

## INDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>1</b>
1. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS.....	3
2. CONTEXTO GENERAL DE LA TESIS.....	4
2.1. TENDENCIAS EN LA GESTIÓN DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA. ....	4
2.2. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA. ....	7
2.3. EL PAPEL DEL SIG EN LA GESTIÓN DE REDES. ....	8
3. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	9
4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA PRESENTADA. ....	12
5. CONCLUSIÓN. ....	17
<b>CAPÍTULO 2. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA GESTIÓN DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
1. INTRODUCCIÓN .....	21
2. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	22
2.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA. ....	22
2.2. DEFINICIÓN Y COMPONENTES DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	23
2.3. MODELACIÓN DE LOS DATOS ESPACIALES.....	26
2.3.1. El modelo ráster. ....	26
2.3.2. El modelo vectorial.....	28
2.3.3. ¿Modelo ráster o vectorial? .....	30
2.4. MODELACIÓN DE LOS ATRIBUTOS.....	31
2.4.1. Estructura de lista invertida.....	34
2.4.2. Estructura jerárquica. ....	34
2.4.3. Estructura de red. ....	35
2.4.4. Estructura relacional.....	36
2.4.5. Estructura orientada a objetos. ....	37
2.5. INTEGRACIÓN DE LOS DATOS ESPACIALES Y LOS ATRIBUTOS. ....	39
2.6. HERRAMIENTAS PROPIAS DE UN SIG.....	40
2.6.1. Consultas.....	41
2.6.2. Topologías.....	42

2.6.3. Mapas temáticos.....	43
2.6.4. Modelos digitales del terreno.....	45
2.6.5. Desarrollo de aplicaciones.....	45
3. UTILIZACIÓN DE LOS SIG EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	46
3.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LA GESTIÓN DE UN ABASTECIMIENTO APOYADA EN UN SIG.....	46
3.2. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA CREACIÓN DE NUEVAS INFRAESTRUCTURAS.....	49
3.2.1. Planificación de un abastecimiento.....	50
3.2.2. Diseño de la red.....	51
3.2.3. Proyecto de la red.....	53
3.3. APLICACIÓN DE LOS SIG EN LA CREACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	55
3.3.1. Utilización del SIG durante la creación del modelo.....	55
3.3.2. Aportación de los SIG al mantenimiento de los modelos matemáticos.....	56
3.4. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA OPERACIÓN Y EL CONTROL DE LA RED.....	57
3.4.1. Control de la red.....	58
3.4.2. Gestión de maniobras de cierre parcial.....	60
3.4.3. Cálculo de los indicadores de gestión.....	62
3.4.4. Generación y gestión de sectores en la red.....	63
3.4.5. Control y gestión de pérdidas volumétricas.....	67
3.5. APLICACIÓN DE LOS SIG A LA GESTIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS EXISTENTES.....	72
3.5.1. Gestión del inventario.....	72
3.5.2. Mantenimiento preventivo.....	74
3.5.3. Mantenimiento correctivo.....	76
3.5.4. Rehabilitación y renovación de la red.....	77
4. CONCLUSIONES.....	79
<b>CAPÍTULO 3. MODELOS DE CÁLCULO UTILIZADOS .....</b>	<b>81</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	83
2. APROXIMACIÓN A LOS MODELOS DIGITALES O MATEMÁTICOS.....	84
2.1. CONCEPTO DE MODELO DIGITAL O MATEMÁTICO.....	84
2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS.....	85
2.2.1. Clasificación en función de la naturaleza del modelo.....	85
2.2.2. Clasificación en función del tratamiento de la variable temporal.....	86
2.2.3. Nivel de detalle y objetivos del modelo.....	87
3. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.....	88
3.1. PRINCIPALES ESTRUCTURAS DE DATOS PARA LOS MDT.....	88
3.1.1. Matrices de Altitud.....	89
3.1.2. Estructura de Redes Triangulares Irregulares (TIN).....	90

3.2.	FUENTES DE DATOS EN UN MDT .....	91
3.2.1.	Puntos de observación regularmente repartidos. ....	92
3.2.2.	Puntos repartidos de forma irregular.....	92
3.2.3.	Curvas de nivel.....	93
3.3.	ALGORITMO DE TRIANGULACIÓN Y POLIGONIZACIÓN .....	93
3.3.1.	El mosaico de Dirichlet. ....	93
3.3.2.	Introducción al algoritmo de Watson para la Triangulación de Delaunay. ....	95
3.3.3.	Introducción de nuevos puntos.....	97
3.3.4.	Definición de un triángulo.....	99
3.3.5.	Obtención de los polígonos de Voronoi a partir de la triangulación de Delaunay .....	100
3.4.	ALGORITMOS DE INTERPOLACIÓN.....	102
3.4.1.	Planteamiento de un problema de interpolación espacial. ....	102
3.4.2.	Interpolación por proximidad .....	103
3.4.3.	Interpolación lineal .....	104
3.4.4.	Interpolación mediante superficies de tendencia.....	105
3.4.5.	Interpolación inversa a la distancia. ....	105
3.4.6.	Interpolación por kriging. ....	106
3.4.7.	Interpolación por técnicas de elementos finitos.....	110
3.4.8.	Otros métodos de interpolación.....	112
4.	MODELO DE ANÁLISIS HIDRÁULICO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.....	112
4.1.	CODIFICACIÓN DE LA REALIDAD EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	112
4.2.	INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA. ....	114
4.2.1.	Definiciones básicas en un problema de análisis de redes. ....	114
4.2.2.	Definiciones propias de la teoría de grafos o topología.....	118
4.3.	FASES EN LA ELABORACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	119
4.3.1.	Recopilación de Información.....	121
4.3.2.	Esqueletización de la Red.....	121
4.3.3.	Asignación de cargas. ....	122
4.3.4.	Verificación y calibración del modelo.....	123
4.4.	UTILIZACIÓN DE UN SIG PARA LA SIMPLIFICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA. ....	124
4.5.	RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES HIDRÁULICAS DE LA RED. ....	131
4.4.1.	Ecuaciones básicas del flujo en tuberías.....	131
4.4.2.	Resolución de la red por el método del gradiente. ....	133
5.	CONCLUSIONES.....	141

<b>CAPÍTULO 4. ASIGNACIÓN DE CARGAS EN UN MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>143</b>
1. INTRODUCCIÓN.....	145
2. ANÁLISIS DE CONSUMOS Y DETERMINACIÓN DE CAUDALES MEDIOS.....	147
2.1. OBTENCIÓN DEL CAUDAL MEDIO CORRESPONDIENTE A UN INSTANTE ACTUAL. ....	149
2.1.1. Consumo registrado y consumo facturado .....	149
2.1.2. Consumo no registrado .....	152
2.2. OBTENCIÓN DE UNA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL PROYECTADO. ....	155
2.2.1. Demandas actuales frente a demandas futuras.....	155
2.2.2. Método para estimar el caudal en una red con ausencia de datos.....	157
3. TÉCNICAS DE ASIGNACIÓN DE CARGAS.....	161
3.1. ASIGNACIÓN DE CONSUMOS UNITARIOS POR CALLE.....	161
3.2. ASIGNACIÓN POR DERIVACIONES DE LÍNEAS Y NUDOS. ....	162
3.3. ASIGNACIÓN POR MALLAS DEL MODELO.....	163
3.4. ASIGNACIÓN PUNTO A PUNTO. ....	164
4. ESTUDIOS PREVIOS REALIZADOS PARA DETERMINAR EL CAUDAL PUNTA EN UNA INSTALACIÓN. ....	166
4.1. INTRODUCCIÓN A LA NATURALEZA ESTADÍSTICA DEL CONSUMO INSTANTÁNEO DE AGUA. ....	166
4.2. MÉTODOS BASADOS EN LA FORMULACIÓN PROBABILÍSTICA .....	168
4.2.1. Estudios realizados en Inglaterra por Butler y Graham (1995).....	168
4.2.2. Estudio realizado en España por Arregui (1998) .....	170
4.3. MÉTODOS EMPÍRICOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL PUNTA. ....	171
4.3.1. Mediciones realizadas por la American Water Works Association (AWWA).....	171
4.3.2. Arizmendi (1991).....	172
4.3.3. Lingereddy et al. (1998) .....	173
4.3.4. Ayuntamiento de Valencia (1995).....	174
5. MODELO ESTOCÁSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO DE UNA LÍNEA. ....	175
5.1. APROXIMACIÓN A LA TEORÍA DE LÍNEAS DE ESPERA. ....	176
5.2. MODELO DE POISSON PARA EL CAUDAL EN UNA TUBERÍA. ....	179
5.3. DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL CONSUMIDO EN UNA VIVIENDA. ....	180
5.4. DISTRIBUCIÓN DEL CAUDAL EN UNA CONDUCCIÓN QUE ABASTECE A VARIAS VIVIENDAS SIMULTÁNEAMENTE.....	182
5.5. MODELO PROPUESTO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS. ....	187
5.5.1. Distribución del caudal aportado por un aparato.....	188
5.5.2. Determinación del factor de utilización. ....	189
5.5.3. Modificaciones realizadas para acelerar el cálculo. ....	190
5.6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON ESTUDIOS PREVIOS. ....	192
5.6.1. Comparación con mediciones realizadas.....	192
5.6.2. Comparación con otros métodos empíricos.....	194

5.6.3. Conclusiones.....	196
6.    ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	196
6.1. EFECTO DEL NÚMERO DE VIVIENDAS EN LA CURVA DE CAUDALES ACUMULADOS. ....	197
6.2. EFECTO DE LA DOTACIÓN MEDIA .....	198
6.3. EFECTO DE LA TIPOLOGÍA DE LOS APARATOS DE CONSUMO. ....	202
6.4. CONCLUSIONES EXTRAÍDAS. ....	205
7.    PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE CARGAS A UN MODELO DE DETALLE. ....	205
7.1. PLANTEAMIENTO GENERAL. ....	205
7.2. ORDENACIÓN TOPOLÓGICA DE LA RED. ....	208
7.3. APLICACIÓN A REDES RAMIFICADAS. CÁLCULO DIRECTO. ....	212
7.4. APLICACIÓN A REDES MALLADAS. CÁLCULO ITERATIVO. ....	214
7.4.1. Determinación del número de abonados abastecidos. ....	215
7.4.2. Cálculo del caudal punta en cada línea.....	216
7.4.3. Determinación de las demandas a cargar en cada nudo.....	218
7.4.4. Ejemplo de cálculo de caudales punta en redes malladas. ....	219
8.    CONCLUSIONES.....	227
 <b>CAPÍTULO 5.    MODELO DE DATOS .....</b>	<b>229</b>
1.    INTRODUCCIÓN .....	231
2.    FUNDAMENTOS DE LA MODELACIÓN DE DATOS. ....	232
2.1. INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE INTEROPERABILIDAD. ....	232
2.1. NECESIDAD DE DOCUMENTAR LOS DATOS. ....	233
2.2. INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN DE DATOS ESPACIALES. ....	235
2.2.1. Representación de entidades. ....	236
2.2.2. Representación de relaciones. ....	237
2.3. CLASES ESPACIALES SIMPLES. ....	239
3.    MODELO DE DATOS PARA EL MODELO DIGITAL DEL TERRENO.....	240
3.1. TOPOLOGÍA DE PUNTOS.....	241
3.2. TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY.....	241
3.3. MOSAICO DE THIESSEN.....	242
4.    MODELO DE DATOS PARA LA GESTIÓN DE ABONADOS.....	244
5.    MODELO DE DATOS PARA LOS ELEMENTOS DE LA RED.....	249
5.1. ESTRUCTURA GENERAL DE LOS DATOS.....	249
5.2. ENTIDADES TOPOLÓGICAS. ....	252
5.2.1. Nodo.....	252
5.2.2. Línea.....	253

5.3.	ENTIDADES PUNTUALES.....	253
5.3.1.	Nudos de consumo y conexiones .....	254
5.3.2.	Tanques o depósitos de nivel variable.....	255
5.3.3.	Depósitos de nivel constante o embalses.....	255
5.4.	ELEMENTOS LINEALES .....	256
5.5.	ELEMENTOS HIDRÁULICOS LINEALES CON REPRESENTACIÓN GRÁFICA PUNTUAL.....	258
5.5.1.	Tratamiento general.....	258
5.5.2.	Válvulas.....	260
5.5.3.	Bombas.....	262
5.6.	MODELO DE DATOS CONJUNTO. ....	263
6.	CONCLUSIONES .....	265
<b>CAPÍTULO 6. CASO DE APLICACIÓN: MODELACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA COOPERATIVA VALENCIANA DE EL PLANTÍO Y LA CAÑADA .....</b>		<b>267</b>
1.	INTRODUCCIÓN.....	269
2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA RED DE AGUA POTABLE DE EL PLANTÍO Y LA CAÑADA. ....	270
2.1.	MODO GENERAL DE OPERACIÓN. ....	270
2.2.	OPERACIÓN DE LA MITAD NORTE DE LA RED. ....	273
2.3.	OPERACIÓN DE LA MITAD SUR DE LA RED.....	274
2.4.	CARACTERÍSTICAS DE LA FACTURACIÓN. ....	276
3.	CAPTACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE. ....	278
3.1.	INTRODUCCIÓN .....	278
3.2.	DIRECTRICES DE LA DIGITALIZACIÓN. ....	279
3.3.	FUENTES DE INFORMACIÓN GRÁFICA. ....	280
3.3.1.	Información correspondiente a los términos municipales de Bétera y La Poble de Vallbona. ....	281
3.3.2.	Información correspondiente a los términos municipales de Paterna y San Antonio de Benagéber.....	283
3.3.3.	Tratamiento del fondo cartográfico.....	286
3.4.	INFORMACIÓN DISPONIBLE DE FACTURACIÓN.....	287
4.	INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN EL SIG.....	291
4.1.	MODELO DE DATOS.....	291
4.1.1.	Tuberías.....	292
4.1.2.	Pozos.....	293
4.1.3.	Depósitos.....	294
4.1.4.	Nudos.....	295
4.1.5.	Estaciones de bombeo.....	296

4.2.	VINCULACIÓN DE LOS DATOS. ....	297
4.2.1.	Vinculación de los datos de la red.....	297
4.2.2.	Vinculación de los datos de los abonados. ....	298
4.3.	GENERACIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE LA RED. ....	299
4.4.	CREACIÓN DEL MDT E INTERPOLACIÓN DE LAS COTAS. ....	300
5.	DEFINICIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO. ....	302
5.1.	SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO. ....	302
5.2.	ESTUDIO DE CONSUMOS. ....	303
5.2.1.	Análisis de los consumo.....	303
5.2.2.	Asignación de cargas al modelo.....	304
5.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO. ....	308
5.3.1.	Mediciones en la red .....	308
5.3.2.	Ajuste y calibración del modelo.....	312
5.4.	ESCENARIOS SIMULADOS.....	313
5.4.1.	Situación actual. ....	313
5.4.2.	Estudio de consumos con horizonte en el año 2010.....	315
6.	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS. ....	318
6.1.	CÁLCULOS Y RESULTADOS. ....	318
6.2.	ESCENARIO ACTUAL.....	319
6.2.1.	Montesano .....	319
6.2.2.	Zona Sur Colinas de San Antonio.....	320
6.3.	HORIZONTE AÑO 2010.....	322
6.4.	RESUMEN DE RESULTADOS.....	325
7.	CONCLUSIONES.....	326
 <b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS .....</b>		<b>329</b>
1.	INTRODUCCIÓN. ....	331
2.	PRINCIPALES APORTACIONES DE LA TESIS. ....	332
2.1.	APORTACIONES GENERALES EN EL CAMPO DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	332
2.1.1.	Elaboración de un Modelo Digital del Terreno (MDT).....	332
2.1.2.	Elaboración de un modelo de datos orientado a objetos para la obtención y almacenamiento del MDT.....	333
2.2.	APORTACIONES ESPECÍFICAS A LA MODELACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. ....	334
2.2.1.	Definición de una estructura de datos para la gestión técnica de una red de abastecimiento. ....	334
2.2.2.	Integración en el SIG de las técnicas de simplificación de modelos.....	334

2.2.3. Desarrollo de un método de asignación de cargas teniendo en cuenta los caudales punta y la probabilidad de ocurrencia de los mismos. ....	335
2.2.4. Aplicación de todo lo desarrollado a un caso real. ....	335
<b>3. DESARROLLOS FUTUROS. ....</b>	<b>336</b>
3.1. INTEGRACIÓN EN UN MISMO SISTEMA DE LAS REDES DE ABASTECIMIENTO Y DE SANEAMIENTO. ....	336
3.2. EXTENSIÓN DEL MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE CARGAS A CONSUMOS NO DOMÉSTICOS. ....	337
3.3. INCLUSIÓN DE LAS FUGAS EN EL PROCESO DE ASIGNACIÓN DE CARGAS.....	337
3.4. INCLUSIÓN EN EL SIG DE TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN NO TRIVIAL DE INFORMACIÓN. ....	338
<b>ANEXO. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>339</b>