inundaciones debe ser el de evitar cualquier pérdida de este tipo, para lo cual se tendrán que analizar y tener claramente localizadas las áreas de ubicación y movimiento de personas.
- Pérdidas de bienes y servicios.- Estas son las que pueden ser evaluadas en términos económicos con mayor facilidad, y engloban una gran variedad de subtipos (edificaciones, infraestructuras de transporte, de energía o hidráulicas, agricultura, ...), que a su vez pueden clasificarse en:
 - aquellos existentes antes de la inundación y
 - los beneficios que no podrán producirse como consecuencia de la misma
- Costes de la lucha contra las inundaciones.- Se incluyen aquí los costes en que haya que incurrir antes, durante y después de la inundación. Se incluyen gastos en infraestructuras, sistemas de alarma y previsión, servicios de protección civil, etc.
- Daños intangibles.- Se engloban en este grupo todos aquellos daños distintos de los anteriores no evaluables económicamente, entre los cuales pueden incluirse, por ejemplo, la presión psicológica a la que puede verse sometido un ciudadano cuya actividad tiene lugar en una zona de alta peligrosidad.

Hay que hacer referencia a las restricciones y dificultades de desarrollo y progreso que impone la naturaleza a una zona afectada por inundaciones frecuentes [EIRD; 2009].

5.4 Gestión de riesgos de desastres

Antes de continuar con este capítulo, se considera conveniente analizar el tema, más amplio, de la gestión del riesgo de desastres, entendiendo por desastre a una situación de interrupción del funcionamiento normal de una comunidad o sociedad. En el caso de sequías o inundaciones, la causa tendrá generalmente un origen natural, con excepción de los casos en que se ocasione por fallo de alguna infraestructura, aunque las afecciones asociadas al fenómeno cuenten con factores antropogénicos (mejorando o empeorando la gravedad de las consecuencias). Es por ello que se refieren como casos de desastres naturales (por el origen del mismo).

5.4.1 Conceptos básicos

Los conceptos básicos necesarios para la definición de riesgo son:

- Amenaza o peligro: Probabilidad de ocurrencia de una inundación, dentro de un período de tiempo determinado y en un área dada [BOE; 2010].
- Vulnerabilidad: condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad y exposición de una comunidad al impacto negativo de amenazas [EIRD; 2004]
- Exposición: cuantificación de los receptores que pueden resultar influidos por un fenómeno peligroso (una crecida), por ejemplo el número de personas y su estructura demográfica, el número y tipo de bienes, etc. [APFM; 2006].

El peligro puede definirse como "evento físico potencialmente perjudicial, fenómeno natural y/o actividad humana que puede causar la muerte o lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental" [EIRD; 2004]. El interés de definirlo en función de la probabilidad está en que se indica cómo cuantificarlo de forma objetiva e independiente de las posibles consecuencias. Con respecto a éstas, se diferencian los términos vulnerabilidad y exposición para marcar metodológicamente la diferencia entre posibles pérdidas en vidas humanas (exposición) del resto (vulnerabilidad).

Con estos términos se define el riesgo como producto vulnerabilidad y peligrosidad, es decir, de la valoración del daño o afección por la probabilidad de que se produzca. En la práctica, la exposición suele incorporarse en la evaluación de las consecuencias [APFM; 2006], independientemente de que se puedan valorar económicamente.

El concepto de gestión de riesgo está asociado a un proceso, que se basará en un análisis de riesgos, pero que incluirá un conjunto de medidas o acciones (ver apartado 5.4.4) orientadas a evitar (prevención) o limitar (mitigación y preparación) el impacto adverso de amenazas, dentro del amplio contexto del desarrollo sostenible. Dicho proceso incluirá medidas que se desarrollen en diferentes ámbitos de actuación, pudiendo ser de tipo económico, político, administrativo u otros, y que en conjunto aspirarán a una estrategia de reducción de efectos adversos. En el caso de las crecidas, cabe distinguir entre medidas estructurales, como las obras hidráulicas de laminación, y las no estructurales, como son los sistemas de alerta temprana basados en sistemas de vigilancia y pronóstico.

5.4.2 Valoración y criterios de peligrosidad

Los daños causados por las inundaciones se suelen relacionar con las siguientes variables:

- La altura de agua alcanzada
- Velocidad del agua
- Permanencia de la inundación
- Aportación sólida

Un área inundable puede delimitarse por la mancha de la lámina de agua de una crecida sobre el terreno. Pero la sola presencia de agua no implica peligro, por lo que es común el uso de criterios de peligrosidad que fijan las condiciones en las que la inundación puede causar daños, siendo los más comunes los que relacionan calado (profundidad del agua) y velocidad (Figura 20).

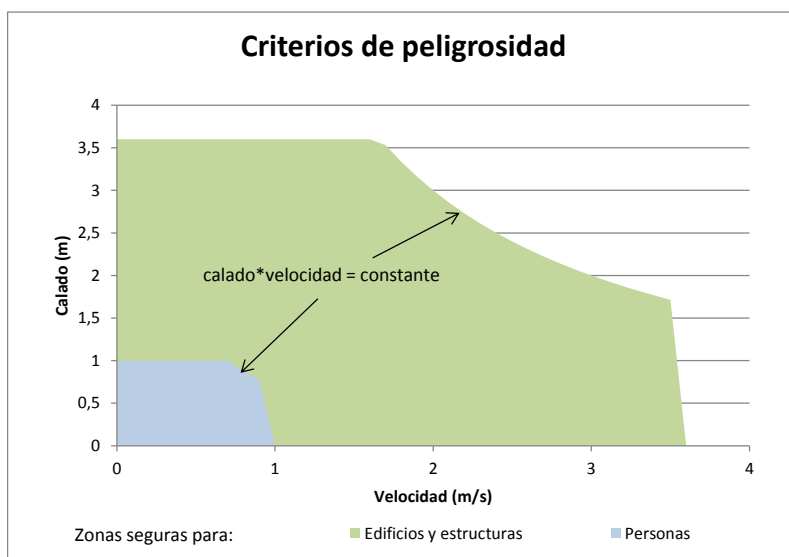


Figura 20: Criterios de peligrosidad de una inundación en función de calado y velocidad

La altura del agua y su velocidad influyen directamente en la capacidad de arrastre (empuje) y erosión de la corriente, pero el tiempo de permanencia de la inundación repercute en los daños que ésta produzca ya que, por ejemplo, algunos vegetales, como la mayoría de los árboles, soportan cierto tiempo de supervivencia en condiciones de inmersión parcial e incluso total. También la aportación sólida agrava la acción perjudicial del agua produciendo aterramientos, obstrucciones y mayores daños en general.

La probabilidad de presentación de una avenida con un caudal punta de determinada magnitud se suele describir por su período de retorno. Este período de retorno T es el valor medio del número de años que han de transcurrir hasta que se produzca una avenida de magnitud igual o superior. Por tanto la probabilidad de que una avenida de período de retorno T sea sobrepasada en un año cualquiera es $1/T$.

Si la variable Q representa el caudal punta anual y Q_T es el caudal correspondiente a una avenida de período de retorno T , la probabilidad de que Q iguale o sobrepase a Q_T es, por definición:

$$\Pr [Q \geq Q_T] = \frac{1}{T}$$

La función de distribución así definida es complementaria de la función de distribución (concepto básico en la estadística) F_Q de los caudales punta anuales, es decir:

$$\Pr [Q \geq Q_T] = 1 - F_Q (T)$$

$$F_Q (Q_T) = 1 - \frac{1}{T}$$

Así, un punto del territorio tendrá una peligrosidad de probabilidad p , si se encuentra en la zona inundada por la avenida de periodo de retorno $T=1/p$ y se cumplen las condiciones de peligrosidad. El periodo de retorno puede servir para definir grados de peligrosidad. Así, la normativa europea [BOE 2010] califica un área de peligrosidad baja si $T=500$ y de peligrosidad media si $T=100$. Anteriormente, la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones (DBPPCRI) calificaba los peligros como frecuentes, ocasionales y excepcionales según los periodos de retorno 50, 100 y 500 años, respectivamente [BOE 1996].

5.4.3 Valoración del riesgo

Pero el riesgo tendrá en consideración el producto de peligrosidad por vulnerabilidad, para bienes, y el de peligrosidad por exposición para personas.

Un estudio de caudales puede resultar en unas áreas de peligro para cada período de retorno, con lo que el resultado final sería un mapa de peligrosidad en el que cada punto tiene asociada una probabilidad de que se presenten las circunstancias que tengan asociada una posible situación de afecciones.

Adoptando la zonificación mencionada de la DBPPCRI, resultarían zonas que podríamos calificar como PV50, PV100 y PV500, de peligrosidades para vidas humanas de 1/50, 1/100 y 1/500 respectivamente. Del mismo modo, para bienes materiales se llegarían a zonas de peligrosidad PB50, PB100 y PB500, con las mismas probabilidades asociadas respectivamente.

Por otra parte, se identificarían y clasificarían las posibles afecciones, lo que daría lugar a un mapa de vulnerabilidad, en el que se representarían áreas con un valor asociado de cuantificación de dichas afecciones. Los daños de bienes económicos pueden evaluarse en términos monetarios (concepto de daño generalmente empleado), aunque para las posibles afecciones de vidas humanas sería preferible un tratamiento independiente cuantificando en población de cada mancha de actividad humana.

Si se superponen el mapa de peligrosidad al de vulnerabilidad, realizando el producto de probabilidad por afección en cada punto, resultaría un mapa de riesgos (Figura 21).

En la clasificación de zonas en función del riesgo, la DBPPCRI utiliza implícitamente éstos conceptos, con atención a la probabilidad (peligrosidad) y tipo de afección (vulnerabilidad en bienes y vidas humanas), y propone una zonificación (A, A-1, A-2, A-3, B y C) cuya obtención sería inmediata con el procedimiento propuesto.

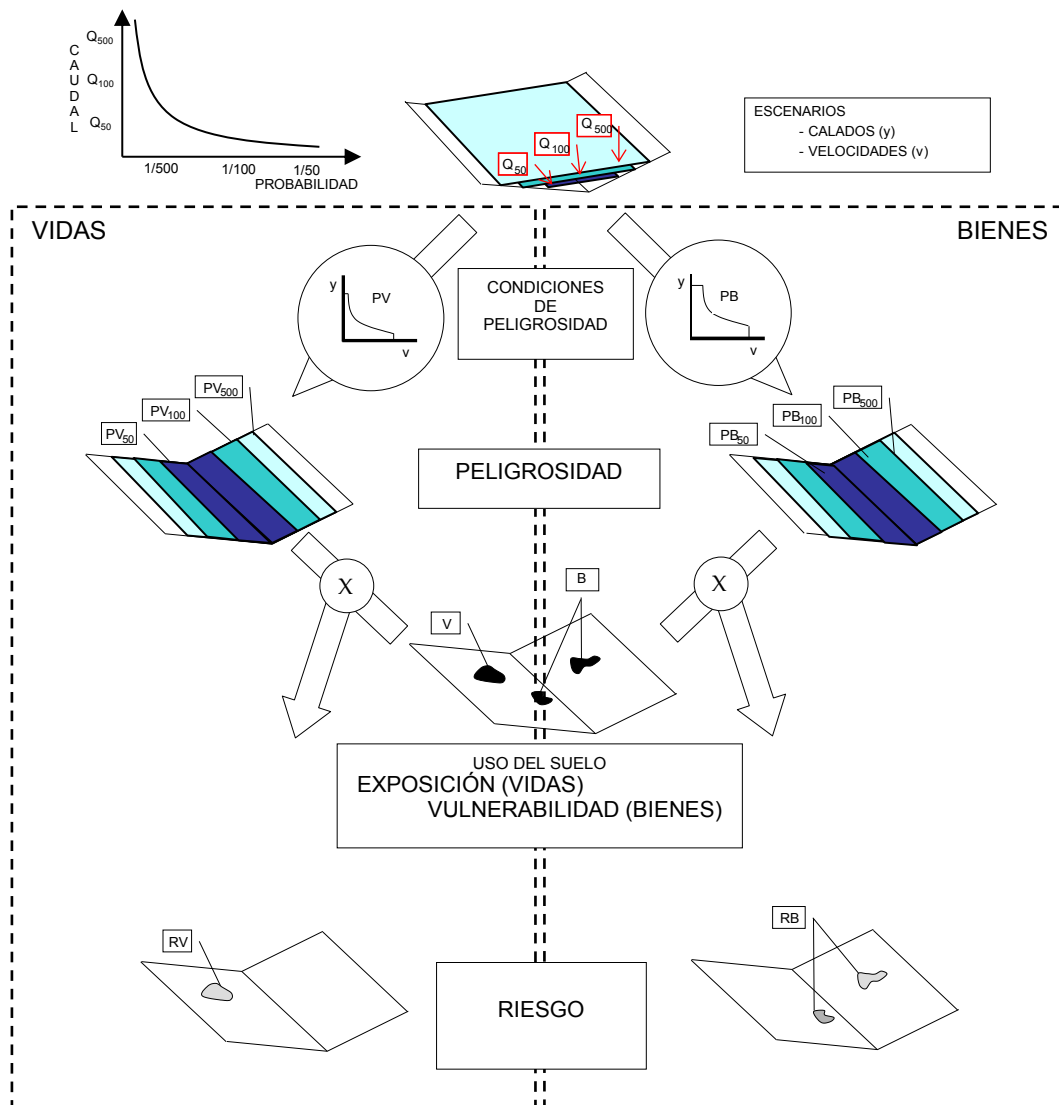


Figura 21: Proceso de valoración del riesgo de inundación

5.4.3.1 Valoración económica de daños

El concepto de riesgo expuesto anteriormente es una generalización del concepto económico del mismo: producto de la valoración del daño o afección por la probabilidad de que se produzca. Éste es el que se expone ahora con mayor detalle.

La probabilidad de sobrepasar un determinado daño D_T es la misma que la de sobrepasar el caudal Q_T que provoca dichos daños. Por tanto, si D es la variable que representa los daños:

$$\Pr [D \geq D_T] = \frac{1}{T}$$

Es necesario, por tanto, una relación daños-caudal, la cual puede obtenerse siguiendo el siguiente procedimiento: un análisis hidrológico de extremos establece la relación caudal-probabilidad, los estudios hidráulicos fijan la relación nivel-caudal

y los estudios de usos del suelo (inventarios, censos disponibles, encuestas y trabajos de campo) permiten conocer la relación entre nivel y daños. Así, queda establecida la relación caudal-daños a través de las relaciones con el nivel o, lo que específicamente se busca, la relación daños-probabilidad (Figura 22).

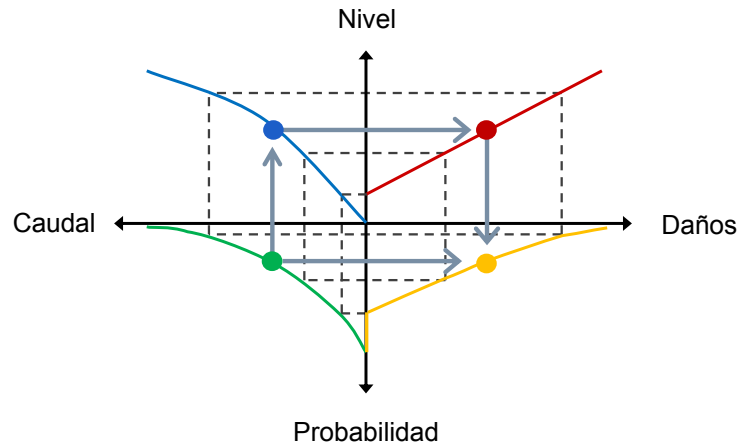


Figura 22: Obtención de la curva daños-probabilidad

Los daños anuales esperados $E[D]$ se obtienen calculando el área encerrada bajo la curva de distribución (

Figura 23):

$$E[D] = \int_0^{\alpha} \Pr [D \geq D_T] dD_T$$

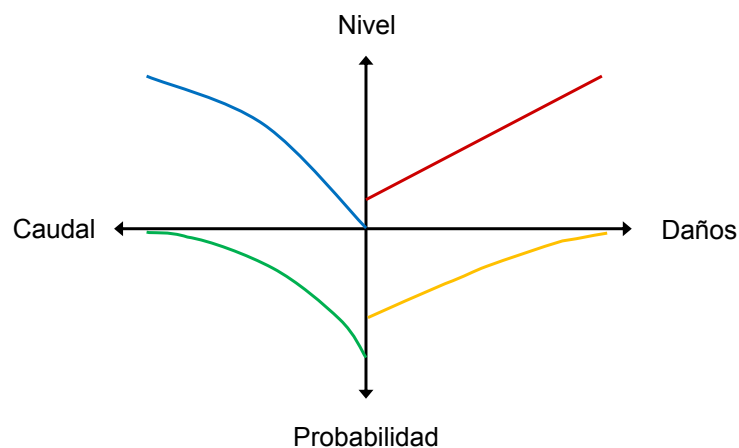


Figura 23: El daño anual esperado es el área encerrada por los ejes de coordenadas y la curva daños-probabilidad.

En el proceso de integración de la curva daños-probabilidad, el límite superior de probabilidad corresponde a la avenida de daño nulo, mientras que, en la práctica, el extremo inferior queda limitado por la probabilidad correspondiente a una avenida de elevado período de retorno. En este extremo se añade un área rectangular igual

al producto de esta última probabilidad por el daño asociado a ella, lo que permite cerrar la curva en este extremo.

Las condiciones de peligrosidad pueden expresarse únicamente en función del nivel, aunque cabe plantearse el uso de funciones calado-velocidad o más complejas, para lo cual, aquellos bienes que no se encuentren en condiciones peligrosas se extraerían de la valoración de daños.

Si se realizase la operación de productos de mapas de peligrosidades, para cada período de retorno, por el de vulnerabilidad humana y el de vulnerabilidad material, podría así obtenerse mapas de daños anuales esperados, realizando en cada punto el mismo tipo de integración.

5.4.4 Acciones para la reducción de riesgos

Los riesgos de desastres por crecidas pueden reducirse con diferentes tipos de acciones, algunas que se llevan a cabo antes de que se presente la amenaza, otras mientras sucede la crecida y otras después de que se haya producido el daño:

- Antes de que se presente la amenaza
 - Mitigación.- Medidas orientadas reducir el riesgo
 - Prevención.- Se refiere a las medidas que tratan de evitar el riesgo por completo [EIRD 2009-2]
 - Preparación .- Acciones para aumentar capacidad de respuesta
- Durante.- Las medidas de respuesta que se aplican mientras se presenta el fenómeno.
- Después.- Las acciones de recuperación
 - Rehabilitación del funcionamiento normal de la comunidad afectada
 - Reconstrucción de los bienes destruidos

En la práctica, de acuerdo a esta terminología, el uso del vocablo prevención carece de sentido, pues cabe afirmar, casi con total seguridad y generalidad, que una situación de riesgo cero es imposible.

Por otra parte, las medidas de mitigación y prevención pueden clasificarse en:

- Estructurales
- No estructurales

Las primeras pueden definirse como "cualquier construcción física para reducir o evitar los posibles impactos de las amenazas" [EIRD 2009-2], mientras que las segundas son las que no emplean soluciones físicas, por lo que también pueden

denominarse actividades de gestión (políticas y leyes, una mayor concienciación pública, la capacitación y la educación, etc.). Las medidas estructurales tratan generalmente de reducir el peligro, y entre ellas se encuentran los embalses de laminación de crecidas, los encauzamientos (para mejorar la capacidad de transporte de un tramo de río), diques de protección (para aumentar los niveles de desbordamiento) y los desvíos de caudales. Las actividades de gestión se orientan a reducir la vulnerabilidad o la exposición. Hay medidas que pueden considerarse mixtas, como es la operación de obras hidráulicas, como las presas, pues pueden reducir el peligro actuando directamente sobre la causa del riesgo.

Con la conservación de suelos y la reforestación se evita, además de la pérdida de suelo fértil y de masas vegetales, disminuir el transporte de sólidos y una disminución de escorrentías gracias al efecto de las masas forestales (por aumento de intercepción y evapotranspiración). La zonificación y regulación legal de los cauces y áreas próximas evita el intrusismo en el espacio que necesita el río para transportar caudales de avenidas, y con ello se evita que nuevos bienes o personas se sitúen en zonas con alta probabilidad de sufrir el efecto de las inundaciones.

En ocasiones puede merecer la pena, bajo el punto de vista económico, aprovechar zonas susceptibles de ser inundadas, lo que es inevitable en muchos casos. Esto hace conveniente o, más generalmente, necesaria la implantación de sistemas de seguros y de sistemas de alerta temprana.

Las actuaciones de emergencia suelen ser competencia de los servicios de protección civil (defensa civil), que en la legislación española [BOE 1985] se entiende como el "conjunto de actuaciones orientadas al estudio y prevención de las situaciones de riesgo colectivo, catástrofe o calamidad pública y a la protección de personas y bienes en los casos en que dichas situaciones se produzcan". Estos servicios también tienen gran responsabilidad en las tareas de rehabilitación y recuperación.

La instalación de sistema de vigilancia y predicción es necesaria para realizar actuaciones con la anticipación suficiente y facilitar la respuesta más acertada en situaciones de emergencia.

5.4.4.1 Análisis económico de algunos tipos de medida

Algunas medidas (como desvíos y embalses) reducen los caudales. Con ello, los daños anuales esperados bajan (Figura 24), pero debe tenerse en cuenta que la población, con una percepción de riesgo posiblemente subestimada por la medida de

protección, puede ocupar zonas con baja probabilidad de ser inundadas pero pueden verse afectadas por los caudales de alto periodo de retorno.

En el caso anterior como en los siguientes, debe tenerse en cuenta que las actuaciones no modifican las probabilidades de que un fenómeno peligroso se presente, pues ello responde a causas naturales. Se pueden modificar las curvas caudal-probabilidad o las curvas daños-probabilidad, pero esto no significa que se modifican las probabilidades, pues lo que se alteran son las consecuencias del fenómeno, no la causa primera.

Los daños anuales esperados también pueden reducirse mediante el mantenimiento de los cauces y los encauzamientos, al aumentar la capacidad de transporte y llevar a un descenso de la curva caudal-nivel (Figura 25).

Un efecto final similar puede lograrse aumentando los niveles que causan cada valor de daños (Figura 26), lo que resulta con la ordenación territorial (sobre la base de la zonificación) y con la construcción de diques.

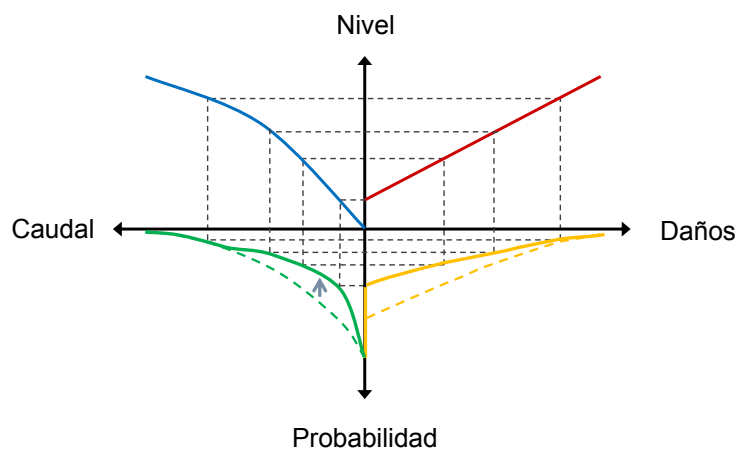


Figura 24: Reducción de daños por disminución de caudales

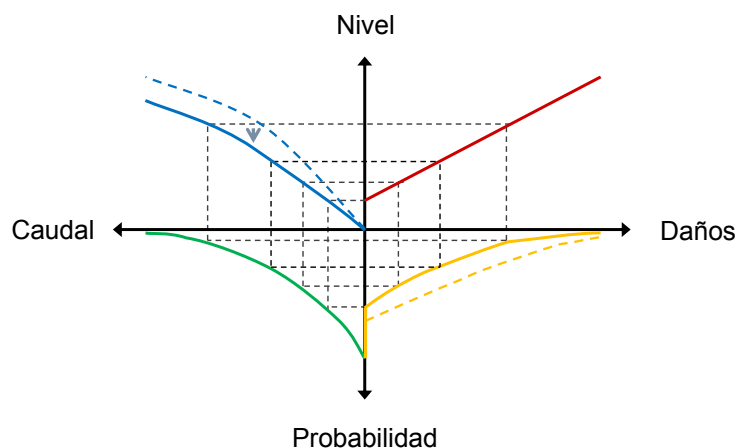


Figura 25: Reducción de daños por reducción de niveles en función de los caudales

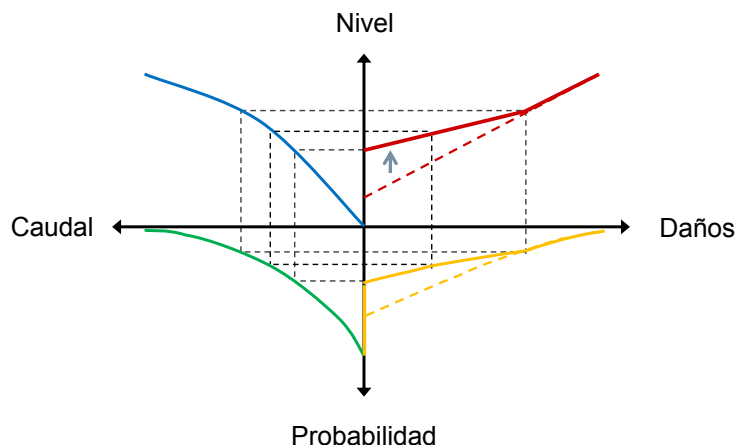


Figura 26: Reducción de daños por aumento de niveles para cada valor de daños

Tal y como pretenden reflejar dos de las figuras anteriores, las medidas correctoras no suelen tener capacidad para modificar cuanto pueda ocurrir para los niveles y caudales más altos. Los peligros más raros pero también más severos no se alteran en magnitud ni en probabilidad. Se pueden reducir las pérdidas anuales medias, lo que es un beneficio, pero puede llevar a la percepción equivocada por parte de la población de una falsa seguridad ante los fenómenos más extremos.

5.5 La gestión integrada de crecidas

La gestión integrada de crecidas se define como “un proceso que promueve un enfoque integrado, y no fragmentado, en materia de gestión de crecientes. Integra el desarrollo de los recursos de suelos y aguas de una cuenca fluvial en el marco de la GIRH, y tiene como finalidad maximizar los beneficios netos de las planicies de inundación y reducir al mínimo las pérdidas de vidas causadas por las inundaciones.” [APFM 2003]

Los elementos esenciales de este concepto pueden resumirse con los siguientes puntos:

- Gestión del ciclo hidrológico en su conjunto
- Gestión integrada de suelos y rocas
- Adopción de una combinación de estrategias óptima
- Garantía de un proceso participativo
- Adopción de enfoques de gestión integrada de riesgos

Pretendiendo integrar:

- La gestión combinada de aguas y tierras

- Áreas situadas aguas arriba con las de aguas abajo
- Medidas estructurales con no estructurales
- Acciones a corto y largo plazo
- Medidas locales y de cuenca
- Toma de decisiones de arriba a abajo y de abajo a arriba
- Consideraciones ambientales y económicas
- Instituciones desde un punto de vista funcional

Este enfoque lleva a una consideración de las posibles actuaciones como complementarias entre sí y nunca excluyentes. En especial, los sistemas de alarma y previsión y las actuaciones de emergencias son complementarias de todas las demás.

6 Sistemas de ayuda a la decisión y modelos

Los sistemas de ayuda a la decisión (SAD) tienen como objetivo facilitar, a un sujeto que tiene que tomar una decisión, información y herramientas de análisis, incluso previsión, que le permitan decidir de manera racional. En el caso de la hidrología operacional, la base estará en los sistemas de medida y observación, y los modelos de simulación y previsión pueden ser una de las herramientas más útiles e importantes.

6.1 Proceso de toma de decisiones basado en fenómenos observados

Un proceso de toma de decisiones racional se basará en las siguientes fases:

- Toma de datos: es necesario un esfuerzo para recopilar toda la información que pueda resultar útil. Las mediciones serán el fundamento de posteriores análisis cuantitativos. No obstante, la información cualitativa procedente de cualquier otra fuente de observación debe ser aprovechada.
- Análisis de datos: sobre la base de las mediciones y con la ayuda de otras fuentes de observación se realizará un análisis que lleve a una descripción y una explicación de lo que está ocurriendo en la realidad objeto de la decisión. El objetivo final será hacer una previsión sobre un conjunto de variables relevantes (variables de decisión). En esta fase, los modelos pueden jugar un papel protagonista.
- Toma de decisiones: sobre la base de los procesos anteriores, el sujeto estará en condiciones de tomar una decisión sobre una base racional y, por tanto, objetiva en gran parte.

Un proceso de toma de decisiones relacionado con un problema hidrológico estará basado en un sistema de vigilancia y predicción, pues las funciones que se asignan a este último coinciden con las primeras etapas del proceso. Después, el sujeto con responsabilidad (en protección civil, gestión de obras hidráulicas o en otros ámbitos de actividad) decidirá. En muchas circunstancias, la decisión podrá alterar el funcionamiento del sistema hidrológico, como en el caso de operación de obras hidráulicas.

Pero este proceso debe entenderse como un ciclo (Figura 27), el cual tendrá que repetirse según se vaya obteniendo información nueva. Y será necesario, en muchas ocasiones, volver al inicio (observación y medida) desde otras fases para completar la descripción del fenómeno, su explicación o la previsión, antes de la fase siguiente. Esto debe ser tenido en cuenta en el diseño de un sistema de vigilancia y pronóstico.

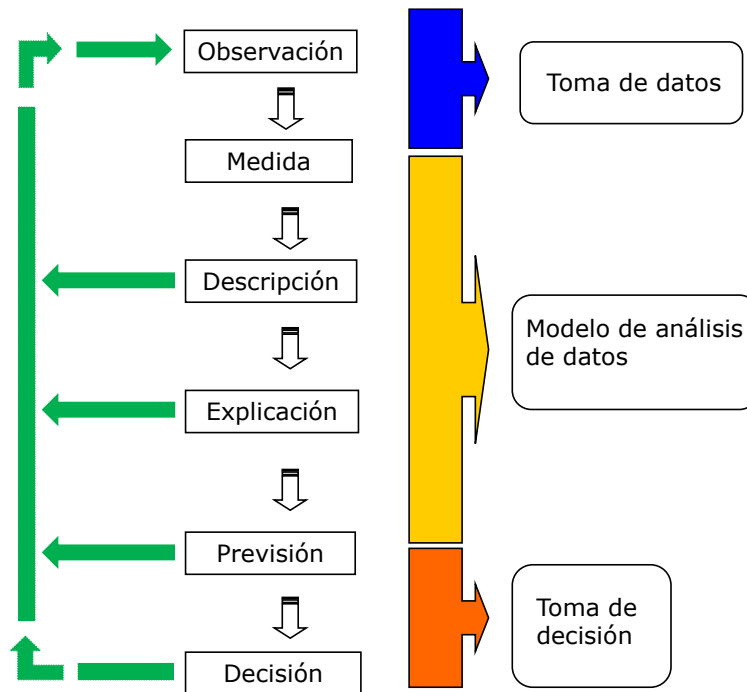


Figura 27: Esquema de un proceso de toma de decisiones basado en fenómenos observados

6.2 Los modelos de simulación y previsión

Un modelo es una representación de una parte de la realidad que facilita el análisis de ésta por medio de la consideración de hipótesis. Hay muchos tipos de modelos. De forma resumida, cabe distinguir, en los campos de la hidráulica e hidrología, entre modelos matemáticos, numéricos y físicos (modelos a escala). Pero todos los modelos comparten algo: son una representación que permiten un conocimiento aproximado.

6.2.1 Representatividad de los modelos

Siempre encierran una gran simplicidad frente a la complejidad del mundo real. Los modelos físicos se basan en suponer que una réplica a escala de una parte de la realidad (un tramo de río, por ejemplo) sigue unas relaciones claras de algunas variables en el modelo y sus correspondientes en la realidad. Esto no suele darse, y la construcción de la réplica cuenta con dificultades prácticas. Los modelos matemáticos se inician con una representación de una realidad sobre la base de un conjunto de variables, lo que es ya una simplificación, y después establecen leyes que relacionan dichas variables y otras. Los modelos numéricos tratan de encontrar soluciones a planteamientos matemáticos para los que no se encuentra solución en forma de funciones, lo que implica nuevas simplificaciones y mayor imprecisión.

La hidráulica se fundamenta en unas ecuaciones a las que se les reconoce una validez universal (se consideran una buena aproximación en todo tiempo y lugar), pero encierran muchas simplificaciones incompatibles con muchos fenómenos que se observan y su solución en casos concretos reales suele ser difícil y aproximada (en general, solo es posible con métodos numéricos).

La hidrología cuenta con dificultades muy graves para hacer de ella una ciencia, pues trata con una realidad muy compleja, el comportamiento del agua en el terreno, para la que nunca hay observaciones ni medidas suficientes. Los flujos del agua en el terreno y la interacción con la atmósfera, las plantas y las diferentes coberturas están relacionados con magnitudes que no se pueden medir, o que, incluso, ni siquiera se observan. El terreno es muy heterogéneo, tanto en la superficie como en profundidad, y varía mucho de unos lugares a otros. Es por ello que la hidrología está condenada a ofrecer soluciones válidas para algunas áreas y algunos tipos de fenómenos, basadas en la experiencia (fórmulas empíricas). No hay fórmulas universales. No se cuenta con ecuaciones constitutivas para esta disciplina.

Hay que tener en cuenta que un modelo no es un programa de ordenador que soluciona un complejo planteamiento con un gran número de ecuaciones e incógnitas. Un modelo puede ser una simple tabla que proporciona los tiempos de propagación de un hidrograma a lo largo de la longitud de un río en función del caudal en un punto.

No obstante lo anterior, los modelos son herramientas muy útiles. Pero su uso acertado dependerá del conocimiento y entendimiento de sus fundamentos, de la consideración de incertidumbres y de la calidad de los datos de entrada. Ahora bien, el modelo principal, ayudado o no por herramientas auxiliares, es el cerebro humano, el de cada uno de los agentes que participa de algún modo en el proceso de toma de decisiones, como decisor o como asesor.

6.2.2 Utilidad de los modelos

Los modelos pueden ser usados en muchas tareas relacionadas con actuaciones de reducción de riesgos de origen hidrometeorológico, como por ejemplo:

- Valorando peligrosidades y riesgos
- Evaluación de alternativas de actuación
- En el diseño de una red de medida

Por otro lado, en el caso concreto de un sistema de vigilancia y predicción los modelos son útiles:

- 1) En fases preparatorias (anteriores al uso en tiempo real)
 - a) Análisis de situaciones históricas
 - b) Análisis del comportamiento de un sistema ante diversas situaciones hipotéticas
 - c) Estudio de la sensibilidad del sistema a la variabilidad de sus características
- 2) En tiempo real (en operación)
 - a) Evaluación de la calidad o veracidad de unos datos
 - b) Reducir el desconocimiento por falta de datos
 - c) Obtención de magnitudes no medidas
 - d) Previsión

6.2.3 Modelos hidrológicos para estudios, diseños u operación

La hidrología tiene muchos campos de aplicación y muchos de sus métodos pueden emplearse en todos ellos. No obstante, según lo expuesto anteriormente, la utilización de un modelo debe tener en consideración el objetivo final y las condiciones de uso. En un estudio o en un diseño, cabe abordar el trabajo con métodos complejos y no se cuenta con las restricciones de tiempo de dedicación que hay que asumir en aplicaciones en tiempo real. En hidrología operacional pueden usarse métodos idénticos en sus fundamentos a los empleados en estudios o diseño, pero los condicionantes específicos implicarán un modo de aplicación especial que exigirá adaptaciones y complementos. Mención especial merece el problema de la validación de datos, que no será posible completar o asegurar en muchas aplicaciones en tiempo real.

6.2.4 Exigencias prácticas a un modelo para uso en tiempo real

Un modelo cualquiera, cuenta con unas exigencias, cuya consideración y cumplimiento condicionarán o determinarán, según el caso y relevancia de los factores, su acierto:

- La naturaleza de los fenómenos hidrológicos locales.
- La finalidad última del problema que se pretende ayudar a resolver.
- La variable objeto de la previsión. Ésta ha de elegirse en función de las dos condiciones anteriores.
- La abundancia (distribución espacial), calidad y disponibilidad (distribución temporal) de los datos a que se tenga acceso en tiempo real.

Pero también hay una serie de características que se le pueden exigir a un modelo para su uso en tiempo real, como pueden ser:

- Sencillez en su utilización en modo operacional.
- Robustez, entendiendo como tal la capacidad del modelo de proporcionar resultados fiables en gran número de situaciones posibles, siendo poco probable su fallo o error.
- Tiempo de ejecución breve. El tiempo máximo de ejecución será función de la naturaleza de los fenómenos locales y de la finalidad de la previsión, y tiene gran dependencia del tipo de máquina en donde se hagan funcionar (prestaciones del ordenador donde se ejecuten).
- Capacidad de adaptación a los datos y condiciones existentes.
- Capacidad de calibración automática de parámetros.

Por otro lado, siempre hay que tener en cuenta que, en tiempo real, puede darse un elevado número de circunstancias que tengan como conclusión una pérdida de datos. Los fallos más comunes serán:

- Pérdidas de datos total o parcial en un breve período de tiempo.- Esto exigirá, a los modelos, capacidad de rellenar huecos, aunque esta labor puede ser realizada por una herramienta especializada.
- Pérdida de datos de una estación de medidas en un plazo de tiempo largo.- Este hecho puede obligar a una reconfiguración del modelo cambiando las relaciones topológicas, de tal modo que pueda prescindirse de esos datos.
- Mal funcionamiento de una estación de medidas.- El modelo ha de contar con las mismas capacidades indicadas anteriormente, y que, a falta de herramientas o métodos de validación de datos, el funcionamiento del mismo modelo pueda avisar de un posible error de medida.

El modelo o aplicación debe ser capaz de superar situaciones como éstas (capacidad de adaptación a datos y condiciones existentes), con la mínima intervención del usuario (sencillez de uso) de modo que se minimicen tanto el tiempo empleado en las operaciones necesarias (tiempo de ejecución breve) como las posibilidades de error (robustez).

Hay algo a lo que generalmente no se hace referencia en trabajos relacionados con el tema: las condiciones de estrés de los individuos que realizan las previsiones y de los que toman las decisiones. El cansancio, el nerviosismo o la ansiedad que estos sujetos pueden sufrir, puede hacer que una herramienta sea inútil, por ser

sofisticada y de interpretación (acción siempre inevitable) compleja. En estas circunstancias es difícil alcanzar el grado de concentración necesario.

Por tanto, cabe afirmar, que la realidad de los hechos impone que la mejor solución será la más sencilla que la realidad a tratar admita, pues la simplicidad consigue, con menor esfuerzo y con mayores garantías, cumplir todos los requisitos necesarios.

6.2.4.1 Sencillez y franqueza

Los modelos de previsión y otras utilidades para ser usados en tiempo real deben tener un diseño y una interfaz de uso tal que le permitan cumplir las condiciones de sencillez y franqueza:

1. Mostrar los errores de simulación, cuantificando el error de cálculo y mostrar comparaciones de variables medidas y calculadas para cada magnitud en que esto sea posible.
2. Destacar las correcciones de datos originales, tales como rellenos o filtrados, de modo tal que se evalúen rápidamente la importancia de las modificaciones realizadas.
3. Presentar resultados ante distintas hipótesis de datos de entrada o parámetros de funcionamiento, especialmente los que tengan que ver con hipótesis de futuro.
4. Facilitar análisis de sensibilidad, de los resultados buscados, a los parámetros e hipótesis más relevantes.
5. Proporcionar todo lo anterior de manera simple y directa a todo usuario de la información.

6.2.5 Análisis de sensibilidad y tratamiento de la incertidumbre

Los resultados de un modelo tienen que ser interpretados y valorados considerando todas las posibles fuentes de desviación de la realidad. Basar una decisión en los valores de salida de cálculo de un modelo sin estas consideraciones es una acción disparatada. La valoración de errores e incertidumbres (ver también el capítulo 11) no es una opción para el modelador o para el usuario, es una obligación.

El funcionamiento de un modelo dependerá de unas caracterizaciones de la realidad representada y de unos parámetros que definan las fórmulas de comportamiento. Las caracterizaciones tendrán un error asociado y los parámetros unos rangos de variación razonables. Hay que valorar las variaciones en las salidas

del modelo en función de las incertidumbres de las entradas. Este proceso suele denominarse análisis de sensibilidad.

En general, existirán un gran número de fuentes de incertidumbres, asociadas al modelo o a las medidas de variables de entrada al modelo. Aunque un tratamiento riguroso de las incertidumbres puede llegar a ser complejo y costoso, es necesaria, al menos, una cierta valoración aproximada en la desviación de resultados.

6.3 El ciclo de desarrollo y uso de los sistemas de ayuda a la toma de decisiones

En el desarrollo y uso de las utilidades que sirvan de apoyo en un proceso de toma de decisiones participan dos tipos de agente: los desarrolladores (incluyendo los modeladores que construyen y ponen a punto los modelos) y los usuarios finales. En el caso de los sistemas de vigilancia y predicción:

- Desarrolladores y modeladores.- engloba a todos aquellos profesionales, especialistas en tecnologías de la información y comunicaciones y expertos en modelación hidráulica e hidrológica, que resuelven los problemas fundamentales.
- Usuarios finales.- En una primera instancia serán los operadores y responsables de los sistemas, pero también en este grupo hay que considerar a los usuarios finales de la información, entre los que estarán los tomadores de decisiones.

Los trabajos recomendados para poner a punto una colección de medios necesarios son:

- Estudio del problema, con especial atención a las características propias de la cuenca.
- Planificación de las soluciones, basada en el análisis anterior.
- Diseño de soluciones, que definan en mayor grado las soluciones a desarrollar.
- Implementación, si procede, de herramientas específicas.
- Caracterización de parámetros que asegure un ajuste suficiente de los resultados.
- Pruebas con datos históricos que sirvan para contrastar los resultados y realizar los análisis y correcciones oportunas.
- Instalación de las aplicaciones en el centro o lugar donde vayan a ser usadas por los usuarios finales.
- Formación y entrenamiento de los usuarios finales.

- Seguimiento en tiempo real por parte de los desarrolladores/modeladores dando apoyo a los usuarios finales
- Funcionamiento autónomo del personal del sistema sin necesidad de asistencia por parte de los desarrolladores/modeladores.

Esta última acción dará lugar a un nuevo estudio del problema al detectarse otras necesidades o mejoras de las soluciones que se han probado, lo que cierra el proceso en una espiral de evolución por aproximaciones sucesivas (Figura 28).

En cada actividad habrá participación de uno u otro tipo de agente, o de los dos.

Las actividades previas deben considerarse agrupadas en dos fases, cada una de las cuales cuenta con unas condiciones de trabajo distintas:

- Fase preparatoria (o de desarrollo y calibración), en la que se incluyen todas las actividades destinadas a poner a punto las herramientas necesarias para su uso en tiempo real.
- Fase de operación (o de uso en tiempo real), que es en la que se aplican las soluciones implementadas para la satisfacción de los objetivos finales.

Esta presentación cíclica por fases de los trabajos necesarios para la puesta a punto de un SAD pretende ofrecer un método de trabajo que reduzca las posibilidades de caer en errores comunes.

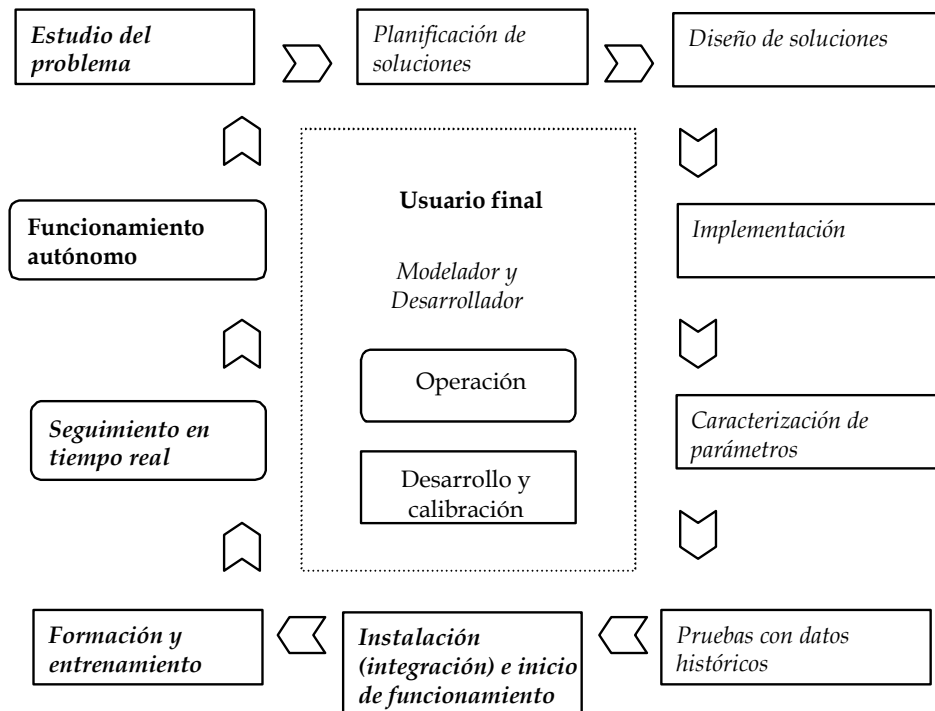


Figura 28: Esquema del ciclo de desarrollo y uso de las herramientas de ayuda a la decisión en situaciones de crecida

6.4 La importancia de la calidad de los datos

Cuanto se ha visto hasta ahora depende de la observación y de la medición desde la base de los enfoques propuestos. El éxito del resto del proceso que sigue a la captación de información será posible si y solo si los fundamentos son robustos, lo que implica información de calidad en cantidad suficiente (ver también el capítulo 11).

Los modelos pueden ser un buen complemento a la observación y la medida, pero no podrá sustituirlas en ningún caso, pues su funcionamiento depende de ellos (son la entrada principal) y solo la observación y la medida pueden validarlos. Las posibles desviaciones de un modelo, o de cualquier otro sistema de ayuda a la decisión, por sus limitaciones intrínsecas, serán aumentadas como consecuencia de errores e imprecisiones en los datos de entrada.

En cuanto a la calidad de la información, hay que advertir que es cara, o relativamente cara. Para asegurarla hay que poner en práctica programas de mantenimiento y operación de los sistemas de medida que contemplen acciones preventivas, calibraciones, supervisiones y pruebas. Solo así es posible asegurar datos fiables. Es por ello que hay que buscar un equilibrio entre calidad y cantidad, tratando de lograr la máxima calidad posible en las variables hidrológicas aún a costa de reducir el número de puntos. El manejo de un elevado número de datos de baja calidad, además de que implica sobrecostos en el proceso de gestión de la información, lleva a inevitables errores de percepción de la realidad, lo que muy probablemente llevará a decisiones desacertadas.

6.5 Soluciones básicas

Lo indicado en el apartado 3.8 relativo a las soluciones y herramientas básicas para el manejo de la información hidrológica es importante en el trabajo con modelos o con cualquier sistema de ayuda a la decisión. Pero estos sistemas, la información que usan así como la que generan, deben también ser considerados en la estructura global de información de un servicio hidrológico.

6.5.1 Síntesis de análisis, estudios y pruebas

En el ciclo de desarrollo y uso de sistemas de ayuda a la decisión recomendado (apartado 6.3) se aprecia una importancia alta al análisis del problema y a las pruebas con datos históricos. El análisis del problema exige la realización de estudios básicos, que pueden incluir modelos de simulación (ver también lo relacionado a utilidad de

los modelos en el apartado 6.2.2.). Es recomendable que se realice una síntesis de resultados que puedan tener interés práctico, como gráficos de propagación de ondas de crecida o de situaciones de desbordamiento. Esta síntesis de resultados también debe hacerse con las pruebas con datos históricos de las herramientas o modelos de previsión que se preparen para su uso en tiempo real.

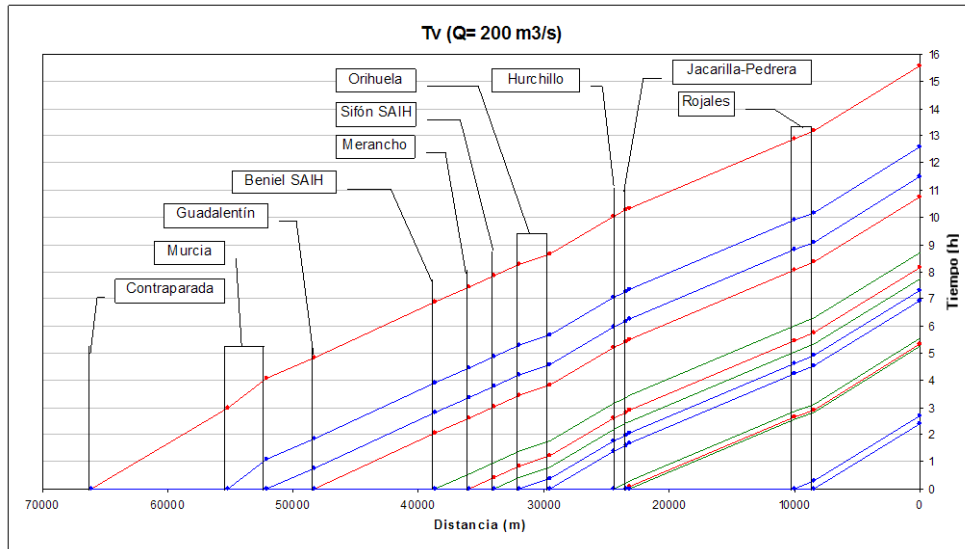


Figura 29.- Ejemplo de síntesis de resultados de estudios de propagación en el río Segura, bajo determinadas hipótesis (2002)

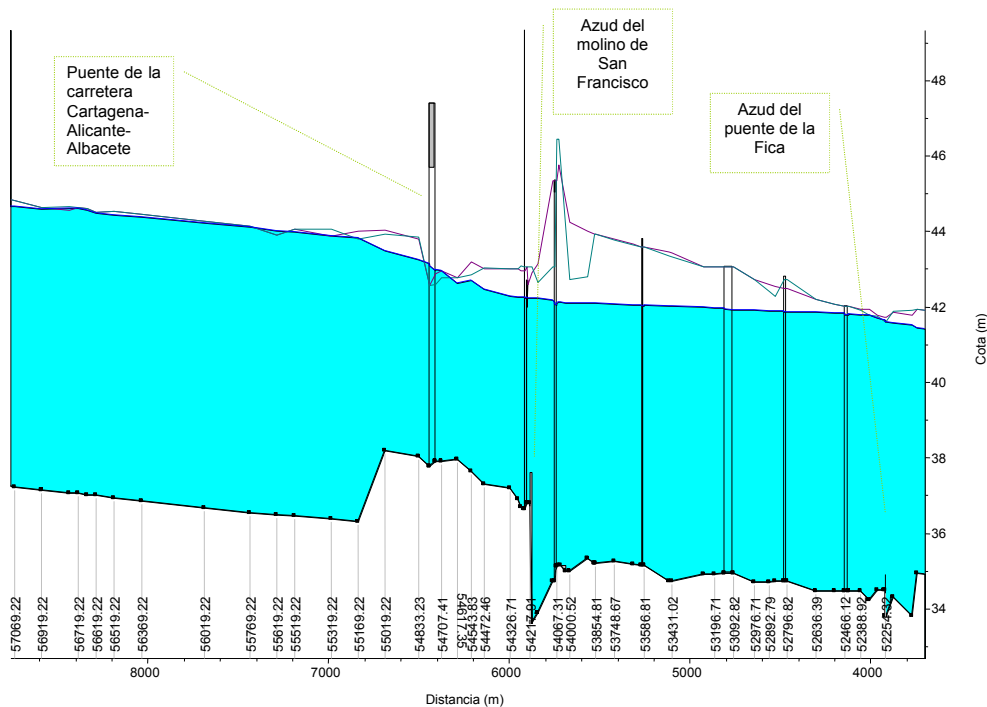


Figura 30.- Ejemplo de resultado de estudio básico para el análisis de un problema y definición de una solución: definición de zonas y circunstancias en las que puedan producirse desbordamientos

También se ha advertido de la necesidad de prever el fallo del sistema conjunto o de una parte del mismo (de las herramientas de cálculo, de las comunicaciones o de

estaciones de medida, entre otros muchos ejemplos). Estas síntesis de resultados pueden servir para sustituir un modelo en caso de fallo, o para supervisar el funcionamiento de éste, dado que se cuenta con cuantificaciones orientativas que facilitan la interpretación de resultados.

7 Vigilancia y predicción

La difusión de información hidrológica a tiempo es requerida para múltiples ámbitos de decisión de muchas instituciones y de la población en general. La información necesaria será aquella que, en primer lugar, describa la evolución reciente y situación actual del sistema hidrológico y, eventualmente, cuando sea necesario y posible (con un margen de error admisible), la previsión (para algunas variables y subsistemas) se incluirá entre esta información, convirtiéndose así en predicción. La meta fundamental será la que se refiere con los términos monitoreo o vigilancia, pero con el objetivo de llegar a la última: la predicción.

7.1 Definiciones

El Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia Española recoge los siguientes significados [RAE 2012] para algunos vocablos relacionados con el tema:

Prever.

1. tr. Ver con anticipación.
2. tr. Conocer, conjeturar por algunas señales o indicios lo que ha de suceder.
3. tr. Disponer o preparar medios contra futuras contingencias.

Predecir.

tr. Anunciar por revelación, ciencia o conjetura algo que ha de suceder.

Previsión.

1. f. Acción y efecto de prever.
2. f. Acción de disponer lo conveniente para atender a contingencias o necesidades previsibles.

Predicción.

1. f. Acción y efecto de predecir.
2. f. Palabras que manifiestan aquello que se predice.

Anunciar.

1. tr. Dar noticia o aviso de algo; publicar, proclamar, hacer saber.
2. tr. pronosticar.
3. tr. Hacer saber el nombre de un visitante a la persona por quien desea ser recibido.
4. tr. Dar publicidad a algo con fines de propaganda comercial.

Pronosticar.

tr. Conocer por algunos indicios lo futuro.

Pero también se encuentran las siguientes definiciones de interés:

Previsión.

Anuncio preciso o estimación estadística de la aparición de un hecho futuro [GHI 2013]

Proyección.

Evolución potencial futura de una cantidad o conjunto de cantidades, a menudo calculadas con la ayuda de una simulación. La proyección se diferencia de una 'predicción' para enfatizar que la proyección se basa en hipótesis sobre, por ejemplo, avances tecnológicos y socioeconómicos futuros, que se pueden o no realizar, y está sujeta a una gran incertidumbre [IPCC 2001]

De acuerdo con ello, se proponen las siguientes definiciones:

- Previsión hidrológica: acción y efecto de conocer lo que ha de suceder en un sistema hidrológico.
- Predicción hidrológica/pronóstico hidrológico: acción y efecto de dar noticia o aviso de lo que ha de suceder en un sistema hidrológico.
- Proyección: Previsión de gran incertidumbre debido a las hipótesis de que depende.

Es decir, la previsión hidrológica será la actividad y resultado de un grupo especializado cuyos esfuerzos estarán orientados a conocer cuanto pueda suceder en el sistema hidrológico sobre el que trabajan, mientras que la predicción hidrológica implica dar un paso más: la acción que denominamos habitualmente difusión de la previsión, o sea, dar noticia o aviso de la previsión hidrológica.

7.2 Ciclo de vigilancia y previsión. Fases

El proceso de vigilancia y predicción hidrológica debe entenderse bajo una concepción cíclica, con unas fases que se van repitiendo cada ciertos intervalos (no necesariamente regulares) de tiempo:

1. Observación
2. Análisis
3. Previsión
4. Difusión de información

Cada ciclo (Figura 31) se iniciará tras una observación y recopilación de información, pero puede estar motivado por una pregunta que surja ante esta primera fase o por necesidades asociadas a un proceso de toma de decisiones. No siempre se terminará el ciclo, pues cabe la posibilidad de que, por ejemplo, no se observen cambios que justifiquen siquiera completar la siguiente fase de análisis, o que una vez realizada ésta, se concluya en que no es necesario llegar a la previsión y, menos aún, a una difusión de información. No obstante, razones operacionales

prácticas aconsejan un ciclo regular con intervalos constantes, salvo cuando las condiciones aconsejen la emisión de información con carácter extraordinario.

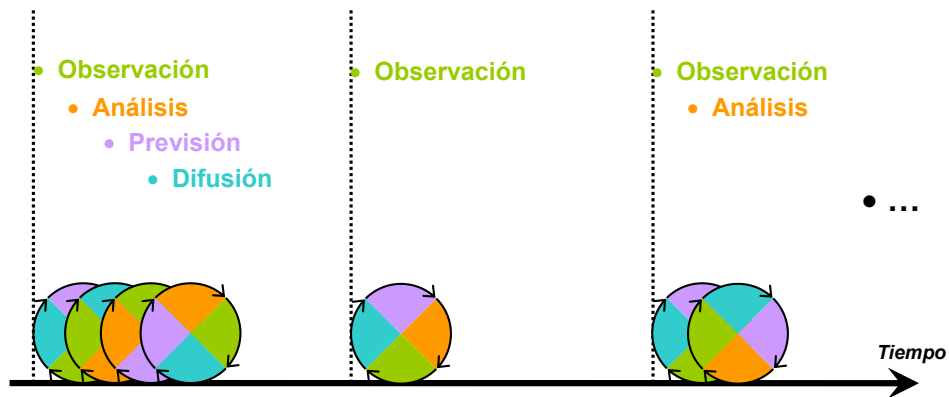


Figura 31: Esquema del ciclo de vigilancia y previsión de crecidas

Se comentan a continuación cada una de las fases y sus respectivos subprocesos:

1. Observación.- engloba todo tipo de observación y medida que aporte información del estado y evolución del sistema sobre el que se hace la vigilancia
 - a. Datos hidrológicos.- En el caso que nos ocupa, es la principal fuente de información cuantitativa con que se cuenta y la base de los principales análisis y previsiones.
 - b. Imágenes de satélite.- Aun cuando no se utilicen con el fin de obtener magnitudes cuantificadas, como estimaciones de precipitaciones, aportan información cualitativa muy importante y útil, pues la causa primera de las escorrentías estará en la actividad atmosférica observable con los satélites espaciales.
 - c. Datos de radares meteorológicos.- Permiten mejorar la estimación de precipitaciones aportando información valiosa sobre su distribución espacial, a pesar de las limitaciones en la cuantificación de la lluvia en cada punto.
 - d. Observadores en campo.- la información que se obtiene gracias a los sistemas de telemedida y teleobservación (incluyendo cámaras de video controladas a distancia) es útil, pero las observaciones de personal situado en campo es conveniente para contrastar información. Las valoraciones serán a menudo subjetivas, por lo que han de ser debidamente interpretadas, pero no por ello son inservibles sino que, muy al contrario, son muy útiles.

2. Análisis.- Toda la información recolectada en el centro de proceso se analizará con el objeto de tener el mejor conocimiento del estado y evolución del sistema, tratando de incidir en los orígenes y causas de las observaciones y en la velocidad de cambio de los acontecimientos
 - a. Cálculos básicos.- Muchas de las variables que se colectan tendrán que ser tratadas, de forma automática o semiautomática, para obtener otras más elaboradas que contribuyan a facilitar el análisis.
 - b. Visualizadores de datos.- Puesto que los volúmenes de información que se manejan son altos y deben analizarse en poco tiempo, las herramientas ágiles y bien diseñadas de visualización de variables medidas y calculadas son muy útiles.
 - c. Herramientas avanzadas.- Algunos análisis requieren cálculos más sofisticados para obtener variables útiles, por lo que se requiere de herramientas avanzadas para realizarlos.
3. Previsión.- Sobre la base de las observaciones, mediciones y análisis, cabe realizar la previsión de variables hidrológicas de interés.
 - a. Gráficos, tablas y ábacos.- Es posible encontrar soluciones sencillas que permitan una primera aproximación (un "orden de magnitud") a una previsión. Basándose en cálculos previos con modelos de simulación, se pueden obtener síntesis de resultados, expresados en formato de consulta fácil y rápida, que permitan una estimación de tiempos de propagación o laminaciones.
 - b. Modelos.- Las herramientas más sofisticadas permitirán la previsión cuantitativa con bastante acierto en un gran número de casos. Pero el manejo de estas aplicaciones requiere personal debidamente formado y entrenado, y un largo periodo de configuración y calibración.
4. Difusión de información y predicciones.- La información recolectada y la generada tras los análisis alcanzará su máxima utilidad una vez haya sido difundida entre los diferentes usuarios potenciales. Si, entre la información difundida, se incluyen las previsiones, a éstas se las denominará predicciones.
 - a. Protocolos.- Los diferentes servicios involucrados necesitan tener instrucciones claras sobre cómo y cuándo actuar en situaciones de crecida. Reglas y procedimientos estarán definidas en un protocolo que incluirá también la definición de estados o situaciones en función de la información disponible, ya sean medidas, observaciones o predicciones.

- b. Medios auxiliares.- La acción de difundir información requiere de unos medios que hagan de canal de transmisión. Teléfonos redundantes, faxes, conexiones de ordenadores e incluso radios de comunicación por voz son algunos de los medios que no deben faltar.

7.3 La importancia de la vigilancia

Es común observar como muchos de los esfuerzos de creación de un sistema de vigilancia (monitoreo) y predicción se dirigen hacia las capacidades de previsión, lo que puede llevar al terrible error de descuidar los fundamentos del sistema. Las tareas de vigilancia serán el paso previo necesario para llegar a una previsión, pues deben lograr:

- Colecta de datos.- La tarea más costosa, por inversión, uso de recursos humanos y gastos de mantenimiento, es la obtención de información y su reunión en un centro de proceso.
- Validación y relleno.- No es suficiente con tener unos datos. Es necesario conocer su incertidumbre y evaluar si son correctos o erróneos, con el fin de valorar si son útiles para servir de soporte en un proceso de toma de decisiones. Hay que validar cada dato y, en caso de pérdidas de información o imposibilidad de adquirirla, completar las series temporales u ofrecer resultados alternativos.
- Realización de cálculos básicos.- Se mide un conjunto de variables hidrológicas que no son suficientes para decidir en función de ellas, por lo que es necesario calcular otras (como caudales, volúmenes o precipitaciones distribuidas en toda el área geográfica) que sirven como variables de decisión o resultan de las tareas de validación y relleno.
- Incorporación de observaciones complementarias o auxiliares.- Aun cuando se cuente con una red de medida completa, el uso de otras fuentes de información siempre será recomendable, y en algunos casos será muy útil aunque no aporten información cuantitativa. Un ejemplo de esto último podría ser el empleo de video o fotografía, con elementos situados en campo que permiten observar niveles, velocidades o presencia de flotantes en los ríos que pudieran dar lugar a una obstrucción, por ejemplo.
- Verificación en campo.- Puede darse el caso de que sea necesario visitar el lugar en que se realiza una medida para verificar su correcto funcionamiento. Esto tiene que ser considerado en los programas de operación y mantenimiento (apartado 4.6)

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que muchos protocolos y planes de emergencia, para actuaciones en caso de crecidas o de sequías, se definen en función de variables hidrometeorológicas medidas, de una manera determinante, mientras que la información de futuro (previsiones) se trata solo como condicionante. Esto refuerza los argumentos a favor de la importancia de las tareas de vigilancia.

Un sistema de vigilancia puede ser muy efectivo sin capacidades de previsión numérica automatizada. Así, por ejemplo, en caso de tormentas, si es conocido el comportamiento del sistema hidrológico con estudios previos, es posible hacer una previsión cualitativa, e incluso cuasi-cuantitativa (de niveles y tiempos de presentación), una vez detectadas lluvias intensas.

Este apartado se resume en la siguiente afirmación: un buen sistema de vigilancia puede lograr un sistema de avisos anticipados mientras que es imposible hacer predicción sin él.

7.4 Tiempo real

El término "tiempo real", que se aplica frecuentemente en el tema de vigilancia y predicción hidrológica, puede que proceda del campo de las tecnologías de la información, entendiéndose aquí como todo sistema que funciona sincronizado con un reloj de hora real y cuyos procesos tienen algún atributo temporal (hora de inicio, fin, duración, ...). En el campo que nos ocupa se debe hacer referencia a la respuesta a tiempo. Si el sistema proporciona un producto que facilita la toma de decisiones y su puesta en práctica de manera adelantada (temprana), se puede decir que funciona en tiempo real.

7.5 Horizonte de previsión

En primer lugar, hay que recordar el hecho de que la previsión es posible gracias al desfase existente entre causa y efecto que se observa en los fenómenos hidrometeorológicos. Esto es especialmente claro en los procesos de transformación lluvia-escorrentía, en los que la respuesta de la cuenca receptora de lluvia se manifiesta en un caudal cuyo valor máximo (punta) se presenta con un desfase temporal (tiempo de punta). Esto se explica con el concepto de hidrograma unitario (Figura 32), que define la respuesta de una cuenca a una precipitación uniforme de volumen con valor unidad.

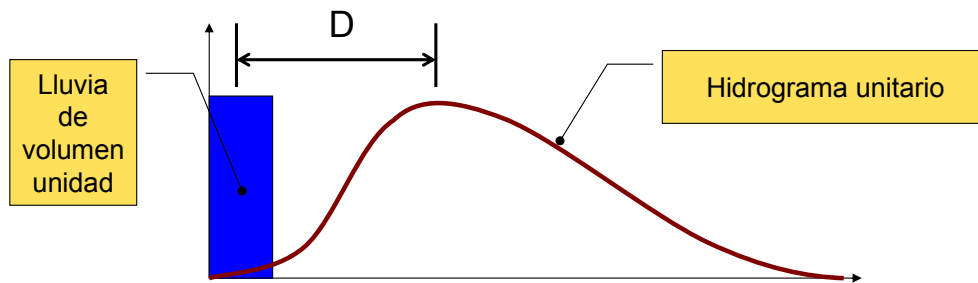


Figura 32: Desfase (D) entre la lluvia y el caudal de escorrentía según el concepto de hidrograma unitario

También la propagación de hidrogramas a lo largo de un río o canal se produce con un desfase que permite hacer previsión en función de los valores pasados (recientes) y actuales. Un hidrograma observado en un punto del río, se propagará hacia aguas abajo con un retraso o desfase D (Figura 33) y una laminación (reducción de sus valores punta). El modelo de propagación conocido como Muskingum recoge este concepto en uno de sus principales parámetros (que suele identificarse con K).

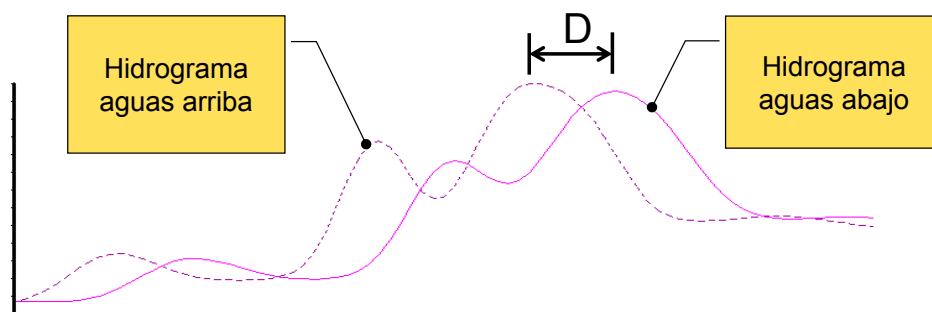


Figura 33: Desfase (D) entre un hidrograma y su propagado aguas abajo

Gracias a esta característica de este tipo de fenómeno, que fácilmente puede valorarse en horas, se cuenta con capacidad de previsión basada en observaciones, medidas de niveles y cálculo de precipitaciones y caudales.

En la meteorología se distinguen distintos tipos de previsiones atendiendo al horizonte temporal de la misma, es decir, el tiempo máximo que alcanza la previsión medido desde el momento en que ésta se realiza:

- Inmediata (hasta 6 horas)
- A corto plazo (hasta 4 días)
- A medio plazo (hasta 10 días)

Estos horizontes temporales son independientes del área geográfica sobre la que se realiza la previsión, pues la constancia en desfases de causas y efectos es, de

algún modo, global. Sin embargo, en hidrología, al estar asociada cada previsión a sistemas con tiempos de respuesta muy variables (ver capítulo 8), un enfoque análogo no resulta práctico.

Un conjunto de hipótesis razonables de causa (la precipitación, por ejemplo) tendrá como respuesta unas consecuencias (caudales) en un determinado punto de la red hidrográfica situada aguas abajo del lugar o área donde se detecta la causa. Entre estímulos y respuestas habrá unos desfases que dan lugar a una horquilla en la previsión. Esta horquilla (Figura 34) puede definirse con dos hipótesis de futuro extremas dentro de un rango razonable (siguiendo con el ejemplo, podrían ser una lluvia futura nula y otra alta con una determinada probabilidad de ocurrencia). El horizonte de previsión estaría dado por un tiempo tal que la amplitud de la horquilla de previsión (divergencia admisible), la diferencia entre hipótesis extremas en un instante dado, fuese tal que, tratada como incertidumbre en la previsión, se considerase aceptable desde un punto de vista práctico.

Así, el horizonte de previsión vendría determinado por los factores:

- Tiempo de respuesta del sistema hidrológico
- Divergencia admisible en la previsión asociada a la incertidumbre en las entradas al sistema

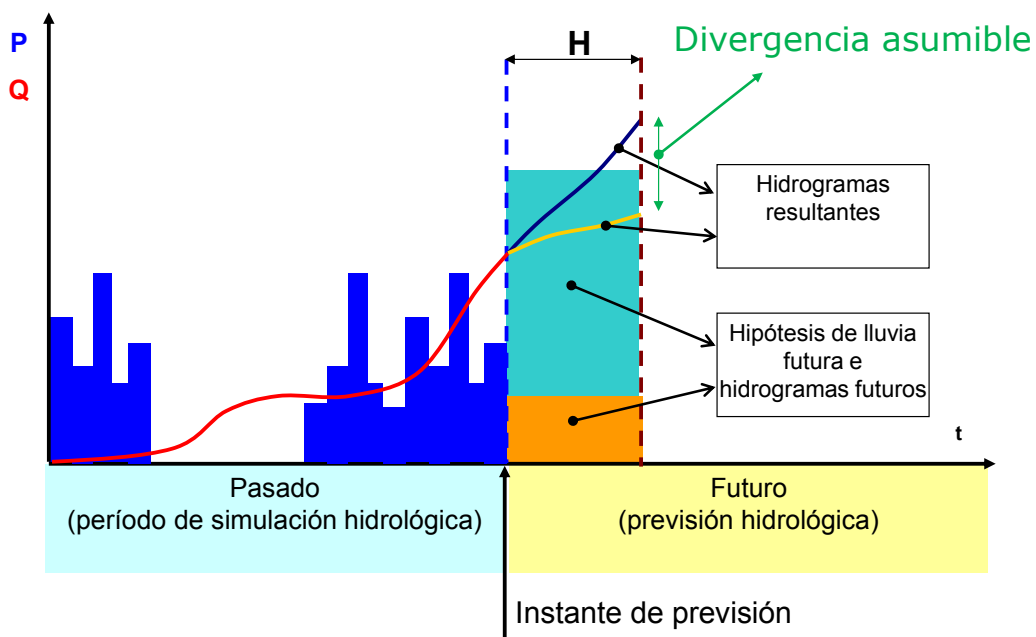


Figura 34: Horizonte de previsión en función del error asumible y la horquilla de previsión

A lo anterior habría que sumar una apertura adicional de la horquilla de previsión debido a las incertidumbres de medida y cálculo.

Así pues, horizonte de previsión será aquel periodo de tiempo que, a partir de un instante determinado con datos suficientes, proporcione una previsión con incertidumbre menor a la divergencia asumible por los usuarios de la información.

Con el ánimo de que se manejen conceptos claramente diferenciados, se usarán las siguientes definiciones:

- Tiempo de previsión: cualquier intervalo de tiempo en el que se realiza una previsión.
- Instante de previsión: instante concreto (hora de reloj) que tiene asociada una acción de previsión.

7.5.1 Tiempo de punta y horizonte de previsión

El tiempo de punta de la respuesta de un sistema hidrológico es lo que condiciona o determina la definición del horizonte de previsión. Esto se ilustra con el ejemplo de una cuenca de 500 km² que se simula con un modelo basado en el hidrograma unitario y la función de pérdidas del número de curva, añadiendo un caudal base de 50 m³/s. Se definen varios escenarios futuros de lluvia (Figura 35) a partir del instante de previsión (03 00:00): creciente (P max crec, aumentando hasta 30 mm), decreciente (P max dec, disminuyendo desde los 30 mm), constante (P cte, de 15 mm) y nula (P nula). Cada escenario da lugar a un hidrograma futuro que en conjunto dan lugar a una horquilla de previsión hasta 12 horas más allá del instante de previsión.

La primera gráfica de horquilla de previsión está calculada con un hidrograma unitario cuyo tiempo de punta es de 12 horas (Figura 36). Las siguientes, se han calculado para tiempos de punta de 6 (Figura 37) y 3 (Figura 38) horas.

De acuerdo a los resultados de cálculo en este ejemplo, cabe plantear fijar un horizonte de previsión de 6 horas en el caso de que el tiempo de punta sea de 12 horas, incluso cabría aceptar que se extienda hasta 12. Solo si en la práctica se puede asumir una divergencia considerable, puede aceptarse ese mismo horizonte si el tiempo de punta es de 6 horas. Pero la pretensión de hacer previsión a 6 horas con un tiempo de punta de 3 es absurda.

En el ejemplo se ha fijado el horizonte de previsión y se han comparado diferentes tiempos de punta, todo ello con fines didácticos. Pero en la práctica el proceso a seguir se basará en asumir una estimación del tiempo de punta y seleccionar el horizonte que proporcione la divergencia asumible.

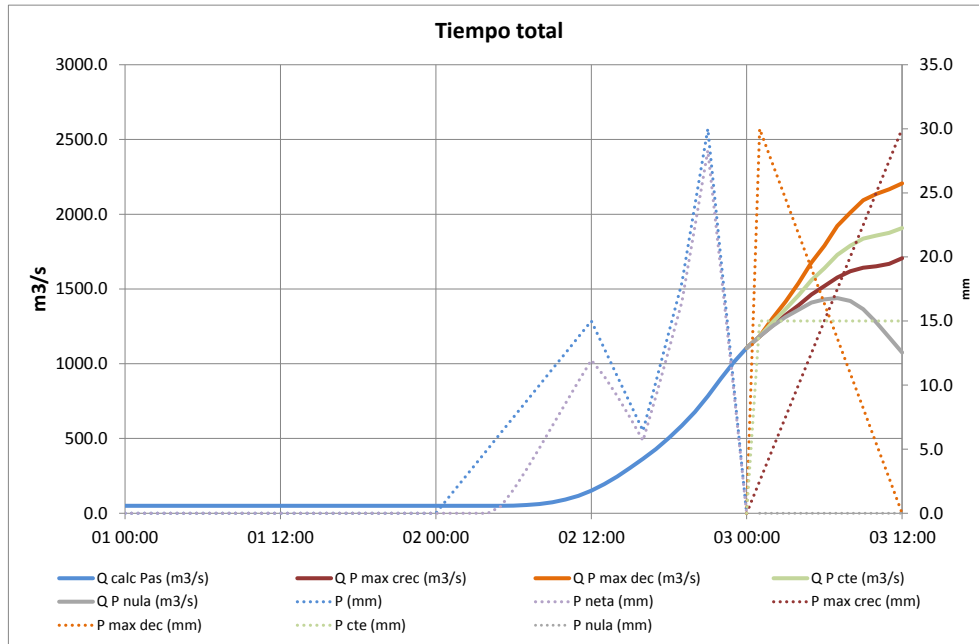


Figura 35: Simulación de transformación lluvia-escorrentía con consideración de varios escenarios de precipitación futura (instante de previsión: 03 00:00) que da lugar a una horquilla de previsión de hidrogramas.

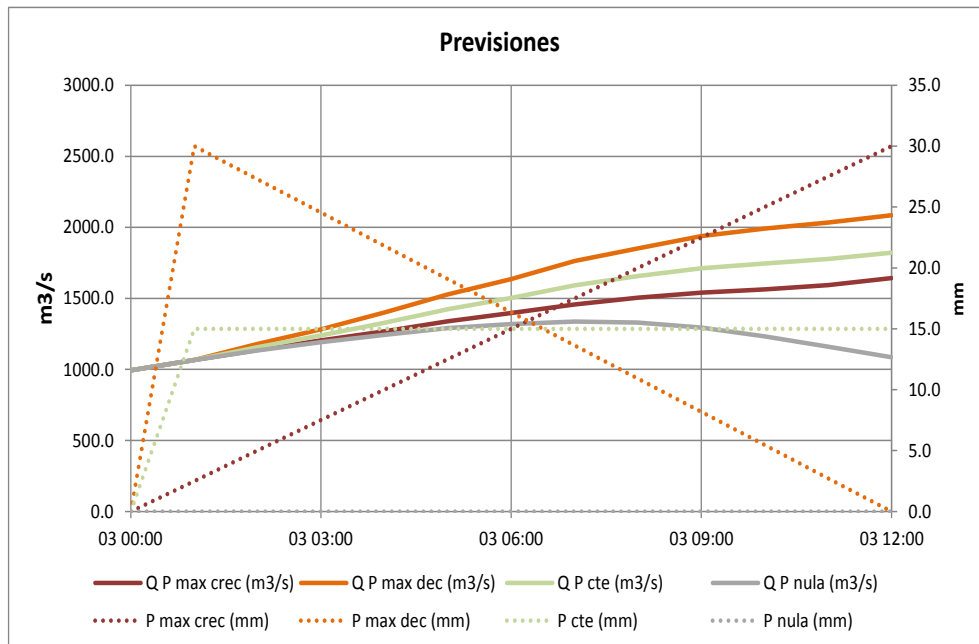


Figura 36: Horquilla de previsión para un tiempo de punta de 12 horas

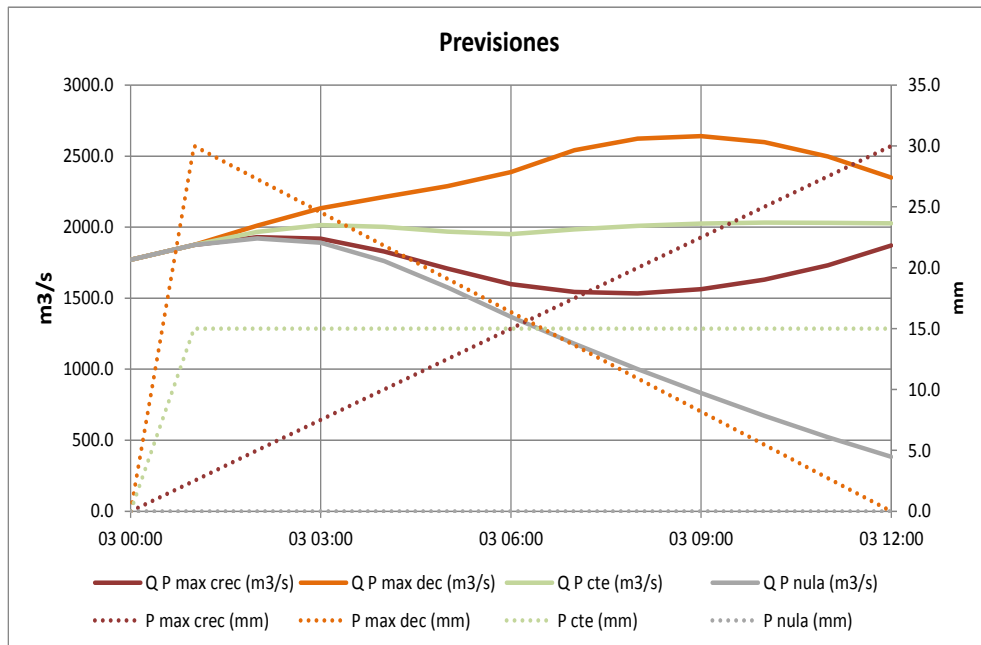


Figura 37: Horquilla de previsión para un tiempo de punta de 6 horas

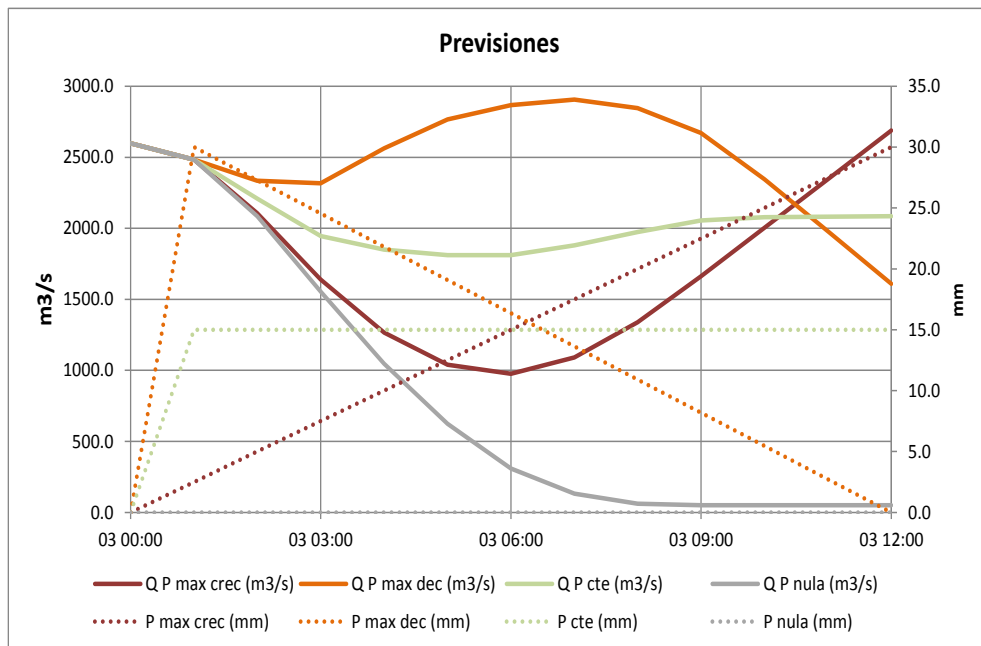


Figura 38: Horquilla de previsión para un tiempo de punta de 3 horas

Al analizar un caso concreto debe tenerse en cuenta que podrían plantearse escenarios de lluvia más severos pero suficientemente probables, lo que dependerá del clima del área de aplicación real.

Como regla general, en una primera aproximación, se puede plantear que el horizonte de previsión se fije en la mitad del tiempo de punta de la respuesta del sistema.

7.6 Acción temprana, horizonte de previsión y margen de actuación

La acción de respuesta de reducción de riesgos será efectiva si es temprana, si se lleva a cabo a tiempo, lo que será posible si el horizonte de previsión (H), desde el instante en que se observa o prevé la causa, es mayor o igual a la suma del tiempo necesario para llevar a cabo las acciones de protección (TA) y del tiempo de disponibilidad (por parte de los agentes que actúan) de la información (TD) (Figura 39).

El tiempo de disponibilidad de la información depende del proceso total de producción y difusión de información. $TD = T_{ci} + T_{db} + T_{va} + T_{vf} + T_{di}$, siendo

- T_{ci} .- tiempo necesario para la captación de información y recopilación en un centro de proceso
- T_{db} .- tiempo consumido en el proceso de los datos básicos
- T_{va} .- tiempo de obtención de variables de decisión referidas al instante actual (o reciente)
- T_{vf} .- tiempo de cálculo de variables de decisión en instante futuro
- T_{di} .- tiempo necesario para la difusión de información

La condición $H > TD + TA$ supone una limitación para determinados casos prácticos de aplicación de la vigilancia y predicción hidrológica. Tal es el caso de cuencas de respuesta muy rápida. Por ejemplo, si la transformación lluvia-escorrentía se produce en una hora (tiempo de respuesta del sistema hidrológico) y el tiempo de acción de protección mínimo es de dos horas, carece de sentido tratar de construir un sistema que persiga como objetivo la predicción hidrológica sobre la base de medidas de precipitación y niveles en río, pues el horizonte de previsión será menor a una hora. Es decir, cuando se quiera actuar sobre la base de unas medidas hidrológicas ya todo habrá sucedido.

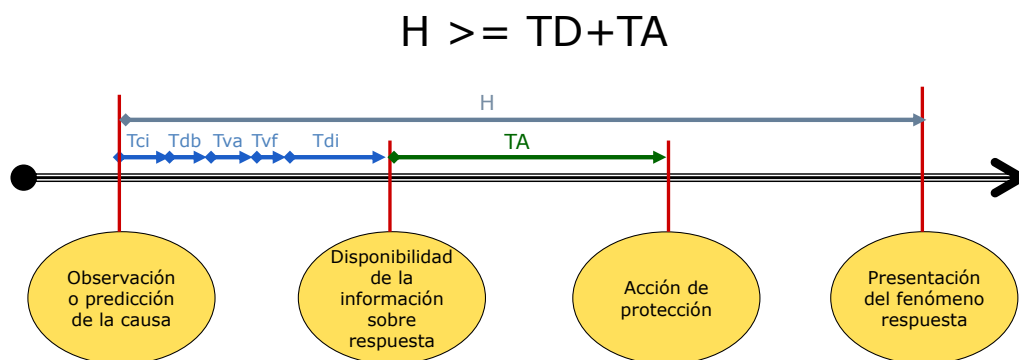


Figura 39: Condición temporal para funcionamiento en tiempo real de un sistema de vigilancia y predicción

Dado un horizonte de previsión determinado, para el usuario de información tendrá interés el valor H-TD, que puede denominarse "margen de actuación".

7.7 Modos de vigilancia y predicción

Las labores de vigilancia y predicción hidrológica y las características de los productos de predicción que se generen estarán condicionadas por la red de medida. Anteriormente se ha tratado lo relativo a los tiempos, pero la configuración de la red de medida va a imponer más condiciones.

Un sistema de vigilancia y predicción hidrológica tendrá como objetivo varias zonas geográficas que podremos asimilar a puntos en el territorio: núcleos de población, infraestructuras, etc. No todos los puntos podrán ser tratados del mismo modo ni con las mismas herramientas. Los horizontes de previsión y las medidas disponibles aguas arriba de cada punto condicionarán o determinarán el modo de actuación.

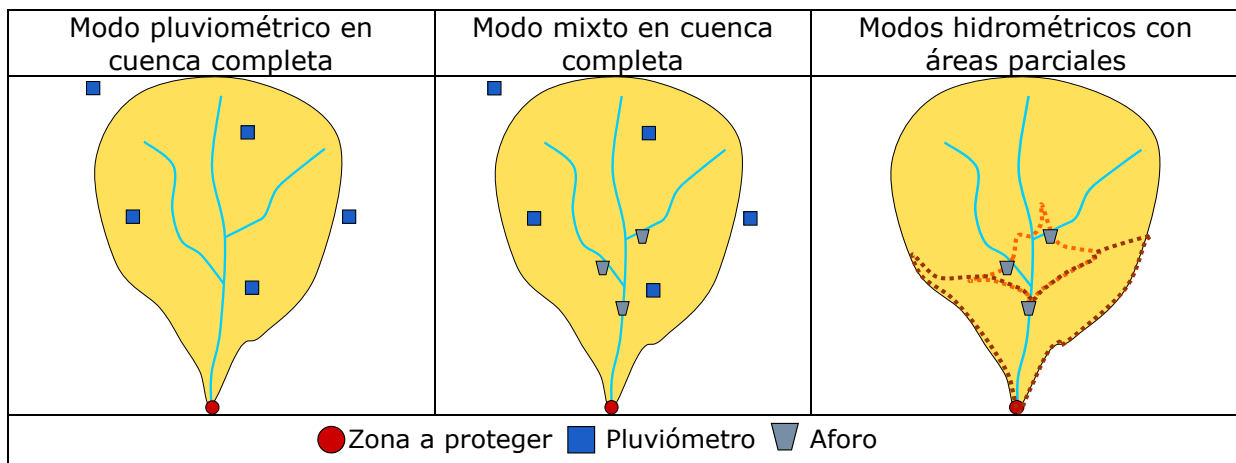


Tabla 3: Modos de vigilancia y predicción en función de la información disponible

7.7.1 Por tipos de medida

Los tipos de medida disponibles para el área (con una extensión fijada) situada aguas arriba del punto de protección dan lugar a los siguientes modos.

7.7.1.1 Modo pluviométrico

En caso de que no se cuente con datos de flujos en los cauces aguas arriba del punto a proteger, será inevitable trabajar únicamente con datos de pluviometría. El desfase de las transformaciones de la lluvia en escorrentía será el que condicione el horizonte de previsión. Aunque no se cuente con pluviómetros en la cuenca que drena

al punto, es posible trabajar en este modo sobre la base de precipitaciones interpoladas, o estimadas a partir de datos de satélite o de radar meteorológico.

7.7.1.2 *Modo hidrométrico*

El caso opuesto sería aquel en el que no se dispone de ninguna información de precipitaciones en el área aguas arriba, o se considera que su uso no es imprescindible (lo que es admisible cuando la escorrentía que se genera entre los puntos de medida en río y el punto a proteger es despreciable frente a los caudales que se miden). Será necesario trabajar con datos de flujos en cauces en, al menos, un punto situado aguas arriba.

El fenómeno de propagación en cauces será el que determine el horizonte de previsión, por lo que es necesario que el punto de medida se encuentre a una distancia mínima, pues de lo contrario no se contaría con un margen de actuación suficiente.

7.7.1.3 *Modo mixto*

En general, será necesario o conveniente trabajar con datos de precipitaciones e hidrométricos a la vez. El horizonte de previsión estará condicionado por diferentes tipos de fenómenos hidrológicos, por lo que su valoración exigirá hipótesis sobre varios tipos de sucesos probables.

7.7.2 **Por extensión de cuenca: completa o parcial**

Generalmente, será conveniente trabajar con cuencas completas, haciendo seguimiento de los fenómenos hidrológicos que se produzcan en todo el área vertiente a un punto en el que se centra la atención (a efectos de vigilancia y predicción). Pero una cuenca grande facilitará horizontes de previsión largos, e incluso mucho más largos de lo que se necesita. En tal caso puede lograrse un sistema más económico o más sencillo y con menor incertidumbre si se realiza un seguimiento de una parte del sistema hidrológico.

7.8 **Prácticas operacionales**

La vigilancia y previsión hidrológica requiere método y medios, pero, sobre todo, su éxito dependerá de las capacidades de los individuos que las realicen. A su vez, estas capacidades dependerán en buena medida de los aciertos en los aspectos organizativos que aseguren buenas prácticas.

7.8.1 Validación y corrección diarias de datos

Los datos que se vayan recopilando deben ser validados y corregidos siempre que sea necesario y posible. Esta tarea debe estar incluida en la rutina diaria de un grupo de personas.

7.8.2 Sesiones de discusión hidrológica

Otra práctica, que lleva a buenos resultados de coordinación interna en todo servicio hidrológico y que es especialmente interesante en el caso de un sistema de vigilancia y predicción, es la dedicación durante un breve intervalo de tiempo a unas reuniones diarias para tratar lo más relevante que involucre a todo el personal. Es lo que se denomina sesión de discusión hidrológica.

Un guion de estas reuniones puede basarse en los siguientes puntos:

- 1) Observación y medidas
 - a) Análisis de medidas
 - i) Para cada tipo de medida
 - (1) Automáticas
 - (2) Convencionales
 - ii) Tiempos
 - iii) Precipitaciones
 - iv) Presas
 - v) Niveles en ríos
 - b) Observaciones e información complementaria
 - i) Meteorología, satélites, radar, observaciones en campo, etc.
- 2) Análisis (descripción y explicación)
 - a) Caudales en estaciones de aforo
 - b) Balances
 - c) Precipitaciones
 - i) Distribución espacial y por subcuencas
 - ii) Contraste con pronósticos meteorológicos
 - d) Tiempos de propagación
 - i) Pasados y para las condiciones actuales
 - e) Problemas y necesidades de usuarios
- 3) Previsión
 - a) Hipótesis de lluvias
 - b) Comportamiento de modelos

- c) Empleo de tablas, ábacos y demás material auxiliar (hojas de cálculo, etc)
 - d) Previsión en puntos de interés
- 4) Predicción (difusión de la previsión)
- a) Escenarios contemplados
 - b) Variables seleccionadas
 - c) Expresión cuantitativa o cualitativa
 - d) Incertidumbre
 - e) Horizonte de predicción y tiempo de validez
 - f) Siguiete predicción

7.8.3 Relación con la meteorología

Las rutinas que obliguen a un trabajo conjunto de meteorólogos e hidrólogos es una de las claves para una coordinación efectiva entre los dos tipos de especialistas. Así, la participación de una representación del equipo de meteorología en la discusión hidrológica es una práctica recomendable. La importancia de las relaciones entre meteorología e hidrología es muy alta, por lo que en esta publicación se dedica un capítulo específico a esta cuestión (8).

7.8.4 Trabajo con modelos

El trabajo con modelos de simulación y previsión (apartado 6.2) debe seguir un método para, sobre todo, cumplir con las premisas:

- Transparencia.- El contraste de los resultados de los modelos con la realidad observada debe ser mostrado claramente de manera continua.
- Continuidad de los trabajos.- Los modelos deben ser independientes de los responsables de su uso y mantenimiento.
- Explicación.- Los hidrólogos deben estar en condiciones de explicar los aciertos y fallos en el uso de los modelos.

Lo anterior obliga a mantener una documentación completa, con el historial de cada modelo que refleje un trabajo metódico, riguroso y constante. El índice de la documentación puede basarse en el siguiente esquema (alguno de cuyos puntos se indican a modo de ejemplo):

- 1) Caracterización básica
 - a) Subcuencas
 - i) Áreas, pendientes, longitud cauces principales
 - b) Tramos de ríos

- i) Longitudes, pendientes medias
- c) Infraestructuras
- 2) Fundamentos metodológicos
 - a) Parámetros de modelación
 - i) Tablas
- 3) Parámetros de funcionamiento y operación
 - a) Horizonte de previsión
 - b) Discretización temporal
- 4) Datos de entrada
 - a) Requisitos de calidad. Valores inválidos
- 5) Configuraciones
- 6) Contraste de resultados
 - a) Datos y resultados, medida y simulación
 - b) Gráficas y tablas
 - c) Cálculo del error
 - i) Simulación
 - ii) Previsión
- 7) Métodos y utilidades de calibración

7.8.5 Formación y entrenamiento

Las tareas de vigilancia y predicción hidrológicas son complejas y necesitan personal cualificado y experimentado. Una formación básica y un entrenamiento inicial de hidrólogos (que se incorporan a la plantilla) son necesarios, pero ambos (formación y entrenamiento) requieren unas acciones periódicas que aseguren la capacidad humana suficiente (apartado 2.10) para lograr las metas que correspondan.

Algunas de las tareas anteriores, tales como las discusiones hidrológicas o la documentación de modelos, pueden ser muy útiles en la formación y entrenamiento de los hidrólogos noveles.

7.9 Avances en previsión de crecidas

Es conveniente reflexionar sobre los avances en previsión de crecidas que se producen a lo largo del tiempo. Están especialmente condicionados por las materias científico-tecnológicas relacionadas y tienen gran dependencia de los medios humanos, las relaciones institucionales y los marcos administrativos y legales. Las soluciones tienen que adaptarse, en sus respectivas evoluciones en el tiempo, a las

singularidades de cada sistema físico, a la tecnología disponible y a la realidad económico-social en que se enmarcan.

7.9.1 Aplicaciones de progresos científicos y técnicos

Aunque buena parte del conocimiento científico se tenía con anterioridad, recientemente se han realizado importantes progresos en su aplicación. Los desarrollos tecnológicos han permitido la implementación de nuevas soluciones. En hidrología, la ciencia tiene aún mucho que aportar.

7.9.1.1 *Informática y computación*

Los desarrollos de la informática y, especialmente, los de la computación han sido base para la evolución de otras áreas, lo que no ha sido ajeno a la hidrología operacional. Los sucesivos avances van permitiendo enfoques que antes no podían ser aplicados en la práctica operacional.

7.9.1.2 *Meteorología*

El uso operacional de los modelos numéricos de predicción meteorológica es una realidad (ver capítulo 8). La predicción cuantitativa de lluvia, que es generalmente la principal entrada a los modelos de previsión hidrológica, en plazos útiles para la hidrología operacional va alcanzando precisiones suficientes con índices de errores decrecientes. Los avances de la meteorología en reducción de escala espacial y en aumentos de horizontes de previsión con precisión suficiente irán proporcionando nuevas posibilidades de aplicación. Un caso extremo en cuanto a horizontes de previsión es el de la predicción inmediata del tiempo (nowcasting), que cuenta con dificultades especiales pero cuenta con avances importantes.

7.9.1.3 *Hidrología*

Aunque en la mayoría de los casos la hidrología operacional se asienta sobre conceptos "tradicionales" en la materia, los nuevos avances en técnicas de medida, observación y computación permiten afrontar con éxito nuevos enfoques.

7.9.2 La expansión de las telecomunicaciones

La expansión de las telecomunicaciones ha llevado asociada una disminución de su coste. Gracias a ello ha aumentado la viabilidad de soluciones de captación de datos en tiempo real con un coste más asequible. Si sigue la tendencia observada,

los sistemas completamente automatizados irán teniendo cada vez más ventajas sobre el resto.

7.9.3 Disponibilidad de nuevos medios de observación

La evolución tecnológica pone a disposición del especialista en previsión de crecidas abundante información. Se cuenta así con posibilidades de observación que facilitan un mejor conocimiento de los fenómenos y proporcionan datos de entrada a los modelos de previsión.

7.9.3.1 Satélites

Los satélites meteorológicos son especialmente importantes para la adquisición de información necesaria para los modelos de predicción y para el seguimiento de los fenómenos.

7.9.3.2 Radares meteorológicos

Las redes de radares meteorológicos proporcionan una información, complementaria de la obtenida con pluviómetros, especialmente interesante para la estimación de la distribución espacial de precipitaciones.

7.9.3.3 Sensores de medida de variables hidrológicas

Los nuevos desarrollos tecnológicos en hidrometría también reducen incertidumbres en tareas tales como la de estimación de caudales. Para ello resultan especialmente útiles las mejoras en los dispositivos para la medida de velocidad de flujo en ríos.

8 Relaciones entre meteorología e hidrología

La meteorología y la hidrología tienen interdependencias y campos de interés común. La consideración más relevante que es imperiosa en cuanto a la relación entre ambas disciplinas es que, conjuntamente, son el fundamento para la reducción de riesgos de origen hidrometeorológico.

La meteorología puede proporcionar resultados que sirvan de entrada a soluciones que ofrece la hidrología. Así, la meteorología puede aportar previsiones de precipitación que la hidrología transforme en flujos en las cuencas. Pero la hidrología, más pegada al terreno, puede facilitar un mejor conocimiento de la relación entre peligro y vulnerabilidad o exposición, a la vez que puede constatar el acierto de las previsiones.

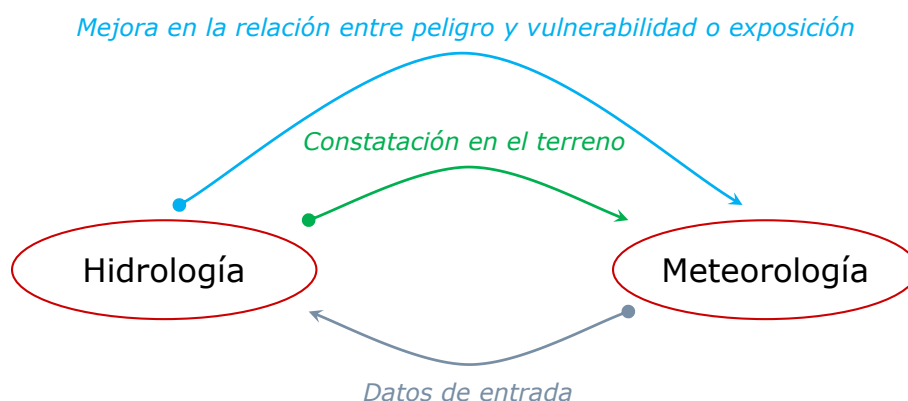


Figura 40: Interdependencias entre hidrología y meteorología

8.1 Necesidades comunes

Meteorología e hidrología cuentan con tareas y objetivos comunes, algunos de los cuales se concretan en metas de conocimiento. Tal es el caso de muchas magnitudes que deben ser conocidas por ambos con la mayor precisión posible.

8.1.1 Campos de precipitaciones

Para ambas disciplinas es necesario conocer con el mejor grado de ajuste a la realidad posible los valores de precipitación repartidos por el terreno (campos de precipitación).

8.1.2 Campos de temperaturas

La temperatura es un dato también importante para ambos, que al igual que la precipitación, se mide igualmente en puntos del terreno, por lo que es necesario transformar esas medidas puntuales en valores distribuidos espacialmente.

8.1.3 Coberturas nivales

Los mantos de nieve que cubren los lugares más altos, son resultado y, a su vez, condición para otros fenómenos. El conocimiento de la extensión, profundidad y densidad de las coberturas nivales es necesario para las dos disciplinas

8.1.4 Evapotranspiraciones

Las cantidades de agua que fluyen desde el terreno hacia la atmósfera a través de la evaporación y la transpiración de las plantas son una variable importante tanto para la meteorología como la hidrología. Es necesario calcularlas en ambos casos, para lo cual comparten datos y métodos.

8.1.5 Humedad del terreno

La humedad del terreno condiciona el comportamiento hidrológico de un terreno y afecta a las condiciones meteorológicas. Es un dato y un parámetro importante tanto para los modelos hidrológicos como para los modelos del tiempo.

8.2 Diferencias

Las dificultades que se encuentra en la práctica de las relaciones entre la meteorología y la hidrología tienen raíces de diferente naturaleza:

- Institucionales.- A menudo los servicios nacionales de meteorología e hidrología se encuentran en instituciones distintas sin procedimientos y prácticas que faciliten o aseguren una buena coordinación.
- Profesionales.- Los perfiles profesionales de meteorólogos e hidrólogos suelen ser distintos, pues están vinculados a formaciones académicas raramente comunes o parecidas. Esto supone una dificultad en la comunicación entre profesionales de ambos ramos.
- Operativas.- Las características especiales del servicio que unos y otros profesionales tienen que ofrecer, les lleva o induce a prácticas operativas diferentes, lo que dificulta la coordinación de tareas.
- Metodológicas y de aplicación.- Hay bastantes diferencias en características fundamentales de los métodos de ambas disciplinas (Tabla 4), y de la naturaleza de los casos en que se aplican, que dificultan la práctica del trabajo coordinado, aún en los casos de tener que abordar necesidades comunes que, en principio, se muestran iguales.

	Hidrología	Meteorología
Bases físicas	- No hay ecuaciones constitutivas. - Gran empirismo. - Formulaciones con validez condicionada por características físicas del lugar de aplicación y por tipo de evento	-Formulaciones de base más generales.
Escala espacial	- Los detalles del terreno pueden ser importantes - Decenas o cientos de metros	- Es posible trabajar con representaciones del terreno con poco detalle - Cientos o miles de metros
Extensión de los modelos	- Muy variable, desde los cientos de kilómetros a los miles de kilómetros	- Pueden ser globales y suelen ser de miles de kilómetros cuadrados
Parámetros fundamentales	- Hay que considerar la gran heterogeneidad del terreno en las tres dimensiones.	- No tiene tanta dependencia de las características del terreno
Variables fundamentales y relevantes	- Gran parte de las variables no pueden ser medidas directamente ni con precisión	- Gran parte de las variables pueden ser medidas y observadas con precisión.
Tiempos de respuesta de los sistemas y horizontes temporales de previsión	- Muy variables. Por naturaleza y necesidades de aplicación pueden ser de horas, días, semanas e incluso meses	- Hay unos plazos claramente definidos y mundiales.

Tabla 4: Resumen de diferencias entre hidrología y meteorología asociadas a las características metodológicas y de aplicación de ambas disciplinas

8.3 Ampliación del horizonte de previsión hidrológico

Si se dispone de predicción meteorológica cuantitativa, el horizonte de previsión hidrológica puede ampliarse. En el tiempo en el que se desea ampliar el horizonte de previsión hidrológica se pueden definir las entradas de lluvia futura en dos tramos o intervalos de tiempo (Figura 41): 1) con los valores de lluvia dados por las salidas de un modelo de previsión meteorológica y 2) con valores de precipitación dados por unas hipótesis de valores extremos probables.

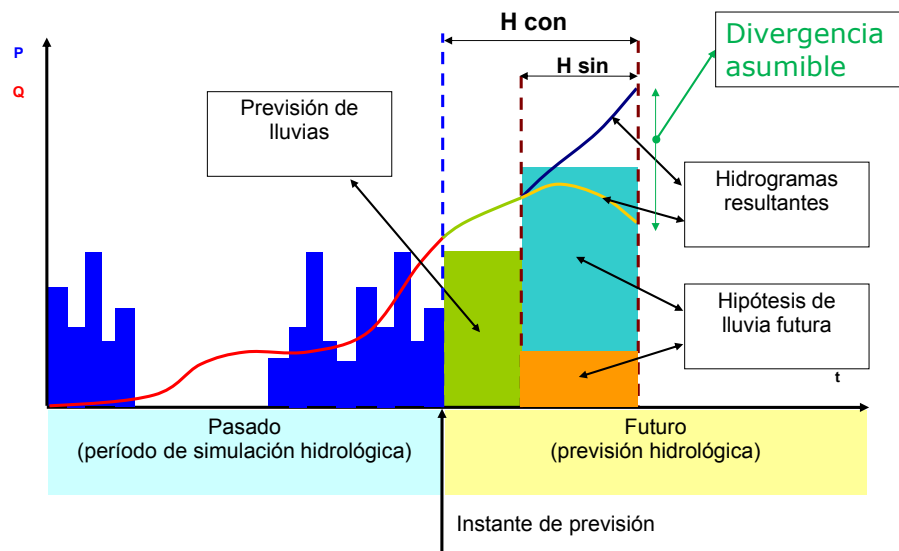


Figura 41: Previsión hidrológica basada en previsión de lluvias

De este modo, la horquilla de previsión empieza a abrirse más tarde, con lo que la incertidumbre es menor que si se opera sin la previsión dada por un modelo meteorológico. Podría darse el caso de que el horizonte de previsión hidrológico necesario en la práctica fuese menor que el tiempo de previsión meteorológica, en cuyo caso no habría horquilla.

Este enfoque se mejora si se tiene en cuenta la incertidumbre de los modelos meteorológicos y se definen los valores correspondientes del primer tramo con, al menos, dos escenarios que contemplen los posibles errores. Con ello la horquilla de previsión hidrológica se abre desde el instante de previsión (Figura 42), pero es más realista.

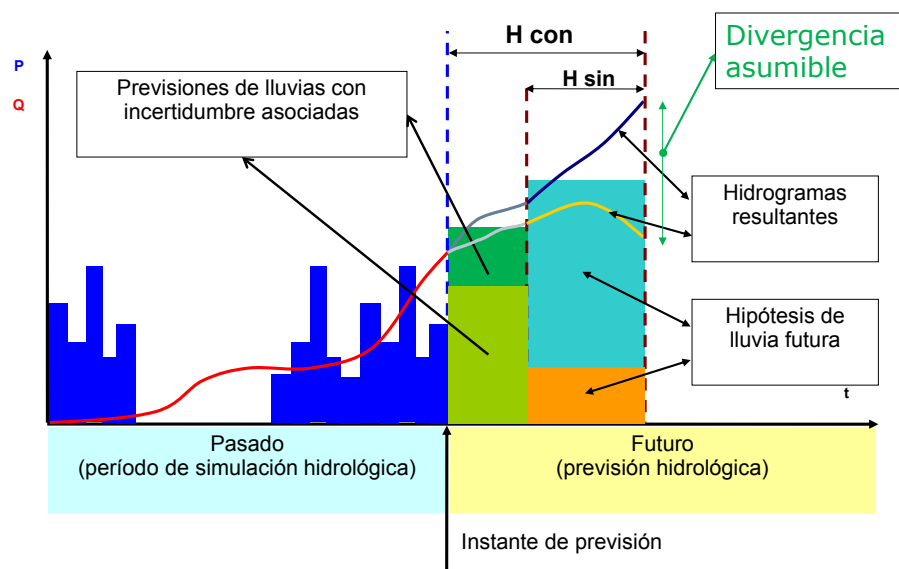


Figura 42: Previsión hidrológica basada en previsión de lluvias y con consideración de incertidumbres

Ahora bien, hay que tener en cuenta dos limitaciones importantes en los modelos de predicción del tiempo actuales:

- Los modelos de predicción del tiempo no funcionan bien en escalas espaciales detalladas.
- Los errores son mayores en las dos primeras horas y menores a partir de la cuarta (general y aproximadamente).

Por tanto, este enfoque no llevaría a buenos resultados en cuencas pequeñas. En todo caso, los métodos hidrológicos proporcionarían unas horquillas muy abiertas, que llevaría a una imposibilidad de cumplir con la condición de incertidumbre menor a la divergencia asumible. Ambas dificultades o limitaciones recomiendan limitar la previsión hidrológica a cuencas cuya superficie pueda expresarse en cientos de kilómetros cuadrados (como orden de magnitud). Pero esto no implica que no se pueda hacer nada ante un problema relacionado con cuencas pequeñas. En estos casos, la vigilancia meteorológica e hidrológica también es fundamental. La predicción meteorológica puede ofrecer información útil, al menos desde el punto de vista cualitativo y la hidrología puede aportar información sobre cuándo se están dando circunstancias en las que se puedan producir crecidas de cierta importancia (vigilando el estado de saturación del terreno, por ejemplo).

8.3.1 Ejemplo de ampliación de horizonte de previsión por reducción de la incertidumbre sobre precipitaciones

En el apartado 7.5 se ha expuesto un ejemplo de análisis de horizontes de previsión en función de varios tiempos de punta en la respuesta del sistema. Partiendo del caso de tiempo de punta de 6 horas, se concluye en que el error asociado a un horizonte de previsión de 6 horas puede ser demasiado alto. Suponiendo dos escenarios de lluvia constante de 0 y 30 mm, como representativos de dos situaciones extremas con una probabilidad de presentación considerable, se llega a una horquilla de previsión tan abierta en las 6 y 12 horas que aconsejan fijar un horizonte de previsión de 3 horas, o 6 si se puede asumir un error grande. Si se cuenta con previsión meteorológica de lluvias, el rango razonable de precipitaciones $[0, 30]$ puede reducirse a $[5, 15]$, por ejemplo, con lo que la horquilla de previsión de caudales resulta mucho más cerrada. Esto lleva a que ahora sí es asumible un horizonte de previsión de 6 horas, e incluso sensiblemente superior si pudiera asumirse en la práctica un error grande en la previsión de hidrogramas.

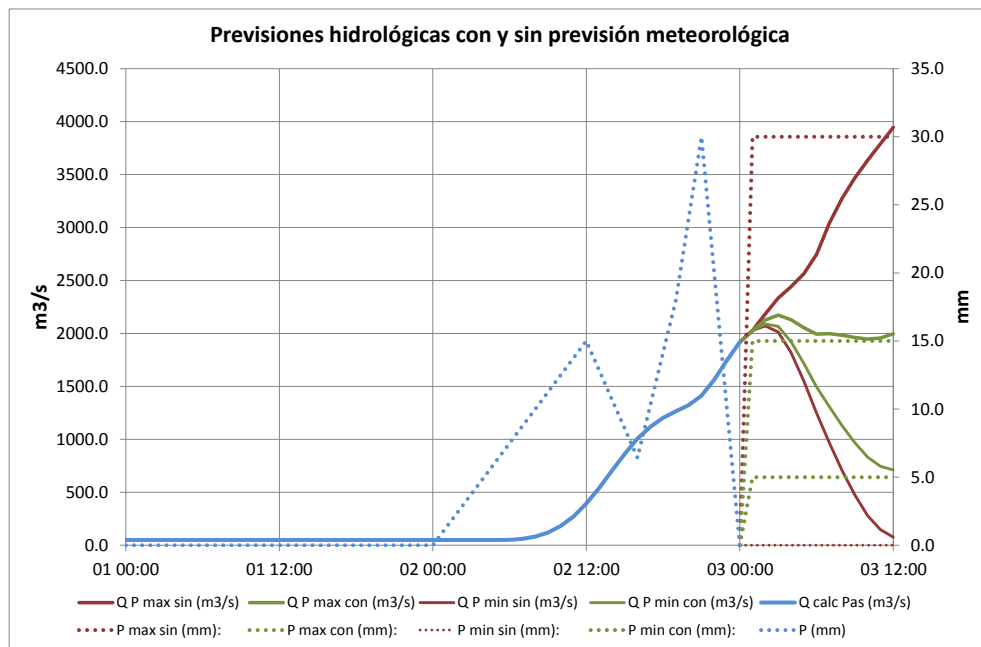


Figura 43: Comparación de horquillas de previsión hidrológica con y sin previsión de precipitaciones.

Este ejemplo sirve para ilustrar cómo se puede llegar a multiplicar por dos, incluso por más, el horizonte de previsión hidrológica si se dispone de una previsión meteorológica que pueda ofrecer una reducción de la incertidumbre en la definición de posibles escenarios de lluvia futura.

8.4 Condicionantes organizativos e institucionales

En la práctica, las principales dificultades de coordinación entre meteorólogos e hidrólogos no son técnicas ni científicas, pues éstas acaban superándose por medio del trabajo conjunto, y siempre se encuentra solución. Las deficiencias que se observan radican generalmente en cuestiones de índole organizativa o institucional.

Los servicios hidrológicos nacionales y los servicios meteorológicos nacionales están, muy a menudo, en instituciones distintas. Aunque esto no debería ser obstáculo, lo cierto es que la experiencia demuestra que hay dificultades de comunicación y de trabajo coordinado entre ambos. Pero, curiosamente, también se observan estas deficiencias cuando ambos servicios están incluidos en la misma institución.

La solución está en fijar objetivos concretos a grupos de trabajo mixtos. A la vista de necesidades comunes expuestas anteriormente, es fácil encontrar un motivo que justifique una práctica de interacción. También se puede lograr una coordinación imponiendo en la rutina diaria una comunicación obligada, como puede ser incorporar a los meteorólogos en las sesiones de discusión hidrológica.

9 Presas y embalses

La interacción entre el río (y su cuenca) con una presa (y su embalse) suele ser muy significativa, especialmente cuando el tamaño del embalse es importante en comparación con los volúmenes de aportación anuales de la cuenca o con los de los hidrogramas de las crecidas que tenga el río. La influencia de la presa puede ser modificada si sus órganos de desagüe admiten regulación. Especialmente en este caso, el responsable de la operación de la presa será uno de los principales interesados en la información hidrometeorológica. De cualquier modo, el hidrólogo debe conocer bien todos los aspectos hidráulicos e hidrológicos de las presas y sus embalses.

9.1 Efectos de presas y embalses sobre el río

Pueden distinguirse dos tipos principales de efectos de las presas y embalses: los normales y los accidentales. Dentro de los primeros se distinguen:

- Nivel de embalse.- El almacenamiento de agua se produce a costa de elevar el nivel de la lámina, lo que causa la inundación de terrenos, algunos de los cuales se ven sumergidos sólo en situaciones de crecidas. Otro de los efectos del nivel de embalse es el de ser la posible causa de deslizamientos de laderas, sobre todo si se producen oscilaciones rápidas en relación con la capacidad de drenaje del terreno de estas áreas. Además, el nivel impone una condición de contorno elevada para el flujo aguas arriba, lo que causa diversos efectos en una cierta longitud del río.
- Laminación de crecidas.- La capacidad de laminación de un embalse permite reducir considerablemente el caudal punta de los hidrogramas de crecidas (apartado 5.2.1) restando incluso, si existe resguardo, volumen a los mismos, con la consiguiente reducción de daños aguas abajo. Este efecto justifica muchas presas como obras de defensa frente a avenidas.
- Caudales sólidos.- La disminución de velocidad que sufre el flujo de agua al entrar en el embalse lleva a que gran parte de los sólidos transportados en suspensión se depositen. La proporción de sólidos arrastrados por el fondo que son capturados por el embalse es aún mayor. Este efecto es en parte beneficioso, pues reduce la capacidad destructiva de las crecidas, pero afecta al balance de transporte de sólidos.
- Morfología del río.- El perfil longitudinal del río, en su zona aguas arriba, se verá afectado por el aumento del nivel del agua y los depósitos de sólidos que

se producen en el embalse. Pero la captura de sólidos también alterará el equilibrio aguas abajo, pues el agua con menos sólidos transportados tiene más capacidad erosiva y algunas formaciones, como los deltas, pueden desaparecer.

- **Objetos flotantes.**- La presa servirá de barrera para muchos de los objetos flotantes que arrastra la corriente. Estos objetos pueden crear dificultades en la operación de compuertas o de funcionamiento de vertederos, pero con su captura se pueden evitar daños aguas abajo.
- **Otros efectos.**- La presa y el embalse pueden provocar muchos otros efectos, tales como alteraciones del clima en el área (microclimas), inestabilidades geológicas, o modificaciones de los ecosistemas del río y áreas próximas o relacionadas.

Pero también pueden darse:

- **Accidentes parciales.**- Una maniobra inapropiada de los órganos de la desagüe de la presa (intencionada o por error) o un fallo mecánico puede tener como consecuencia una crecida artificial aguas abajo de la presa.
- **Rotura:** En caso de rotura de la presa se generará un hidrograma de crecida que puede tener consecuencias muy graves, especialmente si se superpone a un hidrograma de crecida natural (que ha podido ser la causa del suceso).

9.2 Laminación de crecidas sin operación de válvulas y compuertas

Un efecto importante de un embalse, que debe conocerse bien para la correcta vigilancia y previsión hidrológica, es el de la laminación de las crecidas. Las presas cuentan generalmente con aliviaderos, que permiten el desagüe de volúmenes almacenados, de tipo vertedero (situados en la superficie, empiezan a funcionar a partir de cierto nivel de embalse) o desagües profundos (conducciones cerradas con la boca de entrada sumergida). Tanto unos como otros pueden funcionar de manera libre, sin posibilidad de regulación, o con sistemas de compuertas o válvulas que admitan control (al menos parcial y dependiendo de la situación) del caudal de salida.

Gracias al fenómeno de laminación, el hidrograma de entrada a un embalse puede ser completamente absorbido, si el volumen disponible es mayor o igual al volumen del hidrograma de entrada, o transformarse aguas abajo de la presa en un hidrograma (el de salida) con un volumen igual o menor pero con un valor punta (valor máximo) reducido y retrasado.

9.2.1 Con vertedero libre

En las figuras siguientes se ilustra el caso de un embalse de volumen 100 hm³ para un nivel de 60 m (siguiendo una ley altura-volumen de tipo cónico) al que le llega una crecida de 100 m³/s, con una presa dotada de un vertedero con labio en nivel 60 y longitud de vertido 40 m. Puesto que inicialmente se cuenta con un volumen disponible, al estar la lámina del embalse en el nivel 56, parte del hidrograma de entrada es asumido y la salida tiene un volumen menor y una punta reducida y retrasada.

En un caso como éste, la protección aguas abajo es notable.

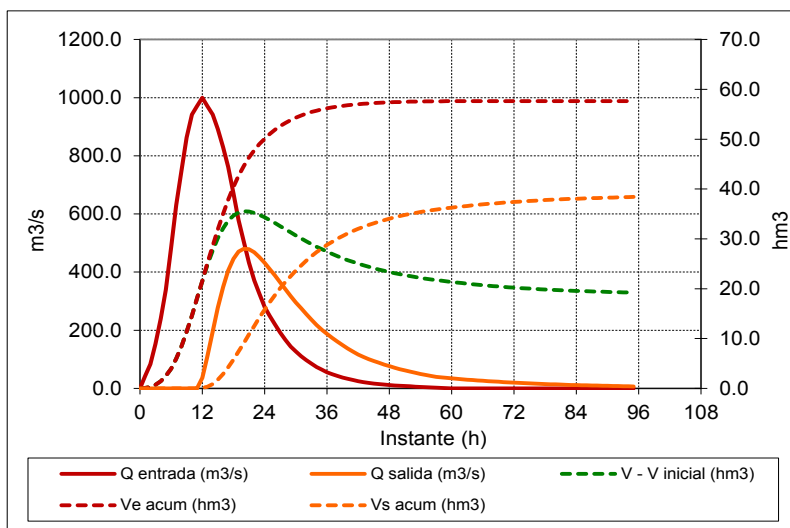


Figura 44: Ejemplo de evolución de caudales y volúmenes de un embalse que contaba con resguardo antes de la presentación de una crecida

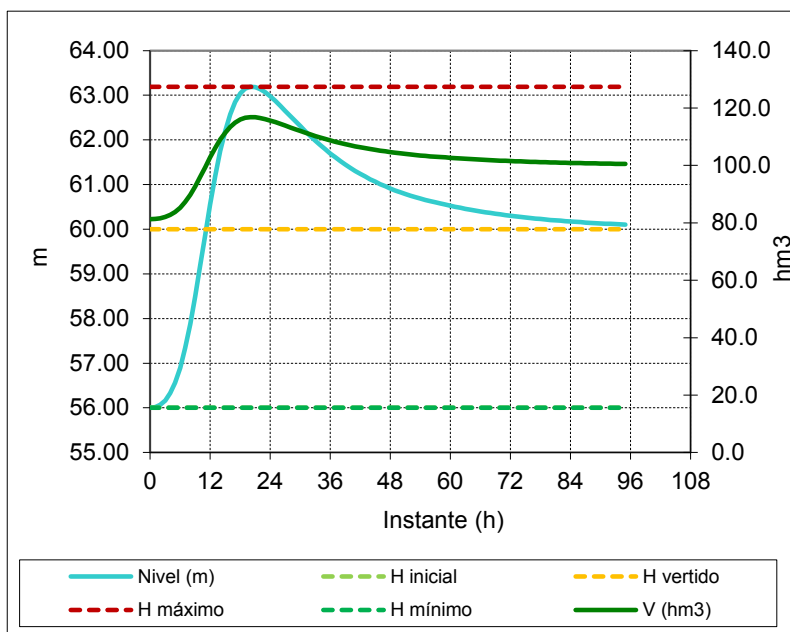


Figura 45: Ejemplo de evolución de nivel y volumen de un embalse que contaba con resguardo antes de la presentación de una crecida

9.2.1.1 Influencia de la relación entre volúmenes de embalse y de crecida

Pero el efecto laminador dependerá en gran medida de la relación entre el volumen del hidrograma y el volumen del embalse. Así, en el caso de que el volumen del embalse sea muy pequeño con respecto al de la crecida, los hidrogramas aguas arriba y aguas abajo serán prácticamente idénticos (la presa funciona como un azud). Todo dependerá de la capacidad de almacenamiento del embalse en los niveles que se alcancen durante la laminación.

Esto se ilustra analizando el caso anterior, con el mismo hidrograma de entrada (de 5.7 hm^3), pero suponiendo que la cota inicial está en el borde del vertedero (nivel 60) y suponiendo diferentes volúmenes de embalse. Puede observarse que si el volumen de embalse es pequeño (25 hm^3) el valor punta aguas abajo es casi el mismo que el de aguas arriba, aún a costa de una sobreelevación importante (5 metros). Sin embargo, si el embalse es grande, 500 hm^3 , le basta una sobreelevación de poco más de metro y medio para reducir la punta de caudal en un 80 %.

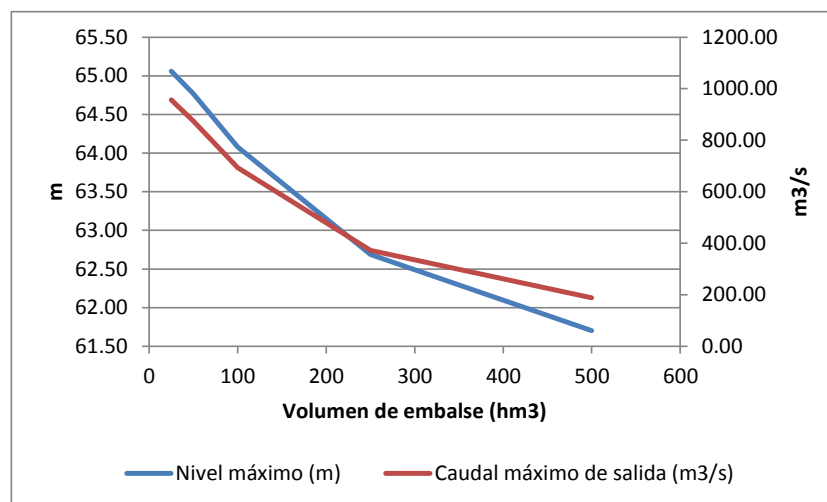


Figura 46: Dependencia del efecto de la laminación en función del volumen de embalse

9.2.1.2 Influencia de la longitud de vertido

La presa se diseña para admitir una cierta sobreelevación en la laminación de un determinado hidrograma de entrada. En función de estos condicionantes resultarán las dimensiones del vertedero, con una longitud de vertido determinada. Cuanto mayor sea la longitud de vertido menor será la laminación (reducción del caudal punta), porque el caudal máximo se produce con menor sobreelevación de embalse.

La figura siguiente ilustra el mismo caso anterior manteniendo el volumen de embalse en 100 hm^3 pero variando la longitud de vertido.

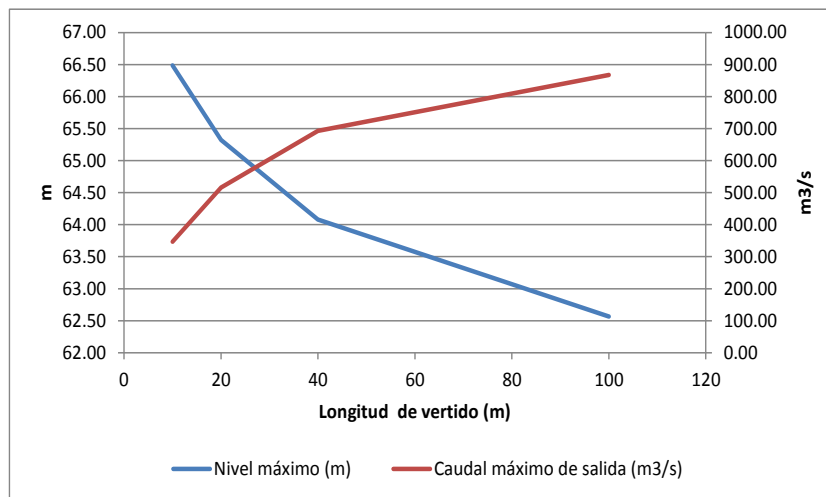


Figura 47: Influencia de la longitud de vertido en la laminación.

9.2.2 Capacidad de laminación de crecidas de los desagües profundos

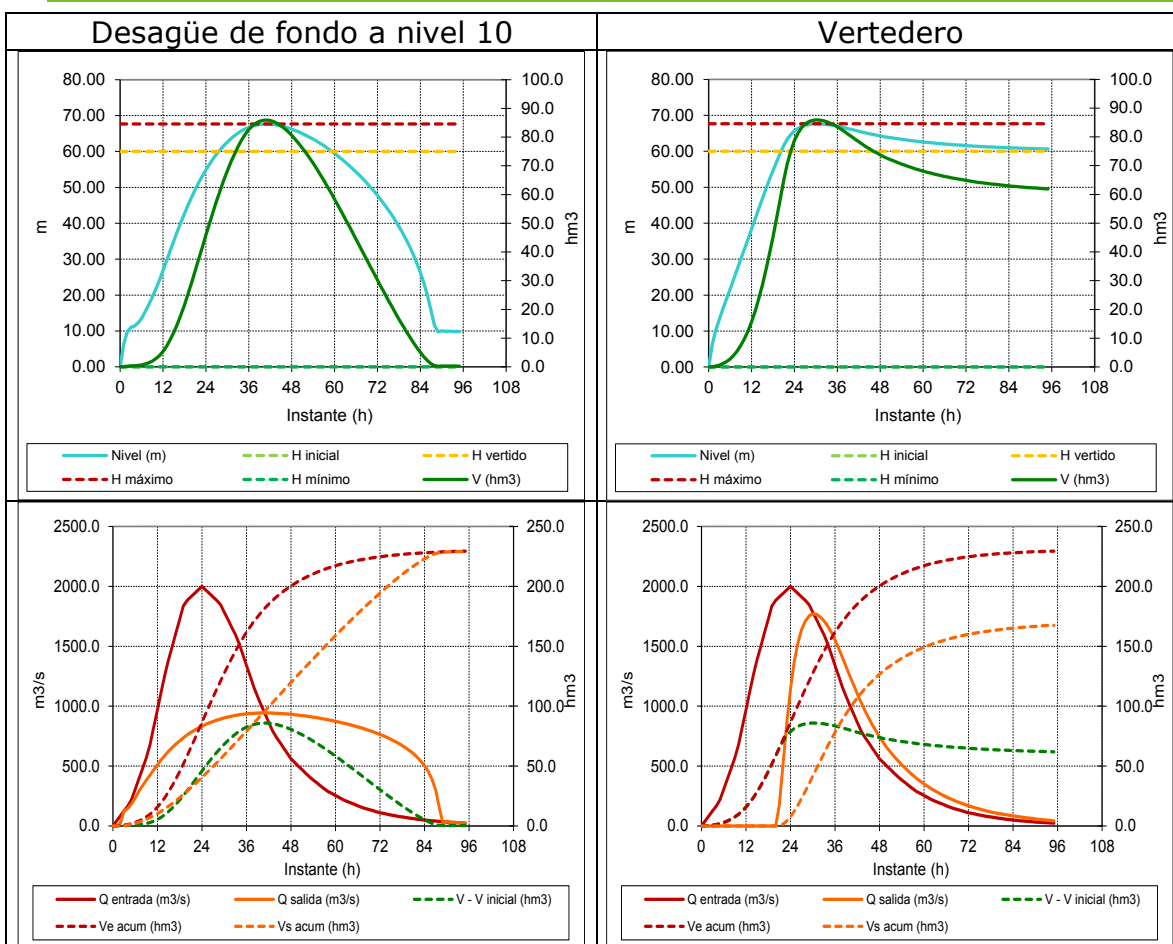


Tabla 5: Comparación de laminaciones con vertedero y desagüe de fondo que llevan a la misma sobreelevación

Los desagües profundos llevan a una excelente laminación, con ventajas con respecto a los vertederos en lámina libre. Ello es debido a que rápidamente alcanzan un caudal máximo de desagüe poco sensible a las variaciones de nivel de la lámina de agua, caso contrario al de los aliviaderos en superficie.

Para ilustrar lo anterior (Tabla 5) se supone una presa de capacidad de embalse de 60 hm^3 para una altura de lámina de 60 metros a cuyo embalse le entra un hidrograma de valor punta $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ y volumen 230 hm^3 . La laminación de la crecida con un aliviadero de 40 metros (de longitud de vertido) llevaría a una sobreelevación 7.6 metros con un caudal de salida punta de $1772 \text{ m}^3/\text{s}$. A un desagüe de fondo situado al nivel 10 le bastaría desaguar un hidrograma con una punta de $943 \text{ m}^3/\text{s}$ (casi la mitad), para que no se superase esa sobreelevación. Para ambos casos se supone apertura total desde el principio y embalse vacío. Esta comparación sirve como ejemplo de la idoneidad de la solución de "presas agujero", como son conocidas en España, para la laminación de crecidas.

9.3 Operación de embalses en situaciones de crecida

El problema de la operación de embalses en situaciones de crecida es también conocido como operación de embalses en tiempo real. Se trata de un proceso continuo de toma de decisiones para la determinación de niveles de embalses y desagüe de caudales. La operación estará basada en una política de explotación que se concretan en unas reglas (normas de explotación), las cuales definirán una planificación estratégica (resguardos a lo largo del año, prioridad de uso de los órganos de desagüe, ...). En cada situación se irán tomando unas decisiones que concretarán más los resguardos con que se afronte la crecida y el modo de operar con los desagües.

El problema así planteado no está referido a las condiciones pésimas de caudales de entrada, sino que se orienta hacia la operación en situaciones de crecidas ordinarias. En situaciones de avenida extrema, generalmente, solo hay una opción posible con garantías de seguridad: abrir todo. Dado la importancia de los volúmenes que se mueven en situaciones de crecida respecto al balance anual de recursos hídricos, una buena operación no solo disminuirá el riesgo de inundaciones, sino que, además, puede permitir un ahorro considerable de agua.

9.3.1 Previsión de entrada y situación del embalse

La selección de una determinada operación de desagüe será el resultado de una toma de decisiones. Este proceso se habrá desarrollado en unas determinadas circunstancias y en un intervalo de tiempo. En cualquier caso, la decisión se habrá apoyado en una previsión de hidrogramas de entrada, pues la definición de una estrategia de explotación basada en estudios hidrológicos de naturaleza estadística se basa en la consideración de que se puedan presentar unos hidrogramas con una

determinada probabilidad (esto también puede ser considerada una previsión). La diferencia estará en la definición más o menos detallada del hidrograma y en la base y naturaleza de la previsión. Se distinguen pues los siguientes casos:

- Previsión probabilista de posibles situaciones hipotéticas: Será el caso de las metodologías seguidas en la definición de las normas de explotación de embalses. Generalmente se reducen a unas previsiones de hidrogramas de entrada caracterizados por los caudales punta y con una cierta definición de la forma de los hidrogramas, llevada a cabo por métodos sintéticos más o menos realistas. En estos casos, también el estado del embalse al inicio de la crecida estará asociado a un razonamiento probabilista o será el real correspondiente a una situación concreta durante la explotación de un embalse.
- Previsión de hidrograma concreto: En una situación concreta, se realiza una previsión de entrada al embalse con definición de hidrograma a lo largo del tiempo. Es el caso de las previsiones de caudal de entrada por métodos hidrometeorológicos basados en información obtenida en tiempo real.

En un sentido amplio, las estrategias de explotación se pueden clasificar en dos grupos, según se considere conocido o desconocido el hidrograma de entrada. En este último caso, la estrategia de operación se califica como reactiva, por ser función sólo del estado actual del embalse y de la evolución reciente. Este modo de operar un embalse es usado en la actualidad, pero su consideración en este documento carece de sentido, pues no necesita a la hidrología operacional.

9.3.2 Horizonte temporal de la decisión

El proceso de toma de decisiones mencionado anteriormente estará asociado a un horizonte temporal, cuyos rangos serán distintos en unas circunstancias y otras, dependiendo del sistema hidrológico en el que se encuentre (ver apartado 7.5), pero podrían ser los siguientes:

- Largo plazo: El horizonte temporal será expresable en meses y la decisión será función de unas hipótesis de aportaciones y demandas y de la situación inicial. La previsión y la decisión estarán prácticamente definidas en las normas de explotación de los embalses (apartado 9.3.4) y su extensión más común será la del año hidrológico. Las entradas tendrán una base probabilista en función de series históricas, es decir, climáticas.
- Medio plazo: Serán el horizonte, expresado semanas (o incluso en días), en el que las decisiones habrán de ser tomadas sobre situaciones definidas con

mayor nivel de concreción por las circunstancias del momento. En general, las hipótesis de entrada serán casi las mismas que las que se emplean en el horizonte a largo plazo, salvo cuando la previsión meteorológica o climática proporcione bases para acotar la incertidumbre de base probabilista.

- Corto plazo: En este horizonte temporal, las variables tienen una definición continua o cuasi-continua (discretización temporal a intervalos de una hora, por ejemplo), pudiendo abarcar varios días, pero en el que la situación actual estará definida concretamente y las posibles entradas cuenten con mayor grado de determinación, hasta el punto de que sean aceptables métodos deterministas. Será el caso en el que se cuente con la previsión de un hidrograma concreto de entrada al embalse.

Cabría asociar, por tanto, el largo plazo a la explotación ordinaria del embalse, con escalas temporales de trabajo anuales y estacionales, basándose en predicciones climáticas. El medio plazo, se ajusta también a unas decisiones estratégicas, con un conjunto de condicionantes aún poco definidos pero ya con mayor nivel de concreción, y puede contar con la predicción meteorológica como dato de entrada. Por último, el corto plazo será la escala temporal propia de la operación de embalses en tiempo real, pero dentro ya de un proceso continuo y en el que la previsión hidrológica puede tener gran importancia. Todo esto se entenderá condicionado a los tiempos de respuesta del sistema hidrológico situado aguas arriba del embalse y del tamaño de éste último.

9.3.3 Condicionantes específicos

La gestión de embalses tratada con un enfoque general buscará satisfacer en su operación los objetivos que le sean marcados, los cuales pueden agruparse en satisfacer unas demandas (de abastecimiento, regadío, ...), generación de energía eléctrica y laminación de crecidas. Cada presa y embalse contará con sus propios condicionantes de acuerdo a sus objetivos específicos.

En la gestión de un embalse se distinguirán los siguientes objetivos cuya ponderación relativa dependerá de cada caso concreto:

- Seguridad de la presa.
- Daños aguas arriba por sobreelevación de la lámina
 - por inundación o
 - por efecto sobre la curva de remanso.
- Daños aguas abajo consecuencia del desagüe.

- Asegurar un volumen mínimo al final de la avenida para su explotación normal (abastecimiento, riego, energía eléctrica,...)

Las siguientes variables estarían asociadas a estos objetivos:

- nivel de embalse a los dos primeros,
- caudal de salida relacionado con los daños aguas abajo y
- volumen (o de nuevo el nivel relacionados ambos por las curvas batimétricas del embalse)

Por otra parte, se contará con una serie de limitaciones, como:

- velocidad de maniobra de compuertas,
 - por razones mecánicas o
 - para evitar efectos sorpresa aguas abajo,
- y la velocidad de elevación del nivel de agua
 - para evitar posibles deslizamientos de ladera o
 - para evitar efectos sorpresa aguas arriba.

Y unas condiciones:

- volumen de embalse destinado a la laminación (resguardo) existente en ese momento,
- umbrales de caudales máximos admisibles y
- niveles en puntos de afección.

Relacionado con la primera de las condiciones está la variable nivel en el instante en el que tenga que ser tomada la decisión y, con las otras, las condiciones hidrológicas existentes en los puntos de afección a los que se superpondrá el efecto del posible desembalse. Para un punto de afección que se encuentre aguas abajo puede existir una subcuenca vertiente, o incluso otro embalse, cuyos caudales drenantes sean de importancia, pero, por contra y con efecto favorable, el tramo de transporte probablemente tenga cierta capacidad de laminación. Es recomendable considerar la combinación de la salida del embalse con distintos valores de caudales circulantes por el cauce procedente de otras aportaciones. No obstante, por razones prácticas, se simplifica el problema, en gran número de ocasiones, relacionando directamente el caudal de salida con unos posibles daños.

9.3.4 Las normas de explotación

Las normas de explotación de presas y embalses, que tienen una finalidad mucho más amplia de lo que aquí se trata, definen la manera en que ha de ser controlado

el embalse para satisfacer los objetivos de la gestión. Es decir, fijaran por un lado la regulación del embalse, generalmente a escala mensual, que permita cumplir con los objetivos de sus funciones en cuanto a demandas de agua o generación y, por otro, la política de resguardo a seguir con el objetivo de hacer frente a las crecidas.

La casuística de situaciones posibles es enorme, variable según las funciones del embalse y las singularidades del clima de su cuenca vertiente, de las posibles afecciones aguas abajo y otros condicionantes. Por ello, habrá que asumir algunas simplificaciones e hipótesis que permitan llegar a algunas conclusiones más o menos generales, y sea así posible definir la estrategia de operación.

9.3.5 Análisis simplificado de algunas situaciones

Con la finalidad de alcanzar un conjunto de conclusiones generales de interés práctico, se ha acometido la tarea de obtención de resultados de cálculo y su posterior análisis, sobre la base de un caso simplificado, pero planteado de tal modo que permita centrar la atención en las magnitudes más representativas, en los resultados de mayor interés y en los aspectos más relevantes de las decisiones.

Se analiza el caso de una presa, pero cabe aplicar el mismo enfoque a casos más complejos.

9.3.5.1 Definición de la maniobra triangular

Se usa el concepto apertura, expresado en porcentajes, como la relación del desagüe, que se produce a una cota de lámina de agua en el embalse, respecto del margen posible entre máximo y mínimo desaguable en el mismo nivel de llenado del embalse.

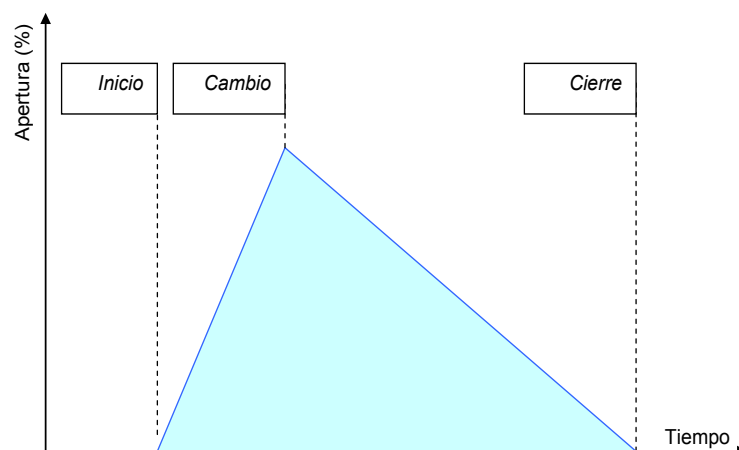


Figura 48: Definición de desagüe triangular. Instantes representativos.

En función de lo anterior, se definen las maniobras triangulares como unos movimientos de desagüe tales que la curva de grado de apertura se ajusta a un triángulo con un instante de inicio de apertura (inicio), un instante (cambio) de apertura máxima y un instante en el que se cierran las válvulas y compuertas (cierre).

9.3.5.1.1 Justificación de la maniobra elegida

La maniobra triangular elegida puede considerarse como representativa de un conjunto de otras muchas que proporcionen la misma situación para el embalse en los instantes de inicio, cambio y cierre. La condición para que puedan englobarse en un mismo grupo es que los volúmenes desaguados hasta el instante de inicio sean cero, y coincidan los volúmenes en los intervalos comprendidos entre los instantes de inicio y cambio, y entre los de cambio y cierre. Por supuesto, las trazas de la representación de las cotas y los caudales en función del tiempo no coincidirán, pero serán muy parecidas y coincidirán en los puntos señalados.

La intención es representar una maniobra representativa de las decisiones más importantes: la de inicio de la maniobra, la de alcanzar la máxima apertura y la de cierre total, asociada a su vez con la velocidad de descenso de nivel y caudal.

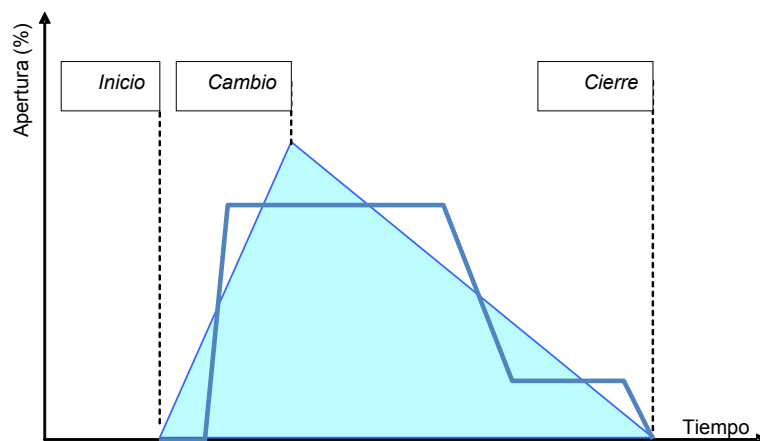


Figura 49: Desagües equivalentes (si sus volúmenes desaguados entre tiempos característicos de la maniobra triangular son iguales)

9.3.5.2 Definición de embalse y órganos de desagüe

Las pruebas y análisis (que se exponen aquí) se realizan operando con embalses y presas ficticios, con el objeto de variar a voluntad características más relevantes de volúmenes y desagües para así evaluar la influencia de diversos factores.

- El volumen se define como una curva cónica que tal que a la altura H de la presa se almacena un determinado volumen V .

- El vertido por aliviadero se define con una curva de exponente 1.5 tal que a la altura $H+S$, siendo S la sobreelevación, desagua un caudal Q_v .
- El alivio por desagüe de fondo se define por una cota de posición, a partir de la cual se puede producir el desagüe, y un caudal que puede aliviarse a la altura H .

9.3.5.3 Definición de envolventes para el caso de una presa

En lo que sigue, se va a suponer una presa caracterizada por:

- Altura=70 m. Volumen= 200 hm³
- Aliviadero que desagua 2000 m³/s con una sobreelevación de 4 m (equivalente a una longitud de vertido de unos 90 metros)
- Desagüe de fondo cerrado (caudal 0)

Y unas maniobras que se caracterizan por (ambos tiempos a medir desde el instante cero)

- Inicio = 6 horas
- Cierre = 96 horas

Pudiendo variar el cambio y la apertura. Las conclusiones que se presentan a continuación se basan en valores de cambio comprendidos entre 12 y 90, con incrementos de 6 horas, y aperturas de 0 a 100 con incrementos de 5 %. En las gráficas no se presentan todos los resultados.

Las entradas al embalse estarán definidas por hidrogramas tipo SCS (su definición puede encontrarse en libros de hidrología básica) con diferentes caudales punta y con:

- Tiempo de punta = 12 horas
- Duración = 96 horas

Las siguientes figuras muestran los caudales (Figura 50) y niveles (Figura 51) que resultan de varias combinaciones de cambio y apertura para un caudal con valor punta de 300 m³/s. Se han incluido también las curvas correspondientes a una simulación del embalse bajo la hipótesis de que sus órganos de desagüe se encuentran completamente abiertos desde el principio y así se mantienen hasta el final del periodo de cálculo.

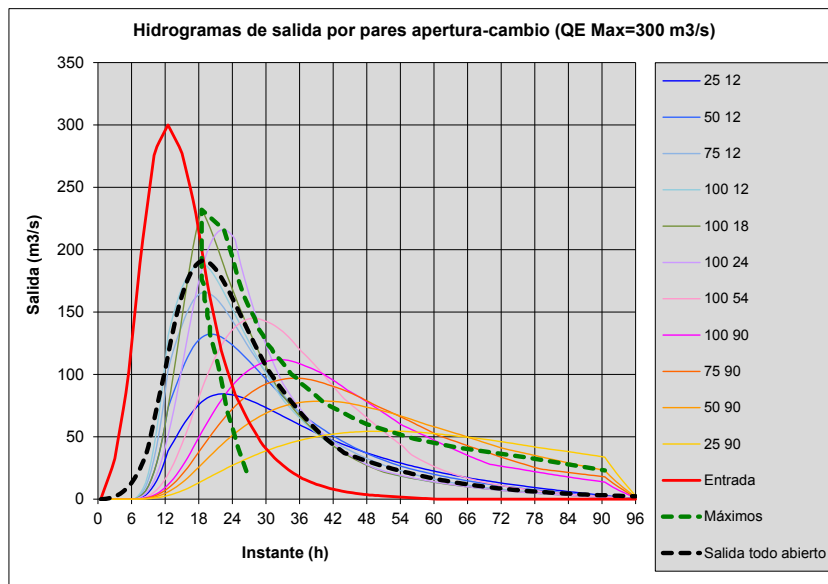


Figura 50: Hidrogramas de salida de embalse resultantes de maniobras triangulares para un caudal de entrada con punta de 300 m³/s

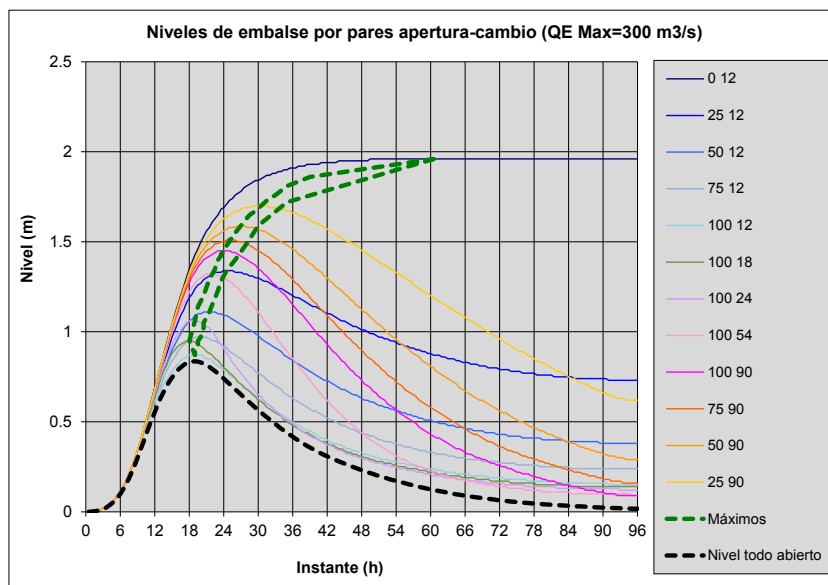


Figura 51: Limnogramas de embalse resultantes de maniobras triangulares para un caudal de entrada con punta de 300 m³/s.

Si se realiza esto mismo para varios hidrogramas de entrada y se presentan los resultados de síntesis de los máximos caudales de salida expresados en porcentaje respecto al valor máximo de entrada, se aprecian curvas muy similares, salvo en los valores más extremos (Figura 52) debido a que es posible laminar más un hidrograma de entrada cuanto menor sea su volumen.

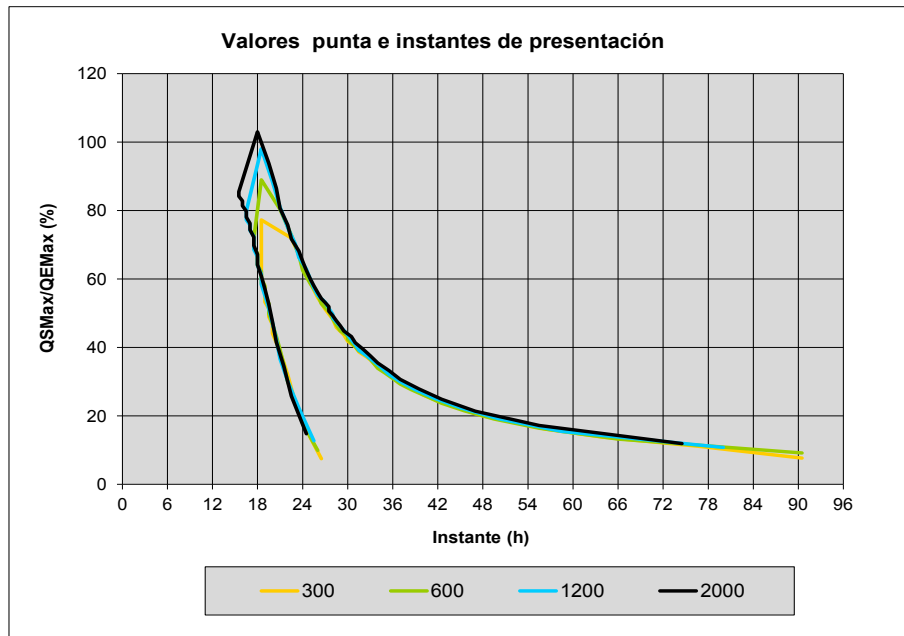


Figura 52: Presentación de caudales punta de salida de embalse para diferentes caudales de entrada

Si se representan los valores punta de nivel expresados en porcentajes respecto a la máxima sobreelevación que se alcanzaría en caso de mantener todo cerrado, es decir, embalsando todo el hidrograma de entrada (lo cual puede no ser posible para caudales altos por necesitar una gran sobreelevación), también resultan gráficas muy similares entre sí (Figura 53).

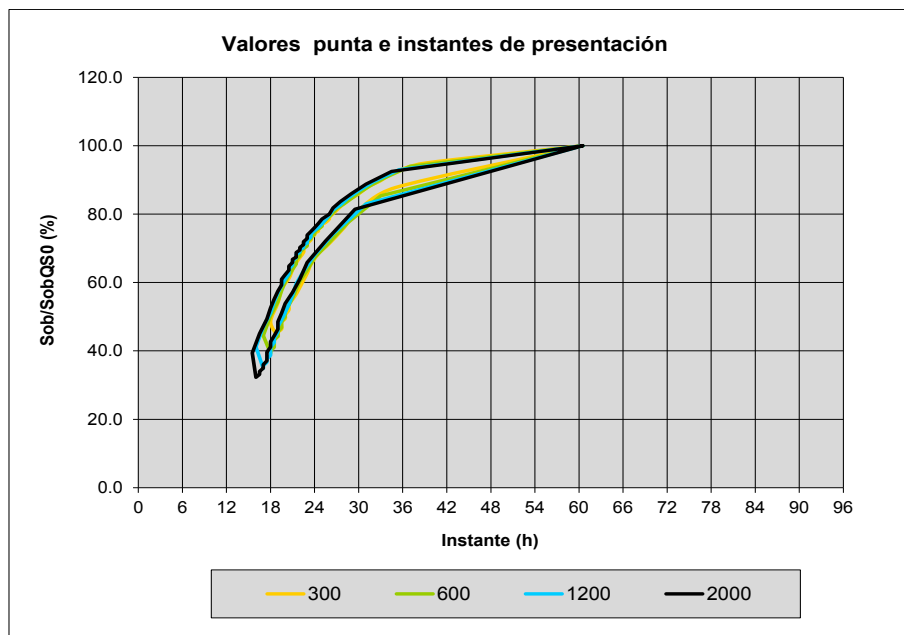


Figura 53: Presentación de niveles punta de nivel de embalse para diferentes caudales de entrada

Si se centra la atención en el caso de uno de los hidrogramas de entrada (Figura 54 y Figura 55), se aprecia que los resultados pueden resumirse en tres tramos: los

que corresponden al cambio en la hora 12, a la apertura total y al cambio en la hora 90, es decir, a las maniobras más anticipadas, a las de apertura total y a las más retrasadas.

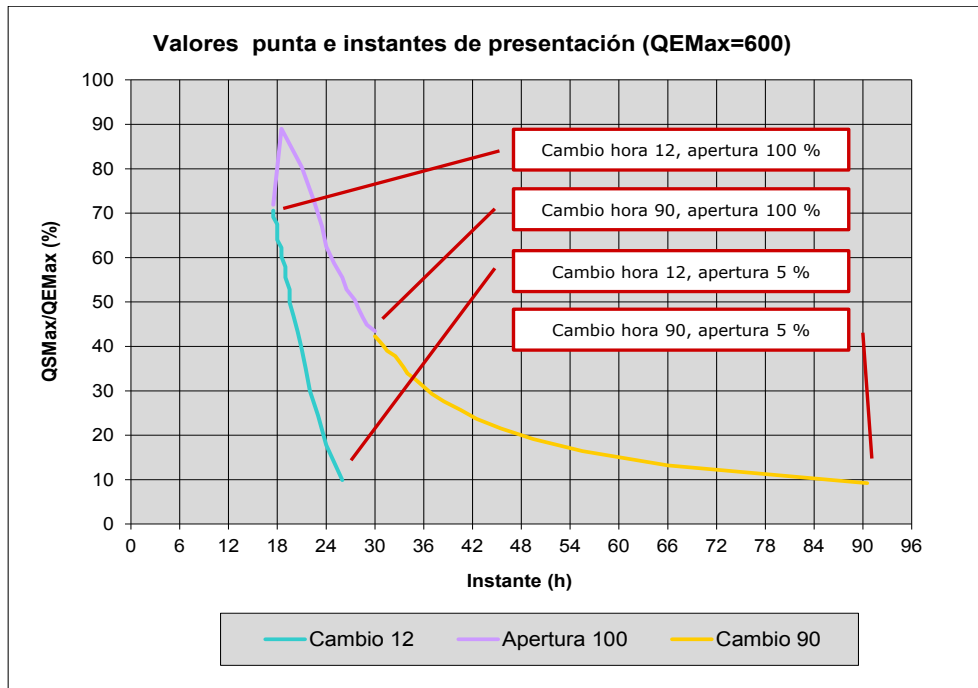


Figura 54: Presentación de caudales punta de salida de embalse para un caudal de entrada de 600 m³/s. Maniobras extremas.

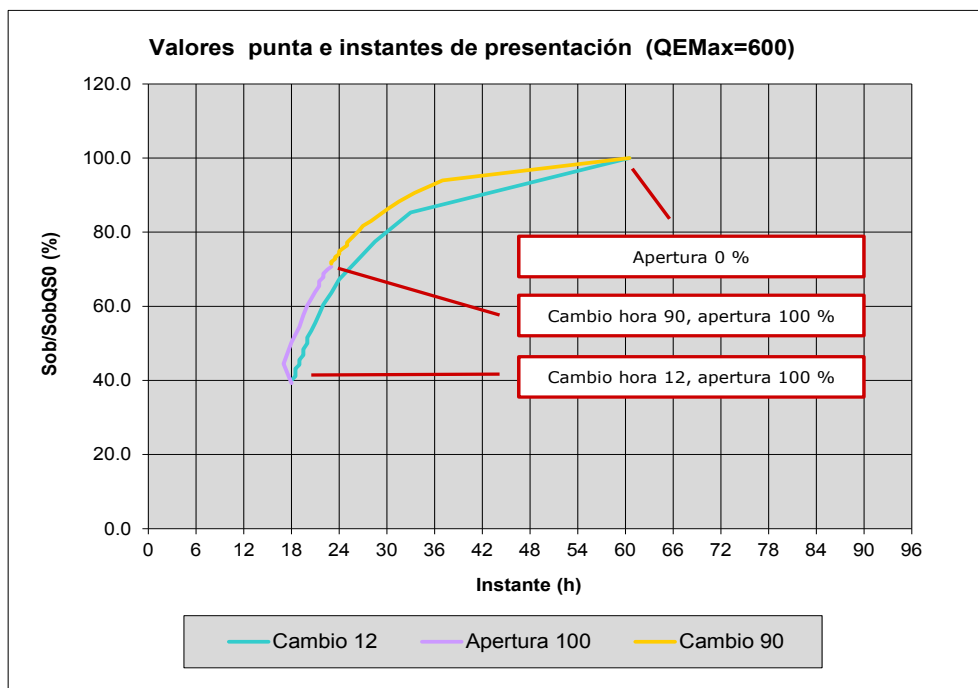


Figura 55: Presentación de niveles punta de embalse para un caudal de entrada de 600 m³/s. Maniobras extremas.

Las aperturas retrasadas llevan a las grandes laminaciones, pero también a las máximas sobreelevaciones necesarias para tales laminaciones. Las maniobras

adelantadas llevan a importantes laminaciones sin necesidad de altas sobreelevaciones. Por otro lado, las aperturas totales llevan a las mayores puntas de caudal de salida pero sin ventajas importantes en las sobreelevaciones. Esto resulta más evidente en una gráfica (Figura 56) que relaciona las laminaciones con las sobreelevaciones.

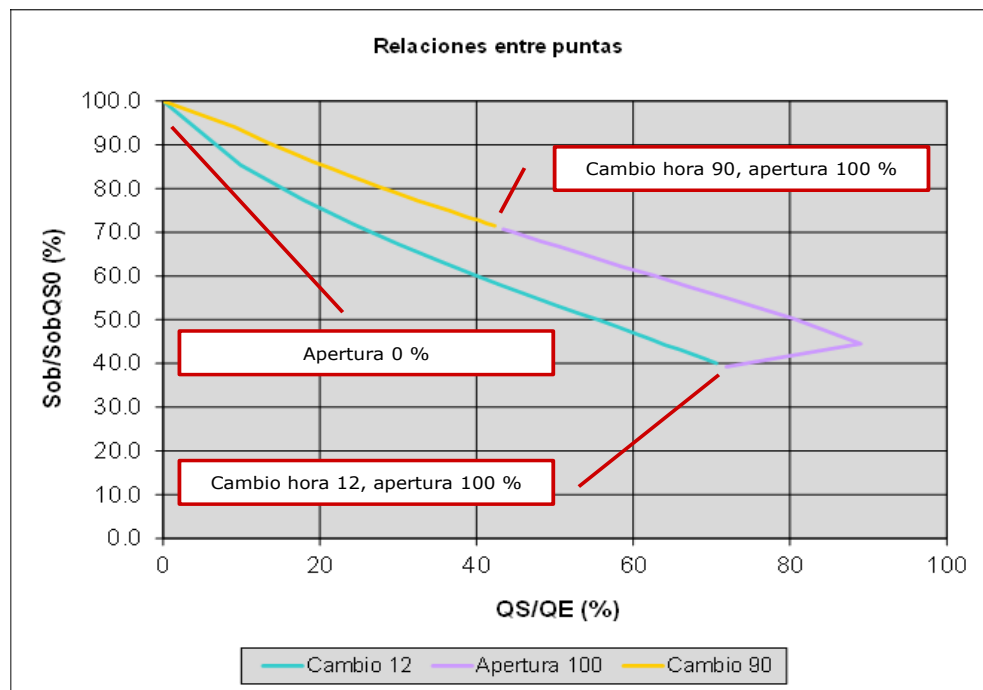


Figura 56: Relaciones entre valores punta de nivel y caudal de salida para un hidrograma de entrada con punta de 600 m³/s

Se observa que la mínima sobreelevación se logra con la maniobra más adelantada con la máxima apertura, pero si se desea una mejor laminación hay que abrir menos, lo que implica mayor sobreelevación.

Esta gráfica es útil para evaluar las posibilidades de maniobra en una situación concreta. Así, si en el caso del hidrograma de entrada de 600 m³/s, en el que la sobreelevación con todo cerrado es 3.82 m, se fijan como objetivos un caudal máximo de salida de 420 m³/s (70 %) y una sobreelevación de 2.5 m (65 %), resulta que las posibilidades se reducen al área marcada en la figura (Figura 57), lo que aconseja buscar una solución de apertura sin retraso importante y con una apertura alta.

Por ejemplo, si se opta por la maniobra definida por cambio = 30 h y apertura = 75 % (la marcada en la figura anterior), se logra un resultado (Tabla 6) con sobreelevación = 2.21 m (57%) y caudal punta de salida de 333 m³/s (55 %).

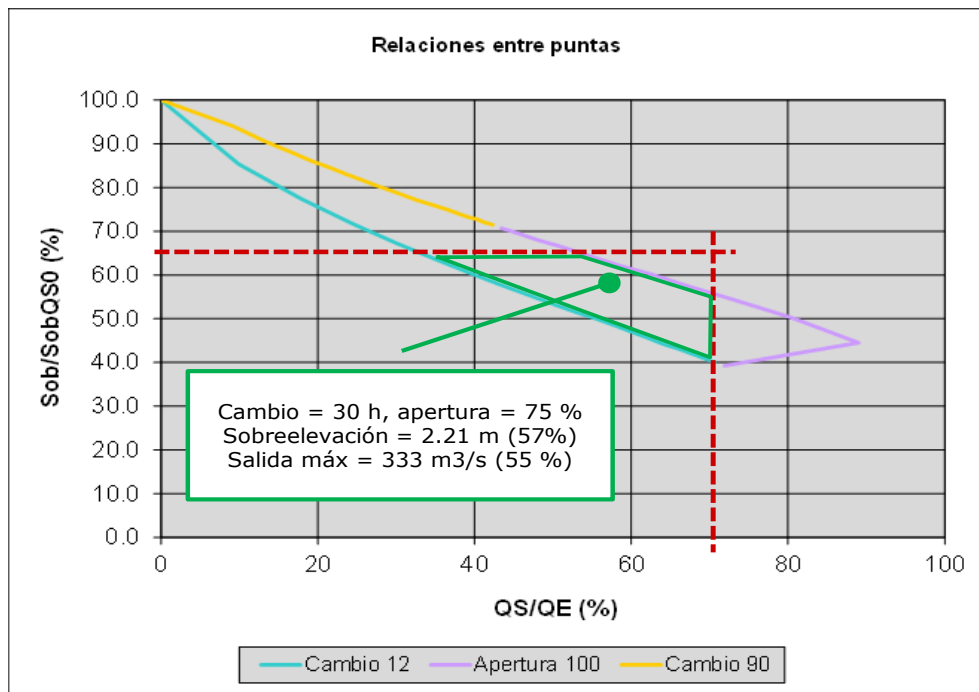
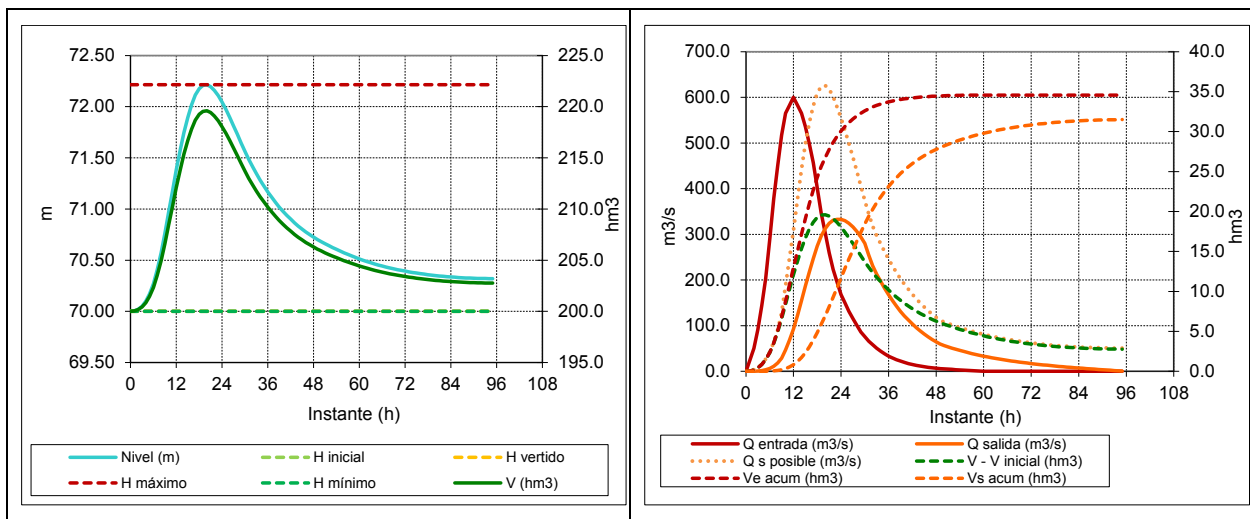


Figura 57: Área de posibles maniobras fijados unos objetivos de operación en nivel y caudal.



El análisis de los instantes de presentación de las puntas de caudal de salida y de nivel de embalse tiene también interés especial. Se observa (Figura 58) que con las maniobras retrasadas se cuenta con amplio margen para los instantes de presentación de las salidas máximas, lo que no se da con las maniobras adelantadas, pero a costa de mayores sobreelevaciones. El margen para optar por el instante de presentación del nivel máximo es menor en cualquier caso, pues está fuertemente condicionado por el instante de la punta del hidrograma de entrada.

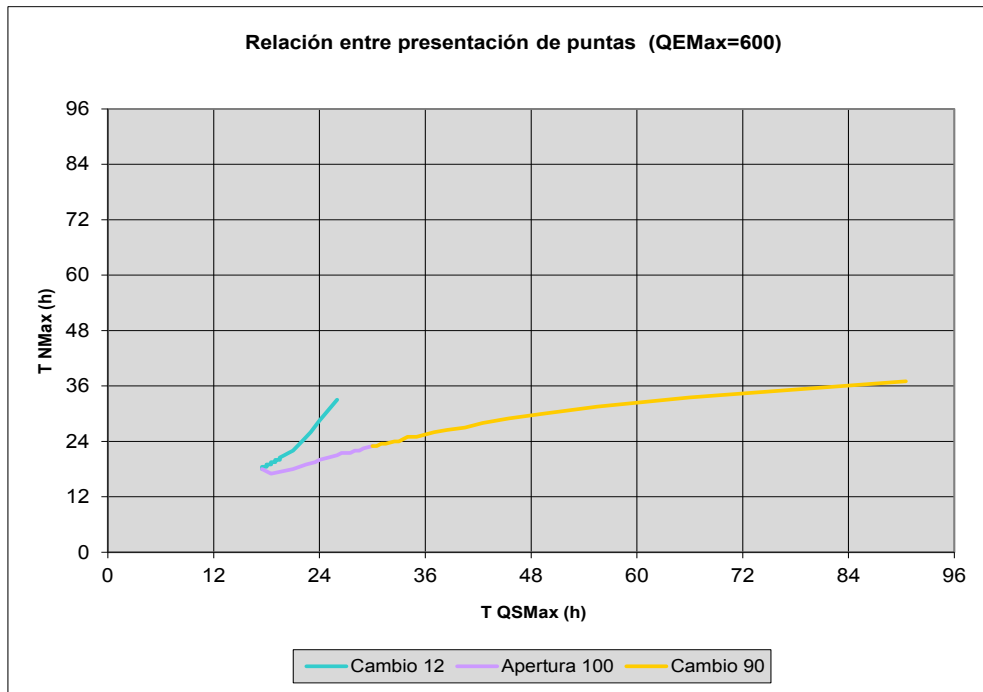


Figura 58: Relación entre los tiempos de presentación de las puntas de nivel y caudal para un hidrograma de entrada con punta de 600 m³/s

10 Relaciones nivel-caudal en ríos y canales

El caudal en un río se calcula midiendo la velocidad en diferentes áreas de la sección transversal al flujo e integrando. Generalmente, las medidas son puntuales y se asocian a una cierta área parcial. Pero este método es caro, suele requerir mucha intervención humana y hay que usar instrumentos de alto coste. La acción de medir así el caudal es lo que se denomina aforo directo, y hay que resaltar que se trata de una medida eventual, pues se realiza en un momento determinado con unas condiciones concretas. Existen sistemas de medida de velocidad continuos pero tienen coste alto y suelen ser solución para canales o cauces pequeños. Así, la solución general suele ser optar por la medida de nivel y relacionarla con el caudal a través de una relación biunívoca denominada curva de gasto.

La definición de la curva de gasto cuenta con numerosas dificultades, y debe tenerse en consideración que esta relación simple se trata de un modelo que, en muchas ocasiones, no se ajusta bien a la realidad.

En cualquier caso, incluso cuando se pueden medir velocidades en una estación, es necesario realizar trabajos de campo y de oficina, para ajustar parámetros o para definir curvas de gasto (varias, correspondientes a distintas hipótesis).

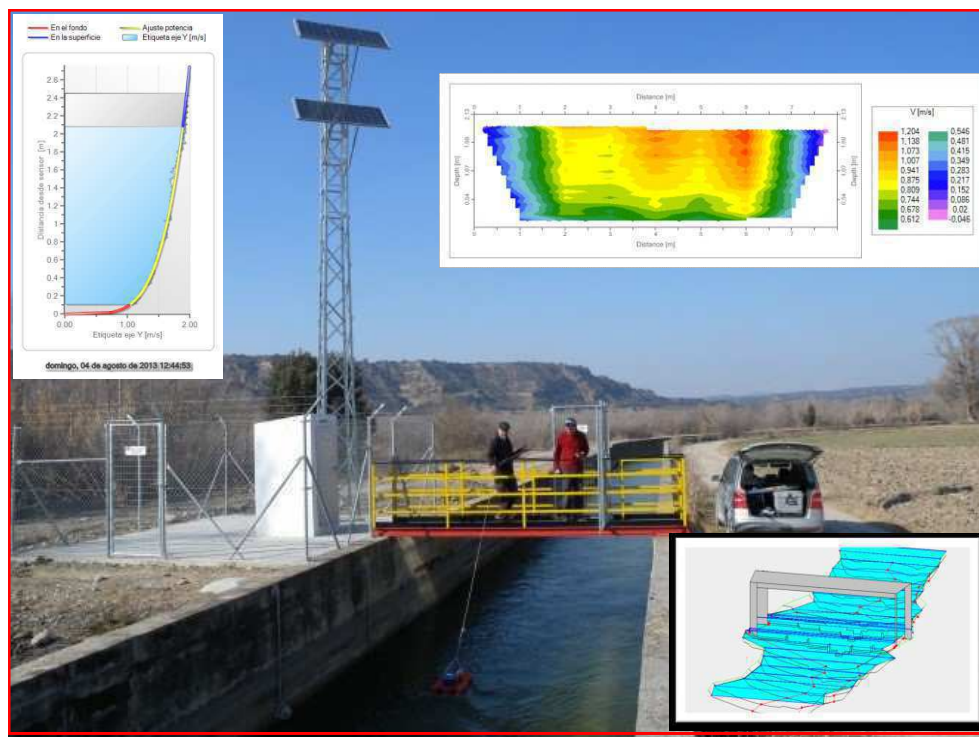


Figura 59.- La medida y el cálculo de caudales requieren trabajos periódicos en campo y en oficina

10.1 Histéresis

Este fenómeno ya fue brevemente explicado en otro apartado (5.2.2), pero es conveniente profundizar más en él por su importancia práctica.

Puede ser simulado con modelos hidrodinámico de flujo en lámina libre, en lo que se suelen denominar un cálculo hidráulico en régimen variable. Para el cálculo de una curva de gasto puede usarse un modelo en régimen permanente (resultado de los cálculos de modelos hidrodinámicos bajo la hipótesis de constancia en el tiempo), pero la histéresis solo se reproduce cuando se consideran variaciones en el tiempo.

La exposición que sigue a continuación se va a basar en ejemplos de un canal de 20 kilómetros de largo, de sección rectangular con ancho 100 metros y suponiendo que la condición de contorno aguas abajo viene dada por el régimen uniforme (una curva de gasto obtenida bajo las hipótesis hidráulicas más simples) para la pendiente general del canal. La condición aguas arriba será un hidrograma. Se compararán resultados cambiando la tasa de variación de dicho caudal en el tiempo, la pendiente del canal y su rugosidad. Para alejar las conclusiones de las posibles influencias de las condiciones de contorno (y de su cálculo), las conclusiones se basarán en la observación de cuanto ocurre en el punto intermedio (10 km). Los cálculos se realizan con el software HEC-Ras (ver referencias).

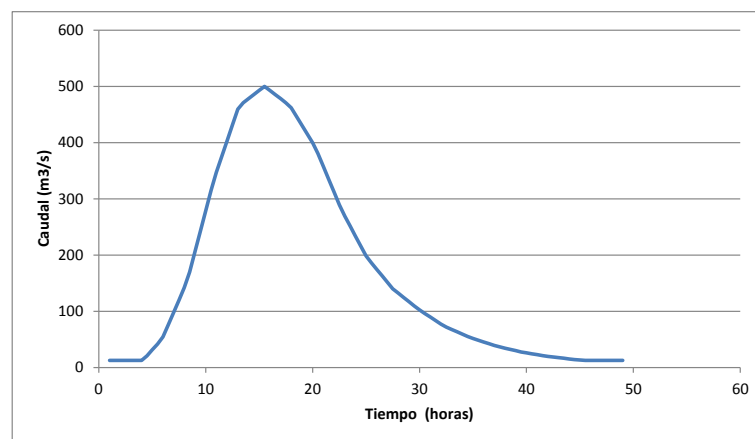


Figura 60: Hidrograma en cabecera del canal con elevación en 12 horas

Si el hidrograma (Figura 60) asciende en 12 horas desde casi cero hasta 500 m³/s en un canal como el indicado anteriormente con una rugosidad $n = 0.035$ y una pendiente $p = 1/10000$, se observa un fenómeno de histéresis considerable, en el que los caudales en la rama ascendente y descendente difieren hasta en más de un 40 % para algunos niveles. La curva biunívoca que proporcionan los cálculos en régimen

permanente se queda en una posición intermedia entre ambas ramas, a un tercio, aproximadamente, de la descendente (Figura 61).

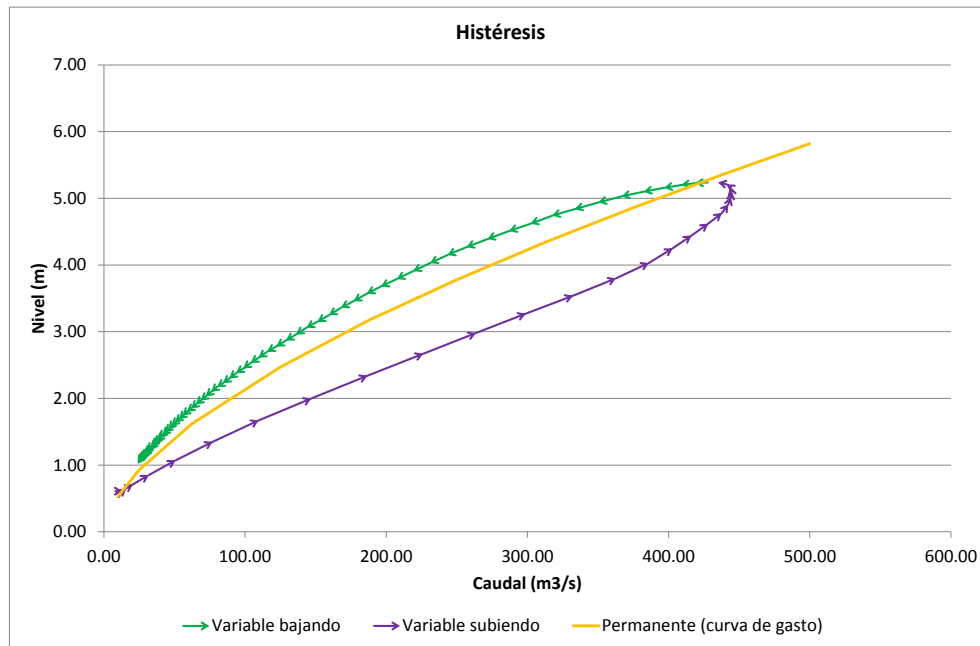


Figura 61: Relaciones nivel caudal en un canal de poca pendiente y con variación brusca del caudal

Si el hidrograma se estira en el tiempo de modo tal que la punta se alcanza en 24 horas (Figura 62), el fenómeno de histéresis es menos acusado. Pero si, aún con un hidrograma más suave, la rugosidad es mayor (0.055) entonces el fenómeno de la histéresis se acentúa nuevamente. Si la pendiente del canal fuese considerablemente mayor, 1/1000, prácticamente no se detecta el efecto de este fenómeno (Figura 63).

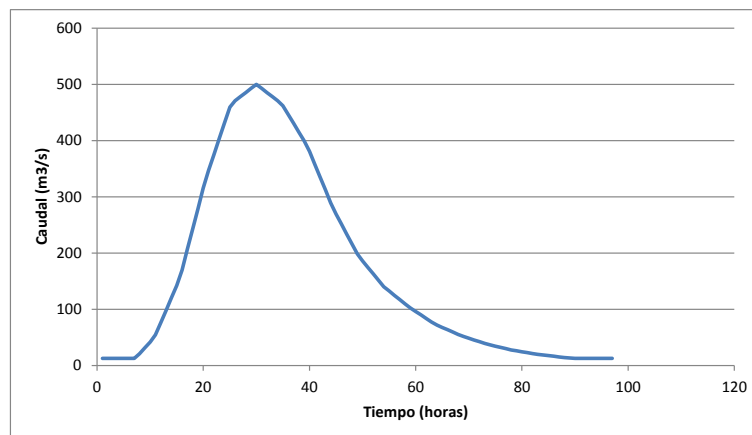


Figura 62: Hidrograma en cabecera con variaciones en tiempo más suaves

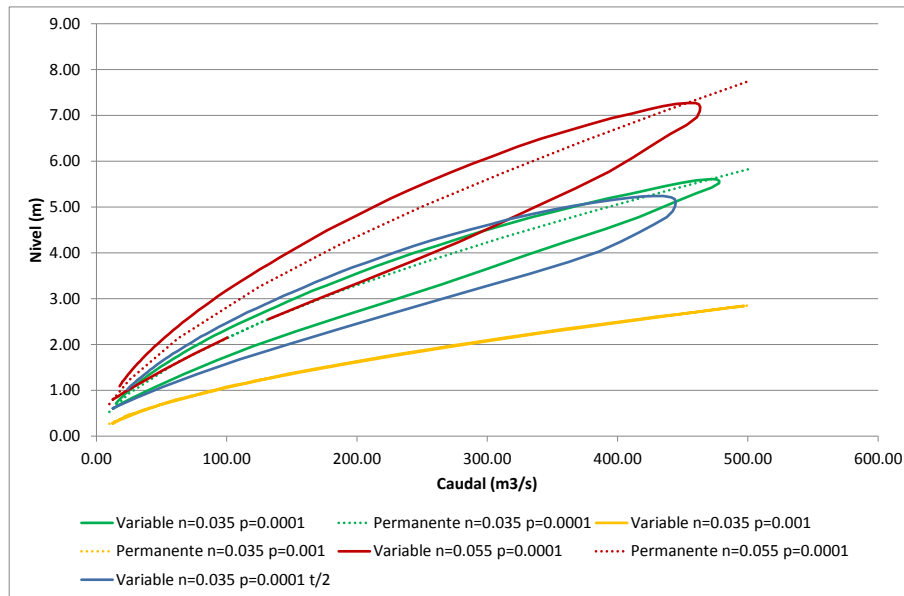


Figura 63: Cambios en la histeresis en función de la rugosidad, la pendiente y la variación temporal del caudal

Otra de las consecuencias importantes en la práctica es que las puntas de nivel y caudal se presentan desfasadas debido a las diferentes relaciones en las ramas ascendente y descendente. Esto dificulta la interpretación de observaciones de casos reales. El hidrograma calculado con una curva de gasto presentará la punta coincidente con la del limnigrama. Sin embargo, el hidrograma real, debido al fenómeno de la histeresis, se presentará adelantado y con un valor punta superior al que se estimaría con cálculos en régimen permanente (Figura 64).

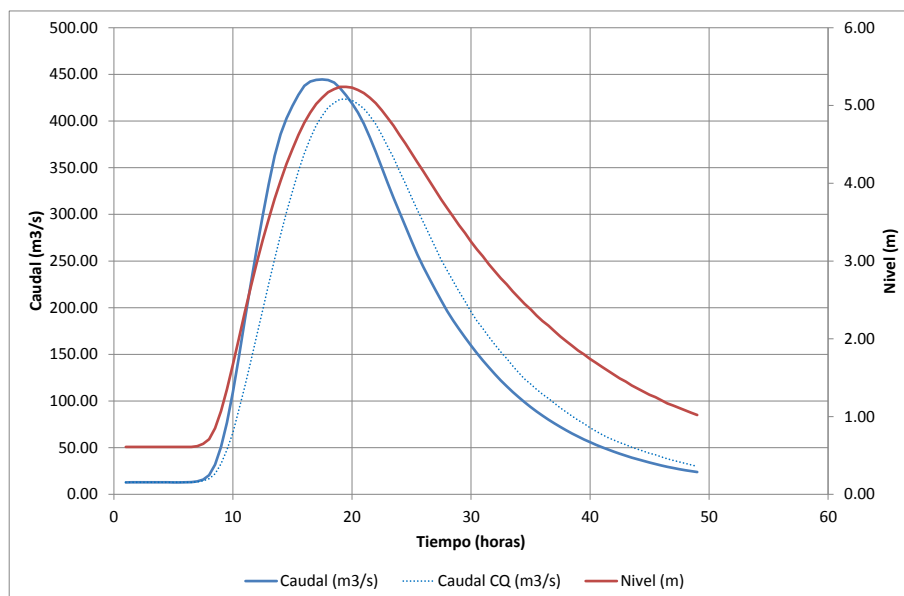


Figura 64: El fenómeno de histeresis puede dar lugar a un desfase importante entre la presentación de las puntas del caudal y el nivel.

10.2 Otras fuentes de error e incertidumbre

Hay otras causas que pueden causar modificaciones en la relaciones nivel-caudal en un río. Hay que tener en cuenta que los ríos tienen cambios a lo largo del tiempo, lo que altera su comportamiento. Las modificaciones pueden ser debidas a causas naturales pero también artificiales.

- Condiciones de contorno.- Una modificación del cauce que se produzca a varios kilómetros aguas abajo de la sección de medida, puede afectar en la relación nivel-caudal en ella, al propagarse el efecto con una curva de remanso.
- Vegetación.- Los cambios en la vegetación que afecten al flujo de agua alterarán la rugosidad (resistencia al movimiento). Por su crecimiento o por ser arrancadas y arrastradas por la corriente, las masas vegetales pueden constituir obstrucciones en el cauce. También pueden causar la elevación de la cota del lecho, por sus propias dimensiones o por retener sedimentos. Las variaciones de la vegetación pueden ser estacionales, siguiendo los ciclos vegetativos anuales de las plantas, pero también pueden tener un carácter más permanente.
- Transporte de sedimentos.- Las crecidas suelen causar erosiones y sedimentaciones que pueden llegar a producir modificaciones geométricas con importante repercusión en las capacidades de transporte del tramo de río afectado. En los casos más extremos, el flujo puede llegar a ser hiperconcentrado (con alta proporción de sólidos transportados por el agua), con lo que el comportamiento del fluido será distinto que si fuera solo agua. Además, hay que tener en cuenta que, durante una crecida, pueden darse fenómenos difícilmente observables y no detectables después de la misma. Así, pueden darse grandes erosiones con los caudales mayores que después serán, al menos parcialmente, reducidas por los depósitos de la rama descendente del hidrograma.
- Errores de medida de nivel y velocidad.- Los instrumentos de medida cuentan con sus propias limitaciones y dificultades de funcionamiento, las cuales pueden tener mayor importancia en casos de crecidas, nuevamente. Además, en estas situaciones pueden darse fuertes ondulaciones de la lámina de agua y otras circunstancias que dificultan la definición de un nivel.

10.3 Trabajo con curvas de gasto

Lo visto anteriormente obliga a trabajar con conjuntos de curvas de gasto, o con herramientas ágiles que permitan realizar cambios en las relaciones hipotéticas entre niveles y caudales, y que faciliten así la realización de unos cálculos de caudales ajustados a la realidad. Pero, previamente, es necesario realizar aforos directos, que proporcionen puntos de alguna de esas curvas en unas condiciones determinadas, y extender la relación entre niveles y caudales de forma continua y en todo el intervalo de valores de nivel que sea necesario para la operación.

10.3.1 Los aforos directos

La medida de caudales correcta es difícil (nunca debe ser trivializada) y requiere personal bien formado y entrenado. Una descripción completa de métodos e instrumentos implica una extensión grande en la documentación necesaria (ver manuales de la OMM), pero resulta obligado aquí, al menos, un breve espacio dedicado a esta cuestión.

Hay muchos modos de medir velocidades en una sección transversal de un río o canal. Los instrumentos más usados son los molinetes, de eje vertical u horizontal, y los perfiladores Doppler (ADCP, instrumentos modernos que han ganado importancia con el tiempo, apartado 4.5). Con los primeros se toman medidas de velocidad en varias verticales, se calcula un valor medio (aritmético o ponderado) en cada vertical y se integra en toda la sección. Los segundos calculan la velocidad en un gran número de celdas y, con los programas de ordenador complementarios, integran en la sección.

Cada instrumento tiene sus limitaciones. Por ejemplo, el tamaño de un determinado molinete le impide medir velocidades en ciertas zonas de la sección y le exigirá una profundidad mínima. La presencia de vegetación puede impedir la situación del instrumento en algunos puntos. Por razones como éstas, algunas hipótesis, de que esos caudales (los que no se pueden medir por razones geométricas) son despreciables u otras, tendrán que ser asumidas. Los ADCP también dejan áreas de la sección sin medidas, y, además, sufren efectos de ecos indeseados y necesitan partículas suspendidas en el agua para funcionar, aunque también tienen problemas con flujos con cargas sólidas muy altas.

La primera cuestión a abordar será la selección del lugar donde realizar la medida: la sección de control. Para ello, hay que considerar factores como el régimen hidráulico (es deseable, idealmente, que sea uniforme y, por tanto, permanente), la

accesibilidad del sitio y si existe alguna ventaja para aforar (como un puente, por ejemplo). También hay que procurar que se disponga de unas profundidades mínimas y unas velocidades mínimas compatibles con el instrumento de medida.

La selección del instrumental debe equilibrar necesidades y dotaciones. Un equipo de aforadores dispondrá de un cierto número de conjuntos completos para aforar, cada uno previsto para objetivos y condiciones distintas. La magnitud de las velocidades y de las profundidades de la corriente condicionarán las dimensiones de los instrumentos, e incluso la adicción de pesas. El transporte de sólidos por fondo puede dificultar las medidas con un ADCP, obligar a métodos de corrección o, incluso, puede hacer desaconsejable su uso. Si la sección tiene un ancho muy grande, el tiempo necesario para medir con molinete puede ser demasiado largo.

El tiempo de trabajo con el molinete condicionará el número de puntos de medida en cada vertical. Es aconsejable tomar al menos tres medidas, pero diferentes razones pueden justificar que sean menos: el tiempo disponible para realizar el trabajo, la profundidad máxima comparada con las características del medidor, la evolución de los niveles y caudales (la medida debe ser realizada en condiciones aproximadamente constantes), la existencia de vegetación, ... Es común que se tomen las medidas a profundidades en cierta proporción a la máxima en cada vertical (0.2, 0.6 y 0.8) y después se apliquen una medias ponderadas, justificadas por la hipótesis de distribución de velocidades en la vertical que se considera normal (Figura 65). Pero en la práctica se observan discrepancias importantes con esa distribución, por lo que es común que se elijan (por razones prácticas) profundidades con mayor grado de libertad y se aplique una media aritmética. No obstante, cuando se tome solo una medida en la vertical, es recomendable asumir esta distribución y hacer la corrección correspondiente.

El número de verticales que se considera ideal es aquel que asegure que el caudal de cada franja vertical no supere el 5% del total. Este criterio tiene bastantes posibilidades de cumplirse si se toman 25 verticales. Sin embargo, razones de economía del trabajo pueden llevar a que se opte por 20 o incluso por menos. Aquí, la irregularidad de la sección, que implique velocidades muy distintas de franjas diferentes, será una de las consideraciones importantes a la hora de decidir. Esto es de aplicación cuando se emplea un molinete o un perfilador 2D (aquellos que proporcionan un perfil de velocidades en la vertical).

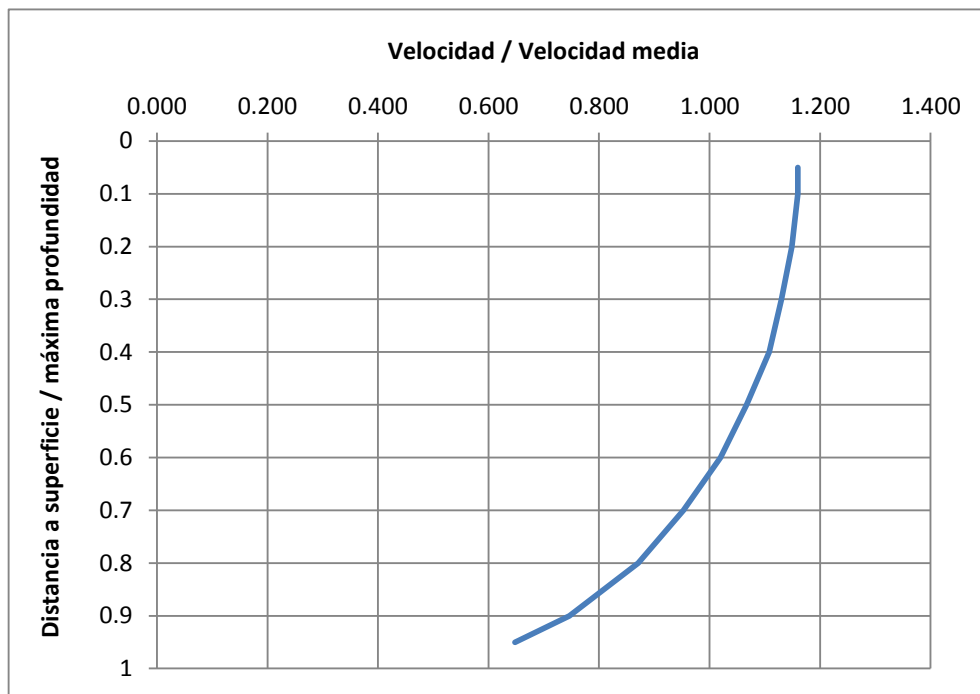


Figura 65: Distribución vertical de velocidades supuesta como normal o representativa

Otro de los problemas a resolver es la situación geométrica de cada punto de medida en la sección, tanto la posición horizontal de la vertical de medida dentro de la sección transversal (generalmente expresado en distancia a una de las márgenes), como la profundidad respecto de la superficie de la lámina de agua. El perfilador proporciona la segunda magnitud de forma directa gracias a sus principios de funcionamiento.

Cuando el molinete cuelga de un cable (generalmente acompañado de alguna pesa) puede ser necesaria la aplicación de correcciones por la falta de verticalidad de éste, una para la parte de la línea en el aire y otra para la parte en el agua (ambas siguen formas distintas).

Para medir la posición horizontal se suelen usar cintas métricas o dispositivos con cables unidos a algún artilugio de medida de distancias hasta un extremo. Este último método es casi obligado cuando se recurre a medir con un sistema de cables suspendidos transversales a la corriente por el que se traslada el molinete (también puede ser un perfilador) con un sistema de torno, manejado desde una de las orillas del río o desde una canastilla colgada en la que se encuentra un operador. Cuando se afora desde una pasarela o puente, se suelen realizar marcas cuya posición ha sido medida, y que pueden volver a emplearse en las operaciones de aforos posteriores.

En ocasiones se usan instrumentos topográficos, lo que es común en el caso de medidas realizadas desde una embarcación flotante. Actualmente son muy usados los sistemas GPS (Global Positioning System) diferenciales, es decir, con un receptor en la embarcación pero con el apoyo de un receptor fijo en tierra. Esta es la solución aplicada en muchos instrumentos tipo ADCP, ya sea con el perfilador montado en una embarcación conducida por un operador o con el instrumento situado en una mini-embarcación (hecha a la medida para él) que es arrastrada con cables.

Estas medidas de posición y las correcciones que correspondan (posición de la vertical en la sección transversal, profundidad de la medida, ángulo del cable), necesarias cuando se trabaja con molinetes y otros dispositivos, no son necesarias en algunos perfiladores Doppler, lo que facilita mucho la tarea del aforo directo. Para otros es necesario solo medir la posición de cada vertical.

Cuando se miden las velocidades y las distancias siguiendo una línea con un cierto ángulo respecto a la dirección de la corriente (porque se realiza desde un puente que esté en esa posición, por ejemplo), es necesario corregir el caudal total reduciéndolo según las relaciones trigonométricas que correspondan.

Debe tenerse en cuenta que los métodos que se usan habitualmente al realizar aforos asumen implícitamente que el flujo tiene una componente dominante según la dirección de la corriente. Es decir, que las velocidades en otros ángulos es despreciable frente a la velocidad de la corriente principal (velocidad media expresada como vector). Así se integra en una superficie plana. Esto no siempre es cierto, y ha de ser analizado y tenido en cuenta en algunos casos.

10.3.2 Definición de la curva

La definición completa de la curva puede hacerse con:

- Curvas analíticas.- Se ajusta una curva con expresión analítica concreta
 - basadas en fundamentos hidráulicos con parámetros físicos o
 - fórmula matemática con parámetros abstractos a ajustar
- Empleo de modelos numéricos de flujo en lámina libre.- Se obtienen pares nivel-caudal a partir de cálculos con modelos, con lo que la curva se define como una poli-línea.

En ocasiones se logran resultados similares con los diferentes métodos, pero en otras se alcanzan discrepancias importantes, fundamentalmente en la extrapolación de curvas para los caudales más altos. Hay que tener en cuenta la dificultad práctica de realizar aforos directos para los caudales altos, especialmente en caso de crecidas

repentinas. La ventaja del uso de los modelos de simulación es que ofrecen una extrapolación físicamente basada.

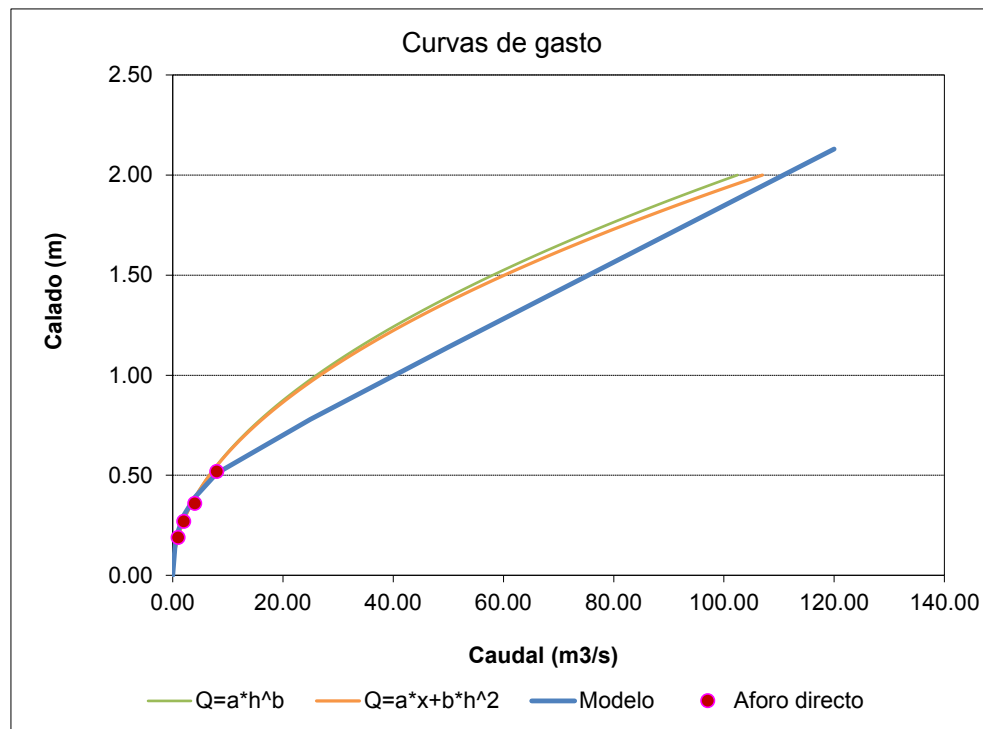


Figura 66: Ejemplo de varias definiciones de curvas de gasto

10.3.3 Análisis de sensibilidad

Otra de las ventajas del uso de modelos numéricos de flujo en lámina libre es que facilitan la realización de análisis de sensibilidad de cambios en la relación nivel-caudal a la variación de parámetros o características. A modo de ejemplo, cabe citar los siguientes aspectos a considerar, entre los que se incluyen también cuestiones intrínsecas a los modelos:

- **Modo de cálculo:** La resolución de las ecuaciones puede llevar implícita la hipótesis de que el régimen es subcrítico (lento, con número de Froude inferiores a uno) o supercrítico (rápido, con número de Froude superiores a uno). En otras ocasiones, los algoritmos de cálculo realizan una doble iteración a lo largo de un tramo, determinando la posición de los cambios de régimen y de la formación de resaltos hidráulicos. Respecto a estos últimos hay que tener en cuenta que las limitaciones del cálculo proceden ya del mismo planteamiento ecuacional, no siendo únicamente un problema numérico.
- **Rugosidad y pérdidas de energía localizadas:** Existen parámetros de cálculo que no pueden estimarse, sin datos observados, de otro modo que recurriendo a experiencias en casos similares, para lo que resultan de gran utilidad diversas

referencias bibliográficas. Las variaciones de vegetación pueden llevar a cambios en la rugosidad, lo que debe ser analizado.

- Distribución transversal de caudales: Los modelos de flujo unidimensional operan con distribuciones medias de velocidades en la sección transversal del flujo. Gracias a los distintos métodos de cálculo de pérdidas de energía, que operan con conceptos como el de la rugosidad compuesta, se puede tener en cuenta este fenómeno.
- Condiciones de contorno: El modelo de la realidad tiene que ser necesariamente finito, es decir, necesita unas fronteras que en ocasiones llevan asociadas una incertidumbres, por cuanto pueda ocurrir fuera de ellas. El análisis de sensibilidad a las condiciones de contorno es obligado en la mayor parte de las aplicaciones. Un posible cambio aguas abajo de la sección de medida debe ser considerado en muchas ocasiones.
- Modificación de geometría: Aunque con el modelo no se resuelva el problema de erosiones y sedimentaciones, puede evaluarse la influencia de modificaciones del cauce. Esto también puede incluir la presencia de obstrucciones u otras alteraciones.

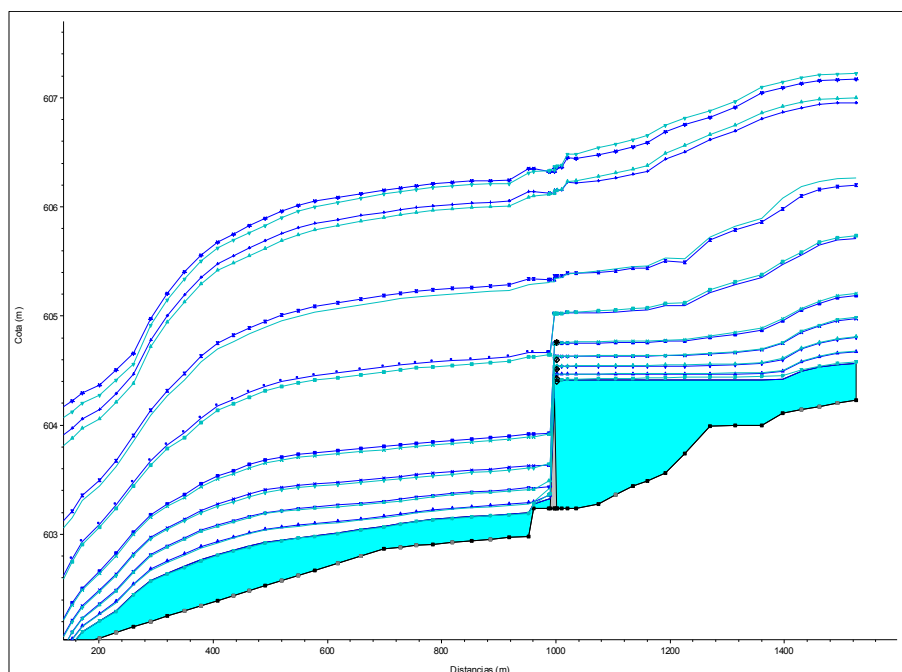


Figura 67: Ejemplo de comparación de resultados en un análisis de sensibilidad de la simulación (con Hec-Ras) del comportamiento de una estación de aforos

10.3.4 Referencia temporal

Hay que tener en cuenta que la relación nivel-caudal cambia a lo largo del tiempo, por lo que cada curva debe tener la referencia temporal de su validez, asociada a

unas condiciones concretas. Esto implica que las bases de datos hidrológicas y demás sistemas informáticos deben estar preparadas para calcular caudales, en función de niveles, distinguiendo el periodo temporal de validez de cada curva.

10.3.5 Soluciones para el uso en tiempo real

La correcta definición de una curva de gasto exige un consumo de recursos y de tiempo considerables, tanto de trabajo en oficina como de inspecciones, medidas y comprobaciones en campo. Y es muy probable que en aplicaciones en tiempo real no sea posible tal dedicación para hacer las modificaciones pertinentes. Por ello, es recomendable tener preparadas un conjunto de curvas de gasto para el trabajo en estas condiciones. A modo de ejemplo, se puede trabajar con unas curvas que estén asociadas a distintos grados de crecimiento de vegetación que pueden asociarse a distintas rugosidades.

La dificultad práctica estará en la selección de la curva más apropiada al caso, puesto que, casi seguro, no se dispondrá de la información necesaria para un ajuste riguroso. La experiencia y el conocimiento de la zona por parte del hidrólogo responsable serán la base para la selección de la curva, aunque debe intentar basarse, además y si es posible, en contraste con otras medidas, cálculos y observaciones.

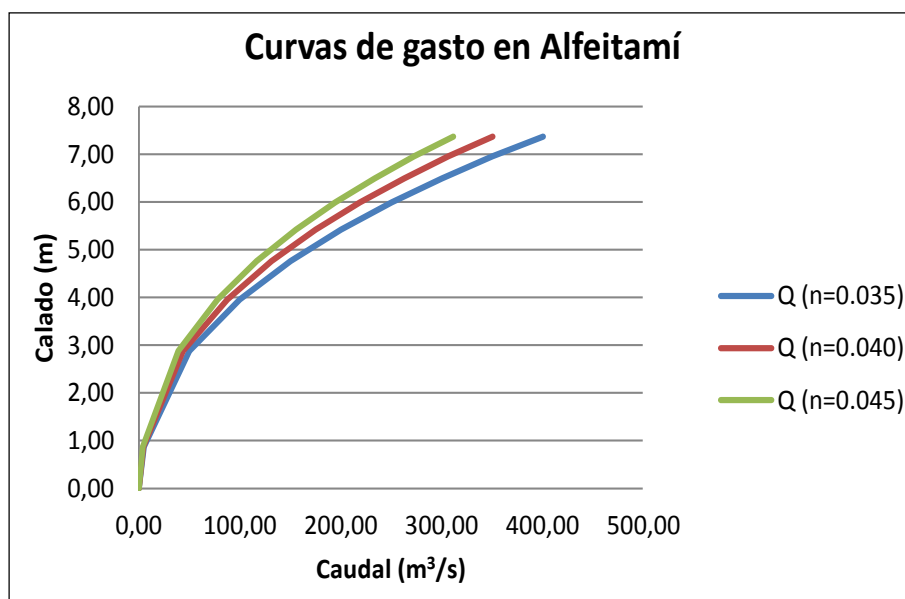


Figura 68: Ejemplo de conjunto de curvas de gasto correspondientes a situaciones hipotéticas para uso en tiempo real

También hay fórmulas o algoritmos que permiten transformar las curvas de gasto de modo tal que se puedan considerar los efectos de fenómenos de histéresis o cambios de rugosidad.

11 Error e incertidumbre en la hidrología operacional

Las soluciones que se planteen en el ámbito de la hidrología operacional deben tener en consideración las múltiples posibilidades de error e incertidumbre que hay que aceptar. Las decisiones que se tomen en función de la información hidrometeorológica tendrán también que asumir esta realidad inevitable.

A pesar de que se presenten con gran frecuencia valores de variables hidrológicas con decimales, unos resultados de trabajos hidrológicos realizados con rigor evitarán esto o incluirían los rangos de imprecisión. El manejo de números con decimales es necesario a efectos de cálculo pero, ni especialista ni usuario deben olvidar que es prácticamente imposible asegurar en la práctica precisiones con rangos inferiores al 10 %. Por ello, cuando un modelo o cálculo concluye que un caudal en un instante determinado es 1000 m³/s, no es posible afirmar que esta valoración es mejor que otra que proporciona un valor de 910 m³/s. Ambos resultados se considerarán idénticos, salvo que la interpretación de un hidrólogo experto aconseje una ponderación a favor de uno de ellos (lo que puede no ser posible en aplicaciones en tiempo real).

11.1 Realidades inevitables

11.1.1 Realidad inevitable 1: el error y la incertidumbre

A lo largo de este documento ya se han evidenciado numerosas fuentes de error e incertidumbre. El mismo concepto de medida no se puede desligar de la consideración de una incertidumbre, asociada a una precisión. Pero muchas de las variables necesarias para las aplicaciones serán calculadas, y esto lleva asociado un conjunto de hipótesis (siempre simplificadoras) para un modelo que se haga de una parte de la realidad. Téngase en cuenta que una descripción cuantitativa de un sistema hidrológico, o de un fenómeno que se produce en él, es ya un modelo de la realidad.

Además, no existe un sistema de colecta de datos hidrológicos que proporcione una tasa de fallos nula. Hay datos que se pierden o que se colectan con valores inválidos. En la práctica, es difícil bajar del 5 % de error en tiempo real, más aún si consideramos como fallo la recepción de los datos con retardo excesivo. Los fallos pueden producirse en cualquiera de los subprocesos: en los asociados a las estaciones, en la transmisión o la recepción, en la manipulación de los datos, etc.

Esta primera realidad inevitable obliga a poner en práctica sistemas de validación y relleno, así como la realización de análisis de sensibilidad en todo tipo de estudios y cálculos.

11.1.2 Realidad inevitable 2: el coste de la calidad de la información

El objetivo ideal será disponer de información de la mayor calidad posible, es decir, proporcionar datos a los usuarios finales en el menor tiempo posible, con la menor tasa de fallos y con una incertidumbre mínima. Pero hay que considerar que la calidad de la información se asegurará con gastos en todo el proceso de obtención y en los relacionados, que pueden ser resumidos del siguiente modo (recordando lo expuesto en el capítulo 2):

- 1) Primera instalación de infraestructuras de medida, transmisión y tratamiento
- 2) Mantenimiento de infraestructuras
 - a) Ajustes y limpieza
 - b) Reparación
 - c) Reposición
 - d) Actualización
- 3) Operación
 - a) Personal
 - b) Energía
 - c) Transmisión de datos
 - d) Transporte de personas y equipos auxiliares
- 4) Uso
 - a) Personal
 - b) Desarrollo, implementación y calibración de herramientas
 - c) Equipamientos auxiliares de recepción, almacenamiento y presentación
 - d) Difusión de información

La solución estará en una opción de compromiso, adaptada a los problemas a resolver, con la que se buscará que la información se proporcione con tiempo suficiente, con una tasa de fallos que no invalide la aplicación y con una incertidumbre no mayor a aquella que sea asumible en la toma de decisiones.

11.2 Ejemplos de incertidumbres

11.2.1 Pluviometría

Las precipitaciones son fenómenos difícilmente modelables, tienen un comportamiento fuertemente aleatorio que no se logra simular bien con ningún modelo. La principal dificultad está en el problema de la distribución espacial de precipitaciones. Las medidas en los pluviómetros tiene un carácter puntal, comparada con las superficies (cientos de kilómetros cuadrados, generalmente) de las áreas geográficas a las que se les asignan sus valores (directa o indirectamente). Los valores proporcionados por estos instrumentos no son realmente representativos de grandes áreas, además de que también cuentan con deficiencias al medir el valor puntal. Hay precipitaciones muy uniformes que se cuantifican con mayor facilidad, pero las que tienen un carácter más torrencial varían mucho en el espacio y a lo largo del tiempo, lo que hace más difícil su cálculo.

En la práctica, los radares meteorológicos para aplicaciones hidrológicas son muy útiles. Proporcionan un mejor conocimiento de la distribución espacial de las precipitaciones, pero no proporcionan una buena cuantificación de la precipitación en cada punto, por lo que necesitan apoyo en medidas puntuales realizadas con pluviómetros.

Las imágenes de satélite también resultan útiles. Aunque cuantifiquen la precipitación peor que los radares, proporcionan información útil de grandes extensiones de territorio.

11.2.2 Modelos de previsión del tiempo

Los resultados de los modelos de previsión del tiempo, muy útiles en la hidrología (ver capítulo 8), deben ser interpretados convenientemente. Así, si se expresan en formato matricial (ver apartados 3.2 y 3.8), hay que tener en cuenta que la precipitación asignada a una celda, puede (por imprecisiones del modelo) estar realmente asociada a una vecina. En cualquier caso, el resultado en cada celda debe interpretarse como un valor medio en la misma, en el área geográfica que le corresponde, por lo que carece de sentido tratar de bajar de escala en su aplicación, diferenciando superficies menores que la de la celda. La operación de bajar de escala es denominada "downscaling", y no debe olvidarse que se trata de un modelo apoyado en otro, y que es una tarea nada trivial.

11.2.3 Hidrometría

Ya se analizaron anteriormente los problemas de las relaciones nivel-caudal (10), y se hizo mención al problema de la definición del nivel de un río cuando hay grandes ondulaciones y cambios en la lámina libre. Los problemas de discretización temporal (apartado 3.7.2) también deben ser considerados aquí.

11.2.4 Embalses

Las salidas de embalse se calculan con estaciones de aforos o en función del nivel y de las posiciones de válvulas y compuertas. Este último caso también cuenta con imprecisiones importantes, pues las fórmulas empleadas en los cálculos de diseño son aproximadas, con mayor o menor error, como todo modelo.

Las entradas pueden calcularse con estaciones de aforos o por balance, lo que implica una imprecisión mucho mayor. Hay que considerar que en el embalse se pueden producir pérdidas por filtraciones, en el vaso o por la presa y sus contornos. También hay evaporaciones que pueden ser muy relevantes en trabajos a escala temporal grande. En estos cálculos, como en otros, puede tener mucho peso la incertidumbre asociada a la curva nivel-volumen embalsado, la curva batimétrica del embalse. Los aterramientos por el transporte de sedimentos exigen revisiones periódicas de la batimetría del embalse, cuya medida también cuenta con dificultades e imprecisiones.

11.2.5 Respuesta hidrológica de las cuencas

A pesar de que hay muchos modelos y estudios para el cálculo de las escurrientías (la respuesta hidrológica de las áreas receptoras de lluvia en forma caudal fluyente por los ríos), no hay solución carente de errores importantes. La heterogeneidad del terreno en sus tres dimensiones, la complejidad del proceso y la imposibilidad de medir y cuantificar muchos parámetros importantes dificultan enormemente la simulación de estos fenómenos.

Hay que considerar que las características de las respuestas dependen de la escala temporal de trabajo (mensual, semanal, diaria, horaria o menor), lo que se traduce en valores de parámetros de modelos dependientes de dicha escala. Las coberturas del terreno (los usos del suelo) cambian con el tiempo, lo que repercute en el balance de volúmenes y en los tiempos de propagación.

También hay influencia del tipo de evento que se analice, pues la intensidad de precipitación puede afectar a la permeabilidad del terreno, bien por una cuestión

relacionada con los tiempos de infiltración o porque una intensidad alta altera la superficie del suelo. Además, cuando se generan grandes escorrentías aumentan las velocidades de transporte, lo que implica menores tiempos de propagación, pero los modelos hidrológicos no suelen ser capaces de reflejar esto bien.

11.3 Necesidades en cuanto a la calidad de la información

La incertidumbre en las variables hidrológicas tiene que ser considerada en todo análisis o solución de un problema. En caso contrario, se llegaría a un absurdo o a un fracaso.

Ya en el capítulo 7 se abordó el concepto de divergencia admisible o asumible en función del problema y de las posibilidades de predicción, en el que se relacionaba una incertidumbre con unas necesidades de información. Relaciones como ésta son inevitables, pues todo problema impondrá unas precisiones, e incluso algunos no admitirán solución directa cuando no se pueda garantizar un error máximo en la variable de decisión.

A modo de ejemplo, se indican algunas necesidades relacionadas con algunos ámbitos de trabajo:

- General.- La cuantificación de caudales con un error pequeño es difícil y generalmente cara. Pero en hidrología es inevitable hacer balances de volúmenes de agua, pues estos son, directa o indirectamente, la principal variable de decisión.
- Gestión de crecidas.- En trabajos de delimitación zonas inundables en función del riesgo potencial, básicos para muchas acciones, hay unos errores e incertidumbres que pueden tener gran importancia. La valoración equivocada de un peligro en un punto determinado de la geografía puede acarrear consecuencias perjudiciales. En casos de actuaciones en tiempo real, las aperturas de las "horquillas de previsión" (ver apartado 7.5) limitan algunas soluciones.
- Gestión de recursos.- El conocimiento completo y preciso de demandas potenciales, reservas, consumos y otras variables relevantes dependerá en gran parte de medidas hidrológicas. Las imprecisiones al cuantificar volúmenes llevará a errores en la planificación o en la decisiones de operación.
- Gestión de sequías.- En los estudios que sirvan de base para la gestión de sequías se requieren medidas con gran precisión. Además, en situaciones concretas de sequía, las funciones de las Administraciones Hidráulicas como

policía de cauces o como árbitro ante conflictos por incompatibilidad de usos de agua, requieren un manejo de información hidrológica completa, precisa y con rigor demostrable. En otro caso no será posible comprobar y demostrar quién deriva caudales indebidamente o si se siguen protocolos de sequía.

- Variabilidad y cambio climático.- Las variaciones o cambios en el clima pueden incluir modificaciones importantes en la hidrología. Pero en las variables hidrológicas se observan cambios importantes a lo largo del tiempo debido a causas diversas, naturales o antropogénicas (cambios en el uso del suelo, por ejemplo). Esto dificulta definir la relación entre las variables climáticas básicas y las hidrológicas. A ello hay que añadir la incertidumbre en las variables hidrológicas. La consecuencia es que no será posible en muchos casos, con rigor, establecer la respuesta hidrológica a las variaciones pequeñas en las variables climáticas, pues las modificaciones consecuentes en caudales o volúmenes de agua serán menores que los errores mínimos que llevan asociado.

11.4 La solución a través del diseño y la organización

Las limitaciones científicas y técnicas no impiden alcanzar soluciones válidas en la práctica, pero tendrán que basarse no sólo en recursos tecnológicos sino también en los enfoques de diseño de la solución y en los aspectos organizativos.

11.4.1 Asumir los órdenes de magnitud de las variables hidrológicas (“números gordos” del problema)

Es conveniente hacer algunos cálculos simples que permitan cuantificar relaciones entre variables e imprecisiones con las que se trabaja. Se indican a continuación un par de ejemplos.

11.4.1.1 *Calculo de entrada a un embalse por balance*

La razón de la dificultad de calcular el caudal de entrada a un embalse por balance está en las precisiones de las medidas y en la importancia relativa de las variaciones en algunas magnitudes. Supongamos un embalse que alcanza un volumen de 600 hm³ con una altura de lámina de agua de 70 m. Si se supone que el volumen del embalse sigue la forma de un cono que cumple lo anterior, un incremento de 1 cm en la lámina llevaría a un incremento de volumen de unos 260,000 m³. Si se hace un balance con discretización de 30 minutos, esos m³ se transforman en casi 140 m³/s. Como difícilmente se pueden asegurar errores de medida menores (cabe esperar que

sean mayores de 1 cm), no se puede pretender obtener un caudal con una precisión menor que esos 140 m³/s.

11.4.1.2 Conversión lluvia en escorrentía

Una precipitación de 1 mm en una superficie de 1000 km², implica un volumen de 1 hm³. Si esto sucede en una hora, se transforma en un caudal de unos 280 m³/s. Una precisión menor de 1 mm en lluvia neta es algo difícilmente alcanzable en la práctica.

11.4.2 Identificación y análisis del problema

La planificación y diseño del sistema, que arranque de la identificación correcta del problema y de un buen análisis del mismo, serán la clave de la solución. No es raro encontrar buenas soluciones aplicadas a problemas distintos de aquellos para los que realmente son válidas.

Si esto se lleva a la práctica según un enfoque metodológico cíclico (apartado 6.3), se garantiza un proceso convergente hacia una solución apropiada al problema a resolver.

11.4.3 Adaptación mutua de producto y uso

El usuario de la información (que puede ser un sujeto decisor) tiene que asumir las realidades inevitables sobre los sistemas de monitoreo y pronóstico. Tanto en lo referente a las incertidumbres como a los tiempos de disponibilidad para cada producto.

Por su parte, el generador de la información debe asegurar la franqueza y sencillez de las soluciones que aporte (ver punto 6.2.4.1), y contribuir a que el usuario sea capaz de entenderlas por medio de la divulgación, la educación y la formación.

11.4.4 Evaluación preliminar de la incertidumbre

La incertidumbre asociada a cada solución posible debe ser evaluada, con el objetivo de establecer las bases de adaptación mutua entre productor de información y usuario. Lo indicado en el apartado 10.3.3, relacionado con las curvas de gasto, puede ser un ejemplo.

11.4.5 Funcionamiento cíclico

El funcionamiento cíclico del sistema (apartado 7.2) permite corregir previsiones y decisiones conforme se actualizan análisis y previsiones a lo largo del tiempo, gracias a los refrescos de datos y a la rectificación de los productos de información.

11.4.6 Medios auxiliares de observación

Cualquier fuente complementaria de información puede ser muy útil en las aplicaciones prácticas. Los observadores en campo (aquellos pertenecientes a las instituciones vinculadas directamente al problema o bien colaboradores externos) son muy útiles, pues pueden ayudar mucho en la elaboración del diagnóstico de la situación.

11.4.7 Protocolos de actuación

Puesto que la solución para superar las limitaciones tecnológicas se va a basar en cuestiones organizativas, la definición de unos protocolos de actuación, ante diferentes tipos de circunstancias, constituye una de las bases para la planificación de las soluciones y para su aplicación directa. Todo cuanto sea posible debe estar previamente definido, con la aspiración de reducir al mínimo posible la improvisación.

11.4.8 Validación y relleno de datos

Los sistemas de validación y corrección de datos asociados al proceso de generación de información (apartado 3.6.1) serán necesarios para garantizar la calidad de la información. Pero hay que tener en cuenta que requieren una dotación específica de recursos humanos.

11.4.9 Operación y mantenimiento de redes de medida

Lo descrito en el apartado 4.6, sobre todo lo relacionado con el mantenimiento de la red de medidas, es muy importante para asegurar la calidad de la información. Un buen mantenimiento reduce las incertidumbres, los errores y permite asegurar tiempos de respuesta, aún ante imprevistos.

11.5 Cantidad y calidad.- Una reflexión obligada

Las soluciones anteriores para asegurar la calidad de la información implican un gasto. La calidad de la información tiene un coste, y dicho coste, aún con algunas partidas casi constantes, aumenta con el volumen de la información. Más estaciones de medida implican más días-hombre en las operaciones de mantenimiento, más

variables implican más horas-hombre en validaciones y correcciones, etc. Es por ello que se impone un equilibrio entre la cantidad de variables y la calidad de las mismas. Es preferible ajustar la solución integral de un problema a un cierto número (moderado) de variables con una calidad aceptable que pretender abordar la solución con muchos datos imprecisos o poco fiables. En un proceso de toma de decisiones, la fiabilidad de los fundamentos y la seguridad acerca de las cuantificaciones tienen gran importancia. Una decisión basada en un proceso racional (ver también apartados 6.1 y 6.4) requiere una percepción de los objetos y los sucesos bien ajustada a la realidad.

12 Protocolos y alertas hidrológicas

Los protocolos de actuación son necesarios para prever los medios que vayan a ser necesarios ante situaciones adversas, preparar las vías de comunicación entre agentes involucrados, concretar y acotar responsabilidades al definir funciones, y para superar algunas de las limitaciones del estado del arte del pronóstico hidrometeorológico.

La definición de alertas es necesaria para la valoración de las condiciones hidrológicas que se den o puedan darse y que pudieran representar una amenaza para las personas o los bienes.

12.1 Riesgo y responsabilidad

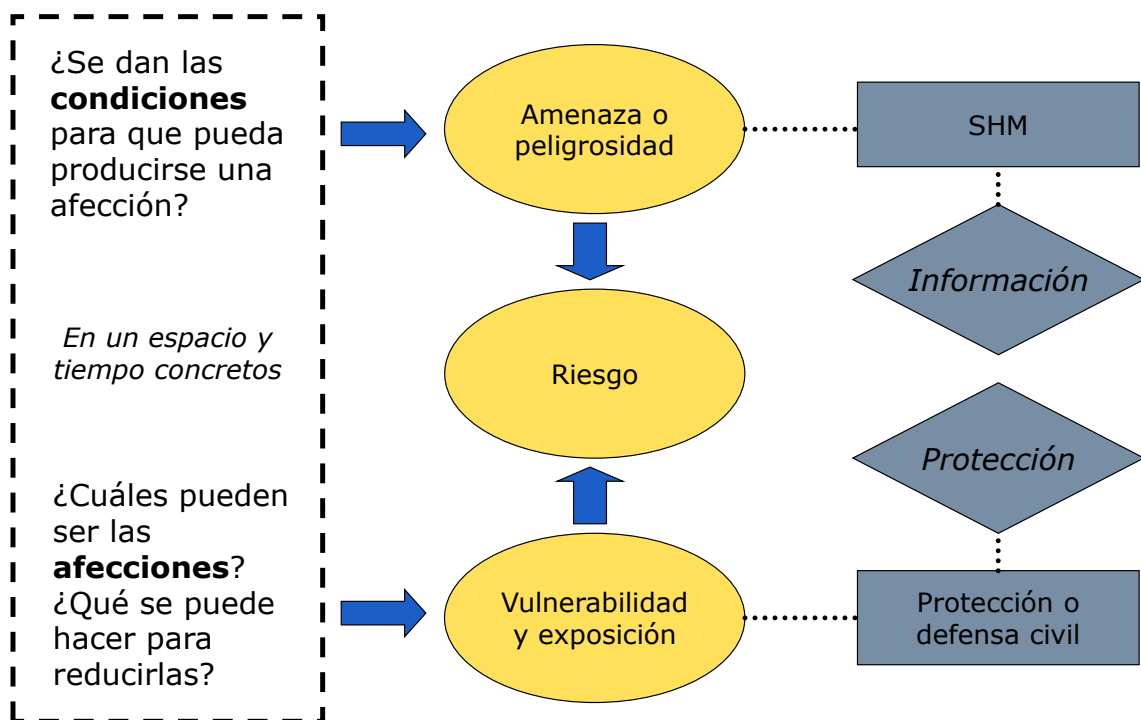


Figura 69: Esquema de riesgo y responsabilidad ante una situación adversa

Un sistema de monitoreo y pronóstico puede informar de las condiciones pasadas, presentes o futuras que puedan suponer una amenaza. Pero cuanto tiene que ver con la vulnerabilidad y la exposición queda fuera de sus competencias, de sus capacidades de acuerdo con sus funciones específicas. Por tanto, el término riesgo (ver apartado 5.4) no debe ser aplicado en su ámbito de actuación, como no lo debe ser en el de un servicio hidrológico. Los servicios de Protección Civil son los que, por las competencias y responsabilidades que suelen tener asignadas, pueden llevar un

control de vulnerabilidad y exposición, e incluso abordar, junto con la información que reciban acerca de los peligros, la valoración del riesgo.

Por ello, los avisos, alertas y alarmas que generarán los hidrólogos sólo harán valoraciones del peligro.

12.2 Necesidad de los protocolos

Para el servicio encargado de proporcionar la información, un protocolo es necesario para que se defina:

- CUÁNDO han de iniciarse actuaciones especiales en situaciones de crecida.
- A QUIÉN deben facilitarle el acceso a los datos.
- CÓMO han de ponerse a disposición.
- QUÉ datos deben proporcionarse.
- DURANTE qué período de tiempo.
- PERIODIDAD y EVENTUALIDAD de los comunicados, si éstos proceden.

Y así, el usuario podrá organizar sus actividades sabiendo:

- CUÁNDO puede disponer de la información relativa a una crecida
- CÓMO puede recibirla o acceder a ella.
- QUÉ información puede consultar.
- DURANTE qué período de tiempo tiene disponible los datos.
- PERIODIDAD y EVENTUALIDAD de los comunicados que pueda recibir, si procede, o de los datos a los que pueda acceder.

Un plan de emergencias (de actuación ante situaciones de avenidas o de explotación de presas, por ejemplo) incluirá necesariamente un protocolo de actuación.

12.3 Los protocolos y las soluciones de la hidrología operacional

Las herramientas que se implementen para la generación de información deben adaptarse al perfil del usuario y a las condiciones de uso, y también a los de los profesionales responsables de la producción. Los medios de que dispongan todos los agentes involucrados también tienen que ser tenidos en cuenta (informática, comunicaciones, etc). Pero todo el sistema de información y respuesta ante la amenaza estará vinculado a un medio físico, con unas características climáticas y unas singularidades hidrológicas, que condicionan la selección de soluciones técnicas, hasta el punto de que aconsejen descartar algunas de ellas. Las estructuras organizativas también condicionan, y casi determinan, la definición de una solución,

y por tanto de un protocolo, pero también deben adaptarse a la implantación de una solución, en un proceso de integración de la misma.

12.4 Modos y medios de difusión

A lo indicado en el apartado 3.5.2 sobre modos y medios de difusión, hay que añadir lo relativo a las exigencias temporales y de disponibilidad. Hay que calcular los tiempos necesarios para la generación y difusión en situaciones de máximo nivel de exigencia. Así, por ejemplo, en caso de que se desee difundir boletines vía fax, hay que tener en cuenta las posibles colas de envío que pueden formarse debido a problemas de recepción por parte de los destinatarios u otras causas, lo que puede llevar a retrasos incompatibles con las necesidades. En cualquier caso, hay que prever modos alternativos de difusión y medios redundantes.

12.5 Generación de avisos

Se entiende por aviso a una información específica que incluye la valoración de un peligro detectado, previsto o potencial.

La generación de los avisos (que formará parte de la información producida y difundida por un servicio hidrológico descrita en 3.5) puede ser automática o manual. En cualquier caso, es deseable que se incluyan procesos de supervisión (como parte de los procesos de validación, ver apartado 3.6.1), lo que será difícil de aplicar en la práctica cuando se trate de peligros que se generen en periodos de tiempo cortos (por estar asociados a sistemas de respuesta rápida con crecidas repentinas) y no se disponga de margen de tiempo suficiente para las tareas correspondientes.

La valoración del fenómeno tendrá que ser única y obligadamente objetiva en caso de generación automática sin supervisión. Pero si hay oportunidad de realizar la supervisión o si la generación es manual, cabe incluir valoraciones subjetivas que puedan ayudar en la interpretación de los datos, o completar un bloque de información con carencias de datos. El resultado de una sesión de discusión hidrológica puede incluir algunas valoraciones subjetivas, aunque sean rigurosas sólo dentro de lo posible, cuya difusión sea útil para los usuarios de la información.

12.6 Definición de umbrales y estados de alerta

Los protocolos suelen incluir diferentes estados o niveles de alerta, cada uno de los cuales se asocia con unas acciones a ejecutar y a un modo de trabajo. El establecimiento de un estado en una situación concreta se realiza en función de unos

valores numéricos relativos a variables hidrometeorológicas, como precipitaciones, niveles o caudales. Dichos valores actúan como umbrales.

A menudo se usan los términos aviso, alerta y alarma, en orden de peligrosidad creciente, u otros similares. Pero es más común que se haga referencia a colores, como si de un semáforo se tratara. Así se habla de estado verde, amarillo y rojo, pudiéndose ampliar con otros, intermedios como el naranja, o referidos a casos concretos como la situación de falta de información (para el que se usa el blanco o el gris). La terminología a usar y la definición de cada estado deber ser clara y accesible. Es preferible que acompañe a cualquier aviso o bloque de información.

La definición de los umbrales puede hacerse:

- Por condiciones de peligrosidad,
 - ya sea con criterios morfológicos, como pueda ser la definición de estados en función de la proximidad a una situación de desbordamiento de un tramo de río, o
 - según criterios probabilísticos, según la rareza de la magnitud del fenómeno.
- Según el riesgo.- Cuando se consideran la vulnerabilidad y exposición, además del peligro. Esta práctica, aunque pueda darse, es menos usada y es desaconsejable para un servicio hidrológico, según se indicó anteriormente.
- Basados en la experiencia de uso de umbrales en el pasado y el resultado de poner en marcha unas u otras acciones.

Aquí se recomiendan los umbrales establecidos según criterios de peligrosidad, pero incorporando correcciones a lo largo del tiempo en función de la experiencia en su uso (tras analizar la respuesta a la recepción de la información por parte de los usuarios finales).

13 La importancia de la cooperación y la colaboración

En esta disciplina, la experiencia de los profesionales es muy importante y difícil de alcanzar, no solo por el tiempo que requiere sino porque en cada país suele haber un servicio y un sistema. Por tanto, el modo de adquirir experiencia es a través del intercambio de conocimientos con profesionales de otros países.

Por esta y otras razones, los sistemas de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico son un claro ejemplo de la necesidad de la cooperación y la colaboración.

13.1 Algunos términos usados con frecuencia

Hay algunos vocablos ampliamente usados: cooperación, colaboración, sinergia,... En cada ámbito de uso, una palabra puede tener sus acepciones o matices. Se incluyen a continuación las definiciones que aparecen en el diccionario de la Real Academia Española (RAE, 2012) para aquellos términos que tienen un sentido "positivo" en el tema que aquí se aborda:

Cooperar.

1. intr. Obrar juntamente con otro u otros para un mismo fin.

Sinergia

1. f. Acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales.

2. f. Biol. Concurso activo y concertado de varios órganos para realizar una función.

Coordinar

1. tr. Disponer cosas metódicamente.
2. tr. Concertar medios, esfuerzos, etc., para una acción común.

Uniendo conceptos, se puede plantear un objetivo ideal: la cooperación entre un grupo de personas o instituciones buscará la consecución de un mismo fin gracias a

las sinergias logradas por medio de un trabajo coordinado. Esta frase implica que cada agente aportará medios y esfuerzos para un objetivo común a todos los implicados, que la participación de todos será activa, que en el proceder habrá método y concierto, y que gracias a todo lo anterior, el resultado final será superior al que se obtendría como sumas de cada aportación individual.

De forma antagónica, aparece la definición de:

Competencia

1. f. Disputa o contienda entre dos o más personas sobre algo.
2. f. Oposición o rivalidad entre dos o más que aspiran a obtener la misma cosa.

Este concepto parece estar en la esencia de nuestro mundo y de nuestra organización social, como puede encontrarse en numerosas definiciones en los campos de la biología o la economía. Esta realidad en la que aparecen necesidades y condiciones opuestas ha de ser aceptada si se desea promover acciones con ánimo de reforzar la cooperación o mejorar la coordinación. En la práctica, el problema consistirá en la búsqueda de una solución de equilibrio entre objetivos individuales contradictorios en favor de uno común.

13.2 Información y comunicación entre agentes

A pesar de la importancia que la ciencia y la técnica tienen en la sociedad, se observan a menudo deficiencias de conocimiento en los mensajes de los políticos, en sus decisiones o en los contenidos de los medios de comunicación. Estos errores podrían evitarse con una formación más completa alcanzable sólo si se realizan mayores esfuerzos de divulgación.

Una sociedad que avance conforme a estructuras democráticas debe adoptar procesos, que deriven en toma de decisiones, cada vez más participativos. La participación directa de los agentes involucrados tiene que reflejarse en los diferentes ámbitos de gobierno. Pero cada agente debe tener la información y el conocimiento que le capacite para fundar una opinión.

Pero las evoluciones de la ciencia y de la tecnología pueden tener sus desviaciones, con desarrollos poco útiles para una sociedad que consume unos

necesarias nuevas vías y medios que garanticen comunicación en ambos sentidos, lo que obliga a un esfuerzo, incluso imaginativo, que lleven a la sociedad a una democratización más extendida.

Una reflexión en este apartado debe dedicarse al lenguaje. Una comunicación apropiada exige un rigor que dependerá de unas buenas definiciones. A menudo, cada disciplina evoluciona con un lenguaje propio en extensión, pero un glosario con definición de algunos conceptos fundamentales puede ser suficiente para salvar las principales dificultades en la comunicación (las referencias GHI 2013 y EIRD 2009-2 son buenos ejemplos, ver capítulo 15).

13.3 PROHIMET: un ejemplo de cooperación para abordar los problemas de inundaciones, sequías y cambio climático

El acrónimo PROHIMET corresponde a la Red iberoamericana para el monitoreo y pronóstico de fenómenos hidrometeorológicos. Es una red temática, de ámbito iberoamericano, que une a especialistas en varias disciplinas especialmente preocupados por los problemas de las crecidas y las sequías, aunque también se tratan los problemas relacionados con el cambio climático.

PROHIMET sirve de nexo de unión y marco de cooperación para la búsqueda de los siguientes objetivos específicos:

- Incrementar la cooperación entre las comunidades científicas de hidrólogos y meteorólogos y estimular su contacto con otros organismos que tengan relación con ambas, como es el caso de las instituciones dedicadas a la Protección Civil.
- Establecer una cooperación multinacional en el ámbito iberoamericano sobre el uso de técnicas modernas de pronóstico hidrometeorológico.
- Impulsar actividades de formación y capacitación de personal en el uso de herramientas modernas de vigilancia, predicción y difusión hidrometeorológica, así como en todo lo relacionado con los conceptos de riesgo, peligrosidad/amenaza y vulnerabilidad.
- Analizar y evaluar el estado de desarrollo y las carencias y necesidades de los diversos países iberoamericanos en relación con los sistemas de pronóstico, alerta y actuaciones relacionadas con los fenómenos hidrometeorológicos.
- Promover la elaboración de proyectos piloto que sirvan de casos de demostración

- Contribuir al desarrollo, extensión y mejora de los sistemas de medida y observación

13.3.1 Principales características de la red

PROHIMET es un marco multisectorial y multidisciplinar de especialistas que intercambian conocimientos y experiencias, y contribuye a la creación de capacidades, concienciación pública y educación en temas de crecidas y clima. Son meteorólogos, hidrólogos, ingenieros, físicos, matemáticos, arquitectos y expertos en urbanismo y ordenación del territorio. La red une grupos de trabajo que desarrollan sus respectivas actividades en diferentes sectores: institutos nacionales de meteorología e hidrología, empresas hidroeléctricas, organismos de gestión de aguas, ayuntamientos, universidades, instituciones de investigación y desarrollo y fundaciones y organizaciones no gubernamentales.

Actualmente, reúne a docenas de miembros de 30 grupos de 16 países de Iberoamérica (Argentina, Brasil, Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, España, Guatemala, México, Nicaragua, Perú, República Dominicana, Uruguay y Venezuela), a los que se suman especialistas de otras regiones (Alemania y Canadá)

Son destacables las siguientes características:

- La red se orienta a personas y a instituciones (a través de algún representante).
- Los requisitos que se exigen a sus miembros son participar, aportar y compartir (participar en las actividades, aportar opiniones, análisis y soluciones, y compartir conocimientos y experiencias).
- Los intercambios científico-tecnológicos se concretan en soluciones específicas a los problemas que se tratan.
- Se constituyen foros de discusión de temas específicos y transversales.
- El desarrollo y transferencia de tecnología se produce de forma efectiva.
- Reúne conocimiento de los problemas específicos de la región.
- Cuenta con capacidad de asesoramiento, con enfoque integral, en todo lo relacionado con los sistemas de vigilancia y pronóstico de fenómenos hidrometeorológicos y los sistemas de alerta temprana.
- Constituye una valiosa plataforma de apoyo en acciones de ayuda al desarrollo

PROHIMET emplea diferentes tipos de acciones para lograr sus metas, que son, principalmente:

- Organización de seminarios y cursos de entrenamiento
- Preparación de material de divulgación y proporcionar acceso libre al mismo
- Desarrollo de proyectos piloto como casos de demostración
- Creación y mantenimiento de un foro de Internet: los miembros constituyen un grupo "electrónico" de discusión.
- Organización de grupos de trabajo en temas especializados

13.3.2 Diagnóstico de situación en lo relacionado con la cooperación y coordinación

A través de los medios que ofrece Internet, los miembros de la red han mantenido comunicación que ha facilitado, entre otras actividades, la realización en equipo de análisis y evaluaciones. Pero ha sido durante la celebración de los eventos cuando se han concretado los diagnósticos y recomendaciones. En cada una de las reuniones se discuten, en sesiones abiertas, cuestiones relacionadas con la temática de la red, cuyos resultados se resumen en unos documentos de síntesis y conclusiones.

Periódicamente, se revisa el diagnóstico y se publica en el sitio web de la red (<http://www.prohimet.org>). Lo que se incluye a continuación es parte de ello.

Algunos de los diagnósticos ya se plantearon en el evento que dio origen a la propuesta de creación de PROHIMET: el "Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Información y Pronóstico Hidrometeorológicos". Sus conclusiones se recogen en la denominada "Declaración de Valencia" y de la misma se extraen, por su relación con lo aquí tratado, la siguiente consideración:

f) a pesar de lo expuesto anteriormente, aún existen casos donde dificultades institucionales obstaculizan la cooperación entre los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos." (OMM, 2005)

Hay que destacar aquí que el evento de Valencia contó con la presencia de 128 expertos de 22 países (Argentina, Bolivia, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Chile, Ecuador, El Salvador, España, España, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Paraguay, Perú, Portugal, República Dominicana, Suiza, Uruguay y Venezuela), por lo que sus conclusiones son bastante representativas de la realidad iberoamericana en el sector.

En los diferentes eventos se han puesto de manifiesto reiteradamente las conclusiones del seminario de Valencia de 2004, a las que cabría añadir las siguientes

que se formularon durante el curso de Santo Domingo (República Dominicana) en julio de 2005, con participación de 24 profesores de 11 países de Iberoamérica:

- La necesidad de incrementar la cooperación entre hidrólogos y meteorólogos y de ambos con otros especialistas (ejemplo: profesionales de Protección Civil).
- La conveniencia de establecer foros nacionales e internacionales en los que regularmente se pongan en contacto los diversos especialistas

Y las de las jornadas celebradas en Antigua (Guatemala) en junio de 2006 con 35 participantes de 16 países:

- Gran parte de los problemas que se detectan están asociados a defectos en la ordenación del territorio
- La complejidad del problema impone un enfoque multidisciplinar. Así, los especialistas en hidrometeorología pueden proporcionar información y conocimientos fundamentales para los especialistas en ordenación del territorio.
- No aceptar visiones, análisis y diagnósticos simplistas de un problema tan complejo como el de las inundaciones y el de los desastres naturales en general.

En el taller de Mendoza (Argentina, 2006), los participantes ensalzaron la importancia de poner en práctica acciones de educación pública sobre riesgos de inundaciones, así como programas de creación de capacidades.

Todo lo tratado anteriormente puede complementarse con algunas de las conclusiones de las jornadas de San Carlos (Brasil), que en mayo de 2007 reunió a un elevado número de participantes de muchos países de la región, las cuales fueron recogidas en la denominada "Carta de San Carlos" y de la que se extrae lo siguiente:

- Los procedimientos de información y emisión de alerta deben ser efectivos, por lo que deben ser previamente definidos en un proceso racional y ser incluidos en protocolos de actuación de cada institución.
- Se detecta la necesidad del establecimiento de una estrecha y fluida comunicación entre profesionales especialistas en la materia y las estancias políticas, organizaciones no gubernamentales y comunidades, para contribuir conjuntamente a la mejora de la ordenación del territorio.

- Urge la promoción de actividades de divulgación y educación que permitan a la comunidad mejorar su percepción de la amenaza (peligro) y dotarse de capacidad para involucrarse en la gestión del riesgo.
- Los especialistas deben tratar de llegar a los medios de comunicación, usándolos como vía de transmisión de información y conocimiento a la comunidad, con la intención última de concienciar a la población de lo que se considera un precepto muy importante: que todos los ciudadanos se involucren en las diferentes acciones paliativas de las posibles consecuencias adversas de los fenómenos naturales.

Entre el 30 de noviembre al 4 de diciembre de 2009 se celebra en el Salvador el "taller sobre el pronóstico hidrometeorológico y las inundaciones urbanas", en el que se reunieron 19 miembros de PROHIMET de 12 países que presentaron 23 comunicaciones. Se destaca la amplia participación de especialistas salvadoreños, muchos de ellos del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) del Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador, que añadieron otras 11 comunicaciones. La singularidad de esta reunión estuvo en la participación de dos colaboradores de las redes sociales para actuación en caso de inundaciones. El número de temas tratados fue amplio, aunque se resaltó el interés o preocupación por:

- Necesidad de mejoras en relaciones internacionales, especialmente en lo relacionado con el intercambio de datos

En el 2010 se celebran las jornadas sobre "Sistemas regionales de observación hidrometeorológicos. Intercambios de información" (de 19 al 23 de julio), a las que acudieron miembros de PROHIMET de 11 países, además de 8 participantes de Costa Rica. Se concluyó, entre otros asuntos, en lo siguiente:

- Hay una gran necesidad de mejorar los sistemas de medidas y de coordinar acciones en ámbito internacional. Hay algunas iniciativas de acciones internacionales concretas interesantes, pero, en general, se detectan en deficiencias en este sentido.

Las jornadas de México de 2011 (que incluyen participantes de 13 países y 14 instituciones mexicanas) abordan varias cuestiones, entre ellas la de relaciones institucionales:

- Se reconoce la necesidad de los protocolos pero se observa que rara vez están definidos.

- La difusión de información es aspecto clave para la efectividad de los SHN y SMN. Se recomienda la difusión directa paralela a la información a autoridades competentes, aunque siempre acompañada de acciones orientadas a la educación pública.
- Se recomienda llevar a cabo trabajos orientados a interactuar con la población.
- Se resalta una vez más la importancia de las relaciones de los SHN y SMN con los servicios de protección civil.

El tema cambio climático fue el central en las jornadas de República Dominicana de 2012 (con ponentes de 14 países y diferentes instituciones dominicanas). Los siguientes puntos de las conclusiones de esta reunión relacionan esta cuestión con la de este capítulo:

- Las incertidumbres de los actuales modelos y de las proyecciones climáticas no se suelen exponer claramente, lo que sí se ha hecho en estas jornadas.
- Se detecta una gran confusión en el manejo de conceptos básicos que se evidencia en los medios de difusión. A modo de ejemplo, cabe citar el caso de tiempo y clima, o el de los términos predicción y proyección.
- Se difunden muchos mensajes catastrofistas con afirmaciones de futuro deterministas sin informar sobre las incertidumbres de modelos ni de las limitaciones del estado del arte actual.

En el año 2013, el evento PROHIMET tuvo lugar en Aguascalientes (México), donde se reunieron miembros de la red de 9 países y 25 mexicanos de 14 instituciones. Los puntos que se pusieron de manifiesto en esta reunión más singulares fueron:

- Gestión de avisos de fenómenos adversos, su emisión y difusión. Problema de la rotura de la cadena de información.
- Capacitación de tomadores de decisiones para el entendimiento de productos generados por los SMH.
- Presentación de la información, interacción con los usuarios y comunicación con los sujetos decisores.

Es decir, el grupo de especialistas que constituyen PROHIMET ha llegado en numerosas ocasiones a conclusiones relacionadas con deficiencias y necesidades en cuanto a coordinación, cooperación y comunicación. Por otra parte, se trata de una iniciativa entre cuyos resultados (beneficios) hay varios relacionados con estos mismos conceptos.

14 Acrónimos

Español	Descripción	Inglés	Descripción
APFM	Programa Asociado de Gestión de Crecidas	APFM	Associated Programme on Flood Management
BD	Base de datos	DB	Data Base
BOE	Boletín Oficial del Estado		
EIRD	Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (Naciones Unidas).	UNISDR	United Nations International Strategy for Disaster Reduction
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
OMM	Organización Meteorológica Mundial	WMO	World Meteorological Organization
SAD	Sistema de ayuda a la decisión	DSS	Decision support system
SIG	Sistema de información geográfica	GIS	Geographic Information System
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura	UNESCO	United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization

15 Referencias, bibliografía y otras fuentes

Las siguientes fuentes han sido referidas en el documento

- BOE 1985.- Ley 2/1985 sobre Protección Civil. BOE 25 de enero de 1985
- BOE 1995.- Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones. BOE de 14 de febrero de 1995.
- IPCC 2001.- Glosario de términos del Tercer Informe de Evaluación del IPCC. IPCC Secretariat. OMM. Ginebra. Suiza. <http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>
- APFM 2003.- Gestión integrada de crecientes. Documento conceptual. APFM. Ginebra. Suiza. Agosto 2006. http://www.apfm.info/pdf/concept_paper_s.pdf
- EIRD 2004.- Vivir con el Riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. Versión 2004. Naciones Unidas. Ginebra. Suiza. <http://www.eird.org/vivir-con-el-riesgo/index2.htm>
- APFM 2006.- Aspectos sociales y participación de los interesados en la gestión integrada de crecidas. APFM. Ginebra. Suiza. Agosto 2006. http://www.apfm.info/pdf/ifm_social_aspects_Sp.pdf
- OMM 2006.- Reglamento Técnico. VOLUMEN III. Hidrología. OMM-Nº 49. 2006
- EIRD 2009.- Informe de evaluación global sobre la reducción de riesgos de desastres 2009: Riesgo y pobreza en un clima cambiante. Naciones Unidas. Ginebra. Suiza. 2009. <http://www.preventionweb.net/gar09>
- EIRD 2009-2.- Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Naciones Unidas. Ginebra. Suiza. 2009. http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- BOE 2010.- Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación. BOE Núm. 171 de 15 de julio de 2010.
- PROHIMET 2010 "PROHIMET 2005-2010. Memoria de actividades". <http://www.prohimet.org/PROHIMET-2005-2010.pdf>
- OMM 2011.- Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I. Hidrología – De la medición a la información hidrológica. OMM-Nº 168. Sexta edición. 2011. <http://library.wmo.int/opac/>
- RAE 2012.- Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia Española <http://www.rae.es/>
- GHI 2013.- Glosario Hidrológico Internacional. OMM, UNESCO, Pierre Hubert (Ecole des Mines de Paris). <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglo.htm>.

Por otra parte, se recomienda el uso de la Biblioteca Digital de la OMM (<http://library.wmo.int/opac/>), concretamente, se pueden encontrar los siguientes documentos directamente relacionados con lo aquí expuesto:

- Reglamento Técnico. VOLUMEN III. Hidrología. OMM-Nº 49. 2006
- Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I. Hidrología – De la medición a la información hidrológica. OMM-Nº 168. Sexta edición. 2011
- Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II. Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. OMM-Nº 168. Sexta edición. 2011
- Guidelines on the Role, Operation and Management of National Hydrological Services. Operational Hydrology Report No. 49. WMO – Nº 1003. 2006
- Manual on Flood Forecasting and Warning. WMO-No. 1072. 2011
- Manual on Stream Gauging. Volume I – Fieldwork. WMO-No. 1044. 2010
- Manual on Stream Gauging. Volume II – Computation of Discharge. WMO-No. 1044. 2010
- Directrices de orientación para la enseñanza y formación profesional del personal de meteorología e hidrología operativa. Volumen IIII: Hidrología. OMM – Nº 258. 2007.

En cuanto a herramientas de cálculo, con el software libre del Hydrologic Engineering Center (HEC) se cuenta con un conjunto de utilidades que abarcan gran parte de las necesidades para el análisis hidrológico e hidráulico, además del interés que tienen a efectos formativos:

<http://www.hec.usace.army.mil/software/>

Éstas y otras utilidades forman parte del Sistema de Hidrología Operativa para Fines Múltiples, HOMS (Hydrological Operational Multipurpose System), de la OMM. http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/homs/homs_es.html

Resumen

Los problemas de agua, tiempo y clima exigen enfoques racionales basados en la ciencia y la tecnología. Pero en el fundamento de toda solución debe estar un sistema de información que proporcione capacidad de observación, análisis y previsión. En concreto, la reducción del impacto negativo de las crecidas y la gestión correcta de los recursos hídricos, especialmente en caso de sequías, exigen estas capacidades, que se concretan en los denominados sistemas de predicción hidrológica. En este ámbito temático, amplio y complejo, este libro pretende proveer al lector una síntesis con visión global, aclarar conceptos fundamentales y ofrecer una base que facilite la comprensión de otras publicaciones. Además, partiendo de que los recursos humanos son lo más importante, se intenta concienciar sobre la importancia de la calidad de las medidas hidrológicas y de los aspectos organizativos, pues su consideración y el acierto en su tratamiento son imprescindibles para la puesta en práctica de soluciones operacionales (permitiendo, incluso, superar limitaciones científico-tecnológicas).

Autor

Angel Luis Aldana Valverde es, desde 1997, Doctor Ingeniero por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid (España). Ha desarrollado gran parte de su carrera profesional en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, trabajando sobre todo en cuestiones relacionadas con los sistemas automáticos de información hidrológica, la predicción hidrológica y la operación de embalses en situaciones de crecidas. Es el coordinador de la red PROHIMET (Red iberoamericana para el monitoreo y pronóstico de fenómenos hidrometeorológicos), desde su fundación en 2005, y ha participado en proyectos y actividades de formación en muchos países latinoamericanos. Actualmente trabaja como consultor de la OMM (Organización Meteorológica Mundial) y como consultor independiente.