

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

**DEPARTAMENTO DE ESTADÍSTICA, ECONOMETRÍA, I.O Y
ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS
(ÁREA DE ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS)**

TESIS DOCTORAL

**“DEMANDA DE AGUA EN ZONAS URBANAS EN
ANDALUCÍA”**

Directores:

Prof. Dr. D. José M^a Caridad y Ocerin

Prof^a. Dr^a. Dña. Nuria Ceular Villamandos

Prof. Dr. D. Ricardo Veroz Herradón

Doctoranda:

Francisca Daza Sánchez

Córdoba, 2008

TITULO: *Demanda de agua en zonas urbanas de Andalucía*

AUTOR: *Francisca Daza Sánchez*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2008
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

ISBN-13: 978-84-7801-928-1
D.L.: CO-183-2009



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

**DEPARTAMENTO DE ESTADÍSTICA, ECONOMETRÍA, I.O. Y
ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS**

ÁREA DE ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS

TESIS DOCTORAL



**Departamento de Estadística, Econometría,
I.O. y Organización de Empresas**

Aptdo. 3048 E14080 Córdoba

**DEMANDA DE AGUA EN ZONAS URBANAS EN
ANDALUCÍA**

Tesis doctoral presentada por Francisca Daza Sánchez en satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba. Dirigida por los Profs. Dres. D. José María Caridad y Ocerin, Dña. Nuria Ceular Villamandos y D. Ricardo Veróz Herradón.

Vº. Bº.de los Directores

Prof. Dr. D. José Mª Caridad y Ocerin

Profª. Drª. Dña. Nuria Ceular Villamandos

Prof. Dr. Ricardo Veroz Herradón

La Doctoranda

Francisca Daza Sánchez

Córdoba, Julio de 2008

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer la ayuda y colaboración prestada por los directores de tesis:

. Dr. D. José María Caridad y Ocerin, excelente persona y profesional, quien a pesar de sus muchas ocupaciones, confió en mí y me propuso e impulsó esta investigación, su apoyo y supervisión junto a una alta calidad humana han sido vitales.

. Dra. D^a. Nuria Ceular Villamandos, por su incondicional disponibilidad y sus valiosas aportaciones, mostrando siempre una gran paciencia y comprensión.

. Dr. D. Ricardo Veroz Herradón, por su inestimable apoyo y constante interés mostrado tanto en el ámbito personal como académico.

Mi gratitud a mis compañeros del Departamento de Estadística, Econometría, Investigación Operativa y Organización de Empresas de la Universidad de Córdoba. Aunque esta tesis sea el resultado de un trabajo individual, casi solitario, dada la distancia física que nos separa, siempre he encontrado en ellos un constante aliento, sabios consejos y, lo más importante, su amistad.

A María, Camino y Manolo por su ayuda generosa para resolver mis dudas informáticas. Y a todos mis compañeros de la Escuela Universitaria Politécnica de Belmez, por el compañerismo mostrado durante estos años.

A Pedro y a nuestros tres hijos, a quienes he robado tantas horas de dedicación en la elaboración de este proyecto, y siempre he contado con su cariño y comprensión.

A mis padres, por su sacrificio permanente, a ellos les debo toda mi formación.

A mis hermanos, al resto de mi familia y amigos les agradezco todo su apoyo y confianza.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. INTRODUCCIÓN	3
1.2. ANTECEDENTES	4
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	7
1.4. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	9
1.5. METODOLOGÍA ADOPTADA	10
1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	11
2. CARACTERÍSTICAS DE LA ECONOMÍA DEL AGUA.....	17
2.1. INTRODUCCIÓN	17
2.2. LA ECONOMÍA DEL AGUA EN ESPAÑA	18
2.2.1. <i>El Mercado del Agua</i>	18
2.2.2. <i>La Demanda de Agua</i>	19
2.2.3. <i>La Oferta de Agua</i>	23
2.2.4. <i>El Precio del Agua</i>	28
2.2.4.1. <i>Sistemas de Precios: Tarifas</i>	28
2.2.4.2. <i>Estructura Tarifaria</i>	32
2.2.4.3. <i>El principio de Recuperación de Costes</i>	41
2.2.4.4. <i>Evolución de las Tarifas de los Servicios de Agua Urbanos</i>	45
2.2.4.5. <i>Precio del Agua, Ahorro y Sostenibilidad</i>	48
2.2.5. <i>Usos del Agua</i>	50
2.2.5.1. <i>Introducción</i>	50
2.2.5.2. <i>Usos Urbanos del Agua</i>	50
2.2.5.3. <i>Usos del Agua en los Hogares</i>	54
2.2.5.4. <i>Usos Industriales</i>	59
2.2.6. <i>Escenario Tendencial al 2015</i>	61
2.3. LA ECONOMÍA DEL AGUA EN EUROPA.....	63
2.4. LA ECONOMÍA DEL AGUA EN ANDALUCÍA	66
2.5. REGULACIÓN	68
2.5.1. <i>Directiva Marco del Agua</i>	71
2.5.1.1. <i>Antecedentes</i>	71
2.5.1.2. <i>Calendario de Aplicación</i>	72
2.5.1.3. <i>Finalidad y Objetivos</i>	73
2.5.1.4. <i>Recuperación de Costes en la Directiva Marco</i>	75
2.6. EXPERIENCIAS EXTRANJERAS.....	76
3. LA GESTIÓN DEL AGUA EN ESPAÑA	81
3.1. INTRODUCCIÓN	81
3.2. EL AGUA COMO UN BIEN ECONÓMICO	84
3.3. EL PROBLEMA DEL AGUA	86
3.4. UNA NUEVA POLÍTICA DEL AGUA	90
3.4.1. <i>La Crisis de la Política Hidrológica Tradicional</i>	90
3.4.2. <i>Un Enfoque de Demanda en la Gestión del Agua</i>	92
3.4.3. <i>Nuevos Instrumentos de Gestión: La Nueva Cultura del Agua</i>	95

3.4.4. <i>La Participación Pública en la Gestión de los Recursos Hídricos</i>	103
3.5. AGENTES DE LA GESTIÓN HIDROLÓGICA.....	105
3.6. LA GESTIÓN DE RIESGOS-SEQUÍAS.....	108
3.7. GESTIÓN URBANA DEL AGUA.....	110
3.7.1. <i>Introducción</i>	110
3.7.2. <i>Problemática de los Abastecimientos Urbanos</i>	113
3.7.3. <i>Modalidades de Gestión</i>	120
3.7.4. <i>Medidas para Gestionar la Demanda</i>	123
3.8. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	124
3.8.1. <i>Introducción</i>	124
3.8.2. <i>El Ciclo del Agua</i>	126
3.8.3. <i>Calidad del Agua Potable</i>	127
3.8.3.1. <i>Indicadores de calidad del agua potable</i>	127
3.8.3.2. <i>Plantas de Tratamiento</i>	129
3.8.3.3. <i>Distribución del Agua</i>	131
3.9. GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	132
3.10. CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUA.....	134
4. LA GESTIÓN DEL AGUA EN ANDALUCÍA.....	139
4.1. INTRODUCCIÓN.....	139
4.2. AGUA Y TERRITORIO ANDALUZ.....	139
4.3. GESTIÓN Y USOS DEL AGUA EN ANDALUCÍA.....	142
4.3.1. <i>Gestión Sostenible del Agua</i>	142
4.3.2. <i>Gestión de los Abastecimientos Urbanos</i>	145
4.4. CONFEDERACIONES HIDROGRÁFICAS.....	147
4.4.1. <i>Cuenca Hidrográfica del Guadiana</i>	148
4.4.2. <i>Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir y Cuenca Andaluza del atlántico</i>	149
4.4.3. <i>Cuenca Andaluza del Mediterráneo</i>	152
4.4.4. <i>Cuenca Hidrográfica del Segura</i>	152
5. LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ÁREA URBANA.....	157
5.1. ESTRUCTURA TERRITORIAL.....	157
5.1.1. <i>Territorio e Historia</i>	158
5.1.2. <i>Infraestructuras Urbanas de Abastecimiento y Saneamiento de Agua</i>	159
5.2. ANTECEDENTES DE LA GESTIÓN DEL AGUA.....	160
5.3. LA GESTIÓN DEL AGUA.....	162
5.3.1. <i>El Ciclo Integral del Agua</i>	162
5.3.2. <i>Oferta y Demanda de agua</i>	164
5.4. PRECIOS Y TARIFAS DEL AGUA.....	166
5.4.1. <i>Cálculo de la Tarifa de Abastecimiento y la Tasa de Saneamiento</i>	166
5.4.2. <i>Tarifa de Abastecimiento de Agua en el Año 2008</i>	168
5.4.3. <i>Tasa de Depuración de Aguas Residuales del Año 2008</i>	169
5.4.4. <i>Plan de Individualización de Contadores</i>	170
6. MÉTODOS DE PREDICCIÓN UTILIZADOS Y DISCUSIÓN.....	175
6.1. INTRODUCCIÓN.....	175
6.2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN CON DATOS TEMPORALES.....	176
6.3. MODELOS ARIMA.....	179

6.3.1. <i>Revisión Histórica</i>	179
6.3.2. <i>Modelos Arima de Box-Jenkins</i>	181
6.3.3. <i>Metodología Arima</i>	188
6.3.4. <i>Selección de modelos</i>	192
6.3.5. <i>Aplicaciones de los Modelos ARIMA</i>	194
6.3.6. <i>Limitaciones de los Modelos ARIMA</i>	196
6.4. REDES NEURONALES ARTIFICIALES	197
6.4.1. <i>Revisión Histórica</i>	197
6.4.2. <i>Simplificación del Modelo Biológico</i>	201
6.4.3. <i>Elementos de una Red Neuronal Artificial</i>	203
6.4.4. <i>Estructura de una Red Neuronal Artificial</i>	209
6.4.5. <i>Modos de Operación: Aprendizaje y Recuerdo</i>	212
6.4.6. <i>Algoritmo de Retropropagación</i>	216
6.4.7. <i>Arquitecturas de Redes Neuronales</i>	221
6.4.7.1. <i>El Perceptrón Multicapa</i>	224
6.4.8. <i>Selección de Modelos</i>	229
6.4.9. <i>Aplicaciones de las Redes Neuronales</i>	230
6.4.10. <i>Ventajas y Limitaciones de las Redes Neuronales</i>	233
7. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELOS ARIMA	239
7.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	239
7.2. PREDICCIÓN CON MODELOS ARIMA.....	241
7.2.1. <i>Presentación y Estacionariedad de la Serie</i>	241
7.2.2. <i>Identificación, Estimación y Validación del Modelo</i>	243
7.2.3. <i>Predicción de la Demanda de Agua</i>	249
7.2.4. <i>Modelo Arima Alternativo</i>	251
7.3. RESULTADOS.....	256
8. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES	259
8.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	259
8.2. PREDICCIÓN CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	262
8.2.1. <i>Estructura de la Red Neuronal</i>	262
8.2.2. <i>Método de Aprendizaje</i>	264
8.2.3. <i>Predicción de la Demanda de Agua</i>	266
8.3. RESULTADOS.....	274
9. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELO HÍBRIDO	279
9.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	279
9.2. PREDICCIÓN CON MODELO HÍBRIDO.....	280
9.2.1 <i>Construcción del Modelo Híbrido</i>	280
9.2.2. <i>Predicción de la Demanda de Agua</i>	285
9.3. AMPLIACIÓN DEL HORIZONTE TEMPORAL DE PREDICCIÓN.....	290
9.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	293

10. APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO EN LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DESAGREGADA DE AGUA	299
10.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	299
10.2. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DOMÉSTICO	300
10.3. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA INDUSTRIAL	306
10.4. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA BENÉFICO	313
10.5. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA MUNICIPAL	319
10.6. PREDICCIONES DEL CONSUMO DE AGUA DE LAS ADMINISTRACIONES	325
11. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	335
11.1. CONCLUSIONES.....	335
11.2. CONTRIBUCIONES ORIGINALES.....	341
11.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	342
BIBLIOGRAFÍA	345
ANEXO	375

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DE LA ECONOMÍA DEL AGUA

TABLA 2. 1 CONSUMO DOMÉSTICO DE AGUA ANUAL PER CÁPITA (M3).....	20
TABLA 2. 2 RESERVAS EMBALSES CONSUNTIVOS POR CUENCAS.....	25
TABLA 2. 3 PORCENTAJE DE LA SUPERFICIE DEL PAÍS EN EL QUE SE DAN CONDICIONES SEVERAS DE “ESTRÉS HÍDRICO”. PROMEDIO (1081-1985).....	25
TABLA 2. 4 AGUA FACTURADA Y TARIFAS EN ESPAÑA	33
TABLA 2. 5 TARIFAS MEDIAS PONDERADAS PARA LOS SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO URBANO DE AGUA. AÑO 2005	34
TABLA 2. 6 VALOR UNITARIO DE LOS PAGOS POR LOS SERVICIOS DE AGUA A PRECIOS CORRIENTES (2000-2005)	46
TABLA 2. 7 TARIFAS MEDIAS DE USOS DOMÉSTICOS E INDUSTRIALES POR COMUNIDAD AUTÓNOMA (2002-2006)	47
TABLA 2. 8 AGUA POTABLE POR USOS ECONÓMICOS	55
TABLA 2. 9 ABASTECIMIENTO PROMEDIO DE AGUA FACTURADA (LITROS/HAB/DÍA).....	56
TABLA 2. 10 USOS POR VIVIENDA Y CUENCA 2001 Y 2005 (LITROS/VIVIENDA/DÍA).....	57
TABLA 2. 11 PORCENTAJE DE AGUA FACTURADA CON RESPECTO A LA DISTRIBUIDA	58
TABLA 2. 12 VALOR AÑADIDO BRUTO A PRECIOS DE MERCADO (PRECIOS CONSTANTES 1995). EMPLEO Y PRODUCTIVIDAD INDUSTRIAL	60
TABLA 2. 13 TASAS DE CRECIMIENTO 1995-2005	61
TABLA 2. 14 EVOLUCIÓN PREVISIBLE DEL USO DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO EN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS (HM ³).....	63

CAPÍTULO 3. LA GESTIÓN DEL AGUA EN ESPAÑA

TABLA 3. 1 PARTICIPACIÓN EN LAS CONFEDERACIONES HIDROGRÁFICAS.....	105
TABLA 3. 2 SERVICIOS DE AGUA Y MECANISMOS DE RECUPERACIÓN DE COSTES	107
TABLA 3. 3 POLÍTICA TARIFARIA DE LA INTERNACIONAL WATER SUPPLY ASSOCIATION (I.W.S.A).....	115
TABLA 3. 4 PORCENTAJE DE AGUA NO REGISTRADA	118

CAPÍTULO 4. LA GESTIÓN DEL AGUA EN ANDALUCÍA

TABLA 4. 1 CUENCAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA	149
TABLA 4. 2 CUENCAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR Y CUENCA ANDALUZA DEL ATLÁNTICO	151
TABLA 4. 3 CUENCAS DE LA CUENCA ANDALUZA DEL MEDITERRANEO.....	152
TABLA 4. 4 CUENCAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SEGURA	153

CAPÍTULO 5. LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ÁREA URBANA

TABLA 5. 1 EMBALSES DE CÓRDOBA	165
---	-----

CAPÍTULO 6. MÉTODOS DE PREDICCIÓN UTILIZADOS Y DISCUSIÓN

TABLA 6. 1 ALGUNAS APLICACIONES DE LA PREDICCIÓN EN ECONOMÍA Y GESTIÓN DE EMPRESAS	195
TABLA 6. 2 FUNCIONES DE ACTIVACIÓN.....	211
TABLA 6. 3 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES.....	223

CAPÍTULO 7. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELOS ARIMA

TABLA 7. 1 ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA.....	245
TABLA 7. 2 RESIDUOS MENSUALES DEL MODELO ARIMA (M ³).....	246
TABLA 7. 3 RESULTADOS OBTENIDOS CON MODELO ARIMA SELECCIONADO	249
TABLA 7. 4 VALORES REALES Y PREDICCIONES CON MODELO ARIMA (M ³)	250
TABLA 7. 5 RESULTADOS PREDICCIÓN MODELO ARIMA SELECCIONADO (M ³)	251
TABLA 7. 6 ESTIMACIÓN MODELO ARIMA ALTERNATIVO	252
TABLA 7. 7 RESULTADOS OBTENIDOS CON MODELO ARIMA ALTERNATIVO (M ³).....	253
TABLA 7. 8 VALORES REALES Y PREDICCIONES CON EL MODELO ARIMA ALTERNATIVO (M ³)	254
TABLA 7. 9. RESULTADOS PREDICCIÓN MODELO ARIMA ALTERNATIVO (M ³)	255

CAPÍTULO 8. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES

TABLA 8. 1 PESOS DE LA CAPA OCULTA	264
TABLA 8. 2 PESOS DE LA CAPA DE SALIDA	265
TABLA 8. 3 CONSUMO REAL Y PREDICCIONES RED NEURONAL	272
TABLA 8. 4 COMPARACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS EN PREDICCIÓN ARIMA Y RNA.....	274

CAPÍTULO 9. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELO HÍBRIDO

TABLA 9. 1 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CADA ARQUITECTURA	281
TABLA 9. 2 PESOS DE LA CAPA OCULTA.....	283
TABLA 9. 3 PESOS DE LA CAPA DE SALIDA	283
TABLA 9. 4 PREDICCIONES DEL RUIDO CON MODELO HÍBRIDO (M ³).....	289
TABLA 9. 5 CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³).....	290
TABLA 9. 6 PREDICCIONES DEL RUIDO CON MODELO HÍBRIDO. AÑO 2000 (M ³).....	291
TABLA 9. 7 PREDICCIONES DEL RUIDO CON MODELO HÍBRIDO. AÑO 2001 (M ³).....	291
TABLA 9. 8 CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³)	292
TABLA 9. 9 CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³)	293
TABLA 9. 10 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON MODELOS ARIMA, RNA E HÍBRIDO	294

CAPÍTULO 10. APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO EN LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DESAGREGADA DE AGUA

TABLA 10. 1 ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO DOMÉSTICO	301
TABLA 10. 2 VALORES REALES Y PREDICIONES CON MODELO ARIMA. CONSUMO DOMÉSTICO (M ³)	302
TABLA 10. 3 PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO DOMÉSTICO	303
TABLA 10. 4 PESOS DE LA CAPA DE SALIDA. CONSUMO DOMÉSTICO	303
TABLA 10. 5 PREDICIONES DEL RUIDO CON RED NEURONAL (M ³). CONSUMO DOMÉSTICO	305
TABLA 10. 6 CONSUMO REAL Y PREDICIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³). CONSUMO DOMÉSTICO	305
TABLA 10. 7 RESULTADOS PREDICCIÓN: ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO DOMÉSTICO	306
TABLA 10. 8 ESTIMACIÓN MODELO ARIMA. CONSUMO INDUSTRIAL.....	308
TABLA 10. 9 VALORES REALES Y PREDICIONES CON MODELO ARIMA (M ³). CONSUMO INDUSTRIAL	308
TABLA 10. 10 PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO INDUSTRIAL.....	309
TABLA 10. 11 PESOS DE LA CAPA DE SALIDA. CONSUMO INDUSTRIAL	309
TABLA 10. 12 PREDICIONES RUIDO CON RED NEURONAL (M ³). CONSUMO INDUSTRIAL	311
TABLA 10. 13 CONSUMO REAL Y PREDICIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³). CONSUMO INDUSTRIAL	312
TABLA 10. 14 RESULTADOS PREDICCIÓN: ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO INDUSTRIAL	312
TABLA 10. 15 ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO	314
TABLA 10. 16 VALORES Y PREDICIONES CON MODELO ARIMA (M ³). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO.....	314
TABLA 10. 17 PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO	315
TABLA 10. 18 PESOS DE LA CAPA DE SALIDA CONSUMO DE AGUA BENÉFICO.....	315
TABLA 10. 19 PREDICIONES DEL RUIDO CON LA RED NEURONAL (M ³). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO.....	317
TABLA 10. 20 CONSUMO REAL Y PREDICIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO.....	318
TABLA 10. 21 RESULTADOS ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO	318
TABLA 10. 22 ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO MUNICIPAL.....	320
TABLA 10. 23 VALORES REALES Y PREDICIONES CON MODELO ARIMA (M ³). CONSUMO MUNICIPAL.....	320
TABLA 10. 24 PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO MUNICIPAL.....	321
TABLA 10. 25 PESOS DE LA CAPA SALIDA. CONSUMO MUNICIPAL	321
TABLA 10. 26 PREDICIONES DEL RUIDO CON LA RED NEURONAL (M ³) CONSUMO MUNICIPAL.....	323
TABLA 10. 27 CONSUMO REAL Y PREDICIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³). CONSUMO MUNICIPAL.....	324
TABLA 10. 28 RESULTADOS PREDICCIÓN: ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO MUNICIPAL.....	324
TABLA 10. 29 ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO ADMINISTRACIONES	326
TABLA 10. 30 VALORES REALES Y PREDICIONES CON MODELO ARIMA (M ³). CONSUMO ADMINISTRACIONES	326
TABLA 10. 31 PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO ADMINISTRACIONES	327

TABLA 10. 32 PESOS DE LA CAPA SALIDA. CONSUMO ADMINISTRACIONE	327
TABLA 10. 33 PREDICCIONES DEL RUIDO CON LA RED NEURONAL (M ³). CONSUMO ADMINISTRACIONES.....	329
TABLA 10. 34 CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M ³). CONSUMO ADMINISTRACIONES.....	330
TABLA 10. 35 RESULTADOS PREDICCIÓN ARIMA Y MODELO. CONSUMO ADMINISTRACIONES.....	330

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3. LA GESTIÓN DEL AGUA EN ESPAÑA

FIGURA 3. 1 CICLO INTEGRAL DEL AGUA	100
FIGURA 3. 2 RÉGIMEN DE GESTIÓN DEL SERVICIO DE SUMINISTRO URBANO DE AGUA. PORCENTAJE SEGÚN POBLACIÓN	122

CAPÍTULO 6. MÉTODOS DE PREDICCIÓN UTILIZADOS Y DISCUSIÓN

FIGURA 6. 1 ETAPAS DE UNA APLICACIÓN ARIMA.....	184
FIGURA 6. 2 NEURONA Y CONEXIONES SINÁPTICAS	201
FIGURA 6. 3 MODELO MATEMÁTICO PARA UNA NEURONA.....	204
FIGURA 6. 4 MODELO GENÉRICO DE NEURONA ARTIFICIAL.....	206
FIGURA 6. 5 ARQUITECTURA DEL PERCEPTRÓN MULTICAPA CON UNA CAPA OCULTA..	226

CAPÍTULO 7. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELOS ARIMA

FIGURA 7. 1. FASES DE ELABORACIÓN DE UN MODELO ARIMA	240
--	-----

CAPÍTULO 8. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES

FIGURA 8. 1. RED (3 x 6 x 1)	263
FIGURA 8. 2. MODELO DE NEURONA ARTIFICIAL	268

CAPÍTULO 9. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELO HÍBRIDO

FIGURA 9. 1. RED (5 x 6 x1)	282
-----------------------------------	-----

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS DE LA ECONOMÍA DEL AGUA

GRÁFICO 2. 1 RECUPERACIÓN DE COSTES DE LOS SERVICIOS DEL AGUA	43
--	----

CAPÍTULO 5. LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ÁREA URBANA

GRÁFICO 5. 1 EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA ANUAL (M ³)	164
---	-----

CAPÍTULO 7. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELOS ARIMA

GRÁFICO 7. 1 CONSUMO MENSUAL DE AGUA EN CÓRDOBA (1984-01 A 2006-12)	242
GRÁFICO 7. 2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CONSUMO ANUAL POR MESES (1984-2006)	242
GRÁFICO 7. 3 RESIDUOS OBTENIDOS (M ³)	247
GRÁFICO 7. 4 CORRELOGRAMA DE LOS RESIDUOS	248
GRÁFICO 7. 5 CORRELOGRAMA PARCIAL DE LOS RESIDUOS	248
GRÁFICO 7. 6 CONSUMO REAL- CONSUMO PREVISTO (M ³)	250
GRÁFICO 7. 7 RESIDUOS (M ³)	251
GRÁFICO 7. 8 RESIDUOS OBTENIDOS (M ³)	253
GRÁFICO 7. 9 CONSUMO REAL – CONSUMO PREVISTO (M ³)	254
GRÁFICO 7. 10 RESIDUOS (M ³)	255

CAPÍTULO 8. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES

GRÁFICO 8. 1 CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES	265
GRÁFICO 8. 2 CONSUMO REAL Y CONSUMO ESTIMADO (M ³)	266
GRÁFICO 8. 3 ERRORES COMETIDOS POR LA RED	267
GRÁFICO 8. 4 CONSUMO REAL – CONSUMO PREVISTO (M ³)	273
GRÁFICO 8. 5 RESIDUOS OBTENIDOS- PREDICCIÓN	273

CAPÍTULO 9. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELO HÍBRIDO

GRÁFICO 9. 1 CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES	283
GRÁFICO 9. 2 RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M ³)	284
GRÁFICO 9. 3 ERRORES COMETIDOS POR LA RED	284
GRÁFICO 9. 4 PREDICCIÓN MODELO ARIMA Y MODELO HÍBRIDO (M ³)	295
GRÁFICO 9. 5 GRÁFICA COMPARATIVA DE ERRORES: ARIMA-HÍBRIDO (M ³)	296

CAPÍTULO 10. APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO EN LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DESAGREGADA DE AGUA

GRÁFICO 10. 1	CONSUMO DE AGUA ANUAL DESAGREGADO (MILL. M ³).....	299
GRÁFICO 10. 2	CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO DOMÉSTICO.....	300
GRÁFICO 10. 3	CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO DOMÉSTICO..	303
GRÁFICO 10. 4	RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M ³). CONSUMO DOMÉSTICO.....	304
GRÁFICO 10. 5	ERRORES COMETIDOS POR LA RED. CONSUMO DOMÉSTICO (M ³).....	304
GRÁFICO 10. 6	CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO INDUSTRIAL (M ³).....	307
GRÁFICO 10. 7	CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO INDUSTRIAL .	310
GRÁFICO 10. 8	RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M ³). CONSUMO INDUSTRIAL	310
GRÁFICO 10. 9	ERRORES COMETIDOS POR LA RED (M ³). CONSUMO INDUSTRIAL	311
GRÁFICO 10. 10	CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO BENÉFICO (M ³)	313
GRÁFICO 10. 11	CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO	316
GRÁFICO 10. 12	RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M ³). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO	316
GRÁFICO 10. 13	ERRORES COMETIDO POR LA RED (M ³). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO	317
GRÁFICO 10. 14	CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO MUNICIPAL (M ³)	319
GRÁFICO 10. 15	CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO MUNICIPAL	322
GRÁFICO 10. 16	RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES. CONSUMO MUNICIPAL	322
GRÁFICO 10. 17	ERRORES COMETIDOS POR LA RED (M ³). CONSUMO MUNICIPAL	323
GRÁFICO 10. 18	CONSUMO ANUAL DE AGUA DE LA ADMINISTRACIONES (M ³)	325
GRÁFICO 10. 19	CONTRIBUCIONES RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO ADMINISTRACIONES.....	328
GRÁFICO 10. 20	RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M ³). CONSUMO ADMINISTRACIONES.....	328
GRÁFICO 10. 21	ERRORES COMETIDOS POR LA RED. CONSUMO ADMINISTRACIONES...	329

ÍNDICE DE ECUACIONES

CAPÍTULO 7. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELOS

ARIMA

ECUACIÓN 7.1 ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA.....	244
ECUACIÓN 7.2 ECUACIÓN DE PREDICCIÓN	244

CAPÍTULO 9. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELO

HÍBRIDO

ECUACIÓN 9.1 ECUACIÓN DE PREDICCIÓN. MODELO HÍBRIDO.....	289
ECUACIÓN 9.2 ECUACIÓN DE PREDICCIÓN (AÑO 2000). MODELO HÍBRIDO	292
ECUACIÓN 9.3 ECUACIÓN DE PREDICCIÓN (AÑO 2001). MODELO HÍBRIDO	292

CAPÍTULO 10. APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO EN LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DESAGREGADA DE AGUA

ECUACIÓN 10.1 MODELO ARIMA CONSUMO DOMÉSTICO	301
ECUACIÓN 10.2 MODELO ARIMA CONSUMO INDUSTRIAL	307
ECUACIÓN 10.3 MODELO ARIMA CONSUMO BENÉFICO	313
ECUACIÓN 10.4 MODELO ARIMA CONSUMO MUNICIPAL	319
ECUACIÓN 10.5 MODELO ARIMA CONSUMO ADMINISTRACIONES	325

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural incomparable, escaso y estratégico, elemento clave para la vida y el desarrollo social, difícilmente se puede exagerar la importancia del agua, es seguramente el más valioso e imprescindible de los existentes en el planeta Tierra. El agua debería ser un derecho humano y, sin embargo, 1.100 millones de personas carecen de acceso al agua potable.

La aparente abundancia del agua en el mundo ha dado la impresión, en el pasado, de que se trataba de un bien inagotable. Era también el más barato. En muchos lugares el agua era gratuita. El riego se realiza de forma excesivamente generosa y las fugas en las redes de alimentación de agua de las ciudades son enormes. Una política subsidiada que ha fomentado su derroche, su explotación excesiva, originando problemas de escasez, pérdida de calidad o deterioro medioambiental.

Aunque el 70 por ciento de la superficie del mundo está cubierta por agua, solamente el 2,5 por ciento del agua disponible es dulce, mientras que el restante 97,5 por ciento es agua salada. Casi el 70 por ciento del agua dulce está congelada en los glaciares, y la mayor parte del resto se presenta como humedad en el suelo, o yace en profundas capas acuíferas subterráneas inaccesibles. La tercera parte de los países en regiones con gran demanda de agua podrían enfrentarse a la escasez severa de agua en éste siglo, y para el 2025, dos tercios de la población mundial probablemente vivan en países con escasez moderada o severa.

La distribución de los recursos de agua dulce es muy desigual. Las zonas áridas y semiáridas del mundo constituyen el 40 por ciento de la masa terrestre, y estas disponen solamente del 2 por ciento de la precipitación mundial.

El agua potable domiciliar es una de las más grandes e irrenunciables conquistas de la sociedad del bienestar, es difícil entender en su justo valor qué significa disponer a cualquier hora del día y de la noche de agua biológicamente potable, libre de gérmenes patógenos y químicamente inocua, sin embargo, la mayor parte de la Humanidad no

dispone todavía de agua corriente en sus casas, tienen que buscarla a lugares lejanos que no reúnen las condiciones de potabilidad biológica requeridas y se convierte en transmisora universal de microorganismos patógenos.

En la medida en que el agua se va convirtiendo en un recurso cada vez más escaso y deteriorado por la intervención humana, los poderes públicos han ido estableciendo nuevas medidas para mejorar su gestión. En este contexto, la Directiva Marco del Agua (DMA)¹ establece el objetivo claro de que en el año 2015 se consiga un *buen estado ecológico y un uso sostenible* para todas las aguas europeas. Además, recoge que los Estados miembros garantizarán, a más tardar en 2010, que la política de tarifas del agua proporcione incentivos para el uso eficiente y la recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua.

Este nuevo marco institucional pone de relieve la necesidad de caracterizar y analizar en profundidad la demanda de agua, lo que motiva el interés por utilizar instrumentos económicos para mejorar la eficiencia en el uso del agua. En este trabajo se realiza un análisis de la demanda de agua urbana en Andalucía, partiendo de los datos de consumo de agua en una zona urbana, tanto globales como desagregados, correspondientes al periodo 1984-2007. Así mismo se desarrolla una nueva metodología que resulta fundamental para obtener predicciones de demanda con mayor precisión. A continuación se explican los antecedentes, objetivos del estudio y la metodología utilizada.

1.2. ANTECEDENTES

El agua ha sido uno de los agentes terapéuticos naturales más utilizados desde la remota antigüedad. Ha estado siempre presente en la larga historia de la medicina, en ocasiones como agente preventivo y otras como sustancia curativa.

El desarrollo y la gestión de los recursos hídricos han sido una preocupación constante para todas las sociedades a lo largo de la

¹ DIRECTIVA 2000/60/CE, del 23 de octubre del 2000

historia. Hipócrates recogió toda una doctrina acerca de las propiedades curativas del agua. La sociedad romana reservó el agua de mejor calidad para sus ciudades y catalogó los afloramientos de aguas termales en todo su Imperio, levantando múltiples ciudades balneario. La cultura árabe disfrutó de la presencia doméstica y urbana del agua en patios y jardines.

A finales del siglo XIX los Regeneracionistas desarrollaron un nuevo concepto de gestión y planificación de aguas revolucionando el modelo de la época, basándose en la iniciativa pública consiguieron que se realizaran grandes obras hidráulicas de regulación, canalización y regadío y que se formaran los pilares técnico-administrativos de la actual gestión de aguas.

Desde 1900 hasta la guerra civil en 1936 se suceden unos años de intenso desarrollo de las construcciones hidráulicas de superficie. En 1926 se crea la Confederación Hidrográfica del Ebro que sirve de modelo a otros organismos en Estados Unidos y otros países adelantados y en 1933 se aprobó el Primer Plan Nacional de Obras Hidráulicas.

Posteriormente, tras la Guerra Civil, se reanudan, a mediados de 1939, las actividades hidráulicas anteriores multiplicándose las obras hidráulicas que alcanzaron una intensidad nunca antes conocida, el régimen Franquista retomó el modelo regeneracionista cargando sobre el Estado la financiación de éstas obras.

En los años sesenta, la construcción de embalses empezaba a decaer en Europa y las naciones más civilizadas recomendaban olvidar las grandes transferencias de agua de unas a otras cuencas, tan en boga al principio de siglo y minimizar la construcción de embalses. La tendencia de Naciones Unidas era prescindir no sólo de los trasvases, sino también de las grandes y aparatosas estructuras, proponiendo en cambio, su sustitución por diversos procedimientos entre los que destacaban los siguientes²:

-Captar las aguas subterráneas y aprovechar los acuíferos como embalses regulables y utilizables.

² Díaz-Marta Pinilla, Manuel (1998)

-Economizar el agua en los regadíos, mejorando al mismo tiempo los productos agrarios.

-Depurar y reutilizar las aguas residuales de los centros urbanos e industriales y de los cultivos.

-Desalar, potabilizar y utilizar las aguas salobres y marítimas en las zonas cercanas a los depósitos salobres y a los litorales.

Sin embargo, en España las políticas en materia de agua se han basado tradicionalmente en el aumento de los recursos hídricos, estrategias expansionistas de oferta centradas en la construcción de obras hidráulicas y trasvases, hasta el punto en que se ha convertido en el cuarto país del mundo por detrás de Estados Unidos, India y Japón con mayor número de grandes presas (1.200).

Miles y miles de grandes presas, con sus correspondientes turbinas, centenares de miles de kilómetros de grandes canales, millones de hectáreas transformadas en polígonos de riego, increíbles obras de ingeniería para trasvasar millones de metros cúbicos de unas cuencas a otras, dragados y canalizaciones de ríos para facilitar su navegabilidad o la colonización de sus riberas, drenajes masivos y desecación de humedades, conducción de aguas para todo tipo de concentraciones urbanas³,.... Como consecuencia, nuestros ríos y mares se han visto afectados y degradados y con ello la salud de ecosistemas de ribera, lagos, humedades, deltas y plataformas litorales marinas de los que dependen pesquerías, playas y paisajes costeros.

En la actualidad, cuando han pasado más de cien años desde que se enunciaron los principios regeneracionistas se impone la necesidad de un cambio de rumbo, evolucionar hacia modelos de gestión de la demanda, basados en incentivar el ahorro, mejorar la eficiencia en los diversos tipos de usos y conservar la calidad del agua, en coherencia con la Directiva Marco de Aguas de la Unión Europea a la que debemos adaptarnos progresivamente, hasta culminar el proceso en 2015.

³ Arrojo Agudo, Pedro (1999)

El conocimiento lo más ajustado posible de la demanda de agua puede representar una ayuda imprescindible a fin de gestionar de una forma eficaz las reservas de agua con las que en cada momento se cuentan.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

La demanda de agua se ha convertido a lo largo de los últimos años y, en especial en el nuevo siglo, en uno de los principales problemas a nivel mundial, a medida que numerosos y variados factores confieren que el análisis del agua sea una importante preocupación para los ciudadanos. El primero de ellos, es el hecho de que hemos asistido a una mejora de la actividad económica y del bienestar general que han provocado de un modo incesante las demandas de servicios de agua para todos los usos, el consumo global de agua en España se ha multiplicado más del doble que el incremento de la población, además, las fuentes, los manantiales, las cuencas o cañadas están en acelerada vía de extinción y se sufren cambios de clima y de suelo, inundaciones, sequías y desertización, que condicionan gravemente la seguridad de su abastecimiento.

El crecimiento de la demanda de agua y la escasez física son factores que requieren mejorar la eficiencia económica del uso del agua y actuar de acuerdo a los objetivos ambientales y de sostenibilidad en el contexto de la *Directiva Marco del Agua* y de una nueva política del agua. Muchos de los debates que se plantean en torno al agua suscitan enfrentamientos que, en ocasiones, parten de un mal entendimiento del agua como bien económico.

El funcionamiento de la economía, el crecimiento económico y el bienestar individual y colectivo de las personas depende de los servicios de agua⁴. El agua es indispensable para cualquier actividad: la industrial, la agrícola y la urbana ya que promueve su desarrollo económico y social. Para comprender la importancia del agua, como elemento esencial para la generación de riqueza y bienestar, es necesario analizar profundamente la evolución de la demanda de agua y las actuaciones de intervención pública.

⁴ Informe integrado del análisis económico de los usos del agua. Ministerio de Medio Ambiente (2007)

Diversos organismos internacionales como la Unión Europea, la ONU o la UNESCO están trabajando para plantear los retos que el siglo XXI le presenta a la humanidad con respecto al agua. El agua es un tema prioritario en la agenda política internacional y la adopción en 1997 de una resolución relativa al agua por la Asamblea General de las Naciones Unidas supuso un verdadero hito.

En España la capacidad de agua embalsada es en la actualidad superior a 50.000 Hm³ al año, lo que ofrece una disponibilidad de agua de unos 2.800 m³ al año (2.800.000 litros) por persona al año. Esta disponibilidad es mayor que la de la media de la Unión Europea pero el problema fundamental es que se distribuye de forma muy desigual, por lo que algunas zonas secas sufren problemas de escasez de agua. Los planes hidrológicos están encaminados al trasvase de agua de zonas que la tienen en abundancia a otras más secas a través de la construcción de grandes presas y embalses, túneles y tuberías. En los últimos años se están utilizando otras tecnologías como la desalinización, la destilación o la ósmosis inversa para obtener agua.

La creciente necesidad de lograr el equilibrio hidrológico que asegure el abastecimiento suficiente de agua a la población, supone un importante desafío que requiere armonizar la disponibilidad natural con las extracciones del recurso mediante el uso eficiente del agua.

En este contexto, dada la incidencia a nivel mundial y las múltiples actividades que directa o indirectamente están afectadas por el déficit de agua, la planificación hidrográfica se plantea como un reto ineludible, para el que la elaboración de predicciones de la demanda de agua urbana con la mayor precisión posible tiene un carácter prioritario.

Los Ayuntamientos son el principal organismo encargado de establecer el sistema de tarifas del agua, por lo que la mejora en la predicción del consumo de agua afecta a la gestión municipal y a la gestión eficiente de cada país para prever su demanda de agua.

1.4. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El presente estudio debe entenderse, en líneas generales, como una contribución al conocimiento del problema del agua en España, especialmente, en Andalucía, y una aportación al reto de una gestión eficiente de la demanda de agua. El hecho de analizar el problema del agua en un determinado contexto geográfico y social, permite llevar a cabo un análisis más detallado y profundo y adentrarse en las causas concretas y en las consecuencias del problema, lo que no hubiera sido posible con un estudio mas amplio.

Se centra en la predicción del consumo de agua en los núcleos urbanos, que si bien no tienen un gran peso específico desde el punto de vista del volumen consumido en comparación con otros usos, hay que subrayar que el abastecimiento a la población es el “uso” fundamental por su prioridad social, legal y económica y, además, en los últimos años ha experimentado el mayor crecimiento en términos relativos.

Aunque las metas concretas del estudio presentado son esencialmente:

- Un análisis de la evolución del consumo de agua en un área urbana durante el periodo comprendido entre 1984 y 2007. Así como de las distintas series de consumo de agua desagregado, según el tipo de consumidores: Domésticos, Industriales, Benéfico, Municipal y Administraciones.
- El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una novedosa metodología de predicción del consumo de agua, que trate de superar las limitaciones de los métodos tradicionales, minimizando el error estimado de predicción, y con la que se complete la información precisa para la toma de decisiones tanto de las administraciones públicas como de las empresas suministradoras.

Se trata de combinar técnicas de inteligencia artificial con modelos de análisis de series temporales, resolviendo las dificultades estadísticas propias del uso de varios modelos alternativos, y obteniéndose mejoras en la precisión de las predicciones. Para ello se han elegido las Redes Neuronales Artificiales (RNA) y la metodología de *Box-Jenkins* o modelos ARIMA, que implementadas en un modelo

híbrido permita conjugar sus ventajas y así explicar el comportamiento y predecir a corto plazo la demanda urbana de agua, consiguiendo unos resultados más satisfactorios que la utilización de los modelos anteriores por separado. Un nuevo modelo más complejo y preciso, susceptible de utilización como instrumento de predicción de series temporales.

1.5. METODOLOGÍA ADOPTADA

Dada la importancia a nivel mundial y la implicación de múltiples actividades en el sector del suministro de agua, resulta esencial estudiar su demanda, ya que es el elemento esencial para la generación de riqueza y bienestar. Para ello, es necesario analizar su evolución, su comportamiento y realizar predicciones a corto plazo.

Son muchos los estudios existentes, principalmente en la última década, dedicados al sector y al problema del agua, y todos ellos resaltan la importancia de una eficaz gestión que cubra las necesidades de planificación estratégica, donde la predicción de la demanda cumple un papel muy importante.

Para la predicción de series temporales se dispone de múltiples métodos a aplicar, que van desde los más elementales hasta los más complejos, según las características que presentan tales series. Se eligen los modelos ARIMA y las Redes Neuronales Artificiales para la predicción correspondiente a la demanda de agua y, a partir de ambas metodologías, se construirá un nuevo modelo híbrido, que combina las ventajas y características de los anteriores, con el objeto de mejorar la capacidad de predicción.

En primer lugar, los modelos ARIMA se basan en la serie temporal de las observaciones referentes a una variable, en la que se presupone que la serie de datos sigue un patrón de comportamiento o una combinación de patrones que se repite a lo largo del tiempo. Permiten realizar predicciones con base en una serie temporal estacionaria, si esta no lo es, será necesario aplicar diferencias sucesivas hasta conseguir la estacionariedad de la serie. El objetivo perseguido es obtener el modelo más adecuado al comportamiento de los datos, la validación definitiva se ha de buscar en la validez del modelo en la predicción.

En segundo lugar, las Redes Neuronales Artificiales, se están utilizando considerablemente, en los últimos años, en diversos campos, mostrando una gran capacidad predictiva. Son modelos artificiales, compuestos por un gran número de neuronas interconectadas en paralelo, que buscan emular al cerebro humano, reproduciendo una de las características humanas: la capacidad de memorizar y asociar hechos. En resumen, se puede decir que una red neuronal posee un conjunto de unidades dispuestas en capas en una red, que están conectadas entre sí por unos enlaces representados por unos pesos sinápticos o ponderaciones que reflejan la intensidad e importancia del enlace. La salida de cada neurona es el resultado que suministra una función, denominada función de activación, a la suma de sus entradas multiplicadas por los pesos sinápticos.

En tercer lugar, se construye un modelo híbrido que de forma complementada, aprovecha las ventajas de los métodos anteriores: ARIMA y Redes Neuronales, persiguiendo obtener mejoras en la precisión de la predicción del consumo de agua y, por tanto, aumentar su poder de predicción.

Finalmente, estos modelos se someten a una evaluación de sus resultados con el fin de valorar cuál de ellos presenta un comportamiento estadístico más satisfactorio y sea más idóneo para el cálculo de las predicciones de la Demanda de Agua .

1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La tesis se encuentra articulada en once capítulos y un anexo. Los cinco primeros capítulos son de carácter teórico y los restantes presentan un enfoque práctico de la materia a tratar.

En el presente capítulo introductorio se recogen los objetivos y la metodología adoptada para su consecución, además de justificar la idoneidad del estudio de la Demanda de agua y el desarrollo de una nueva metodología de predicción que permita analizar su evolución futura.

En el segundo capítulo se realiza un análisis del mercado del agua en España, y en concreto de los abastecimientos urbanos. Asimismo, se ha considerado de interés recoger las principales

características de la economía del agua en el ámbito europeo. Se analizan los factores determinantes de la demanda y oferta y sus elasticidades, para terminar tratando el sistema de precios. Las tarifas del agua son esenciales en la gestión de los abastecimientos y saneamientos urbanos con el fin de sostener el equilibrio económico financiero del servicio, repartir equitativamente los costes de este servicio entre los consumidores y mejorar la eficiencia en el uso del agua, como parte del principio promulgado en la Directiva Europea 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en este ámbito. En primer lugar se analiza el sistema tarifario doméstico de las capitales de provincia españolas y, en segundo lugar, pretendiendo un análisis más dinámico, se analiza la evolución del nivel de tarifas para los servicios de agua urbanos.

El tercer capítulo está dedicado al reto de la gestión del agua en Andalucía, una gestión que persigue integrar criterios territoriales, medioambientales y económicos, un reto liderado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía a través de la Agencia Andaluza del Agua. Andalucía ya tiene competencias plenas sobre la gestión del agua y el dominio público hidráulico en la totalidad del litoral andaluz que se ha abierto con el proceso de transferencia de las cuencas intracomunitarias (Cuenca Mediterránea Andaluza y Cuenca Atlántica Andaluza).

En el cuarto capítulo se analizan los principales cambios que se han producido en la gestión del agua en España, como parte de un proceso de transición hacia un modelo general de gestión sostenible del recurso, conocido como Nueva Cultura del Agua, basado en dos principios: aprovechar el agua como recurso natural y su gestión desde políticas orientadas a la demanda. Se efectúa un repaso en las modalidades de gestión y sus agentes, y especialmente se trata la gestión de los abastecimientos urbanos y su problemática.

En el quinto capítulo se presenta la gestión del agua en un área urbana, aplicación empírica de este estudio, por esta razón en este capítulo se repasa el ciclo integral del agua, desde su comienzo con el aprovechamiento del agua de los embalses con destino a potabilización, posterior tratamiento en ETAP, saneamiento integrado de todos los efluentes domésticos e industriales de la ciudad y, por último, depuración en EDAR biológica aerobia. Se realiza en este apartado, especial

referencia a las tarifas vigentes de abastecimiento y la tasa de saneamiento.

En el capítulo sexto se revisa la literatura existente sobre las metodologías adoptadas, modelos ARIMA y Redes Neuronales Artificiales, con el objeto de ofrecer una perspectiva del marco teórico en el que se centra este trabajo.

A continuación, en los capítulos séptimo y octavo, se aplican las metodologías estudiadas en los capítulos anteriores a la serie temporal, que refleja el consumo urbano de agua potable desde enero de 1984 hasta diciembre de 2007, y se procede a evaluar las predicciones obtenidas mediante estos métodos.

En el noveno capítulo se desarrolla un nuevo modelo de predicción que se centra en la implementación de las dos técnicas anteriores: modelo ARIMA y Redes Neuronales, persiguiendo obtener mejoras en la precisión de la predicción del consumo de agua. Así mismo, se comparan las predicciones obtenidas con este modelo Híbrido con las conseguidas con el modelo ARIMA y con Redes Neuronales Artificiales.

En el capítulo décimo se aplica el nuevo modelo Híbrido a cada una de las series de consumo desagregado de agua que distingue entre cinco tipos de consumidores: Domésticos, Industriales, Benéfico, Municipal y Administraciones.

Finalmente, en el último capítulo se presentan las principales conclusiones derivadas de los resultados obtenidos, la originalidad de las aportaciones realizadas y se abren futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LA ECONOMÍA DEL AGUA

2. CARACTERÍSTICAS DE LA ECONOMÍA DEL AGUA.

2.1. INTRODUCCIÓN

El agua siempre ha sido un problema en España, un país con 505.992 Km² de área superficial, 2.000 Km de perímetro de costa, un clima semiárido (pluviometría media escasa, de 650 mm anuales) y con recursos de agua irregulares y desigualmente repartidos.

Aún no siendo un recurso particularmente escaso en relación a los países de su entorno, está irregularmente repartida geográficamente y aunque se han realizado verdaderos esfuerzos económicos en la construcción de obras hidráulicas, principalmente con políticas de aumento de la oferta de agua, sigue siendo un recurso escaso en relación con las necesidades.

En las dos últimas décadas los índices de consumo y la demanda de agua han crecido considerablemente, a su vez, los mecanismos para aumentar el suministro de agua en países áridos están siendo más costosos y restrictivos y esto ha dificultado el aumento continuo de la oferta con nuevos embalses y nuevos suministros, pasando a una reasignación de los usos, de los menos útiles a otros más rentables.

Entre las tendencias que caracterizan la cuestión del agua en España destacan las siguientes¹:

- Tendencia al aumento insaciable de la demanda.
- Tendencia al descenso de la cantidad de agua disponible.
- Tendencia a que la protección y subvención del precio del agua vaya tocando a su fin.
- Tendencia a la escasa sensibilización ciudadana.

¹ Maestre, J, y Rojo, T. (2002)

- Tendencia al aumento de la obra pública hidráulica.

Por lo que se observan dos grandes tipos de tensiones: por un lado, tensiones entre un consumo creciente y una disponibilidad del agua más limitada y, por otro, tensiones entre el tradicional intervencionismo público del Estado y las presiones del comercio mundial para liberalizar el mercado del agua.

2.2. LA ECONOMÍA DEL AGUA EN ESPAÑA

2.2.1. EL MERCADO DEL AGUA

Para la implantación de un mercado del agua en España es necesario realizar previamente una serie de reformas, legislativas y en la red hidráulica, que permitieran la transacción voluntaria entre una Confederación Hidrográfica y un concesionario, de modo que éste pueda ceder o renunciar con carácter temporal o definitivo a parte de la dotación de su concesión a cambio de una cantidad de dinero².

Un mercado del agua, ofrece la posibilidad de otorgar una compensación a los usuarios de esta que estén dispuestos a cambiar libremente el uso al que estaba destinada en un principio. El valor económico del agua y su destino se debe determinar en función de la oferta y la demanda y no en función del interés público que son fruto de decisiones políticas, aunque sería necesario establecer ciertos límites a este mercado.

La existencia de un “precio justo y equitativo adecuado al mercado fijado por oferentes y demandantes”³ supone un incentivo para un uso eficiente del agua, evitando el despilfarro actual derivado de su bajo precio que no refleja su coste real.

La creación de un mercado del agua incentivaría las técnicas de reutilización, depuración de las aguas residuales y desalinización del agua de mar, y además, eliminaría, en parte, los conflictos de la política de trasvases entre las Comunidades Autónomas. Este mercado debe

² Pérez- Díez, V., Meza, J. y Alvarez-Miranda, B.(1996)

³ Iranzo, J.(1995)

estar regulado y el Estado tendrá siempre el poder y la responsabilidad de garantizar los intereses nacionales.

2.2.2. LA DEMANDA DE AGUA

La demanda de agua, en un sentido convencional, hace referencia a la necesidad de agua para uno o varios usos, y es, por tanto, la que se manifiesta a los niveles de precio actuales.

La cantidad demandada de agua en nuestro país se sitúa en 35.323 hm³/ año. La demanda agrícola asciende a 24.094 hm³/año y supone el 92,7% del consumo efectivo y el 68,2% de los usos totales⁴. La demanda urbana, con 4.667 hm³/año, alcanza un 4,49% del consumo efectivo y un 13,21% de los usos. La industria, por su parte se queda en el 1,58% del consumo efectivo y el 4,66% de los usos. Por último, la refrigeración supone el 1,23% del consumo y el 13,91% de los usos⁵.

El consumo de agua en España muestra las siguientes características:

- La *agricultura* es el sector que concentra un mayor consumo, tendencia que se ha agudizado en los últimos años, en los que el mayor ahorro se ha concentrado en la industria. Según datos del Plan Nacional de Regadíos (PNR), actualmente en casi 2 millones de hectáreas se utiliza el sistema de riego por superficie, por lo que las tecnologías más eficientes como la aspersion o el goteo pueden catalogarse todavía como secundarias, aunque han ganado terreno en los últimos años.
- El *consumo doméstico* muestra mayores volúmenes de uso por persona que otros países avanzados (Tabla 2.1).

⁴ Los usos totales están formados por el volumen de consumo efectivo y por el volumen de agua que retorna al ciclo.

⁵ Rico, A.M. (2004)

Tabla 2. 1. CONSUMO DOMÉSTICO DE AGUA ANUAL PER CÁPITA (M³)

PAÍSES		USO DOMÉSTICO	% DE LA POBLACIÓN CONECTADO AL SUMINISTRO PÚBLICO DE AGUA
Países EFTA	Islandia, Noruega, Suiza	75-108	89-95
Uso elevado	Finlandia, Italia, España, Portugal y Grecia	64-78	85-100
Uso medio	Dinamarca, Luxemburgo, Austria, Suecia y Rumanía	55-60	54-97
Uso bajo	Bélgica, Francia, Holanda, Alemania y Eslovenia	41-47	91-99,9

Fuente: OCDE (2006)

- Respecto a la *demanda industrial*⁶, es más difícil obtener información por la dispersión geográfica de las industrias y la falta de controles estadísticos sistemáticos, aunque se estima que los sectores del papel y químico representan cada uno de ellos alrededor de un 30% del consumo industrial⁷.

Hay dos vías de abastecimiento de agua de la industria: captaciones propias y conexión a la red municipal. La demanda actual de las industrias no conectadas a la red municipal, según los Planes Hidrológicos de cuenca, es de 1.647 hm³/año, en la que destacan por el volumen demandado las cuencas del Ebro, interior de Cataluña y Norte II. Y los sectores económicos acapararon cerca de 1.000 hm³/año, aproximadamente un 25% del agua controlada y distribuida para abastecimiento⁸.

- Las *infraestructuras de distribución* presentan un porcentaje de pérdidas por encima del 18% , que está decreciendo debido al notable incremento en las inversiones en infraestructuras hídricas.

En el agua, como en todos los sectores económicos, existe una relación directa entre la curva de precios y la curva de la demanda, en

⁶ Se incluyen en la demanda industrial los sectores industriales y de servicios

⁷ Hispagua (2006b)

⁸ INE (2004)

líneas generales el consumo de agua baja a medida que aumenta el precio, se comprueba que cambian los cultivos, se evitan las pérdidas de las conducciones, mejoran las técnicas de riego, etc, y la demanda aumenta a medida que crece la renta y la población. Se demuestra el efecto de la elasticidad de la demanda del agua en los siguientes términos⁹:

- Consumo doméstico: la demanda suele ser bastante inelástica para subidas no muy considerables del precio. Puede reducirse considerablemente si se dan alzas considerables del precio (también si se adoptan medidas drásticas en épocas de gran escasez) sin que se produzcan graves quiebras del bienestar.
- Consumo industrial: la demanda es más elástica, ante aumentos del precio del agua y del coste de depuración, se reduce el consumo industrial a favor del reciclaje.
- Consumo agrícola: la demanda es muy elástica. Se ha comprobado que un aumento del precio del 50% reduce el consumo agrícola del agua hasta en un 75%.

Los usos agrícolas en España representan del 70 al 80% del consumo de agua, esto supone que pequeñas variaciones en el precio del agua pueden reducir considerablemente este consumo, favoreciendo otros usos en los que el agua tiene un precio más alto y cubre mayor parte del coste del recurso. Aunque ningún uso del agua financia completamente los costes en que se incurre para hacerles llegar el agua, los usos agrícolas o industriales son los que menos contribuyen.

El consumo medio diario de agua por individuo es de 171 litros, según la última Encuesta sobre el Suministro y Tratamiento del Agua del Instituto Nacional de Estadística publicada, 121 litros más del establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como el volumen mínimo para cubrir las necesidades básicas.

⁹ Ariño Ortiz, G.; Sastre Becerro, M. (1997)

La elasticidad es la relación entre el cambio porcentual en el uso del agua inducido por un cambio porcentual de su precio. Su valor es variable según el tipo de uso, el plazo temporal y otros factores.

Para los abastecimientos urbanos, tradicionalmente, se ha considerado que no existe una relación clara entre los incrementos de precio y la disminución de consumos. Sin embargo, estadísticamente, se comprueba que el precio puede afectar a la demanda urbana, con elasticidades muy variables dependientes de las circunstancias locales.

En general la cantidad demandada de agua disminuye con los precios y aumenta con el ingreso *per cápita*. En algunas ocasiones se han aceptado argumentos a favor de la hipótesis de que los aumentos de los precios no traen como consecuencia una disminución de los usos de agua de los hogares. Estos argumentos se apoyarían en la idea de que el uso de agua responde más a una necesidad humana que al deseo, las preferencias o la capacidad de pago de las personas. Estos argumentos dependen de que los precios del agua o los niveles de vida de las familias, o ambos, sean bajos. Si los precios del agua son muy bajos, los cambios marginales de los mismos no se traducen en cambios significativos de la cantidad demandada, en cambio, si los precios son elevados la elasticidad de la demanda de agua se hace claramente positiva.

En el Libro Blanco del Agua se muestra una curva de demanda agregada de los abastecimientos domésticos, que parece mostrar cierta elasticidad al precio. Los elevados precios de los tramos de bajo consumo corresponden, principalmente, a viviendas secundarias con escaso grado de ocupación temporal, por lo que el coste del servicio da lugar a altos precios unitarios.

La curva de demanda industrial ofrece un primer tramo que corresponde a las reducciones que pueden afrontarse por ahorro y mejora de procesos productivos. Después de este descenso, se llega a un nivel de volumen utilizado, considerado el mínimo de permanencia en las condiciones tecnológicas del momento.

Recientes análisis sobre la demanda¹⁰ ponen de manifiesto que las diferencias en el consumo de agua pueden ser parcialmente explicadas por la renta per capita y las diferencias en el precio del agua, aunque hay que apuntar que, en general, la demanda urbana es bastante inelástica, arrojando un valor de -0,65. Los análisis realizados por el MMA han determinado que la elasticidad renta de la demanda de agua es positiva.

Sea cual sea la forma precisa de estas curvas, está claro que, en los niveles actuales de precio cabe esperar que aumentos significativos del precio no afectarán sensiblemente a la demanda doméstica. Las curvas urbana e industrial son similares en este resultado. En esta dirección surgen iniciativas de desalación de agua del mar con destino a abastecimientos en algunas zonas.

Se supone, por tanto, que no existirán limitaciones económicas a la posibilidad de transferencias de aguas para abastecimiento urbano, salvo que los costes de estas transferencias superasen a los de desalación del mar. La incidencia del precio del agua en el presupuesto familiar es muy poco significativa (del orden del 2%), de tal forma, que el precio depende más de razones políticas o psicológicas que rigurosamente económicas.

En resumen, cabe inferir la posibilidad de incrementar significativamente los precios del agua de abastecimiento de forma apreciable sin introducir impactos apreciables a las economías familiares.

2.2.3. LA OFERTA DE AGUA

Tan solo un 2,5% del total de agua existente en el planeta es agua dulce. Más de dos tercios de esa agua dulce se concentran en glaciares y casquetes polares. En este contexto, los dos principales tipos de agua dulce disponibles corresponden en un 30% al agua subterránea y en un 0,3% a la que se presenta en estado líquido en la superficie. El agua superficial es fácil de obtener y renovable, principalmente por

¹⁰ Informe Artículos 5 y 9 y Anejo III DMA. Confederación Hidrográfica del Júcar, MMA (2005)

lluvias, y el agua subterránea es más costosa de obtener y lentamente renovable.

Se pueden destacar dos rasgos que caracterizan la oferta de agua en España. En primer lugar, la desigual distribución de este recurso en función de las diferencias entre regiones tanto en sus condiciones climatológicas como de pluviosidad. En segundo lugar, la aridez y las recurrentes sequías e inundaciones.

La escorrentía media anual en España es de unos 220 mm¹¹, que equivalen a una aportación de unos 111.000 hm³/año, aproximadamente un tercio de la precipitación, repartida entre la escorrentía superficial directa más el drenaje de los acuíferos (109.000 hm³/año) y la escorrentía subterránea al mar (2.000 hm³/año). Es la Cornisa Cantábrica la que cuenta con mayor abundancia de agua, superando los 700 mm/año y el resto de cuencas no superan los 250 mm/año.

La desigual distribución del agua se plasma en la variabilidad entre cuencas para el estado de las reservas de agua en los embalses (tabla 2.2).

¹¹ MMA (1998)

Tabla 2. 2. RESERVAS EMBALSES CONSUNTIVOS POR CUENCAS

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
C.I. País Vasco	76.2%	57.1%	95.2%	71.4%	71.4%	95.2%
Norte III	76.1%	40.8%	88.7%	67.6%	73.2%	83.1%
Galicia Costa	74.77%	36.7%	75.9%	70.9%	72.2%	75.9%
Norte II	63.8%	43.0%	80.9%	73.1%	63.5%	63.5%
C. Guadiana I	49.8%	66.1%	62.4%	74.0%	74.8%	57.2%
C. Guadiana II	83.6%	69.9%	87.6%	42.2%	70.0%	48.9%
C. Ebro	67.6%	58.3%	69.8%	73.6%	53.0%	47.9%
C.I. Cataluña	40.0%	30.9%	66.2%	77.8%	57.8%	45.8%
C. Guadalquivir	37.1%	68.3%	64.8%	74.6%	70.7%	39.8%
C. Duero	72.5%	44.1%	64.0%	64.0%	50.9%	37.9%
Norte I	71.0%	31.6%	76.2%	52.2%	30.9%	31.5%
C. Sur	37.7%	44.2%	34.1%	51.2%	45.6%	26.5%
C.Tajo	45.9%	46.4%	47.4%	51.6%	44.8%	22.8%
C. Júcar	13.7%	21.5%	20.0%	29.6%	32.3%	17.0%
C. Segura	15.4%	19.5%	13.1%	15.4%	14.6%	11.2%

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente

La aridez es otra característica fundamental del panorama hidrológico español, siendo nuestro nivel de precipitación un 85% de la media europea y la escorrentía es la menor de toda Europa. España está entre los países del mundo con un mayor porcentaje de su territorio sometido a condiciones severas de escasez de agua (tabla 2.3).

Tabla 2. 3. PORCENTAJE DE LA SUPERFICIE DEL PAÍS EN EL QUE SE DAN CONDICIONES SEVERAS DE "ESTRÉS HÍDRICO". PROMEDIO (1081-1985)

PAÍSES	%	PAÍSES	%
Kuwait	100.00	Egipto	88.68
Trinidad y Tobago	99.85	España	87.82
Siria	99.58	Irán	87.30
Israel	97.62	Armenia	87.14
Nepal	97.47	Uzbekistán	86.67
Azerbaiján	96.27	Iraq	86.27
Tayikistán	94.82	Líbano	84.91
Turkmenistán	93.87	Libia	83.69
Kyrgyzstán	93.62	Marruecos	82.26
Emiratos Árabes	92.72	Jordania	81.28
Túnez	92.04	India	80.37
Arabia Saudí	90.73		

Fuente: Esty y otros (2005)

La irregularidad hidrológica ha derivado tradicionalmente en la construcción de obra civil, para fines como la captación y embalse de agua¹², y, además, en la dependencia de trasvases¹³, por parte de más de 25 millones de españoles. Ambos efectos encuentran una fuerte controversia social, hay una creciente resistencia de la sociedad a la construcción de nuevos embalses y trasvases.

Por otra parte, las fuentes alternativas de agua, desalinización y reutilización de aguas residuales tratadas, no tienen aún un promedio significativo, las desaladoras presentan problemas económicos y medioambientales¹⁴, aunque varía entre áreas geográficas y la reutilización de aguas residuales puede aumentar, pero sin llegar a incrementos similares a los de las grandes obras hidrológicas. España es uno de los países más avanzados en tecnología de desalación, con más de 900 desaladoras de una capacidad de desalación superior a los 800.000 m³/día, de los cuales aproximadamente el 50% provienen de agua marina.

Sin embargo, el coste de desalar agua marina resulta demasiado caro, el gran consumo de energía necesario y el coste medioambiental derivado de las emisiones de CO₂, así como el vertido al mar de elevadas cantidades de sal, fijan límites a la posibilidad de elevar la oferta hídrica con desaladoras.

En cuanto a la reutilización de aguas residuales dependerá de la existencia de infraestructuras de captación, distribución, almacenamiento y tratamiento de aguas que hayan sido utilizadas con otra finalidad.

Otra alternativa importante consiste en continuar mejorando la eficiencia de la red actual, reduciendo las fugas o pérdidas.

La baja elasticidad de la oferta y el crecimiento de la población conduce a una tendencia continua a la estabilización de la disponibilidad de agua por habitante.

¹²En la actualidad España es el quinto país del mundo en número de presas por detrás de China, EEUU, India y Japón.

¹³Sistemas de suministro basados en transferencias de agua a gran distancia.

¹⁴Problemas económicos por ser muy intensiva en el uso de energía y problemas medioambientales por sus emisiones de CO₂ y los residuos de sal.

España tiene una elevada dotación de capacidad de almacenamiento de agua embalsada, con más de 1.200 presas con una capacidad de 56.000 hm³. En cualquier caso, a pesar de las numerosas obras hídricas, aún cabe debatir sobre si la capacidad es razonable o insuficiente (se dan argumentos en ambos sentidos). Los sistemas hidrológicos con mayores caudales, como son los del Ebro y el Duero, aportan una cantidad de agua que la capacidad total no puede regular. Además, los emplazamientos de los embalses han respondido a fines hidroeléctricos en detrimento de los llamados usos conjuntivos¹⁵.

Las posibles ofertas de agua presentan una enorme diversidad de situaciones singulares en función de las circunstancias y peculiaridades de los distintos territorios. Aunque la determinación de los costes marginales del agua presenta muchos problemas, ya que son muy variables según la localización geográfica, las condiciones socioeconómicas, el nivel de aprovechamiento de los recursos, la inclusión o no de los costes de transporte y distribución, al igual para los costes sociales o ambientales, etc, los costes de los recursos convencionales (incremento de regulación superficial y bombeo de aguas subterráneas) parecen que siguen siendo los más baratos. Seguidamente, estarían los trasvases intercuencas, la reutilización y desalación de salobres y, por último el agua procedente de desalación de agua marina, que es la más costosa.

Es necesario estimar la capacidad de pago de los sectores involucrados en las transferencias hidráulicas intercuencas, para no caer en una infraestructura compleja y costosa sin la expectativa de una razonable recuperación de costes.

La industria del agua comprende una serie de actividades, desde el almacenamiento, tratamiento y depuración, el transporte y la distribución, que se caracteriza por una red de grandes infraestructuras, que tradicionalmente la han mantenido al margen de la competencia por las elevadas inversiones necesarias, que ha conducido, tradicionalmente, a la creación de monopolios públicos o al sometimiento del monopolio privado a fuertes regulaciones.

¹⁵ Rico, A.M. (2004)

Sin embargo, la tendencia que se observa en los países desarrollados donde se ha impulsado un proceso liberalizador y privatizador de distintas industrias, abre un campo de posibilidades a la industria del agua, al menos en algunas actividades como son la recogida y tratamiento del agua¹⁶.

2.2.4. EL PRECIO DEL AGUA

2.2.4.1. SISTEMAS DE PRECIOS: TARIFAS

Una vez tratados los puntos más relevantes acerca de la demanda y la oferta de agua, es necesario analizar el sistema de precios, por ser precisamente el principal mecanismo de conexión entre ambas.

Las tarifas del agua son esenciales en la gestión de los abastecimientos y saneamientos urbanos a la hora de sostener el equilibrio económico financiero del servicio, repartir los costes de este servicio entre los consumidores equitativamente y como medio para transmitir la necesidad de un uso racional y eficiente del agua.

La tarifa del agua urbana, tradicionalmente, se le ha denominado como un precio “político”, es decir, un precio subvencionado. Sin embargo, la Administración se está viendo forzada, por el aumento de los gastos de los Presupuestos Generales del Estado, a reconsiderar el esquema de financiación de determinados servicios públicos, como son los de abastecimiento de agua y saneamiento, para que sean financiados, principalmente, en base a las tarifas de los mismos.

Por otro lado, la Directiva Europea 2000/60/CE, que deberá estar vigente en 2010 determina el marco en el que debe desarrollarse la política de aguas y establece dos cuestiones obligatorias: la unificación del precio del agua para toda la Unión Europea y evitar la fijación de precios altamente subvencionados y por debajo del coste.

El artículo 9 expresa, bajo el epígrafe general “La recuperación de costes para los servicios de agua”, lo siguiente: “Los Estados

¹⁶ De los Ilanos (2002)

miembros tendrán en cuenta el principio de recuperación de costes de los servicios de agua, incluyendo los costes medioambientales y tomando en consideración el análisis económico según el Anexo III, todo ello de acuerdo con el principio de que quien contamina paga”.

Y continua del modo siguiente: “Los Estados miembros asegurarán para 2010”

- que las políticas de precio del agua proporcionen los incentivos adecuados a los usuarios para utilizar los recursos del agua eficientemente, y en consecuencia contribuir a los objetivos medioambientales de esta Directiva,
- al adecuado reparto de los usos del agua, discriminándolos, de cara a una recuperación de los costes de los servicios de agua, basados en el análisis económico establecido de acuerdo con el Anexo III y teniendo en cuenta el principio de que “quien contamina paga”
- los Estados Miembros pueden así tomar en consideración los diferentes efectos sociales, medioambientales y económicos de la recuperación así como las condiciones geográficas y climáticas de la región o regiones afectadas.

En resumen, considera que las estructuras tarifarias tienen dos fines fundamentales. Por una parte, deben propiciar la recuperación de costes y, por otra parte, debido a la escasez de agua dulce, debe influir en los hábitos de consumo incentivando el ahorro y el uso racional del agua, es decir, hacer compatible el crecimiento económico con la prestación sostenible de servicios de agua a la población. La primera condición para alcanzar las metas precedentes establecidas por el artículo 9 es la transparencia de los costes relacionados con el servicio de agua. España, como es el caso de muchos países del mundo, acostumbrados a subvencionar el agua, se encuentra muy distante de la transparencia de los costes que debe repercutirse al precio final del agua que paga el usuario.

Una razón importante para la creciente escasez de agua y el deterioro de los ecosistemas de aguas dulces es el hecho de que el agua está infravalorada y subvencionada en todo el mundo; cada vez resulta más evidente que una adecuada política de precios puede favorecer un reparto eficiente del agua dulce.

El aumento de los costes de energía, junto con la inflación y tipos de interés altos, ha incrementado los costes de proveer agua. Tradicionalmente, como ya se ha tratado, la solución ha consistido en aumentar la oferta expandiendo el sistema y adquiriendo recursos para satisfacer la demanda total de los consumidores, pero los problemas de calidad y escasez de agua son cada vez mayores.

El precio del agua de abastecimiento urbano está incrementando sus precios progresivamente, pero todavía no cubre completamente los costes del servicio. En principio este aumento es debido a la amortización de obras asociadas al abastecimiento, a la aplicación de estándares más elevados de calidad y al cumplimiento de las Directivas de Depuración, pero en el futuro pueden estar asociados a niveles más elevados de recuperación de costes del agua, por una parte, y al uso de los precios como incentivo para la reducción de la demanda.

La entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua Europea provocará un notable incremento del precio del agua. El recibo del agua deberá incluir todos los costes de suministro y tratamiento de las aguas residuales, algo que en la actualidad no ocurre. Las previsiones del Ministerio de Medio Ambiente son que se produzca un incremento de entorno al 30% en los precios. A esta directriz se une la escasez del recurso que se presenta en la mayor parte del territorio nacional y que implica una presión creciente en los precios.

Un atributo que distingue las redes hidráulicas de otros tipos de suministros y dificulta potencialmente las políticas de precios es el hecho de que los sistemas hídricos representan "monopolios naturales". Los sistemas hídricos tienden a tener un solo operador, porque los costes totales son menores cuando el sistema entero es gestionado por una sola entidad en lugar de por empresas competidoras, por lo que suele ser un único agente el que fija el precio. Por esta razón, y porque la mayoría considera el agua un bien público y un derecho básico, los

estados desempeñan un papel en la fijación del precio. Como sucede con todos los monopolios, si no se los regula puede haber un riesgo sustancial de que los bienes que venden tengan un precio excesivo¹⁷.

Durante siglos, a los usuarios del agua sólo se les ha cobrado una pequeña parte del coste real de la extracción, entrega, eliminación y tratamiento del agua, e ignorando factores externos como: la salinización de los suelos, la degradación de los ecosistemas y la contaminación de los ríos, lo que ha llevado al actual uso ineficiente y al deterioro de los ecosistemas del agua. Los partidarios de la política de precios acorde con los costes sostienen la necesidad de que el precio del agua refleje los costes de extracción, distribución y tratamiento, para poder mejorar la eficiencia. En cambio, los detractores de esta política argumentan que el acceso al agua es un derecho humano fundamental, por lo que no debe tratarse como un bien comercializable.

Un estudio de la OCDE¹⁸ ha comprobado algunas tendencias en los países desarrollados durante la última década, en primer lugar, que a medida que se ha ido ajustando la estructura de precios para cubrir el coste total, el precio real del agua se ha incrementado, en segundo lugar, que las subvenciones han disminuido y que en la mayoría de los casos se han adoptado como principio básico de la gestión del agua el concepto de recuperación del coste total, aunque no existe consenso sobre los conceptos que incluye este “coste total”. Se suele considerar que el precio del agua debe reflejar los costes de extracción y abastecimiento, pero no los costes de infraestructura¹⁹.

De esta forma a la función básica de los precios del agua, que es la de cumplir el equilibrio financiero de la entidad suministradora, es decir cubrir los costes de los servicios, se le añade una nueva función que es la de proteger la calidad del agua y servir como incentivo para un uso más eficiente del recurso.

¹⁷ UNESCO (2006)

¹⁸ OCDE (2006)

¹⁹ Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Mundial del agua (2003)

2.2.4.2. ESTRUCTURA TARIFARIA

En España se da una gran disparidad de precios de una región a otra que poco tienen que ver con el grado de escasez del agua en las mismas²⁰. Esta variedad de estructura tarifaria obedece más a la diferente forma de gestionar el agua. En ocasiones aparece en la tarifa del agua la cuota fija únicamente, cuota de servicio fija y una parte variable, en unas facturas aparece la tarifa de saneamiento que incluye el alcantarillado y la depuración y en otras no.

De acuerdo con la Asociación Española de Empresas de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS) el precio medio del agua para uso urbano se situó en 1,17 Euro/m³ en 2004. El abanico de precios a nivel provincial abarca desde los 0,49 Euro/m³ en Lugo hasta los 2,06 Euro/m³ en las Islas Baleares. La Encuesta del Agua 2004 del INE detalla los valores unitarios del agua urbana por Comunidad Autónoma, resultando una media de 0,96 Euro/m³ y un intervalo comprendido entre 0,61 Euro/m³ (Castilla y León) y 1,69 Euro/m³ (Canarias).

Para un consumo medio de 171 l/hab/día y una vivienda tipo de 2,75 hab., el servicio de suministro supone el 61,4% del total del importe de la factura de los servicios domésticos del agua, mientras que el servicio de saneamiento representa el 38,6% restante²¹.

Los precios que pagan los hogares por el agua incluyen las partidas de abastecimiento (extracción, embalse, depósito, tratamiento y distribución) y saneamiento (recogida y depuración).

Los diferentes precios de los servicios del agua en los diferentes territorios se deben a diversas razones, entre los que figuran los tipos y la calidad de los servicios prestados, las inversiones realizadas y el origen de las aguas.

La tabla 2.4. muestra datos sobre el agua facturada por habitante y tarifas.

²⁰ Jové, Josep Lluís (1993)

²¹ MMA (2008)

Tabla 2. 4. AGUA FACTURADA Y TARIFAS EN ESPAÑA

Comunidad Autónoma	Agua facturada		Tarifas	
	Agua facturada (litros/hab/día)	Variación anual (%)	Tarifas (Euro/m ³)	Variación anual %
Andalucía	189	2,72	1,12	5,66
Aragón	162	-4,14	s/d	-
Asturias	172	0,58	0,91	13,75
Baleares	142	9,23	2,06	2,49
Canarias	147	8,89	1,76	0,57
Cantabria	187	1,08	0,75	4,17
C-La Mancha	172	2,38	0,89	15,58
Castilla y León	179	-2,72	0,80	5,56
Cataluña	174	-4,92	1,45	4,32
Com. Valenciana	178	9,20	1,01	13,48
Extremadura	178	9,20	1,04	15,56
Galicia	155	8,39	0,95	5,56
Madrid	171	3,01	0,97	6,59
Murcia	161	8,05	1,72	9,55
Navarra	144	-5,26	0,77	8,45
País Vasco	150	0,67	1,21	19,80
Rioja	141	3,68	0,76	7,04
Ceuta y Melilla	142	2,16	s/d	-
Total España	171	2,40	1,17	5,41

Fuente: INE (2005 y 2006), Encuestas del Agua 2003 y 2004; AEAS (2005 y 2006), Encuestas de Tarifas 2003 y 2004

El sistema de precios del agua en nuestro país presenta estructuras muy diferenciadas en función del usuario final. De tal manera que se distinguen los precios para uso agrícola, industrial y doméstico (tabla 2.5).

Tabla 2. 5. TARIFAS MEDIAS PONDERADAS PARA LOS SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO URBANO DE AGUA. AÑO 2005

	ABASTECIMIENTO			SANEAMIENTO			CICLO INTEGRAL		
	Doméstico	Industrial	Conjunto	Doméstico	Industrial	Conjunto	Doméstico	Industrial	Conjunto
Bajo Bidasoa	0.42	0.76	0.51	0.45	0.77	0.53	0.07	1.53	1.03
Baleares	1.06	1.98	1.29	0.60	1.06	0.77	1.74	3.04	2.06
Canarias	1.25	2.11	1.46	0.30	0.29	0.29	1.55	2.39	1.76
CI Cataluña	0.88	1.29	0.98	0.40	0.61	0.51	1.36	1.90	1.49
Duero	0.40	0.53	0.44	0.34	0.44	0.36	0.74	0.97	0.80
Ebro	0.44	0.64	0.49	0.37	0.47	0.39	0.80	1.11	0.88
Galicia Costa	0.48	1.01	0.62	0.31	0.52	0.36	0.79	1.53	0.98
Guadalquivir	0.64	0.78	0.68	0.48	0.54	0.49	1.12	1.53	1.17
Guadiana	0.54	0.64	0.57	0.41	0.45	0.42	0.95	1.09	0.99
Júcar	0.57	0.74	0.61	0.39	0.53	0.42	0.96	1.27	1.04
Norte	0.48	1.05	0.62	0.38	0.88	0.51	0.86	1.93	1.13
Norte I	0.50	0.86	0.59	0.20	0.34	0.23	0.70	1.20	0.82
Segura	1.05	1.09	1.06	0.67	0.63	0.66	1.72	1.72	1.72
Sur	0.49	0.72	0.55	0.39	0.50	0.41	0.88	1.22	0.96
Tajo	0.65	0.63	0.65	0.32	0.33	0.33	0.97	0.96	0.97
TOTAL	0.68	0.93	0.75	0.40	0.51	0.43	1.08	1.44	1.17

Fuente: Precios y Costes de los servicios de agua en España (MMM 2007)

- **Uso agrícola:** En los regadíos españoles se paga una tarifa de uso (utilización de alguna infraestructura) y un canon de regulación (una cuota para amortizar la realización de obras hidráulicas), el precio que resulta de ambos conceptos varía dependiendo del tipo de cultivo, las condiciones climatológicas y los posibles derechos adquiridos. El actual sistema de tarifas del agua en la agricultura se caracteriza por su baja cuantía, su pago por superficie regada y por no incentivar el uso racional de este input productivo ni el mantenimiento de las infraestructuras de riego.
- **Uso industrial y doméstico:** Se dan importantes diferencias entre las cuencas hidrográficas en los niveles unitarios de facturación para usos industriales. Los mayores niveles unitarios de costes los presentan las dos regiones insulares y las tarifas más reducidas las cuencas del Tajo y el Duero.

Los Ayuntamientos son los responsables del suministro y saneamiento del agua, por ello deben fijar el precio de este bien en su localidad. Este precio incluye todas las fases del ciclo integral del agua e incluyen recogida y almacenamiento, tratamiento y potabilización, provisión al consumidor y depuración.

Una medida eficaz para mejorar la gestión del agua en las ciudades y reducir su consumo es sustituir los viejos contadores globales de edificios, cuyo coste es repartido entre los vecinos, por contadores individuales, otra medida interesante es modernizar las instalaciones de tratamiento de agua potable y reducir las pérdidas en las redes de canalización.

El precio medio del metro cúbico (1000 litros) de agua para abastecimiento urbano en España es de 1,17 euros, una cifra lejana a los 3,46 euros que pagan en Francia, 3,11 euros en Gran Bretaña o 3,07 euros en Finlandia, lo que significa que en un plazo de diez años el recibo del agua puede verse multiplicado por tres.

Las administraciones parecen no estar dispuestas a seguir pagando los costes de las obras (obras de saneamiento, potabilización, distribución,...) por lo que han comenzado a crear nuevos tributos que se aplican bien penalizando el consumo excesivo o reflejando el coste de las obras de infraestructuras en la factura del agua. Por ejemplo, el gobierno vasco ha creado un nuevo tributo medioambiental, la Generalitat de Cataluña introdujo un canon que grava el consumo, y en Murcia se incluye el coste de las desaladoras en la factura, resultando en este caso el precio del metro cúbico de agua a 1,41 euros, el segundo más caro de España, sólo superado por Canarias.

Según cifras del Instituto Nacional de Estadística para el año 2004, en España se consumieron 22.731 hectómetros de agua, de los que 4.923 (21,6%) se destinaron al abastecimiento público urbano y 17.808 (78,4%) fueron consumidos por los agricultores.

El agua *no nos cuesta lo que vale* y ésta es la base de su uso ineficiente, un precio del agua más aproximado a su valor real, incentivará un consumo más racional, su ahorro y mejora de calidad del medio hídrico.

La legislación española configura el servicio de abastecimiento de agua urbano como un servicio local de carácter mínimo, obligatorio y reservado. Los precios para dicho servicio están sometidos a un doble proceso de aprobación, bajo un régimen de precios autorizados. En principio, es la administración titular del servicio la que autoriza provisionalmente las tarifas y son las Comunidades Autónomas, a través de sus respectivas Comisiones de Precios²² las que aprueban, en ciertos casos, las tarifas propuestas por la administración local. Como en ningún caso es condicionada la estructura de los precios y, además, no existe regla explícita que limite su evolución, nos encontramos en España con fuertes diferencias en los niveles de los precios que no se justifican con las condiciones y costes del servicio.

La privatización del agua es un tema muy polémico, en general, existe una fuerte oposición a la entrada del sector privado, aunque los gobiernos, especialmente los de los países en desarrollo, no son capaces de atender a la creciente demanda de suministro de la población, lo cierto es que, a la hora de conseguir un suministro universal e igualitario, el asunto de la propiedad del agua ha demostrado ser menos importante que su administración²³.

El Libro Blanco del Agua en España recoge como origen de la mayor parte de los problemas actuales del agua y de que no se incentive suficientemente el ahorro, el hecho de disponer de un recurso cuasi-gratuito y las subvenciones vinculadas a su uso en algunos sectores²⁴.

La OCDE²⁵ manifiesta entre las recomendaciones en materia de agua para España, la necesidad de desarrollar políticas de gestión centradas en la demanda, entre las que destaca el diseño de tarifas óptimas para el servicio de suministro de agua en las ciudades. La fijación de precios resulta ser una tarea muy complicada, dado que se pretende internalizar combinadamente objetivos de eficiencia en la gestión, equidad interpersonal, suficiencia financiera, sencillez

²² Las Comisiones de Precios son organismos administrativos de composición heterogénea donde participan desde representantes de la propia Administración Autonómica, miembros del sector del agua, hasta organizaciones de consumidores y usuarios.

²³ UNESCO (2006)

²⁴ MMA (1998)

²⁵ OCDE (2001)

administrativa, reducción de riesgos asociados a fallos en el suministro y reducción en el consumo tanto por motivos de protección al medioambiente, como por simples razones de gestión de la escasez²⁶.

El primero de los objetivos, el grado de ineficiencia de los precios puede ser aproximado a través de las desviaciones, que, con respecto a los costes marginales de producción presentan los mismos²⁷ y el estudio de la demanda jugará un papel esencial en la tarificación óptima, dada la presencia de consumidores heterogéneos. Asimismo, parece adecuado considerar algún tipo de mecanismo que favorezca la equidad, puesto que para ciertos usos residenciales, estamos tratando el suministro de un bien de carácter preferente.

Un mecanismo que con frecuencia se suele utilizar en las tarifas para la consecución del objetivo de equidad en los precios es el mínimo de consumo, y se justifica en base al suministro de una cantidad básica del bien o servicio a un precio bajo. Este nivel mínimo de consumo es, normalmente, facturado obligatoriamente, y el precio marginal correspondiente a cantidades que no superen el mínimo es nulo. De esta forma, la presencia de mínimos en las tarifas fuerza a los usuarios a aumentar su consumo y a pérdidas de eficiencia, por lo que los usuarios pueden llegar a ocultar sus verdaderas preferencias y las tarifas a perder sus propiedades autoselectivas²⁸. Por tal motivo, este tipo de elementos tiende a desaparecer en cuanto no contribuyen a proporcionar señales de escasez, mostrando un grado de equidad bastante menor de lo esperado inicialmente²⁹.

Otro de los objetivos de la tarifa del agua es generar los ingresos suficientes que permitan la cobertura de los costes que genera la prestación del servicio. Por añadidura, sería deseable diseñar una estructura financiera sencilla y accesible de comprender por parte de los usuarios. Finalmente, un objetivo adicional es que los precios permitan racionar el uso del recurso, ofreciendo las correspondientes señales de

²⁶ OCDE (1987,1999,2003)

²⁷ Bös, D. (1985; 1994)

²⁸ Castro et al. (2002)

²⁹ OCDE (2003)

escasez y de este modo evitar interrupciones en el suministro u otras deficiencias del servicio³⁰.

Los usuarios de los servicios de agua efectúan pagos de distinta naturaleza a los prestadores de servicios. Entre las distintas categorías de pagos por servicios prestados podemos reseñar los siguientes³¹:

- *El Canon de Regulación* (Servicios de captación y embalse de aguas superficiales) es una figura de ingreso de derecho público que se cobra a los usuarios que aprovechan los recursos captados por las presas y embalses, cuyo titular son los organismos de cuenca. Esto es aplicable en aquellas cuencas de cuyas competencias sea titular la Administración General del Estado. En las cuencas intracomunitarias gestionadas por las comunidades autónomas, las figuras y tipología de gravamen son diferentes.
- *La Tarifa de Utilización de Agua* (Servicios de transporte de aguas superficiales y otros) es una figura de ingreso de derecho público que se cobra a los usuarios que utilizan los canales, infraestructuras de transporte de agua y obras hidráulicas, distintas de las de regulación, que realizan los Organismos de Cuenca.
- *La Tarifa del servicio de suministro urbano* sirve para recuperar los costes por los servicios de potabilización y distribución de agua a través de las redes de distribución. Incluye los servicios de captación y embalse de agua, si se utilizan aguas superficiales, y los de extracción de aguas subterráneas si se utiliza esta agua.
- *Las Tarifas y Derramas de los colectivos de riego* sirven para sufragar los costes de los servicios de distribución de agua de riego a los regantes incurridos por los colectivos de riego en la prestación de sus servicios. Incluye los servicios de extracción de aguas subterráneas si se utiliza esta agua.

³⁰ Crew, M.A., et al. (1995)

³¹ Ministerio de Medio Ambiente (2007)

- *La Tasa de Alcantarillado* (Servicio de recogida de aguas residuales urbanas) es una figura de ingreso de derecho público que se cobra por la prestación del servicio por parte de los municipios a los usuarios.
- *El Canon de Saneamiento o Tarifa del servicio* (Servicio de depuración de aguas residuales urbanas) sirve para generar ingresos para cubrir los costes de prestación del servicio de depuración para aquellos usuarios conectados al sistema de depuración a través de la red de alcantarillado.
- *Canon de Control de Vertidos* que se establece para cubrir los costes de los servicios de control de vertido de los organismos de cuenca, considerando las cargas contaminantes.

Para los usuarios urbanos (domésticos o industriales) se establece una cuota de conexión o enganche a la red que tiene la naturaleza de tasa y se gira una vez al conectar con la red de distribución.

En general, tal y como se pone de manifiesto en un estudio realizado por la OCDE en 1999, las distintas tarifas existentes, tanto en el interior de cada país como entre los distintos países, van a resultar una combinación de algunos (o todos) de los siguientes elementos³²:

- Una tarifa fija de conexión al servicio, que puede cobrarse en una sola vez en el momento en que se realiza la conexión o de forma periódica en el pago por el consumo.
- Una carga fija por acceso al sistema de suministro, sin relación con el consumo, en función de las características del consumidor.
- Una cantidad variable a aplicar sobre el volumen de agua consumido.

³² Álvarez García, S., et al. (2001)

- Un cargo mínimo que especifica el volumen mínimo del servicio por el que es necesario pagar en cada periodo aunque no se alcance su consumo.
- Tarifas por bloques que suponen la aplicación de tipos distintos (crecientes o decrecientes) para diferentes intervalos de consumo.

En España los sistemas de tarificación son muy heterogéneos, desde los que trasladan todos sus costes a los usuarios –los más escasos- hasta sistemas que siguen un criterio basado en la aplicación de precios muy reducidos que están por debajo de sus costes efectivos. Un análisis reciente del sistema tarifario y de las tarifas aplicadas en las capitales de provincia de España vigentes para el año 2006 pone de relieve la amplia diferencia de sistemas y criterios aplicados en las distintas ciudades.

La estructura de las tarifas es diversa. Los datos recogidos por la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS)³³ muestran una estructura heterogénea de las tarifas del servicio de distribución urbana para usos domésticos y no domésticos.

La confección de las estructuras de precios para estos usos suele seguir las recomendaciones sectoriales de las asociaciones y organizaciones especializadas³⁴ y de los criterios que suelen establecer los órganos reguladores de las comunidades autónomas³⁵.

En la mayoría de los sistemas tarifarios se aplican bloques de consumo, donde apenas el 8% de la población está sometida a una tarifa de una sola parte. Incluso, el sistema aplicado conlleva una tarifa progresiva de precios crecientes a casi el 96% de la población, incrementando el precio de suministro por unidad al aumentar el consumo.

En general, unas tarifas basadas en costes reales ha de recuperar tanto los costes históricos como los futuros derivados del

³³ AEAS (2004)

³⁴ AEAS (1997) y AEAS (1999)

³⁵ Comisiones de precios.

cálculo de las inversiones requeridas por una planificación a largo plazo del desarrollo de un sistema de suministro de agua. Según análisis procedentes de EE.UU referentes a la sostenibilidad de los servicios de agua en el siglo XXI³⁶: “Construir un conjunto sostenible de tasas y tarifas requerirá la implicación pública, y por ello el uso de encuestas para conocer la opinión de los ciudadanos será frecuente. Los impuestos de agua estarán mucho más ligados a los programas de gestión del lado de la demanda. Los programas de ahorro y conservación se convertirán en herramientas de apoyo y en una pieza fundamental para analizar y evaluar si las compañías de agua llevan a buen término su cometido”.

2.2.4.3. EL PRINCIPIO DE RECUPERACIÓN DE COSTES

Como se ha evidenciado anteriormente los criterios para establecer las tarifas de agua existentes en España son muy dispares, lo que da lugar a unas diferencias de precios que, en ocasiones tienen difícil justificación y que no existirían si se aplicara con rigor el artículo 9 de la Directiva Marco del Agua (2000) y si, además, se establecieran con claridad los estándares de calidad con los que debe prestarse el servicio³⁷.

Artículo 9: Recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua:

Los Estados miembros tendrán en cuenta el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los relativos a los recursos, a la vista del análisis económico efectuado con arreglo al anexo III y en particular de conformidad con el principio de quien contamina paga.

Los Estados miembros garantizarán a más tardar en 2010: Que la política de precios del agua proporcione incentivos adecuados para que los usuarios utilicen de forma eficiente los recursos hídricos y, por tanto, contribuyan a los objetivos medioambientales de la presente Directiva.

³⁶ American Water Works Ass.. (2000)

³⁷ Cabrera, E. (2004)

El consumo de agua, como hasta ahora ha estado, y está, muy subsidiada, su coste es bajo y esto ofrece pocos incentivos para su ahorro, por ello es importante que el recibo del agua refleje todos sus costes.

Los términos a incluir en el recibo del agua, de acuerdo con la DMA, son³⁸:

- Costes de operación y mantenimiento (se recuperan normalmente en España).
- Costes del capital o costes generados por la amortización de las obras hidráulicas (no se recuperan, en general, en España)

Estos dos costes forman el coste de suministro, y se les pueden añadir los costes siguientes:

- Costes de oportunidad, que recogen el hecho de que en periodos de escasez se puede redirigir agua hacia el uso urbano lo que conlleva que otro uso deje de ser atendido. Por ejemplo la indemnización que se paga a Iberdrola por utilizar agua embalsada en la Muela de Cortes, que ya no podrá utilizar para fines energéticos, por utilizar dicha agua para paliar la sequía Valenciana.
- Costes derivados de externalidades económicas, entendiendo por externalidad el “perjuicio o beneficio experimentado por un individuo o una empresa a causa de actuaciones ejecutadas por otras personas o entidades”. Por ejemplo el gasto que supone la eliminación de los nitratos de un acuífero que otros han contaminado.

Todos estos costes constituyen el coste económico global, el principio de recuperación de costes se basa en incluir todos los costes y que, generalmente, dependen de los estándares de calidad con que el servicio se presta. Al que hay que añadir el coste ambiental, existente en

³⁸ Rogers, P. et al. (2002)

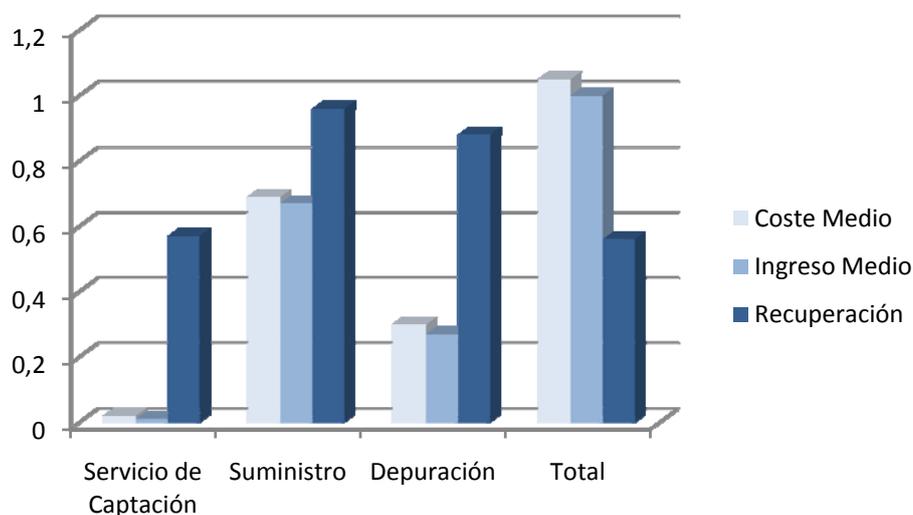
aquellos países que muestran mayor sensibilidad por cuidar su medio natural.

Por tanto, la DMA establece que hay que tener en cuenta el *principio de recuperación de costes* de los servicios relacionados con el agua sentando las bases de aplicación de dicho principio e incluye los costes ambientales, de conformidad con el principio *quien contamina paga*.

En un intento de cuantificar el porcentaje de recuperación de los costes de los servicios del agua en los sistemas de explotación en España se deduce que en los servicios urbanos se recupera entre 60-100% de los costes, siendo la recuperación mayor en las tareas de distribución y depuración y menor en el servicio de captación de las aguas.

El gráfico 2.1 muestra el grado de recuperación de los costes de los servicios del agua y la descomposición de los costes e ingresos totales.

Gráfico 2. 1. RECUPERACIÓN DE COSTES DE LOS SERVICIOS DEL AGUA



Fuente: MMA, Informe Artículo 5 y Anejo III Directiva Marco del Agua de la Demarcación del Júcar, 2007

La Directiva Marco del Agua establece el año 2010 como horizonte temporal en el que los Estados miembros deben *garantizar que la política de precios del agua proporcione incentivos adecuados para que los usuarios utilicen de forma eficiente los recursos hídricos y, por tanto, contribuyan a los objetivos medioambientales de la presente Directiva, con una contribución adecuada de los diversos usos del agua, desglosados, al menos, en industria, hogares y agricultura*. Para ello, los Estados miembros podrán tener en cuenta los efectos sociales, medioambientales y económicos de la recuperación de costes y las condiciones geográficas y climáticas de la región o regiones afectadas.

En este sentido, la Comisión Europea resalta la necesidad de aplicar sistemas tarifarios que promuevan la recuperación de los costes del servicio y un mejor uso de los recursos hídricos. Reconoce la necesidad de recabar una información más abundante y precisa acerca de las principales variables y relaciones que se refieren a la demanda, los costes y los beneficios, que permitan determinar unos niveles y unas estructuras de precios adecuados. Concreta que se *necesitan estimaciones sobre la elasticidad de los precios de la demanda para predecir los cambios en dicha demanda consecutivos o una adaptación de la política actual de tarificación de agua*³⁹.

La política de tarificación debe velar por aplicar incentivos que permitan reducir la contaminación, disminuir la presión sobre los recursos hídricos y el medio ambiente y producir una mayor eficiencia en la asignación de los recursos, esto conlleva que las tarifas deben recoger la valoración de todos los costes del recurso regulado, incluido el del recurso y los costes medioambientales.

La DMA estimó necesarios diez años para pasar de una política subsidiada a otra en la que es el propio usuario el que asume los costes. Según diversos estudios llevados a cabo en la Unión Europea, España subsidia el agua urbana en un 75%, por lo que recuperar los costes supone pagar hasta cuatro veces más por ella, esto nos llevaría a igualarnos al norte de Europa. Cuando tan sólo quedan dos años para agotar el plazo fijado, nos encontramos que el precio del agua apenas si

³⁹ UE (2000)

ha cambiado, y la DMA, que fue concebida para frenar el deterioro del medio ambiente, es muy clara: el usuario asumirá todos los costes.

2.2.4.4. EVOLUCIÓN DE LAS TARIFAS DE LOS SERVICIOS DE AGUA URBANOS

La “Encuesta sobre el Suministro y Tratamiento del Agua” que realiza el Instituto Nacional de Estadística junto con la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS) es la única fuente nacional sobre precios de los servicios urbanos del agua que permite realizar un análisis de su evolución.

El indicador medio de valor unitario del agua para España se situó en 1,02 €/m³ en 2005 (tabla 2.6). En términos de precios constantes de 2000, se situó en 0,87 €/m³. Con un incremento en términos reales de 0,14 €/m³, que supone un incremento real acumulativo anual del 3,56% entre los años 2000 y 2005.

Existen grandes diferencias entre comunidades autónomas, mientras que las Islas Canarias se presentan como la región “más cara” de España con un indicador de 1,65 €/m³ (1,46 €/m³ en términos de precios constantes de 2000), la comunidad autónoma de Castilla y León se sitúa en el otro extremo con 0,57 €/m³.

La razón de estas diferencias se pueden encontrar en diversos factores, entre ellos resalta la fuente de suministro principal de agua. En Castilla y León la fuente de suministro es de origen natural, principalmente de aguas superficiales, lo que da lugar a indicadores más reducidos, en cambio en las Islas Canarias destaca la desalación de aguas marinas como principal fuente de suministro.

Tabla 2. 6. VALOR UNITARIO DE LOS PAGOS POR LOS SERVICIOS DE AGUA A PRECIOS CORRIENTES (2000-2005)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Nacional	0.73	0.76	0.81	0.86	0.96	1.02
Andalucía	0.59	0.64	0.69	0.79	0.94	0.92
Aragón	0.59	0.59	0.62	0.66	0.82	0.87
Asturias (Principado de)	0.51	0.55	0.59	0.65	0.65	0.74
Balears (Illes)	1.32	1.45	1.48	1.42	1.31	1.58
Canarias	1.58	1.66	1.67	1.68	1.64	1.65
Cantabria	0.53	0.52	0.55	0.60	0.69	0.68
Castilla y León	0.42	0.45	0.49	0.53	0.61	0.66
Castilla- La Mancha	0.44	0.48	0.52	0.57	0.63	0.74
Cataluña	0.94	0.91	0.98	1.04	0.92	1.04
Comunitat Valenciana	0.66	0.72	0.78	0.83	1.20	1.36
Extremadura	0.72	0.74	0.76	0.73	0.72	0.81
Galicia	0.54	0.60	0.61	0.62	0.78	0.75
Madrid (Comunidad de)	0.69	0.76	0.81	0.86	1.00	1.09
Murcia (Región de)	1.12	1.02	1.08	1.08	1.41	1.52
Navarra(Comunidad Foral de)	0.60	0.59	0.63	0.73	1.11	1.12
País Vasco	1.12	1.09	1.14	1.15	0.83	0.91
Rioja (La)	0.41	0.42	0.44	0.54	0.96	0.98
Ceuta y Melilla	0.58	0.63	0.68	0.74	0.91	0.98

Fuente: INE (2007)

Los precios de los servicios urbanos en el periodo 2002-2006 crecieron una media del 4,39% anual en términos corrientes, que una vez descontado el efecto del crecimiento del nivel general de precios resultó en un incremento del 1,23% acumulativo anual en términos reales. Para el caso del servicio de suministro doméstico, en ese periodo, presenta un pequeño repunte de precios del 2,63% acumulativo anual en términos corrientes, que se traduce en un crecimiento negativo (-0,48% anual) en términos constantes. En el caso del servicio de saneamiento la tendencia es más inflacionaria, con un crecimiento medio acumulativo anual en términos nominales del 7,98% (4,70% acumulativo anual en términos reales).

Las tarifas por la prestación de los servicios de ciclo integral para los usos domésticos presentan un crecimiento por debajo del crecimiento real de la actividad económica, aproximadamente la mitad del crecimiento de la actividad económica medida a través del PIB⁴⁰.

⁴⁰ MMA (2008)

El crecimiento de las tarifas para uso doméstico e industrial se ha situado ligeramente por debajo del crecimiento medio de la renta. Las tarifas reales para usos domésticos han experimentado una variación media anual, en el periodo 2002-2006, de apenas el 1% y las tarifas industriales poco más del 0,7% anual (tabla 2.7)

Tabla 2. 7. TARIFAS MEDIAS DE USOS DOMÉSTICOS E INDUSTRIALES POR COMUNIDAD AUTÓNOMA (2002-2006)

COMUNIDAD AUTÓNOMA	2002		2003		2004		2005		2006	
	Industrial	Doméstico								
Andalucía	1.19	0.97	1.20	1.01	1.30	1.06	1.43	1.15	1.52	1.17
Aragón	1.28	0.70	1.32	0.69		-	1.56	0.78	1.73	0.85
Asturias	0.83	0.64	1.14	0.68	1.09	0.86	1.27	1.00	1.30	1.01
Cantabria	1.23	0.50	1.32	0.53	1.36	0.54	1.39	0.56	1.34	0.89
C-La Mancha	0.89	0.76	0.85	0.74	1.01	0.85	0.99	0.81	1.00	0.79
Castilla-León	0.85	0.67	0.95	0.72	0.97	0.74	1.04	0.81	0.89	0.68
Cataluña	1.74	1.30	1.75	1.27	1.86	1.32	2.02	1.47	2.13	1.59
Extremadura	0.97	0.91	0.99	0.87	1.02	1.00	1.27	1.27	1.16	1.09
Galicia	1.15	0.71	1.36	0.75	1.48	0.78	1.62	0.94	1.65	0.94
I. Baleares	2.94	1.69	2.94	1.70	3.04	1.74	3.11	1.76	3.48	1.88
I. Canarias	2.31	1.44	2.43	1.56	2.39	1.55	2.49	1.50	2.33	1.39
La Rioja	0.72	0.69	0.74	0.71	0.78	0.75	0.93	0.88	1.06	1.01
Madrid	0.87	0.91	0.90	0.92	0.96	0.97	0.96	0.98	1.13	1.13
Murcia	1.52	1.53	1.55	1.57	1.72	1.72	1.76	1.74	1.90	1.96
Navarra	0.79	0.65	0.83	0.67	0.90	0.73	0.97	0.78	1.04	0.85
País Vasco	1.49	0.76	1.60	0.82	2.20	0.88	2.13	0.92	1.49	0.95
Valenciana	1.17	0.93	1.08	0.82	1.27	0.96	1.14	1.00	1.40	1.25
Total	1.30	1.00	1.34	1.03	1.44	1.08	1.49	1.14	1.53	1.20

Fuente: INE 2007

Por tanto, el nivel de precios (en términos reales) por la prestación de los servicios del agua a usos urbanos (domésticos e industriales) se ha mantenido, siendo inferior al crecimiento del Producto Interior bruto per cápita, lo que significa un menor esfuerzo relativo por parte de los usuarios en el pago de los servicios urbanos del agua.

2.2.4.5. PRECIO DEL AGUA, AHORRO Y SOSTENIBILIDAD

El ahorro del agua es la base de la sostenibilidad, ya que por uso sostenible del agua se puede entender que es aquella gestión que no compromete el acceso a fuentes limpias y de suficiente caudal a las futuras generaciones.

En España, la concienciación ciudadana para ahorrar agua suele darse en épocas de sequía, pero no sirve de mucho ya que no hay una verdadera política tarifaria que propicie un ahorro sostenido en el tiempo. Si un usuario para ahorrar agua debe realizar una inversión inferior al ahorro económico que obtiene durante los años de amortización de tal inversión, sin duda estará interesado en ella⁴¹. Como es el caso de Alemania, donde el consumo de agua es un 35% inferior al de España, ya que los precios que se pagan en ese país hacen rentable la instalación de dispositivos y estrategias de ahorro.

Entre los dispositivos y estrategias de ahorro se encuentran los siguientes:

- Dispositivos que se instalan como grifería.
 - Aireadores que inyectando aire disminuyen el consumo de agua sin que el usuario apenas sí lo perciba. Pueden conseguirse ahorros de hasta el 40%.
 - Grifos con reguladores de caudal en los que su valor máximo esté limitado.
 - Grifos termostáticos, que evitan oscilaciones del caudal, obteniéndose con ello un ahorro de agua.
 - Grifos con temporizador.
 - Grifos con sensores infrarrojos.

⁴¹ MMA (2007c)

- Inodoros de bajo consumo de agua, con sus diferentes realizaciones.
 - Dispositivos de reducción del caudal de ducha, como los cabezales eficientes.
 - Lavadoras ecológicas.
 - Lavavajillas ecológicos.
- Estrategias.
 - Goteros de riego.
 - Aspersores adecuados a las necesidades de riego.
 - Agrupación de especies en el jardín basada en la cantidad de agua que necesitan.
 - Ajuste de los tiempos de riego a las necesidades de cada época del año.
 - Plantación de plantas autóctonas.
 - Instalación de interruptores automáticos de corte del agua de riego en cuanto se detecte que ha comenzado a llover.

Se constata que estas estrategias de ahorro o de uso eficiente estarán económicamente justificadas sólo si las tarifas recogen todos los costes. Si se persigue un uso sostenible del agua, es necesario aplicar el principio de recuperación de costes, tanto porque el artículo 9 de la DMA será de obligado cumplimiento a partir de 2010 como porque los fondos europeos que han financiado obras hidráulicas, están disminuyendo significativamente hasta desaparecer. No se trata de pagar más por el agua sino de hacerlo de una manera más racional aprovechando el gran potencial de ahorro de agua urbana.

2.2.5. USOS DEL AGUA

2.2.5.1. INTRODUCCIÓN

La distribución por sectores de los usos del agua en España es la siguiente:

- Regadío: 24.200 hm³/año.
- Abastecimiento a núcleos urbanos: 4.300 hm³/año.
- Industria: 1900 hm³/año.

Los principales problemas, dentro de cada sector, están claramente identificados:

- En amplias superficies dedicadas al regadío persiste aún el uso de métodos antiguos, como el riego a manta o por gravedad.
- Del agua suministrada a las ciudades e industrias, sigue existiendo un elevado porcentaje de pérdidas por fugas en las redes.
- Aunque el consumo de agua industrial es comparativamente bajo, los retornos no depurados a los cauces tienen una incidencia significativa.

2.2.5.2. USOS URBANOS DEL AGUA

El agua, principalmente se ha utilizado para beber y satisfacer la primera necesidad del ser humano, posteriormente, el agua comenzó a utilizarse para regar, apareciendo a continuación, muchos años después, los denominados usos industriales. La legislación de aguas nos puede servir de guía ya que recoge la problemática que a lo largo de los años ha ido aconteciendo.

En el Título IV del Texto Refundido de la Ley de Aguas española, que trata de la utilización del dominio público hidráulico, en su capítulo II, “De los usos comunes y privativos” se distingue entre usos comunes de las aguas superficiales (beber, bañarse y abrevar el ganado), usos comunes especiales sujetos a autorización (la navegación y flotación, el establecimiento de barcas de paso y sus embarcaderos, y cualquier otro uso, distinto de los comunes antes citados, que no excluya la utilización del recurso por terceros) y los usos privativos, que por el contrario, suponen un uso exclusivo del recurso y excluyente de los demás, adquiriéndose el derecho a este uso privativo por disposición legal o por concesión administrativa. Los usos comunes, por tanto, no necesitan de autorización administrativa, exceptuando la navegación⁴², y los usos privativos necesitan estar en posesión de la oportuna concesión administrativa, según los artículos 59 y 61 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA) y las condiciones que establezca la Administración competente.

Para los usos privativos del agua, la ley establece un cierto orden de preferencia “a efectos de su otorgamiento” de tales usos, y habilita la aplicación de la Ley de Expropiación Forzosa para que se pueda expropiar el derecho al uso a favor de un uso precedente, aunque se haya demandado con posterioridad en el tiempo al primero ya existente. Este orden de preferencia se muestra como sigue en el vigente TRLA:

Artículo 60. Orden de preferencia de usos.

- 1. En las concesiones se observará, a efectos de su otorgamiento, el orden de preferencia que se establezca en el plan hidrológico de la cuenca correspondiente, teniendo en cuenta las exigencias para la protección y conservación del recurso y su entorno.*
- 2. Toda concesión está sujeta a expropiación forzosa, de conformidad con lo dispuesto en la legislación general, sobre la materia, a favor de otro aprovechamiento que*

⁴² Art. 50 del Texto Refundido de la Ley de Aguas.

le preceda, según el orden de preferencia establecido en el Plan Hidrológico de Cuenca.

3. *A falta de dicho orden de preferencia, regirá con carácter general el siguiente:*

1º Abastecimiento de la población, incluyendo en su dotación la necesaria para industrias de poco consumo de agua situadas en los núcleos de población y conectadas a la red municipal.

2º Regadíos y usos agrarios.

3º Usos industriales para producción de energía eléctrica.

4º Otros usos industriales no incluidos en los apartados anteriores.

5º Acuicultura.

6º Usos recreativos.

7º Navegación y transporte acuático

8º Otros aprovechamientos.

El orden de prioridades que pudiere establecerse específicamente en los Planes Hidrológicos de Cuenca deberá respetar en todo caso la supremacía del uso consignado en el apartado 1º de la precedente enumeración.

4. *Dentro de cada clase, en caso de incompatibilidad de usos, serán preferidas aquéllas de mayor utilidad pública o general, o aquellas que introduzcan mejoras técnicas que redunden en un menor consumo de agua o en el mantenimiento o mejora de su calidad.*

Los Planes Hidrológicos de cuencas intercomunitarias⁴³ adaptan este orden de preferencia a su problemática específica manteniendo el uso de abastecimiento urbano como prioritario a cualquier otro, figurando en segundo lugar varios usos distintos del regadío y seguidamente usos

⁴³ Aprobados por R.D. 1664/1998, de 24 de julio, y completados con la publicación de su parte normativa en el Boletín Oficial del Estado (OO.MM. de 13 de agosto y 6 de septiembre de 1999)

industriales y uso hidroeléctrico. Con este orden se pretende garantizar la satisfacción del interés general por encima de cualquier interés particular en el uso del agua⁴⁴.

La prioridad del regadío sobre los usos industriales y el uso hidroeléctrico está siendo actualmente cuestionada por la realidad económica de España en la Unión Europea y por su situación internacional. También se discute la eficiencia de la particularidad de la adscripción unívoca de una concesión administrativa a un solo uso, la imposibilidad legal de compaginar usos y la prelación de usos puede crear ineficiencias importantes en términos económicos, sociales y medioambientales en la valoración económica de los usos del agua.

Según la Directiva Marco de Aguas podría ser conveniente plantear la eliminación de la restricción de la jerarquía de usos del agua confiando más en los mecanismos de asignación de valor económico para otorgar concesiones de uso privativo del agua. La principal preocupación de esta Directiva es lograr un uso eficiente del agua, por ello compatibilizar los usos del agua entre sí, también, favorecerían este objetivo.

Una de las características fundamentales de la demanda urbana de agua es la gran heterogeneidad en cuanto a su utilización, pues incluye utilidades domésticas (individuales), municipales (riego de jardines, bomberos, etc.), colectivas (servicios públicos, como hospitales y escuelas), industriales, comerciales e incluso agrícolas, todo lo cual contribuye a dificultar, en gran medida, su conocimiento. Según las encuestas de la Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento⁴⁵(AEAS), junto a un 61% de consumo doméstico, en torno a un 23% del agua registrada en contadores es consumo de pequeña industria, comercial y servicios que se suministran de la municipal.

⁴⁴ Heras Moreno, G. (2001)

⁴⁵ AEAS (2004)

2.2.5.3. USOS DEL AGUA EN LOS HOGARES

En nuestro país, más de dos terceras partes de la demanda de agua corresponden a la agricultura, mientras que los consumos de la industria y los hogares alcanzan valores en torno al 18 y el 13% respectivamente. Esta distribución del consumo por sectores difiere de la existente en la mayoría de países desarrollados, aun cuando sí es similar a la de otros países del sur de Europa⁴⁶.

Aunque la demanda urbana sea una quinta parte de la demanda agraria no debemos olvidar la obligación de optimizar el funcionamiento del sistema. Es necesario eliminar las pérdidas en la red y estimular el ahorro mediante campañas de concienciación ciudadana, así como actuar sobre las tarifas.

El abastecimiento de agua a los hogares se considera un servicio prioritario con unos requisitos de calidad, seguridad y garantía de oferta sensiblemente superiores a los de otros usos y exige un tratamiento previo más avanzado para convertirla en apta para el consumo humano. Sin embargo, no cuenta con infraestructuras de transporte, potabilización, distribución de agua potable, recogida y depuración de vertidos separadas de otros usos económicos, sino que las comparten. Entre ellos destacan los denominados *usos públicos* destinados a la provisión de bienes de naturaleza pública, como es el caso de la limpieza de calles y el mantenimiento de jardines y espacios de uso colectivo y los *usos de otros sectores económicos*, tales como las instituciones públicas, el comercio, los servicios de alojamiento y restauración, y las actividades industriales conectadas a la red de abastecimiento.

El uso de agua para abastecimiento urbano de todo tipo representa una proporción menor de la demanda total de agua, aunque su importancia es creciente, para el año 2003, según datos del INE (Encuesta de Suministro y Tratamiento de Agua), la cantidad de agua controlada por las distintas empresas de abastecimiento fue levemente inferior a los 5.000 hectómetros cúbicos. De estos, sólo son facturados a los usuarios entorno a 4.000 hectómetros, que se distribuyen para los

⁴⁶ Documentos Círculo de Empresarios (2007)

hogares en un 65% (2.600 hm³), para usos públicos en un 10% y para distintas actividades económicas, entre ellas la industria y la producción de servicios, la parte restante (tabla 2.8).

Tabla 2. 8. AGUA POTABLE POR USOS ECONÓMICOS

	AGUA TOTAL DISTRIBUIDA	SECTORES ECONÓMICOS	HOGARES	CONSUMOS MUNICIPALES	OTROS	AGUA PERDIDA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN	IMPORTE TOTAL DEL AGUA DISTRIBUIDA (MILES DE EUROS)	IMPORTE TOTAL INVERSIÓN SERVICIOS SUMINISTRO (MILES EUROS)
ESPAÑA	4.042.399	969.340	2.700.928	304.704	67.427	931.064	2.647.852	393.655
Andalucía	784.226	172.755	530.514	60.560	20.397	195.530	490.925	62.850
Aragón	113.896	26.126	73.914	12.119	1.737	32.023	46.238	4.081
Asturias	103.528	28.287	67.435	6.461	1.345	24.930	49.416	11.905
Baleares	92.477	38.051	49.518	3.276	1.632	27.593	85.075	21.137
Canarias	177.253	56.044	102.815	12.173	6.221	42.528	242.601	3.262
Cantabria	61.406	13.164	37.880	3.725	6.637	15.977	28.872	519
Castilla y León	254.701	68.922	156.624	19.159	9.996	65.796	108.575	9.052
C-La Mancha	168.897	26.659	120.840	18.988	2.410	38.071	80.015	4.267
Cataluña	576.186	116.259	432.869	24.950	2.108	115.059	445.838	49.064
C. Valenciana	422.820	93.247	295.284	29.348	4.941	139.747	297.070	29.653
Extremadura	114.719	26.742	69.886	17.103	988	30.866	64.535	2.201
Galicia	239.245	58.464	155.693	24.047	1.041	55.928	122.106	3.143
Madrid	510.612	124.020	362.438	23.548	606	81.441	353.148	30.613
Murcia	117.347	30.289	76.110	9.728	1.220	28.442	105.441	23.850
Navarra	52.128	14.815	30.745	4.974	1.594	8.124	27.828	125.624
País Vasco	214.180	66.045	115.853	28.801	3.481	21.479	81.677	4.948
Rioja	29.181	8.665	15.113	5.355	48	6.983	11.393	5.403
Ceuta y Melilla	9.597	786	7.397	389	1.025	547	7.099	2.083

Fuente: INE. Encuesta sobre tratamiento y suministro de agua 2004

La cantidad utilizada de agua por habitante promedio en España ha aumentado de 167 litros diarios de agua, en el año 2003, a 171 litros/hab/día⁴⁷ en el 2004, 6 litros más que tres años atrás.

Considerando que el crecimiento demográfico registrado entre 1996 y 2003 fue sólo del 1% anual y que la cantidad total de agua consumida por los hogares aumentó a un ritmo anual del 3%, se explica que este aumento de demanda puede deberse a cambios en los factores

⁴⁷ Encuesta sobre el suministro y tratamiento del agua. AEAS (2004)

determinantes de la demanda, como pueden ser el aumento del poder adquisitivo, el cambio del modelo de urbanización y la disminución del tamaño promedio de las familias⁴⁸.

El crecimiento de la demanda de agua también se ha dado en los otros usos abastecidos por la red de agua potable, un incremento aún mayor (2,6%) que el de los hogares.

También es importante señalar las grandes diferencias que existen entre las Comunidades Autónomas, respecto al uso *per cápita* de agua, como puede observarse en la tabla 2.9. El uso por habitante superior a la media nacional se registra en Cantabria, Castilla la Mancha, Andalucía, Cataluña, Aragón y Castilla León; un uso similar al promedio nacional se da en Madrid, Extremadura, la Comunidad de Valencia y Asturias y un uso por habitante menor en Baleares, Canarias, La Rioja, Galicia. El País Vasco y Murcia. La cuencas del sur peninsular presentan los mayores usos unitarios, mientras que Canarias presenta el menor.

Tabla 2. 9. ABASTECIMIENTO PROMEDIO DE AGUA FACTURADA (LITROS/HAB/DÍA)

	1996	2001	2004
España	146	165	171
Ceuta y Melilla	164	158	189
Cataluña	170	184	187
Madrid	134	171	179
Castilla-La Mancha	144	200	178
Comunidad Valenciana	134	156	178
Galicia	171	124	174
Murcia	142	151	172
Aragón	129	174	172
Andalucía	151	181	171
Asturias	155	155	162
Navarra	122	147	161
Canarias	107	135	155
Castilla y León	123	146	150
Extremadura	121	169	147
Cantabria		174	144
Baleares	135	124	142
País Vasco		151	142
La Rioja		143	141

Fuente: INE. Indicadores sobre el agua 1996-2004.

⁴⁸ MMA (2007)

Si, además, consideramos las medias por hogar (tabla 2.10) en lugar de los usos *per cápita*, el Guadalquivir sigue presentando los mayores usos unitarios por vivienda, las Cuencas Internas de Cataluña se aproximan al promedio nacional y las cuencas insulares y del norte presentan los menores.

Tabla 2. 10. *USOS POR VIVIENDA Y CUENCA 2001 Y 2005 (LITROS/VIVIENDA/DÍA)*

	2001	2005
España	450	455
País Vasco	419	378
Baleares	318	390
Ebro	430	400
Guadalquivir	531	421
Norte	405	428
Duero	372	428
Canarias	393	452
Galicia Costa	367	455
Júcar	418	457
Tajo	472	465
Cataluña	482	469
Guadiana	511	520
Segura	439	521
CA Andaluzas	547	543
CM Andaluzas	510	575

Fuente: GAE

La diferencia entre el agua total distribuida y el agua efectivamente facturada a los usuarios finales se ha reducido del 20%, en 1996, al 18,7%, en 2004 (tabla 2.11), esta leve mejoría se explica, en parte, por mejoras en la medida de usos, por la reducción de fraudes y, principalmente, por las mejoras técnicas en las redes de distribución.

Tabla 2. 11. PORCENTAJE DE AGUA FACTURADA CON RESPECTO A LA DISTRIBUIDA

	1996	2001	2004
España	80%	81%	81%
Andalucía	82%	81%	80%
Aragón	66%	68%	78%
Asturias	79%	81%	81%
Baleares	81%	76%	77%
Canarias	77%	78%	81%
Cantabria	82%	80%	79%
Castilla y León	77%	77%	80%
Castilla-La Mancha	84%	83%	82%
Cataluña	83%	85%	83%
Comunidad Valenciana	70%	74%	75%
Extremadura	83%	85%	79%
Galicia	88%	85%	81%
Madrid	87%	86%	86%
Murcia	75%	81%	81%
Navarra		83%	87%
País Vasco	71%	74%	91%
La Rioja		84%	81%
Ceuta y Melilla		57%	95%

Fuente: INE. Indicadores sobre el agua.

La demanda doméstica de agua es una demanda final que depende del precio del agua, de las características individuales de los hogares (tamaño, composición y nivel de renta) y de las características climáticas de la región⁴⁹ La elasticidad precio de la demanda varía en función del uso que los hogares hagan del recurso, para cantidades demandadas reducidas empleadas para satisfacer necesidades básicas, la utilidad marginal del recurso es muy elevada, no experimentándose respuesta alguna ante variaciones en el precio, en cambio, a medida que las cantidades aumentan para destinarse a fines menos necesarios, como el caso de riego de jardines, la utilidad marginal va disminuyendo y la respuesta de los hogares ante variaciones en el precio son más elásticas. La demanda de agua con fines domésticos se caracteriza por su alto valor, siendo tanto mayor cuando se destina a cubrir necesidades básicas que cuando se destina a usos discrecionales⁵⁰.

⁴⁹ Renzetti, S. (1992)

⁵⁰ Briscoe, J. (1996)

2.2.5.4. USOS INDUSTRIALES

La demanda industrial de agua depende del tipo de actividad que desarrolle la empresa y de su rentabilidad. La industria manufacturera abarca un amplio conjunto de actividades de transformación y producción de bienes y las necesidades de agua difieren en volumen y calidad para todo el sector industrial, mientras que la industria de caucho y plástico requiere un gran volumen de agua y no es muy exigente respecto a la calidad, la industria de la alimentación, bebidas y tabaco requiere menores cantidades de agua, aunque de gran calidad.

No existen muchos estudios realizados sobre la demanda y valor de agua en el sector industrial, por lo que existe poca evidencia de que el valor del agua en este uso sea muy elevado⁵¹.

Las Comunidades Autónomas con mayor vocación industrial, es decir, con un mayor peso relativo de la industria manufacturera en el VAB regional en el año base, son en orden descendente Navarra y el País Vasco (donde la industria aporta más del 30% de la renta y la producción anual), seguidas de La Rioja, Cataluña y Aragón, Comunidad Valenciana y Cantabria. El resto de regiones españolas, incluida la capital, tienen una especialización relativa inferior a la media española⁵².

En el año 2002 la industria manufacturera representaba el 19% al valor total de la producción española, en el 2005 paso al 15% por el mayor peso relativo del sector servicios y la construcción. En el año 2005 cada trabajador industrial aportó en promedio 34.800 euros (tabla 2.12) al valor de la producción, una productividad superior a la promedio de la economía española (30.500 euros). A su vez, la productividad del empleo en la industria crece entre 1995 y el 2005 a un ritmo elevado (3,5%), en dicho período la productividad que más se incrementa es la del sector primario, en cambio el sector de la construcción decrece la productividad del empleo.

⁵¹ Dupont, D.P. y Renzetti, S. (2001)

⁵² MMA (2007)

Tabla 2. 12. VALOR AÑADIDO BRUTO A PRECIOS DE MERCADO (PRECIOS CONSTANTES 1995), EMPLEO Y PRODUCTIVIDAD INDUSTRIAL

	VAB		EMPLEO		PRODUCTIVIDAD
	Miles euros	%	personas	%	euros/persona
Alimentación, bebidas y tabaco	15.932.179	14.52%	458.456	14.55%	34.752
Textil, confección, cuero y calzado	7.802.739	7.11%	293.118	9.31%	26.620
Madera y corcho	2.648.218	2.41%	120.036	3.81%	22.062
Papel, edición y artes gráficas	9.469.556	8.63%	250.113	7.94%	37.861
Industria química	9.895.404	9.02%	174.563	5.54%	56.687
Caucho y plástico	4.773.699	4.35%	135.393	4.30%	35.258
Otros productos minerales no metálicos	8.402.169	7.66%	222.106	7.05%	37.829
Metalurgia y productos metálicos	17.226.180	15.7%	514.354	16.33%	33.491
Maquinaria y equipo mecánico	8.021.512	7.31%	224.575	7.13%	35.719
Equipo eléctrico, electrónico y óptico	7.429.975	6.77%	171.542	5.45%	43.313
Fabricación de material de transporte	12.337.117	11.24%	311.453	9.89%	39.612
Industrias manufactureras diversas	5.775.509	5.26%	274.211	8.71%	21.062
Industria manufacturera	109.714.258	100.00%	3.149.921	100.00%	34.831

Fuente: Grupo de Análisis Económico del Agua (GAE) del MMA a partir de INE

En la tabla 2.13 podemos observar un ligero cambio en la estructura industrial en los 10 últimos años. La actividad industrial que más crece es la de maquinaria y equipo mecánico seguida de la metalurgia y productos metálicos.

Tabla 2. 13. TASAS DE CRECIMIENTO 1995-2005

	VAB	EMPLEO	PRODUCTIVIDAD DEL EMPLEO
Alimentación, bebidas y tabaco	2,03%	1.02%	1.01%
Textil, confección, cuero y calzado	2.31%	-1.41%	3.72%
Madera y corcho	2.82%	1.92%	0.91%
Papel, edición y artes gráficas	3.81%	3.66%	0.15%
Industria química	3.06%	2.76%	0.31%
Caucho y plástico	3.06%	3.36%	-0.30%
Otros productos minerales no metálicos	3.18%	2.69%	0.49%
Metalurgia y productos metálicos	5.51%	4.72%	0.80%
Maquinaria y equipo mecánico	5.39%	3.84%	1.55%
Equipo eléctrico, electrónico y óptico	2.77%	1.24%	1.52%
Fabricación de material de transporte	3.56%	2.95%	0.60%
Industrias manufactureras diversas	5.99%	4.88%	1.11%
Industria manufacturera	3.59%	2.52%	1.07%

Fuente: Grupo de Análisis Económico del Agua (GAE) del MMA a partir de INE

2.2.6. ESCENARIO TENDENCIAL AL 2015

El artículo cinco de la Directiva 2000/60/CE que establece el marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, promueve la realización de un análisis económico de las repercusiones de la actividad humana en el estado de las aguas por las Demarcaciones Hidrográficas. En este análisis se incluye la evaluación de la importancia económica de los usos del agua y el pronóstico de los indicadores y directrices económicas en el horizonte 2015 de tales usos.

La tendencia futura de los abastecimientos urbanos se encuentra muy determinada por los datos observados en el pasado, aunque se

involucren fenómenos transitorios, como el migratorio y el urbanizador, junto con otros permanentes.

Respecto al fenómeno migratorio, no es probable que se mantenga la intensidad de los últimos cinco años. Por ello, se prevé un contingente migratorio moderado.

En cuanto al proceso urbanizador, tampoco es probable que se mantenga con el ritmo experimentado en los últimos años, ya que en la actualidad se está iniciando un exceso de oferta que está repercutiendo en los precios.

Para elaborar una previsión de los factores determinantes básicos el Ministerio de Medio Ambiente⁵³ asume tres hipótesis básicas con carácter general: en primer lugar, la constancia en el tiempo de los precios reales del agua (que aumentan entonces en línea con la inflación). En segundo lugar, un crecimiento demográfico igual al previsto por el INE para cada una de las provincias hasta 2015. Finalmente, un aumento de la renta disponible de las familias de acuerdo con el escenario central del Banco de España.

La evolución de las necesidades de servicios de abastecimiento y de usos públicos e institucionales, se han calculado a partir de las previsiones sobre aumento de la población y de las viviendas en cada municipio, mediante coeficientes basados en agua facturada medida o en su defecto en coeficientes estadísticos. Tales previsiones se han ajustado conforme una determinada evolución de la renta disponible y de aumento/disminución de los precios reales del agua urbana.

El aumento del uso del agua al 2015 servirá de base para, una vez incorporados los procesos intermedios de captación, transporte y tratamiento, deducir las presiones que sobre el medio natural se derivan de la satisfacción de la demanda de servicios de abastecimiento, tanto en la situación inicial como en el escenario de evolución.

En la tabla 2.14 se recoge la evolución previsible del uso de agua para abastecimiento, de acuerdo con la extrapolación de las tendencias

⁵³ MMA (2007)

pasadas, en el año 2015 se estima en 3060,8 hectómetros cúbicos el volumen de agua facturada para uso doméstico.

Tabla 2. 14. EVOLUCIÓN PREVISIBLE DEL USO DE AGUA PARA ABASTECIMIENTO EN LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS (HM³)

	2001			2015		
	Uso Doméstico	Uso asimilable al doméstico	Distribuida	Uso Doméstico	Uso asimilable al doméstico	Distribuida
Galicia Costa	155,1		199,0	162,8		208,8
Norte	158,4		197,3	161,0		200,5
Duero	116,2		151,5	117,8		135,5
Tajo	418,3	86,5	652,3	517,4	100,2	798,0
Guadiana	91,8		120,8	99,6		131,1
Guadalquivir	317,1		395,9	354,4		442,6
CMAndaluzas	148,8		214,5	171,2		246,4
Segura	92,3		115,6	121,1		151,5
Júcar	261,7		348,2	327,7		435,9
Ebro	172,6		229,7	200,3		266,5
CI Cataluña	369,5	128,0	621,9	555,0		693,5
Baleares	38,9		51,4	47,5		62,7
Canarias	103,7		138,0	124,7		166,1
CIPaís Vasco	66,3	23,2	155,2	75,3	24,5	173,0
Ámbito TOP	22,6		28,0	25,1		31,0
ESPAÑA	2.533,5		3.619,2	3.060,8		4.161,3

Fuente: Grupo de Análisis Económico y CCHH

2.3. LA ECONOMÍA DEL AGUA EN EUROPA

Según un estudio de la OCDE el consumo doméstico de agua es sustancialmente mayor en los países del Sur de Europa (Italia y España) que en el resto, lo que refleja una relación entre consumo y climatología. Los países donde las temperaturas son más altas tienen un mayor consumo de agua. La desigual distribución del agua en nuestro planeta unido a que el agua para consumo doméstico puede ser considerada como un recurso natural preferente plantea un problema en las tarifas, los objetivos de equidad y eficiencia son difíciles de conseguir conjuntamente, puesto que, según este último objetivo, en zonas de escasez los consumidores deberían tener unos precios sustancialmente más elevados que los consumidores residentes en zonas con abundancia de agua.

Hay grandes disparidades en la manera de afrontar el problema de optimización de las tarifas. En la mayor parte de los países han introducido tarifas que incorporan diversas combinaciones de elementos fijos (independientes del consumo) y variables (proporcionales al volumen de agua consumido), de las que la parte proporcional se sitúa normalmente por encima del 75% del importe total.

Se comprueba que los daneses, holandeses, franceses y británicos pagan como media dos veces más por m³ que los alemanes y 3 veces más que italianos y españoles, a pesar de los problemas de escasez que sufre España, que con cierta frecuencia han dado lugar a restricciones importantes en el consumo de agua (principalmente en el centro y sur de España). Este hecho explica que nuestro país sea el segundo en consumo doméstico de agua, a continuación de Italia, y de esta manera no es posible la consecución de los objetivos de ahorro de agua en los países del sur, sería necesario aumentar el pago por el consumo de agua.

España, por tanto, es uno de los países de Europa donde más barata es el agua- el precio medio del agua para uso urbano en 2004 fue de 1,08 euros por metro cúbico, con un incremento anual del 5,5%⁵⁴.

La nueva tarifa de Barcelona en España es un ejemplo de combinación de los objetivos de ahorro de agua, equidad y objetivos de carácter medioambiental, para ello ha establecido una tarifa volumétrica creciente en función del consumo de agua para subsidiar los consumos básicos en hogares con menores niveles de renta. Consiste en incluir en la tarifa una cuota fija mensual según el tipo de vivienda y una cuota variable para distintos tramos de consumo e incorpora dos medidas adicionales, la primera es básica para el cálculo de la cuota fija y consiste en una clasificación de viviendas en función de sus características, considerando el caso de las familias numerosas, y la segunda trata sobre la medición individual del consumo de agua, evitando así los inconvenientes de la tarificación conjunta de los bloques de viviendas.

⁵⁴ MMA (2007b)

La mayoría de los países han introducido tarifas que trasladan al usuario el coste marginal de la prestación del servicio, esto es desde el punto de vista de la eficiencia, y tienden a disminuir los subsidios generales y cruzados, entre grupos de consumidores, para que cada usuario pague en función de su consumo desde la vertiente de la equidad.

En Europa podemos comprobar que existen diversos marcos institucionales para la gestión y provisión del agua, que incluye desde la gestión pública directa hasta la gestión privada pasando por distintos grados de delegación. Nuestro país posee un sistema de delegación parcial aunque la gestión está delegada en un menor porcentaje (37%) que en otros países al sector privado⁵⁵.

A efectos comparativos, en Holanda una veintena de corporaciones gestionan el sistema de oferta de agua mientras que las aguas residuales siguen siendo una competencia municipal. En Francia hay más de 16.000 oferentes de agua, controlados en su mayoría por tres grandes grupos privados que operan en régimen de franquicias con las autoridades locales propietarias de los activos. Suministran al 75% de la población y más de la mitad de los servicios de aguas residuales. El resto de servicios los cubren los ayuntamientos⁵⁶.

El modelo predominante en Europa de suministro y saneamiento de aguas es el de empresas públicas. Menos del 10% de la población obtiene el agua de negocios privados o parcialmente privatizados. Un 48% de la población obtiene el agua de sistemas gestionados públicamente, 15% por empresas públicas, 20% de sistema delegados a la gestión privada y sólo un 1% recibe el agua de la gestión privada directa⁵⁷.

⁵⁵ OCDE (2006)

⁵⁶ Documentos Círculo de Empresarios (2007)

⁵⁷ OCDE (2006)

2.4. LA ECONOMÍA DEL AGUA EN ANDALUCÍA

El problema del agua se agrava particularmente en la región de Andalucía, la denominada España seca o semiseca (de clima seco y precipitaciones medias de 350 mm año), con una problemática diferente a la España húmeda⁵⁸ (de clima húmedo y pluviometría media de 1.350 mm año) que cuenta con mayores precipitaciones y disponibilidad natural del agua y con menor consumo agrario de ésta.

Andalucía dispone de unos recursos naturales renovables totales⁵⁹ de 10.959 hm³, que equivalen aproximadamente a 1.26 l/m², cantidad inferior a la media española y europea. Andalucía puede considerarse una región con una dotación pobre de recursos hídricos y con precipitaciones que se caracterizan por su irregularidad estacional, enormes variaciones en los meses de invierno y verano, a la que se suma otra interanual no menos grave, se suceden años "buenos", con precipitación abundante, con períodos de años "malos" y a su vez se da la mayor y menor pluviometría del país⁶⁰. Esto unido a la orografía poco propicia de Andalucía conlleva que la disponibilidad del agua sea muy escasa en relación con los países del entorno.

Estos hechos justifican la construcción masiva de obras hidráulicas, a lo largo de todo el siglo XX, con ánimo de paliar y corregir mediante obras de regulación, captación y trasvase, la escasez de agua y asegurar el suministro, actualmente la región andaluza dispone de más de 100 grandes embalses con una capacidad total de 9.500 hm³. Andalucía se ha dividido en cuencas hidrográficas⁶¹. Las cuencas pequeñas se pueden agrupar con otras vecinas para formar la demarcación hidrográfica, unidad principal de gestión.

⁵⁸ La España húmeda está integrada fundamentalmente por la Cornisa Cantábrica.

⁵⁹ Los recursos naturales renovables se refieren a la cantidad total de agua procedente de precipitaciones que anualmente circula por las corrientes, superficiales y subterráneas, de un territorio. Su cálculo se realiza restando de la precipitación anual total la evapotranspiración, y se le añade los recursos provenientes de otros territorio "Medio físico. Evaluación diferencial de los recursos naturales españoles".

⁶⁰ Sobre la situación climática véase Naredo, J.M. y F. Parra (2002)

⁶¹ Se definen las cuencas hidrográficas como el terreno en el que las aguas fluyen al mar a través de cauces secundarios que convergen en un cauce principal único.

Al mencionado desequilibrio en cantidad que separa el norte de la Península de las cuencas del sureste hay que añadir el deterioro de la calidad natural del agua que suele acompañar a la escasa cantidad. Mientras que en los ríos de la España Húmeda del norte el agua sale a los mares con cerca de cien miligramos de sales por litro, siendo por tanto prepotable, en las cuencas de la España seca del sur y el este sale con miles de miligramos/litro, siendo ya inadecuada para beber e incluso para regar. De ahí que en las zonas de clima árido o mediterráneo no funcionaran los regadíos por la salinización de los suelos y sea necesario la gestión de las sales en ellas.

Así las cosas, los recursos propios de la región, que incluyen los recursos superficiales regulados, la explotación de recursos subterráneos, los recursos naturales disponibles de forma naturales ríos y lagos, y los retornos de los distintos usos, ascendían en 1997 a más de 5.400 hm³. Respecto a la demanda de agua en Andalucía se cifra aproximadamente en un total de 5.591 hm³, aunque la fiabilidad de este dato es, al menos, cuestionable, si bien proviene de los organismos públicos con competencias en el tema (Ministerio de Medio Ambiente, Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía) suscita reservas ya que no se especifica la metodología adoptada para calcularlo⁶², esto hace que sólo deba tomarse como orientación.

Según este dato, Andalucía tiene un déficit hídrico considerable cercano a los 200 hm³, que se agrava en las épocas prolongadas de sequía, como ocurrió en la primera mitad de la década de los noventa donde las escasas precipitaciones provocaron conflictos sectoriales y territoriales por el control del agua y políticas de restricción de agua urbana y agraria que provocaron pérdidas económicas y efectos negativos sociales. La situación hídrica actual de Andalucía no es alarmante pero si preocupante si no se toman las medidas oportunas. Este recurso es cada vez más escaso, las sequías son consustanciales al clima mediterráneo y seguiremos sufriendo épocas de escasez de agua, con lo que aparecerán nuevos conflictos y pérdidas económicas que condicionarán el desarrollo económico y social de la región.

⁶² Pérez-Díaz, V., Mezo, J., y Álvarez-Miranda, B. (1996)

2.5. REGULACIÓN

Desde el punto de vista normativo puede decirse que aprobados todos los Planes Hidrológicos de las cuencas intercomunitarias y adaptada la Ley de Aguas mediante la modificación realizada en 1999, se terminó de completar todo el proceso de planificación hidrológica previsto en nuestra principal norma legal mediante la aprobación de la Ley del Plan Hidrológico Nacional, entrando ésta en vigor en julio de 2001.

A su vez, se aprueba la esperada Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, comúnmente llamada Directiva Marco del Agua, que viene a sentar las bases para que los Estados miembros de la Unión Europea puedan desarrollar una política de gestión del agua ambiental y económicamente eficiente.

Se pretende introducir importantes cambios en la actual Ley de Aguas mediante una modificación que en este momento se encuentra en fase de anteproyecto y consulta con las partes afectadas. El anteproyecto, como respuesta a la Directiva Marco del Agua, establece el año 2010 como fecha límite para poner en marcha un sistema de precios que permita cobrar al usuario la totalidad de los costes de infraestructura y gestión.

Paralelamente, el Ministerio de Industria ha elaborado un borrador de Anteproyecto de Ley de bases de las Aguas Minerales y Termales con el objeto de trasladar a la titularidad pública todas las aguas minerales y termales, igualándolas de esa forma al resto de recursos hídricos.

Se trata de un marco normativo que apuesta por mejorar la calidad del recurso, conservar el medio hídrico natural y proteger los usos del agua haciéndolos compatibles con la satisfacción de la demanda ambiental.

DIRECTIVA MARCO DEL AGUA

- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Octubre de 2000 por la que reestablece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. *DOCE 32/L, de 22-12-00.*

PHN

- Real Decreto Ley 2/2004, de 18 de Junio, por el que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. *BOE 148, de 19-06-04.* Dicho Decreto-Ley se tramitó posteriormente como ley, siendo objeto de un amplio debate parlamentario, y su contenido fue plasmado en la Ley 11/2005, de 22 de junio.
- Ley 10/2001, de 5 de Julio, del Plan Hidrológico Nacional. *BOE 161, de 06-07-01.*
- Corrección de errores de la Ley 10/2001, de 5 de Julio, del Plan Hidrológico Nacional. *BOE 184, de 02-08-01.*
- Proyecto de Ley del Plan Hidrológico Nacional. *BOCG. Congreso de los Diputados, serie A, núm. 31-1, de 23-02-01.*
- Real Decreto 1664/1998, de 24 de Julio, por el que se aprueban los Planes Hidrológicos de cuenca. *BOE 191, de 11-08-98.*

TRANSFERENCIAS AUTORIZADAS

- Resolución de 31 de Octubre de 2003, de la Secretaría General de Medio Ambiente por la que se formula declaración de impacto ambiental sobre el proyecto retransferencias autorizadas por el artículo 13 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, de la Secretaría de Estado de Aguas y Costas, del Ministerio de Medio Ambiente. *BOE 262, de 01-11-03.*

LEY DE AGUAS

- Ley 29/1985, de 2 de Agosto, de Aguas. *BOE 189, DE 08-08-85.*

- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de Julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. *BOE 176, DE 24-07-01*.
- Ley 46/1999, de 13 de Diciembre, de modificación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. *BOE 298, DE 14-12-99*.

LIBRO BLANCO DEL AGUA

- Libro Blanco del Agua. Documento de Síntesis. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente.

MEDIDAS NORMATIVAS CONTRA LA SEQUÍA

- Real Decreto-Ley 10/2005, de 20 de junio, por el que se adoptan medidas urgentes para paliar los daños producidos en el sector agrario por la sequía y otras adversidades climáticas, destinadas a los titulares de las explotaciones agrarias situadas en los ámbitos territoriales afectados por la sequía.
- Real Decreto 1265/2005, de 21 de octubre, por el que se adoptan medidas administrativas excepcionales para la gestión de los recursos hidráulicos y para corregir los efectos de la sequía en las cuencas hidrográficas de los ríos Júcar, Segura y Tajo y Real Decreto 1419/2005, de 25 noviembre, de contenido análogo para las cuencas hidrográficas de los ríos Guadiana, Guadalquivir y Ebro.
- Real Decreto-Ley 15/2005, de 16 de diciembre, de medidas urgentes para la regulación de las transacciones de derechos al aprovechamiento de agua entre cuencas diferentes.
- Real Decreto 287/2006, de 10 de marzo, sobre modernización de regadíos.
- Real Decreto-Ley 9/ 2006, de 15 de septiembre, por el que se adoptan medidas urgentes para paliar los daños producidos en las poblaciones y en las explotaciones agrarias de regadío en determinadas cuencas hidrográficas.

TRANSFERENCIA DE LAS COMPETENCIAS SOBRE CUENCAS INTERNAS A LAS COMUNIDADES AUTÓNOMAS:

- Real Decreto 2130/2004, de 29 de octubre, por el que se traspasa la Confederación Hidrográfica del Sur a la Junta de Andalucía.
- Real Decreto 1560/2005, de 23 de diciembre, por el que se completa la transferencia a la Comunidad Andaluza del resto de cuencas internas de su territorio, en este caso las cuencas que vierten al litoral atlántico.

Para ordenar la actividad, se crea el Registro de Aguas Minerales y Termalés en las Comunidades Autónomas. Además, se propone la creación de un REGISTRO Central de Aguas Minerales y Termalés en el Ministerio de Industria.

2.5.1. DIRECTIVA MARCO DEL AGUA

2.5.1.1. ANTECEDENTES.

La Comisión en su Comunicación sobre la política de aguas constató que el agua es una necesidad humana básica, un recurso económico, un elemento fundamental de todo ecosistema y paisaje, e incluso una amenaza en las inundaciones o las sequías. Así la política comunitaria debía lograr un equilibrio entre las necesidades cualitativas y cuantitativas de: a) suministro de agua potable; b) otros usos económicos; c) buen estado ecológico del funcionamiento del medio acuático y de los ecosistemas y hábitats; d) la prevención o reducción de los efectos adversos de inundaciones y sequías⁶³.

La Directiva 2000/60/CE⁶⁴, del Parlamento Europeo y del Consejo, establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, conocida comúnmente como Directiva Marco de

⁶³ Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo relativa a la política de aguas de la Comunidad Europea, COM(96) 59 final, pp.1 y 2.

⁶⁴ Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas DOL327 22-12-2000

Aguas, se publicó en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas el 22 de diciembre de 2000, fecha de su entrada en vigor, y en un plazo de tres años –hasta el 22 de diciembre de 2003- los Estados miembros de la Unión Europea debían adaptar sus ordenamientos, aunque el proceso de aplicación es largo y se debe desarrollar progresivamente, hasta culminarlo en 2015.

La Directiva Marco del Agua (DMA) aplica instrumentos económicos para conseguir que se cumplan los dos grandes principios que permiten aunar objetivos económicos y medioambientales: la recuperación de costes del servicio y “quien contamina paga”. Además, establece objetivos de calidad y la cuenca como unidad básica de gestión.

2.5.1.2. CALENDARIO DE APLICACIÓN

Las fechas límite más importantes en el calendario de ejecución de la Directiva marco son:

- .2003. Expira el plazo para que los Estados miembros adapten sus ordenamientos jurídicos a la Directiva marco⁶⁵.
- .2004. Finaliza el desarrollo de estudios y análisis de cada una de las demarcaciones hidrográficas y de los Registros de zonas protegidas⁶⁶.
- .2006. Ultima el plazo a la operatividad de los programas de seguimiento⁶⁷.
- .2007. Derogación del primer grupo de directivas sustituidas por la Directiva marco⁶⁸.

⁶⁵ Artículo 24 Directiva marco.

⁶⁶ Artículos 5 y 6 Directiva marco.

⁶⁷ Artículo 8.2 Directiva marco.

⁶⁸ Artículo 22 Directiva marco.

- .2009. Finaliza el plazo para la publicación de los primeros programas hidrológicos de cuenca y los programas de medidas para cada demarcación hidrográfica⁶⁹.
- .2010. Tarifación adecuada al principio de recuperación de costes⁷⁰.
- .2012. Primer informe sobre aplicación de la Directiva marco; límite para la aplicación de controles de contaminación combinados para las aguas superficiales y para la operatividad de las medidas establecidas en los respectivos programas de medidas⁷¹.
- .2013. Derogación del segundo y último grupo de directivas sustituidas por la Directiva marco⁷².
- .2015. Último plazo para alcanzar los objetivos de buen estado de las aguas superficiales, subterráneas y de protección de las zonas protegidas y primeras actualizaciones de los programas de medidas y planes hidrológicos de cuenca⁷³

2.5.1.3. FINALIDAD Y OBJETIVOS

La Directiva marco supone un nuevo marco legal para todos los países de la UE, donde se encuadren las diferentes disposiciones parciales sobre aguas promulgadas hasta el momento. Establece en su artículo 1 la finalidad de protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas, que se desarrolla en una serie de objetivos generales como son: a) prevención, protección y mejora de los ecosistemas acuáticos y los ecosistemas directamente dependientes del agua; b) promover un uso sostenible del agua; c) la reducción progresiva y en su caso interrupción de determinadas sustancias contaminantes; d) reducción progresiva de la contaminación de las aguas subterráneas; y e) paliar los efectos de las inundaciones y sequías.

⁶⁹ Artículos 13.6 y 11.7 Directiva marco.

⁷⁰ Artículo 9.1. Directiva marco.

⁷¹ Artículos 18, 10.1 y 11.7 Directiva marco.

⁷² Artículo 22.2 Directiva marco.

⁷³ Artículo 4 Directiva marco.

Nos encontramos ante una Directiva que regula aspectos concretos y parciales del derecho al uso de las aguas, por lo que sólo afecta de forma parcial a nuestra legislación de aguas⁷⁴, y la transposición debe recoger explícitamente la prioridad de los objetivos de protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas, unos cambios necesarios para conseguir el objetivo del desarrollo sostenible del agua.

En el mismo artículo 1 de la Directiva se recogen unos objetivos indirectos como son garantizar el suministro de agua en buen estado, la protección de las aguas marinas y el cumplimiento de las obligaciones internacionales, y en el artículo 4 se establecen objetivos ambientales.

La Directiva unifica la regulación de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas⁷⁵, que se encontraban reguladas de forma separada en el Derecho comunitario, es decir asume la unidad del ciclo del agua de una forma más amplia que el concepto del dominio público hidráulico en España, dado que no se excluyen las aguas subterráneas no renovables. Además, también unifica la visión de planificación y gestión del agua creando el concepto jurídico de “demarcación hidrográfica”, similar a la acepción española de cuenca hidrográfica.

La Directiva marco crea cuatro instrumentos de planificación: el Plan hidrológico de cuenca, el Programa de medidas, el Programa de seguimiento y el Plan de futuras medidas, para conseguir mejorar la eficacia y precisión de las medidas de protección, favorecer la acción preventiva, un reparto más eficiente de los recursos hídricos, una mayor transparencia y participación, y un menor coste de la protección ambiental⁷⁶

Desde un punto de vista teórico la Directiva Marco va a tener una gran influencia en la política tradicional española, que ha perseguido garantizar el suministro de agua mediante la construcción de grandes

⁷⁴ Destacan dos textos básicos: el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas, y la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, y sus desarrollos reglamentarios.

⁷⁵ Artículo 1 Directiva Marco de Aguas.

⁷⁶ Arrojo Agudo, Pedro (2004)

infraestructuras hidráulicas, normalmente subvencionadas con dinero público⁷⁷. Los cuatro aspectos más importantes para España de esta Directiva son: 1) su énfasis en la protección de los ecosistemas acuáticos; 2) su insistencia en la participación de todas las personas interesadas y no sólo de los usuarios tradicionales (regantes, abastecimientos e hidroeléctricas); 3) la conveniencia de repercutir los costes de la gestión del agua en los beneficiarios de ella y 4) la necesidad de mayor transparencia y disponibilidad de los datos (hidrológicos y económicos) referentes a la gestión del agua.

Por tanto, la Directiva marco del agua hace hincapié en la gestión eficiente, la recuperación de los ecosistemas hídricos y la participación social en las políticas del agua, y es esto último fundamental para que la transición al nuevo marco de acción definido por esta Directiva no genere traumas ni tensiones.

2.5.1.4. RECUPERACIÓN DE COSTES EN LA DIRECTIVA MARCO

El artículo 5 de la Directiva Marco del Agua requiere la preparación de un informe sobre el análisis económico del uso del agua conforme a las especificaciones del Anejo III de la Directiva. El Anejo III señala que el análisis económico que se debe llevar a cabo como parte de la caracterización de las cuencas hidrográficas debe contener un nivel suficiente de detalle para:

a) *Efectuar los cálculos pertinentes necesarios para tener en cuenta, de conformidad con el artículo 9, el principio de recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, tomando en consideración las proyecciones a largo plazo de la oferta y la demanda en la demarcación hidrográfica y, en caso necesario:*

- *Las previsiones del volumen, los precios y los costes asociados con los servicios relacionados con el agua, y*

⁷⁷ Llamas, MR. (2002)

- *Las previsiones de la inversión correspondiente, incluidos las previsiones relativas a dichas inversiones.*

b) *Estudiar la combinación más rentable de medidas que, sobre el uso del agua, deben incluirse en el programa de medidas de conformidad con el artículo 11, basándose en las previsiones de los costes potenciales de dichas medidas.*

El artículo 9 especifica más claramente los requisitos de la Directiva Marco del Agua relacionados con la aplicación del *principio de recuperación de costes*. El artículo 2.38) recoge y explica, además, algunas definiciones esenciales sobre los servicios del agua: *Los Estados Miembros tendrán en cuenta el principio de la recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los del recurso, de conformidad con el principio de quien contamina, paga.*

El artículo 9 de la Directiva señala que a la hora de tener en cuenta el principio de recuperación de costes hay que considerar al menos los servicios de agua a los usos *industriales, a los hogares y a la agricultura*. Para ello fija un horizonte temporal (2010) en el que los Estados miembros garantizarán que *la política de precios del agua proporcione incentivos adecuados para que los usuarios utilicen de forma eficiente los recursos hídricos y, por tanto, contribuyan a los objetivos medioambientales de la presente Directiva.*

Los Estados miembros tendrán en consideración los efectos sociales, ambientales y económicos a la hora de aplicar este principio.

2.6. EXPERIENCIAS EXTRANJERAS

Por su similitud geográfica y climática podemos referirnos al caso de California, con un norte húmedo y un sur muy seco, con ciclos de gran pluviosidad y riqueza de acuíferos subterráneos. Este Estado ha pasado por una etapa inicial de construcción de presas y canales para transportar el agua del norte al sur y almacenarla en los años húmedos con el fin de utilizarla en los secos, pero el incremento de costes y los

efectos medioambientales limitaron su desarrollo aproximadamente hasta 1975 y a partir de esa fecha fueron necesarias otras medidas incentivadoras del ahorro y de reutilización del recurso.

La extensa red hidráulica que se construyó durante los años 1950 y 1960 fue fundamental para el desarrollo de los mercados del agua, sin ella no sería posible transportar el agua de una región a otra de forma económica.

Con motivo de la sequía sufrida durante los años 1987 a 1992 el Estado creó el llamado "Banco del Agua" con el objetivo de adquirir agua utilizable de los titulares de caudales disponibles que libre y voluntariamente la vendían al Banco para que éste, a su vez la vendiera a los usuarios urbanos con necesidades esenciales, agricultores, mantenimiento de la pesca y la fauna silvestre o para almacenarla como reserva frente a la continuidad de la sequía. La gran parte del agua adquirida por el Banco provenía de la agricultura que para ciertos cultivos renunciaba a las necesidades de riego o por cambios de usos de agua superficiales por aguas subterráneas.

Los efectos del mercado del agua en California se resumen en:

- La toma de conciencia del verdadero valor del agua y, por tanto, la modificación de las necesidades de ésta. Cuando el precio del agua aumenta, los usuarios sus necesidades y su consumo desciende.
- Aumentan las inversiones las inversiones para conservar el agua, se buscan fuentes alternativas, se invierte en tecnología para su depuración, reutilización, etc.
- El Banco genera beneficios directos sobre la economía.

No todo fueron efectos positivos, pero la experiencia en el corto espacio que funcionó el Banco de agua se puede decir que ha sido positiva, por lo que la opinión general es que el mercado de agua estará presente en el futuro sistema de asignación del agua en California.

En Chile, el sistema de privatización casi completa de las aguas y de asignación de usos por el mercado se realizó con el propósito de una asignación más eficiente del agua y la fijación de un precio real, como efecto de la oferta y demanda, aunque se han dado una serie de disfuncionalidades provocadas por las propias deficiencias del sistema de aguas chileno, quizás ha ido demasiado lejos en el proceso de privatización del sector.

En Australia, bajo el nuevo Decreto de Aguas los regantes pueden obtener suministro de agua por transferencia definitiva de derechos actuales sobre el agua mediante una venta por el Gobierno de nuevas asignaciones mediante un precio fijado por subasta pública. En los años 1988 y 1989, se realizaron subastas públicas de agua con ciertas limitaciones para proteger a los pequeños agricultores de los más ricos que podían hacer mejores ofertas. La experiencia fue positiva y supuso una comercialización del agua económica y eficiente, poniendo el agua su verdadero valor lo cual incentiva a asignar el agua a los usos más eficientes⁷⁸.

⁷⁸ Cestti R. and Kemper K. (1995)

CAPÍTULO 3

LA GESTIÓN DEL AGUA EN ESPAÑA

3. LA GESTIÓN DEL AGUA EN ESPAÑA

3.1. INTRODUCCIÓN

El agua, como tantas veces se insiste y es evidente, es un recurso limitado e indispensable para satisfacer las necesidades vitales de los seres vivos y un activo básico de primer orden para las actividades económicas, ecológicas y sociales, constituye uno de los principales desafíos de la humanidad en este siglo y una fuente de conflictos regionales e internacionales.

La tradicional consideración del agua como un bien libre ha dado lugar a una deficiente gestión de los recursos hídricos, convirtiéndolo en uno de los problemas más importantes de la actualidad. El agua, por abundante que sea, será siempre un recurso escaso y limitado frente a las apetencias que despierta. La escasez es una condición necesaria para que un bien sea considerado *bien económico* y esta consideración es la clave que permite llegar a puntos de equilibrio entre lo que se desea y lo que se dispone.

La realidad es que ya son muchos los expertos que reconocen que los problemas o crisis están mucho más relacionados con su mala gestión que con su escasez física, se trata de gestionar la escasez desde la racionalidad económica considerando, además, el agua no solo como un bien económico sino también como un bien social y establecer un equilibrio entre oferta y demanda para mantener la armonía social.

Desde hace siglos, las políticas de aguas desarrolladas en España por los gobiernos sucesivos persiguen responder a las necesidades, urbanas y agrícolas, de agua asegurando su suministro. La administración central, a través de las Confederaciones Hidrográficas (en las islas, Organismos de la Cuenca) es la encargada de gestionar y distribuir el agua desde el lugar de extracción hasta las instalaciones municipales. Los Ayuntamientos, directamente o mediante empresas abastecedoras, son las entidades responsables de asegurar el suministro a la población. A su vez, las Comunidades Autónomas se encargan del saneamiento de las aguas residuales (alcantarillado, depuración, etc.). Supone que una Gestión Integral del agua requiere

una ágil coordinación entre los diferentes niveles administrativos (estatal, autonómico y municipal) y que se plasme en multitud de leyes y normativas, entre las que destaca la Ley de Aguas (1985) en el ámbito estatal, la Directiva Marco del Agua, DMA (2000/60/CE) en el ámbito europeo y los decretos relativos a la calidad de las aguas en el ámbito autonómico.

En el siglo XX el modelo de gestión del agua en España ha estado centrado exclusivamente en la oferta, incrementando las disponibilidades del recurso mediante la realización de ingentes esfuerzos en materia de ingeniería civil, dando origen a una estructura compleja, con más de mil embalses¹, con una capacidad de unos 53.000 millones de metros cúbicos y una muy compleja red de canales, que hacen de España el país del mundo con más presas por habitante y por Kilómetro cuadrado. Esta política de aguas está justificada en un determinado momento histórico donde se carecía de infraestructuras para atender la creciente demanda, la obtención de nuevos recursos era relativamente fácil, los límites para su utilización no se vislumbraban y la preocupación por los costes presupuestarios y por los problemas ambientales y de calidad del agua apenas existían. Es a partir de los años 70 cuando ha sido ampliamente cuestionada tanto desde una perspectiva económica como medioambiental, llegando a poner en crisis el modelo en cuestión. Surge un nuevo enfoque de gestión no estructural basado en estrategias de gestión de la demanda, que trata de conseguir un uso eficiente y sostenible del agua.

En España la vigencia de estrategias “de oferta”, basadas en grandes obras públicas, se ha prolongado hasta nuestros días llevando a fragmentar los límites de sostenibilidad de nuestros sistemas acuáticos y sigue pendiente el reto de priorizar la reducción del consumo asumiendo nuevos enfoques de gestión de la demanda, en coherencia con la Directiva Marco de Aguas de la Unión Europea a la que debemos adaptarnos progresivamente, hasta culminar el proceso en 2015.

La Ley de Aguas de 1985 , que sustituyó a la anterior legislación vigente más de un siglo, consagra tres principios básicos: la unicidad del

¹ Maestu (1997)

agua, comprendida en el ciclo del agua, el carácter público de la misma, a través del dominio público hidráulico de titularidad estatal, y la planificación hidrológica, a través de los Planes Hidrológicos de Cuenca y del Plan Hidrológico Nacional.

La Directiva Marco propugna cambiar del tradicional enfoque de la oferta a nuevas estrategias de gestión de la demanda basadas en la recuperación completa de costes y en la necesidad de la participación ciudadana. Este nuevo enfoque tiene como objetivo la asignación más eficiente del agua y la introducción de mecanismos que incentiven el ahorro y el cambio de hábitos de consumo. Desde esta perspectiva los precios que pagan los consumidores por el agua deben corresponder cada vez más con su coste real, incluyendo el coste medioambiental y esta directiva solicita a los Estados miembros llevar a cabo una política de precios en esta línea antes del año 2010.

En la gestión del agua en España intervienen los tres niveles de gobierno existentes: estatal, autonómico y municipal. Entre las competencias municipales se encuentra el abastecimiento de agua potable, el servicio de alcantarillado y el saneamiento. En muchos casos, la prestación de estos servicios se realiza a través de mancomunidades de municipios o consorcios, que mejoran la economía de escala.

El contexto socioeconómico mundial, como son las variaciones demográficas, migraciones de la población, evoluciones geopolíticas, desarrollo de las tecnologías de la información, el cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos, pobreza, guerras, enfermedades, y el contexto socioeconómico de la cuenca hídrica deben ser aspectos en los que se debe centrar todo debate relativo a la gestión de los recursos hídricos. Un enfoque de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es una prioridad absoluta.

3.2. EL AGUA COMO UN BIEN ECONÓMICO

En los últimos años se ha insistido en la idea de tratar el agua como un bien económico, como por ejemplo en la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente celebrada en Dublín en 1992, donde se reconoció el valor económico del agua en todos sus usos alternativos y la necesidad de ser tratado como un bien económico y, también en el Segundo Foro Mundial sobre el Agua, celebrado en la Haya en el 2000, en el que se reconoció la necesidad de realizar un análisis del valor del agua a la hora de decidir cómo asignarlo entre sus usos competitivos.

El agua, además de ser un recurso natural imprescindible para la vida y para los ecosistemas, cumple múltiples funciones de carácter económico y social. Es esencial como consumo en una multitud de procesos productivos y actúa como receptor y regenerador de residuos y desechos provenientes de las actividades económicas, además provee a numerosos bienes y servicios recreativos. “El agua no es un bien comercial como los demás, sino un patrimonio que hay que proteger, defender y tratar como tal²”.

Desde un punto de vista cuantitativo, el volumen de agua disponible para su uso está determinado por factores geológicos, ecológicos, climáticos y humanos. Bajo el aspecto de su calidad o composición físico-química está influido por los usos que se le den al recurso, ya que la capacidad del agua para regenerarse y purificarse está limitada y si se sobrepasa, los recursos hídricos no podrán desempeñar de igual manera todas sus funciones³.

El valor del agua vendría reflejado por la contraprestación máxima que cada uso del agua estaría dispuesto a pagar por su disponibilidad. Los valores del agua, atendiendo a su uso, se pueden clasificar en dos grandes grupos⁴: valores de uso y valores de no uso.

² DIRECTIVA 2000/60/CE, del Parlamento Europeo

³ Sáenz de Miera (2002)

⁴ Azqueta, D. (2002)

- **Los valores de uso**

Los valores de uso derivan de la utilización directa o indirecta del recurso como insumo productivo o como bien final (agua potable o medio recreativo). Se distinguen los *valores de uso directo* y los *valores de uso indirecto*, los primeros derivan de la rentabilidad económica de la explotación de algunas de sus propiedades o/y de la satisfacción de cubrir necesidades o su contemplación. Conectados a esta categoría se encuentran los *usos consuntivos*, que son aquellos que utilizan el recurso de manera física, como son los usos agrícolas, domésticos e industriales. Los segundos, los valores de uso indirecto, son aquellos que se pueden derivar de la rentabilidad económica de la explotación de activos ambientales cuya existencia y atributos dependen de la existencia y atributos de los recursos hídricos o del disfrute de las funciones ecológicas, vinculados a éstos.

Los *usos no consuntivos* son aquellos que, aún sin consumir agua físicamente, la necesitan y algunos de sus atributos, como son los usos energéticos, paisajísticos, recreativos, culturales y de transporte.

También hay que destacar el *valor de uso futuro*, que tiene lugar cuando las personas valoran la posibilidad de tener la opción de utilizar algún sistema hídrico en el futuro y el *valor de opción* que se da en aquellas situaciones en las que exista incertidumbre sobre la posibilidad de descubrir nuevos empleos del recurso.

- **Los valores de no uso**

Los valores de no uso se componen principalmente del *valor de existencia*, que se refiere al valor que le dan las personas por su simple existencia con unas características determinadas, aunque no lo utilicen de manera directa o indirecta y sin tener pensamiento de hacerlo en un futuro.

Además, hay que considerar que el agua no sólo tiene un valor económico inmediato, sino también como factor esencial para la vida. Una óptima gestión del agua debe promover la explotación sostenible de los recursos hídricos, en la que se satisfagan las necesidades del

presente sin poner en peligro el suministro para generaciones futuras ni tampoco los ecosistemas que dependen de ella⁵.

El agua no es un producto comercial como cualquier otro, sino más bien, una herencia que se debe proteger, defender y tratar como tal⁶. El agua no solo es un bien económico, y por tanto valorable en términos monetarios, sino que también es un bien social, que conlleva unas posibles consecuencias medioambientales. El agua es la base esencial de la vida, la naturaleza, el medioambiente y por tanto, también de la economía.

3.3. EL PROBLEMA DEL AGUA

La situación climática de España es muy diferente a la del resto de países europeos, la aridez estival que caracteriza a la mayor parte del territorio español hace que se asemeje más al norte de África que a Europa. La precipitación por unidad de superficie por término medio en España es un 64% menor que la de Francia, y el stock de agua subterránea un 70% menor.

A la menor disponibilidad hay que añadir la mayor profundidad de nuestras aguas subterráneas y el reducido tamaño de nuestros ríos y lagos, lo que dificulta las captaciones, agrava su impacto ambiental y restringe la capacidad de dilución de vertidos del hidrosistema.

El clima mediterráneo, predominante en España y poco extendido en el mundo, se caracteriza por la irregularidad estacional e interanual de las lluvias y por el desequilibrio entre agua y calor, lo que provoca sequías y, en ocasiones, lluvias torrenciales. Aproximadamente unos 40 millones de hectáreas están sometidas a este clima u otros más secos en nuestro país, cerca de 8 millones de hectáreas de clima húmedo⁷ y 2 con clima de transición entre el húmedo y el mediterráneo.

Al mencionado desequilibrio hidrológico, se añade la marcada diferencia entre la España húmeda del norte y el oeste y la España seca

⁵ Nixon, L. (2004)

⁶ Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (2000/60/Ec), primer preámbulo.

⁷ Cornisa Cantábrica, Galicia, el Pirineo y altas montañas del interior.

del sur y el este. Tenemos las cuencas hidrográficas del norte y de Galicia excedentarias de agua y las del sur, por el contrario, deficitarias, agravándose esta situación para las cuencas del sureste.

El problema de cantidad que separa la España húmeda de la seca no se presenta sólo, está acompañado de la mala calidad natural de las aguas acrecentado a medida que su cantidad disminuye. Mientras que en los ríos del norte de la península el agua sale a los mares con casi cien miligramos de sales por litro y, por tanto, es prepotable, en las cuencas del sureste sale con miles de miligramos/litro, imposible para beber e incluso para regar, por lo que la gestión de las sales es imprescindible para la gestión razonable del agua en zonas de clima árido o mediterráneo.

Todas las cuencas hidrográficas tienen déficit de agua de calidad, a excepción de las del Norte y Galicia⁸, aunque en estas no es que sobre agua, pero sería inviable una solución técnica de trasvases de agua para compensar a costa de ellas el desequilibrio hidrológico de España, debido a las dificultades que presenta la orografía y a la distribución del agua en muchas cuencas cortas y pendientes que desaguan rápidamente en el mar. De ahí que los trasvases que se plantean sean de cuencas deficitarias. El problema no se puede solucionar con medidas técnicas, ha de ser con medidas socioeconómicas que traten de gestionar la escasez de agua.

Entre los problemas ambientales más severos con los que se enfrenta nuestro país se encuentran derivados del uso y distribución del recurso agua. La OCDE⁹ señalaba los elementos fundamentales del problema:

- La presión sobre el recurso hídrico se encuentra en España entre las más elevadas del ámbito de la OCDE: 850 m³ per cápita, frente a los 610 de los países europeos del grupo; 28,7% de los recursos totales captados de una u otra forma, frente a un 13,5% en el mismo ámbito.

⁸ La cordillera pirenaica tiene clima húmedo, pero el agua "sobrante" contribuye a nutrir la cuenca del Ebro o se queda, principalmente en Cataluña y es aprovechada por la población y diversas actividades.

⁹ OCDE (1997)

- La calidad de las aguas continentales, tanto superficiales como subterráneas, también es motivo de preocupación; un 36% del agua superficial controlada por las 251 estaciones de monitoreo mostraba una calidad insuficiente o mala, frente a un 25% que podía considerarse muy buena o buena.
- En España no es posible un uso racional del recurso, debido a la rigidez del sistema de asignación del agua, que origina unos patrones distorsionados de consumo.
- El precio del agua de riego ha de considerarse como muy por debajo de su valor, si se recuerda que la eficiencia media del agua utilizada en la agricultura está por debajo del 47%.
- Se requiere por tanto de un sistema de gestión de demanda que flexibilice los mecanismos de asignación del recurso, haciendo un uso estricto del principio de que quien utiliza paga, así como de un sistema de precios que fomente la conservación y el uso óptimo del recurso.
- Es necesario aplicar un análisis coste-beneficio, riguroso y transparente, que tome en cuenta todos los costes de los proyectos públicos de inversión en infraestructuras hidráulicas.

Hace más de un siglo, cuando se necesitaba regular las grandes cuencas de nuestro país y las obras hidráulicas eran insuficientes, estaba justificado abordar obras públicas de esta índole para aumentar la oferta de agua. Sin embargo, en la actualidad España posee el récord mundial en el porcentaje de superficie geográfica ocupada por embalses y con ello no se ha conseguido garantizar las exigencias de agua de la población ni solucionar los problemas de la sequía, esta línea de gestión de oferta perjudica la eficiencia, aumenta el coste económico y ecológico y genera efectos colaterales adversos. Las expectativas de abundancia de agua que despertó esta política provocó un giro de la cultura tradicional, de ahorro de agua escasa, presente en los usuarios, originando una expansión de los regadíos por todo el país, a lo que se sumaron el *boom* inmobiliario y turístico del litoral mediterráneo, que

presionó con fuertes exigencias de agua¹⁰, y otros usos inadecuados y despilfarradores del agua.

Los principales problemas actuales que presenta el agua en nuestro país se pueden resumir en los siguientes:

- En general, no se valora la importancia vital del agua, su escasez, y su consideración como bien social, económico y medioambiental.
- Las pérdidas económicas derivadas de situaciones de sequías e inundaciones, se deben a una insuficiente gestión global e integradora del agua.
- Es necesario dedicar mayores esfuerzos a la consideración de las condiciones y características medioambientales y al estado de las masas de agua.
- En algunos casos la explotación y uso del agua es ineficaz. Pérdidas en las conducciones y sistemas de riego tradicionales poco controlados y muy consuntivos.
- Aunque se están desarrollando marcos legales y económicos para velar por la calidad de las aguas, son necesarias mayores medidas de protección del dominio hidráulico.
- Los procesos de elaboración e implantación de los Planes Hidrológicos de Cuenca y del Plan Hidrológico Nacional son lentos y complejos.

El problema del agua supone un elemento central de la actual situación de emergencia planetaria¹¹ y su solución puede concebirse como parte de una reorientación global del desarrollo tecnocientífico, de la educación ciudadana y de las medidas políticas para la construcción de un futuro sostenible. El problema del agua actual en España, en

¹⁰ Estevan, A.; Naredo, J.M.(2004)

¹¹ Vilches y Gil, (2003)

resumen, reside en la necesidad de una nueva cultura hídrica que considere la economía y la ecología, tal y como exige la DMA.

3.4. UNA NUEVA POLÍTICA DEL AGUA

3.4.1. LA CRISIS DE LA POLÍTICA HIDROLÓGICA TRADICIONAL

El agua, en numerosas ocasiones, ha sido considerada comúnmente como un recurso renovable que no peligraba del agotamiento que afecta, por ejemplo, a los yacimientos minerales. El “ciclo del agua” a través de la evaporación y la lluvia, devuelve el agua a sus fuentes para engrosar los ríos, lagos y acuíferos subterráneos, y ha sido así mientras se ha mantenido un equilibrio entre el volumen de agua utilizada y el agua que ese ciclo reponía. Pero el consumo de agua se ha disparado debido a los excesos de consumo de los países desarrollados y al crecimiento demográfico, además se sigue produciendo una seria degradación de su calidad debido a los vertidos de residuos contaminantes (metales pesados, hidrocarburo, pesticidas, fertilizantes...), muy superior al ritmo de asimilación de los ecosistemas naturales.

La Comisión Mundial del Agua ha alertado del drástico descenso de los recursos hídricos: en el 2000 las reservas de agua en África eran la cuarta parte de las que existían medio siglo antes y en Asia y en América Latina un tercio, también denuncia que 1200 millones de personas carecen de agua potable, mientras que a 3000 millones les falta agua para lavarse y no poseen un servicio básico de saneamiento.

Como ya se ha comentado con anterioridad, durante más de un siglo en España ha persistido un modelo de política hidráulica, el *paradigma hidráulico*¹², centrado en asegurar el suministro de agua para todos los usuarios, especialmente el regadío. Esta política ha permitido disponer de agua embalsada para la mejora de la calidad de vida, el crecimiento de una próspera agricultura de regadío y el desarrollo de otros sectores económicos como la industria y, más recientemente, el turismo. Sin embargo, el modelo tradicional de gestión del agua presenta, desde hace años, síntomas de agotamiento, similares a lo

¹² Sauri y Moral (2001)

acontecido en otros países como EEUU que llevó a una reorientación de dicha política.

En junio de 2001 el Parlamento español aprobó el Plan Hidrológico Nacional (PHN), que fue modificado en el año 2005 por la Ley 11/2005, de 22 de junio, sustituyendo el trasvase del Ebro por el proyecto AGUA. El debate social suscitado todavía hoy perdura, con mayor eco debido a los medios de comunicación, y hasta se ha extendido al Parlamento europeo. Dos cuestiones, principalmente, son fuente de conflictos: el patente desarrollo del aprovechamiento de las aguas subterráneas y las ingentes sumas de dinero público dedicadas a construir grandes obras hidráulicas.

En el siglo XX, la política española del agua ha girado alrededor de un objetivo único: proveer de agua a todos aquellos agentes que precisan de ella para desarrollar su actividad, por tanto llevaba aparejada un sistema de gestión y financiación coherente con sus propósitos de aumento constante de la oferta. El Estado se hacía cargo, con fondos presupuestarios, de toda o la mayor parte de la financiación de la infraestructura hidráulica. Se han construido en España unas mil doscientas grandes obras hidráulicas y están en construcción unas cincuenta más. Ha sido, por tanto, una política centrada en la oferta.

No se han tenido en cuenta aspectos de demanda, de eficiencia económica o de coste de oportunidad, no se planteaba un análisis de recuperación de costes de las inversiones públicas y tampoco se contemplaban cuestiones medioambientales. A mediados del siglo XX la preocupación era cómo desviar los ríos para evitar inundaciones, en la actualidad los ríos son muy importantes para el desarrollo urbanístico y el paisaje de las ciudades¹³.

El PHN propone construir unas ciento veinte presas más en los ocho años siguientes a su aprobación, con lo que España se sitúa como el país del mundo que más grandes presas tiene por millón de habitantes.

¹³ Del Moral (2003)

En los últimos años ha aumentado intensamente el interés por los principios éticos que rigen las relaciones del ser humano con el medio ambiente del que el agua es un factor esencial¹⁴. En la LPHN se encuentran varios artículos que exigen ordenar el caos administrativo y legislativo sobre las aguas subterráneas y la financiación de las infraestructuras hidráulicas. La situación hidrológica puede empeorar si esos artículos no se aplican eficazmente.

La constatación de crecientes problemas ambientales y sociales unido a la estructura económica del país y a la situación política hacen necesario un cambio a un nuevo modelo más preocupado por la gestión de la demanda de agua y de su calidad.

En sintonía con lo que sucede en otros países desarrollados, la política del agua debe empezar a otorgar un mayor papel central a la gestión de la demanda y no limitarse a buscar formas de llevar el agua allá donde se solicite sin atender a criterios de eficiencia o costes de oportunidad del uso del agua. Es necesario que la gestión del agua persiga la sostenibilidad económica y medioambiental de este recurso¹⁵.

3.4.2. UN ENFOQUE DE DEMANDA EN LA GESTIÓN DEL AGUA.

Los responsables de los abastecimientos han desarrollado tradicionalmente una política de oferta, persiguiendo que la disponibilidad de agua sea mayor que la demanda, actitud lógica dado que el fuerte crecimiento de la población en muchas etapas de su desarrollo y el aumento del nivel de vida, han provocado que el abastecimiento de este recurso haya entrado en crisis frecuentemente. Tal política de oferta no se puede considerar finalizada, ya que todavía existen determinadas posibilidades técnicas, económicas y medioambientales favorables para el aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas.

Las situaciones de sequía aparecidas en los últimos años, el rápido crecimiento de la demanda y el incremento de las disponibilidades, han llevado a reflexionar sobre las posibles actuaciones

¹⁴ Llamas, 2001 b

¹⁵ Documentos Círculo de Empresarios (2007)

sobre la demanda y su gestión. Este fenómeno se acentúa a partir de los años 80, tratando de introducir en la planificación a medio y largo plazo programas de actuación sobre la demanda para conseguir reducirla¹⁶.

Un enfoque de demanda entiende que el agua ha de ser valorada como recurso y conservada como patrimonio natural. Coloca en primer lugar los distintos usos que se hacen del agua al intentar identificar los “servicios que presta el agua”, ya que no todos los servicios que el agua presta pueden tener la misma prioridad, hay servicios esenciales, como bebida, higiene,..., y otros servicios como regar un campo de golf o mantener el césped de una vivienda. Para muchas personas, los servicios esenciales habría que mantenerlos casi a cualquier precio, sin embargo los riegos aludidos son usos suntuarios que se tendrían que restringir.

Con un enfoque de demanda las compañías suministradoras de agua se ocuparían principalmente de la satisfacción de los servicios que presta, para lo que se justificaría la realización de inversiones en la mejora de tecnologías de uso del agua.

Un enfoque de oferta siempre ofrece como respuesta la creación de nuevas infraestructuras para satisfacer una demanda creciente, esto suele tener unos costes ambientales muy altos y, por tanto, sólo deben acometerse aquellas obras justificadas socialmente, no existiendo alternativas viables.

Entre las acciones que se barajan para gestionar la demanda se pueden citar¹⁷:

- Acciones educativas o persuasivas. Tratar de sensibilizar a la población para que modifique sus pautas de consumo mediante campañas sociales. Los mensajes referentes al medio ambiente y la escasez de recursos, aunque muy atractivos, pueden resultar abstractos y reiterativos. Aunque algunas experiencias han resultado eficaces consiguiendo aumentar el ahorro, parece interesante dirigir campañas

¹⁶ López-Camacho, B. (2001)

¹⁷ Castro, J. de (1995)

educativas a los niños que aún no han arraigado hábitos de consumo.

- Acciones normativas. Hacer preceptivo el uso de aparatos de bajo consumo, limitando el caudal máximo de grifos, duchas o cisternas, imponer en lugares públicos el uso de dispositivos automáticos de corte; adecuar el tipo de jardinería de los parques públicos a las condiciones climáticas de cada región, fomentar en las industrias el uso eficiente del agua, etc.
- Acciones económicas. Medir el agua consumida por cada usuario, para que exista una clara relación entre el consumo y el pago individualizado. Establecer una estructura de consumo por bloques real, evitando que los distintos conceptos que se incluyen en el recibo del agua distorsionen la apreciación clara de la progresividad consumo-precio . Renovar instalaciones poco eficientes.
- Acciones de mejora de la gestión técnica y comercial. Mantenimiento y renovación de las redes con el fin de mantener un alto rendimiento, reduciendo pérdidas. Detección automática de fugas incidentales.

Un aspecto importante a la hora de plantear un enfoque de demanda es el precio a pagar por el agua, la línea a seguir intentaría conjugar un uso cada vez más eficiente. No hay ningún incentivo para que la agricultura utilice tecnologías modernas de riego que eviten las altas pérdidas de evaporación y la baja eficiencia de los sistemas. Un instrumento para mejorar la eficiencia en el uso del agua es, sin duda, un precio que recuperara todos los costes derivados de la utilización del agua.

Las Políticas de gestión de la demanda se pueden resumir en: Ahorro, reciclaje y fomento de la reutilización.

3.4.3. NUEVOS INSTRUMENTOS DE GESTIÓN: LA NUEVA CULTURA DEL AGUA.

Este nuevo enfoque denominado Nueva Cultura del Agua (NCA) recoge esa Nueva Cultura de la Sostenibilidad que los tiempos exigen, es decir un cambio cultural integrador de valores en materia de gestión de aguas, donde el fin no justifica los medios y la tecnología hidráulica y el poder de intervención sobre el medio natural tiene un límite moral, en definitiva, adopta como principio universal el respeto a la vida, los ríos, los lagos, las fuentes, los humedales y los acuíferos.

Una gestión de agua sostenible es aquella que equilibra en el tiempo oferta y demanda, sin comprometer el futuro de los recursos, la calidad y la cantidad, es decir no se contamina el medio natural ni se sobreexplotan los acuíferos ni los recursos superficiales. El agua se ha convertido, en los últimos tiempos, en el recurso natural a proteger por excelencia, debido a la importancia que tiene como elemento generador de vida.

El Gobierno se ha comprometido a impulsar una nueva política del agua conforme a los criterios y normas de la Unión Europea, que garantice más equidad, más eficiencia y más sostenibilidad, aprovechando las mejores tecnologías disponibles. El Programa A.G.U.A.¹⁸ del Ministerio de Medio Ambiente materializa la reorientación de la política del agua, mediante la explicación y difusión de las actuaciones concretas diseñadas para garantizar la disponibilidad y la calidad del agua en cada territorio.

El Programa A.G.U.A no es un conjunto de actuaciones en infraestructuras, sino un autentico programa de gestión. Es una nueva forma de entender la política del agua, donde todos los agentes deben ser escuchados, respetando la libertad de opinión. La política del agua debe ser consensuada dentro del marco constitucional y, para ello, los diferentes entes que la integran deben poder expresarse.

¹⁸ Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua

Según el Manifiesto sobre el agua emitido por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos¹⁹ los principios que deben regir en el futuro para una Política Sostenible del Agua, son esencialmente los siguientes:

1. Protección de las aguas continentales, las aguas de transición y las aguas costeras. Protección y mejora de los ecosistemas acuáticos. Desarrollo e implantación de planes de Saneamiento y de programas de calidad de las aguas. Análisis y Planificación medioambiental de las masas de agua.
2. Consideración del agua como un recurso limitado, renovable y escaso, y como un bien social, económico y medioambiental, que debe estar subordinado al interés general.
3. Garantías suficientes de los suministros de agua para las diversas demandas, en cantidad y calidad apropiadas para un desarrollo sostenible, con atención prioritaria al abastecimiento de las poblaciones.
4. Utilización y consumo sostenible del agua basado en la Planificación Hidrológica y en la gestión de los recursos hídricos disponibles.
5. Gestión Integral del recurso en el marco de la cuenca hidrográfica. Desarrollo de Políticas de Gestión Integrada de recursos Hídricos, tanto a nivel de cuenca como de actuaciones y medidas de gestión. Análisis, e implantación conjunta y coordinada de actuaciones estructurales (obras hidráulicas y de regulación, desaladoras, redes regionales, etc.) y de soluciones no estructurales, o de gestión para hacer frente a las problemáticas del agua, y a las situaciones extremas de sequías e inundaciones.
6. Unidad de gestión. Descentralización y coordinación de la gestión en los Organismos de cuenca. Participación de los usuarios y de

¹⁹ Colegio de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos (2006)

los agentes sociales, económicos y políticos en los Órganos de Gobierno y de Planificación.

7. Mejora de la eficacia en la gestión y uso del agua. Desarrollo de Políticas de gestión de la demanda: Ahorro, reciclaje, y de fomento de la reutilización. Explotación racional de los recursos, y explotación coordinada de los recursos superficiales y subterráneos. Flexibilidad de la gestión e interconexión de los recursos. Organización Administrativa adecuada para una buena gestión pública del dominio público hidráulico.
8. Consideración de los aspectos económicos del agua. Recuperación progresiva de los costes del agua, y su asignación adecuada a los diferentes usos, teniendo en cuenta los efectos sociales, medioambientales, económicos y las condiciones climáticas y geográficas. Adopción general del principio de que quien contamina paga.
9. Integración en el dominio público hidráulico de todas las aguas continentales, tanto superficiales como subterráneas, de las aguas para la desalación, y de las usadas para la reutilización.
10. Coordinación de las Administraciones competentes (Estatad, Autónoma y Local) en la aplicación de las Políticas del Agua. Celebración y desarrollo de Convenios de colaboración para el establecimiento de las actuaciones de protección del dominio público hidráulico y de la calidad de las aguas. Coordinación entre las Políticas de desarrollo urbanístico, industrial y agrícola, y las Políticas del uso sostenible del agua.
11. Aprovechamiento energético del agua de manera compatible y coordinada con las diversas demandas consuntivas de agua, y con las diferentes fuentes de energía disponibles. Uso y potenciación de la calidad, flexibilidad, y sostenibilidad de la energía hidroeléctrica, para una mayor eficiencia conjunta del sistema energético nacional.

Cada vez tiene menos sentido el proceder de la vieja cultura del agua²⁰ que hasta ahora nos ha presidido. Cuando nuestro país ya tiene una llamativa dotación de infraestructuras hidráulicas, alcanzando el record mundial en el porcentaje de superficie geográfica ocupada por embalses, cuando los efectos adversos, tanto económicos como ecológicos, comienzan a apreciarse, y cuando no se han conseguido satisfacer, de manera óptima, las exigencias de agua de la población, pero sí deteriorar los ecosistemas acuáticos y la hidrología del país, deberíamos reflexionar sobre el camino de la Nueva Cultura hídrica.

Existen otras medidas que no es la actuación sobre los precios, como la educación y campañas de difusión, la transparencia en los costes asociados al suministro y depuración, la implementación de tecnologías más eficientes, la segmentación de los consumidores y uso del agua, etc. Las políticas comunitarias para la gestión sostenible de los recursos hídricos proponen la utilización de diferentes fuentes de agua – aguas superficiales y subterráneas, desalinización de agua y su reutilización-, adaptación de los precios, y un enfoque combinado de los valores límite de emisión y las normas de calidad.

Durante los últimos años se han realizado numerosos estudios y debates en los que se ha discutido la metodología y los aspectos empíricos de la recuperación completa de costes, sin embargo no hay claridad en las cuestiones de la política del agua, encontramos una perspectiva “individualista” bajo la que se acentúa el concepto de tarificación al coste marginal individual por lo que el mayor problema es asegurar que los recursos económicos disponibles sean asignados a los usos más beneficiosos²¹.

Por otra parte la perspectiva “jerárquica” considera la cuestión de recuperación de costes como un balance entre ingresos y costes, en este sentido el problema principal es la necesidad de asegurar que los abastecimientos dispongan de recursos financieros suficientes para la

²⁰ La vieja cultura del agua se basa en una política degeneración de recursos con subvención pública masiva, sin responsabilización de los usuarios, sin un análisis serio de alternativas y con graves impactos en los ecosistemas acuáticos

²¹ Spulber y Sabbaghi, (1995)

financiación de la construcción y mantenimiento de la infraestructura hidráulica.

Otro punto de vista más “igualitario” se basa en la consideración del agua como un recurso esencial que se debe garantizar a todo los ciudadanos y en una tarificación más justa y equitativa donde el precio funciona como factor limitador del acceso al agua y cuestiona la tarificación y recuperación de costes.

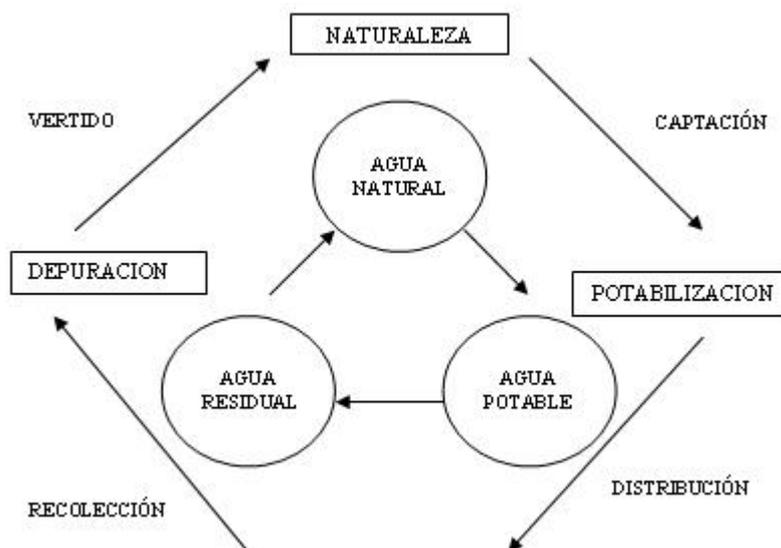
Por último, la perspectiva “ambientalista” utiliza el precio del agua para alcanzar una política medioambiental. Sería conveniente intentar integrar todos estos puntos de vista en una perspectiva más amplia de gestión integrada de agua y territorio basada en un sistema sostenible de gestión de recursos hídricos, es decir que permita compatibilizar el aprovechamiento humano del recurso a largo plazo con el respeto al medio ambiente.

El estudio piloto en la Cuenca de Cidacos (Navarra) realizado en 2003 puso de manifiesto que hay enormes ganancias en reducción de costes si los problemas de calidad de aguas de una cuenca se abordan de manera integrada y consensuada por los agentes sociales²². Una gestión integrada supone incorporar en el análisis todos los procesos y variables relevantes para conseguir unos objetivos concretos y realizables, a diferentes planos geográficos y temporales.

La Gestión Integral del agua consiste en cumplir el ciclo hidrológico o ciclo del agua (Figura 3.1) tal como se da en la naturaleza. Se trata de mantenerla circulación del agua mediante su uso y devolución al medio en las mejores condiciones de calidad posibles, con el fin de que pueda seguir siendo utilizada.

²² Calatrava, J. y Garrido, A. (2006)

Figura 3. 1. CICLO INTEGRAL DEL AGUA



La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos es definida como el modo de manejar el agua que toma en consideración los aspectos sociales, económicos, ambientales e integra las aguas superficiales, las subterráneas y los ecosistemas a través de los cuales aquéllas fluyen.

En cuanto al consumo urbano, las tarifas sobre el agua en España son comparativamente baratas con respecto a otros países de la Unión Europea, a lo que se suma la escasez del recurso y el carácter tan semiárido o mediterráneo de la mayor parte del territorio español²³, lo que origina muchas consecuencias negativas sobre el servicio integral del agua urbana de precios tan baratos.

Se espera que las tarifas vayan aumentando gradualmente por encima de la inflación, tanto para los usos urbanos o agrarios, y que el valor del agua, medido en coste de oportunidad, también vaya creciendo y solo se vea limitado en las costas por el coste del agua desalada, siendo la cuenca del Guadalquivir especialmente propicia para estos cambios.

²³ Cabrera, E. et al. (2004)

El máximo exponente de esta perspectiva es la Directiva Marco del Agua cuyo objetivo explícito es establecer un marco para la protección de las aguas que promueva un uso sostenible, lo que no significa terminar con las obras hidráulicas, como embases o trasvases, pero sí reorientar la gestión hacia la demanda tanto a través de la vía técnica (mejora de infraestructuras de distribución agrícola y urbana, reutilización de aguas residuales urbanas, depuración de vertidos industriales, etc.) como a través de la vía institucional²⁴ (tarifación volumétrica, mejoras organizativas en el riego, subvenciones y normas para la instalación de mecanismos eficientes en el uso del agua, campañas educativas, flexibilización de la asignación del recurso²⁵, etc.). En esta línea de actuación es esencial tanto el traslado a los usuarios de los costes íntegros de obtención y transporte del recurso²⁶ como una reconversión de la administración pública del agua.

Existen múltiples avances técnicos para determinar la calidad de las aguas, tratamiento de aguas residuales, depuración de vertidos industriales, etc. Pero es necesario un cambio que se reconoce como la Nueva Cultura del Agua que adopta el principio universal del respeto a la vida, los ríos, los lagos, las fuentes y los acuíferos deben ser considerados como Patrimonio de la Biosfera y deben ser gestionados por las comunidades y las instituciones públicas para garantizar una gestión equitativa y sostenible.

Desde la Nueva Cultura del Agua se denuncia el uso inapropiado del agua y plantea posibles medidas para el fomento de una gestión del agua que favorezca un uso más eficiente, evitar el despilfarro, el agua es reutilizable, reciclable y desalinizable.

La participación ciudadana es un elemento crucial, tal y como recoge la normativa Europea en materia medioambiental y de aguas²⁷ y otras muchas disposiciones y convenciones internacionales que han producido acuerdos y normas sobre la participación ciudadana en

²⁴ Cuervo Mir, M; Ramos Gorostiza, J.L (2001)

²⁵ Ramos, J.L (2002b)

²⁶ Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (2000/60/CE)

²⁷ Artículos 2, 3 y 4 de la Directiva 2003/35/EC relacionados con la necesidad de dar "la efectiva oportunidad para participar en el proceso de toma de decisiones medioambientales (...) antes de tomar la decisión" (...).

relación con el agua y el medio ambiente²⁸. La directiva marco insiste en la necesidad de promover nuevas formas de gestión basadas en la participación ciudadana, es decir pasar del tradicional enfoque tecnocrático e ingenieril a nuevos enfoques participativos e interdisciplinarios

En definitiva la Nueva Cultura del Agua es el proceso de transición hacia un modelo general de gestión sostenible de los recursos basada en dos principios: aprovechar el agua como recurso natural y su gestión desde políticas orientadas a la demanda. Para poder extender y consolidar la NCA será necesario un gran esfuerzo por parte de sus promotores para conseguir el apoyo de la población usuaria, que se encuentra anclada a la cultura tradicional del agua donde domina la consideración del problema del agua como un problema de oferta.

La reorientación de la política del agua se enmarca, por tanto, en los criterios de la Directiva Marco de Aguas de:

- Racionalidad económica.
- Optimización tecnológica
- Integración ambiental.
- Participación pública.

²⁸ La Convención de la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas celebrada en 1998, que tuvo por título: "El acceso a la información, la participación pública en el proceso de toma de decisiones y la justicia en cuestiones medioambientales", explícita la necesidad de la participación ciudadana en actividades específicas, planes, programas, regulaciones, etc.

3.4.4. LA PARTICIPACIÓN PÚBLICA EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS.

La participación pública se puede entender como un derecho individual y de grupos sociales para mejorar la calidad y efectividad de los procesos de toma de decisiones²⁹.

La participación pública como instrumento para mejorar la calidad y eficiencia de los procesos de toma de decisiones contribuye a la legitimación de estos procesos, a la aceptación por el público de las decisiones adoptadas y a evitar litigios³⁰. Las aportaciones del público pueden complementar los recursos con que cuentan los gestores para desarrollar normas y estándares así como para el seguimiento, la inspección y la ejecución a través de la identificación de amenazas ambientales e incumplimientos, ya que en muchas ocasiones conocen mucho mejor que las agencias gubernamentales el entorno local y las condiciones socio-económicas³¹.

Las instituciones internacionales y nacionales que llegan a acuerdos en materia de cuencas hidrográficas no reflejan suficientemente los intereses locales, están demasiado alejados de los recursos hídricos en cuestión y no están incentivadas para atender a la realidad de la calle. Es importante involucrar al público en general en los debates sobre el futuro de la cuenca hidrográfica, con el objeto de reunir el conocimiento local relevante y favorecer la aceptación de las medidas adoptadas. Es necesario encontrar una fórmula más abierta e interactiva de gobernanza ambiental que involucre a una amplia serie de partes interesadas para que la gestión de las cuencas hidrográficas sea eficiente³².

La necesidad de utilizar metodologías participativas es reconocida en la Declaración de Dublín sobre Agua y Desarrollo Sostenible (1992), en el Capítulo 18 de Agenda 21 ("Protección de la calidad y el suministro de los recursos de agua dulce"), en la Declaración Ministerial de la Conferencia Internacional sobre Agua Dulce (Bonn,

²⁹ UNESCO/IHP (1999)

³⁰ Moster *et al.* (1999)

³¹ Bruch, C. (2001)

³² Moss, T. (2001)

2001), el propio Plan de Implementación y la iniciativa de la UE “Agua para la Vida” o el Plan de Implementación aprobado en la Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible (Johannesburgo, 2002).

Para poder ejercer de forma efectiva la participación es necesario el acceso a la información, y corresponde a los Estados garantizar la provisión de información por parte de las administraciones y el acceso por parte del público a la información que solicite³³.

La necesidad de garantizar la participación pública se centra en tres tipos de procesos diferentes³⁴: 1) los conducentes a autorizar o no determinadas actividades con trascendencia medioambiental; 2) los relativos a la elaboración de planes, programas y políticas sobre medio ambiente y 3) la elaboración de disposiciones reglamentarias o de instrumentos normativos.

La Directiva Marco del Agua establece en su preámbulo que su éxito dependerá de la colaboración estrecha y una actuación coherente de la UE, los Estados miembros y las autoridades locales, pero también de la información, las consultas y la participación del público, incluidos los usuarios. En concreto, la disposición que se refiere a la participación pública es el artículo 14 que establece la obligación para los Estados miembros de comenzar a organizar la participación pública en el contexto de las demarcaciones hidrográficas y específicamente en el desarrollo de los planes hidrológicos de cuenca. Además, este artículo establece la obligación de los Estados miembros a fomentar la participación activa de todas las partes interesadas en la aplicación de esta Directiva. La DMA no recoge ninguna fórmula para articular esta participación activa, los Estados miembros pueden establecer libremente los mecanismos para conseguir tal participación.

Teniendo en cuenta las disposiciones sobre participación pública de la DMA, deberán introducirse modificaciones en la estructura institucional hídrica española, para poder cumplir con esos objetivos. En España la participación es muy reducida, se limita a la de los usuarios en

³³ IberAqua (2002)

³⁴ Fabra, A. (2002)

la gestión hidrológica y a una participación de lo que se entiende como público interesado en la planificación (tabla 3.1)

Tabla 3. 1. PARTICIPACIÓN EN LAS CONFEDERACIONES HIDROGRÁFICAS

ÓRGANOS DE GOBIERNO	JUNTA DE GOBIERNO
Órganos de Gestión	Asamblea de Usuarios Comisión de Desembalse Juntas de Explotación Juntas de Obras
Órganos de Planificación	Consejo del Agua de la Cuenca

Fuente: Elaboración Propia

3.5. AGENTES DE LA GESTIÓN HIDROLÓGICA

La gestión integral del agua la realizan las cuencas hidrográficas, donde transcurre la mayor parte del ciclo hidrológico y alrededor de las cuales se estructura el mercado español del agua.

En la actualidad, la Administración General del Estado gestiona a través de las Confederaciones Hidrográficas ocho cuencas (Norte, Ebro, Júcar, Segura, Guadalquivir, Guadiana, Tajo y Duero), algunas de ellas abarcan en su ámbito territorial varias Comunidades Autónomas. Además, hay que añadir Canarias, Baleares y Ceuta y Melilla.

Las cuencas que abarcan en su territorio sólo a una Comunidad Autónoma (cuencas intracomunitarias), son los gobiernos autonómicos los que han asumido la responsabilidad de la gestión del agua, como es el caso de las cuencas interiores de Andalucía, Cataluña, Baleares, Canarias, Galicia Costa y País Vasco. Los ríos de estas comunidades son relativamente cortos si los comparamos con los principales ríos de nuestro país (Ebro, Duero, Tajo, Jucar, Segura, Guadiana y Guadalquivir).

Las Confederaciones Hidrográficas regulan los recursos existentes, los distribuyen en el espacio y en el tiempo, y garantizan la adecuada explotación de las infraestructuras hidráulicas.

Hay un numeroso grupo de agentes encargados de los servicios relacionados con la gestión del agua (extracción, embalse, transporte, potabilización, distribución, recogida y depuración de aguas residuales), como se puede observar en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2. SERVICIOS DE AGUA Y MECANISMOS DE RECUPERACIÓN DE COSTES

SERVICIO	AGENTES	USUARIO/CONTAMINADOR	COSTES FINANCIEROS	COSTES AMBIENTALES	MECANISMOS DE RECUPERACIÓN DE COSTES
Embalses y transporte en alta (aguas superficiales)	Organismos de Cuenca Sociedades Estatales y otros	Doméstico Industrial Agrícola	Costes de inversión, mantenimiento y conservación	Daños ambientales provocados por la captación y el transporte de agua	Canon de Regulación Tarifa de Utilización de Agua
Extracción de aguas subterráneas	Ayuntamientos, Comunidades de Regantes o usuarios individuales	Doméstico Industrial Agrícola	Costes de inversión, mantenimiento y conservación	Daños ambientales provocados por la extracción de agua de los acuíferos	Fijados por los Ayuntamientos y Comunidades Regantes
Abastecimiento urbano	Ayuntamientos o Comunidades Autónomas	Doméstico Industrial	Costes de inversión, mantenimiento y conservación	Daños ambientales provocados por el uso y la potabilización de agua	Tarifa del Servicio de Abastecimiento
Distribución de agua de riego	Comunidades de Regantes o usuarios individuales	Agrícola	Costes de inversión, mantenimiento y conservación	Daños ambientales provocados por el uso del agua y la contaminación difusa	Derrama o parte proporcional de costes incurridos
Alcantarillado y depuración de aguas residuales en zonas urbanas	Ayuntamientos y Comunidades Autónomas	Doméstico Industrial	Costes de inversión, mantenimiento y conservación	Daños ambientales provocados por la contaminación del agua y los residuos	Tasas de Alcantarillado Canon de Saneamiento
Control de vertidos	Organismos de Cuenca	Doméstico Industrial	Costes de inversión, mantenimiento y conservación	Daños ambientales provocados por los vertidos a la naturaleza	Canon de Control de Vertidos y otras figuras

Fuente: Precios y Costes de los servicios de agua en España (MMA, 2007)

El suministro de agua a los ciudadanos constituye una responsabilidad de la Administración Pública según señala la Ley 39/1988 Reguladora de las Haciendas Locales. La gestión del agua ha experimentado un proceso de descentralización de las administraciones públicas. A los municipios les compete el denominado ciclo de agua

urbana, donde se incluyen los servicios de abastecimiento, alcantarillado y depuración de agua. En España se contabilizan 8.100 municipios, muy heterogéneos respecto a su extensión y población, que dan lugar a diversos modelos de gestión del agua, en los que las concesiones quedan en manos de empresas privadas, públicas o mixtas. También suele ser habitual que los servicios de abastecimiento y saneamiento de agua sean prestados a través de consorcios o mancomunidades, aunque, normalmente, la prestación de este servicio se realiza a través de sociedades anónimas, en las que el único accionista es el propio Ayuntamiento o compañía privada concesionaria, estando sometidas las tarifas de abastecimiento al régimen de precios públicos.

La gestión interna de la sociedad anónima es tarea de la propia entidad, aunque no es así para el caso de la fijación de precios o tarifas de abastecimiento que se ven sometidas al régimen de precios públicos. La propuesta tarifaria puede partir de la sociedad que presta el servicio, sin embargo es la Administración Regional, tras un acuerdo municipal previo, la que, en última instancia consiente su aprobación definitiva.

Los sistemas tarifarios empleados, como ya se ha contemplado en el capítulo anterior, son muy heterogéneos, con independencia de la gestión pública o privada del servicio.

Se dan sistemas tarifarios que trasladan completamente los costes a los usuarios, aunque son lo menos habituales y se localizan donde el recurso resulta más escaso, y sistemas que aplican precios muy bajos, inferiores a sus costes efectivos, y otros sistemas, poco generalizados, que introducen incentivos al uso eficiente del agua.

3.6. LA GESTIÓN DE RIESGOS-SEQUÍAS.

La sequía es un fenómeno pasivo y no se considera una catástrofe natural propiamente dicho pero su impacto puede ser muy severo³⁵. Las épocas de sequías generan situaciones de disminución de los recursos hidráulicos disponibles para satisfacer las demandas de la cuenca afectada. La principal consecuencia es la necesidad de restringir determinados usos, considerando la prioridad del abastecimiento humano y de los condicionados ambientales tolerables en los ecosistemas asociados a ríos y humedales. Son los regadíos los primeros que sufren restricciones, y éstas producen tensiones importantes dentro de una misma cuenca y en cada sistema de explotación, dado que los afectados presionan al Organismo de Cuenca para minimizarlas, aún a costa de disminuir la garantía de los usos prioritarios mencionados.

En este contexto, el Órgano de Cuenca debe ir tomando decisiones en búsqueda de posiciones de equilibrio, apoyado en los Decretos de Sequía. Si la situación se hace más crítica, y las restricciones afectan sensiblemente a los abastecimientos, que es el consumidor prioritario con sólo un 15% del consumo total de agua, se manifiesta la deficiente gestión global de todos los implicados. Tales restricciones originan al usuario la necesidad de utilizar agua mineral embotellada, cuyo costo al usuario es 500 veces la servida por la red domiciliaria.

Para el ciudadano, los responsables de los abastecimientos son las Entidades Locales, y esto genera controversias y debates que dificultan aún más la adopción de soluciones.

El Real Decreto Legislativo 1/2001 de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Agua (TRLA), establece en su Artículo 58: "En circunstancias de sequías extraordinarias, de sobreexplotación grave de acuíferos, o en similares estados de necesidad, urgencia o concurrencia de situaciones anómalas o excepcionales, el Gobierno, mediante Decreto acordado en Consejo de Ministros, oído el Organismo de cuenca, podrá adoptar, para la

³⁵ Bruins, H.J. (2002)

superación de dichas situaciones, las medidas que sean precisas en relación con la utilización del dominio público hidráulico, aún cuando hubiese sido objeto de concesión”.

Referente a este Artículo 58³⁶, el Gobierno dictó el R.D. 531/1992 de 22 de mayo, con vigencia hasta el 31/12/1993, por el que se adoptaban medidas administrativas especiales para la gestión de los recursos hidráulicos, que fue prorrogado hasta el año 1996, por la continuación de la sequía durante el periodo 1002-1995. Su contenido se puede resumir en:

- Las Confederaciones vigilarán la gestión rigurosa de los recursos.
- Determinarán los criterios de prioridad para la asignación del recurso.
- Establecerán las reducciones en las dotaciones de todos los usos con efectos incluso en los derechos concesionales.
- Quedan facultadas para reducir o suspender cualquier aprovechamiento.
- Además, pueden adoptar cuantas medidas exija el cumplimiento de las funciones encomendadas, imponiéndolas a los usuarios.
- Se estableció una Comisión Permanente de las Juntas de Gobierno de las Confederaciones para el más perfecto cumplimiento de sus funciones.

Este Decreto fue muy imprescindible y eficaz para la situación crítica que atravesaron muchas cuencas hidrográficas, con restricciones para todos los usos, incluidos el abastecimiento humano, que difícilmente se podrían haber resuelto con los medios de gestión ordinarios. Su aplicación debe darse en etapas previas a la sequía, antes de llegar las temidas restricciones, para procurar evitarlas.

³⁶ En su versión del Artículo 56 en la Ley de Aguas 29/1985 de 2 de Agosto

En la actualidad, la presente sequía, se afronta bajo la experiencia y los planes de gestión de sequía elaborados en la anterior (1992-95), y esto hace que se estén retardando la aparición de las fuertes restricciones, pero se puede mejorar en la previsión, ya que los Planes Especiales de Actuación en Situaciones de Alerta y Sequía y los Planes de Emergencia en Abastecimiento deberían haber estado terminados en el 2003 y 2005, de acuerdo con el Artículo 27 de la Ley 10/2001 de 5 de julio del PHN.

Para los abastecimientos urbanos es importante contar con la garantía previa de los recursos hídricos necesarios, para evitar situaciones de hecho de gran impacto, dada la prioridad de este tipo de uso³⁷. Unos adecuados Plan Hidrológico de Cuenca, Programa de Medidas y Planes Especiales de Actuación en situaciones de Alerta y Sequía, son necesarios para luchar previamente contra la sequía.

3.7. GESTIÓN URBANA DEL AGUA

3.7.1. INTRODUCCIÓN

La evolución del abastecimiento hídrico se remonta cuando la humanidad se desplazaba buscando el curso de los ríos para resolver sus necesidades hídricas y alimentarias. Más tarde, los asentamientos también buscaban el hallazgo de una fuente manantial en un lugar alto, permitiendo la observación de efectos terapéuticos del agua.

En zonas secas la alternativa estaba en la construcción de pozos. En la civilización romana se construyen excelentes depósitos y conducciones para abastecimiento.

Los germanos utilizaron canalizaciones de barro y madera, a diferencia del plomo que usaban los romanos, no utilizándose de manera generalizada, hasta el siglo XVII, tuberías de hierro y más tarde de latón y cobre.

³⁷ MMA (2007c)

En la actualidad, la gran mayoría de los abastecimientos de agua urbana en España son más bien deficientes y distan mucho de ser los deseables y adecuados para la realidad tecnológica del país. Este problema no tiene fácil ni rápida solución, comienza con la necesidad de una decisión política firme y decidida y desborda a técnicos municipales y profesionales del sector.

El uso urbano del agua incluye los usos residenciales o domésticos; usos comerciales; industriales; y el denominado uso público, municipal o institucional (parques, calles, escuelas, hospitales, etc.).

Dentro del primer grupo, la demanda de agua para uso residencial, hay muchos factores a considerar: número de personas por hogar, tipología residencial, nivel de renta, clima, tarifa, existencia o no de contadores individuales, etc. En el segundo, los usos comerciales, se recoge el agua utilizada en oficinas, tiendas y otros establecimientos públicos. Seguidamente, los usos industriales recogidos dentro de los usos urbanos son sólo las industrias que se abastecen de la red municipal. Por último, los usos públicos también se suelen estimar a partir del tamaño del núcleo urbano y el nivel medio de renta³⁸.

La Ley de Aguas de 1985, recoge que el agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas: la escasez depende de que solamente el 2,59% del volumen total del agua del planeta es potable, presentándose en forma de hielo más del 99% de dicha cantidad. Se calcula en su cielo natural, que de los 500.000 km³ de agua que se evaporan cada año, a partir sobre todo de los Océanos, menos de una centésima parte es la que se precipita sobre los continentes siendo así utilizable³⁹.

La Organización Meteorológica Mundial ha analizado el problema de las reservas de agua dulce en nuestro planeta y advertía que los servicios hidrológicos e hidrometeorológicos de cada país tienen un reto que afrontar: la demanda creciente de agua dulce y potable por parte de la población.

³⁸ Sánchez Gonzalez, A (1993)

³⁹ Romero Martín, M.; San Martín Bacaicoa, J. (1999)

La falta de voluntad de los gestores políticos cuando se trata de un servicio público prestado en régimen de monopolio, sin la presión de la economía de libre mercado, produce un deterioro progresivo del sistema de abastecimiento de agua urbanas.

En España, tanto el abastecimiento de agua como el saneamiento son servicios públicos de competencia municipal, que otorgan las concesiones del servicio a empresas públicas, privadas o mixtas. Con la excepción del Reglamento de Suministro Domiciliario de Agua de Andalucía, los derechos y obligaciones de los usuarios y las empresas suministradoras únicamente se establecen mediante ordenanzas municipales o los acuerdos que regulan las concesiones, una disposición que provoca que no estén garantizados unos requisitos mínimos de calidad del servicio a nivel nacional.

Además, el consumidor suele quejarse poco de las deficiencias de este servicio, el precio que paga por el agua es bajo, en relación a los costes reales del servicio, por lo que no se ve en su derecho. En algunas poblaciones españolas como Barcelona, la factura del agua se ha incrementado en los últimos años y el consumidor comienza a exigir calidad en el suministro y las Compañías se han visto obligadas a invertir para justificar el aumento de precios.

La entrada de Compañías Privadas en el mercado de la gestión del agua que enfatizan en la excelencia de su gestión para convencer a los Municipios puede haber provocado un cierto repunte en la dirección correcta por parte de algunos abastecimientos.

Los problemas existentes en las redes de abastecimiento son muchos, entre ellos podemos destacar:

- El “precio político” del agua y la política de subvenciones, que ocasiona una falta de recursos.
- El problema de las fugas y el desconocimiento del funcionamiento. Existe una grave falta de datos sobre volúmenes no contabilizados y fugas.

- El problema de la calidad de las aguas. Aunque está reglamentado no está totalmente solucionado.
- La insuficiencia de las redes. El consumidor se ve obligado a disponer de aljibes de almacenamiento o a consumir agua embotellada.
- La falta de regulación y automatización de los sistemas. Necesaria para una mejor calidad del servicio del abonado.

En la demanda de agua para uso urbano, prevalece aún el escepticismo sobre la eficacia y conveniencia de la aplicación de las medidas encaminadas a gestionar la demanda. Se comprueba en los documentos planificadores españoles que se suele menospreciar esta demanda por representar una proporción de gasto “mínima” respecto a los usos agrarios, todo esto conduce a la aplicación de métodos obsoletos para su estimación –proyecciones por extrapolación y la aplicación de dotaciones per cápita- no sólo en el ámbito nacional o de cuenca, sino también, en algunos casos, a escala local⁴⁰.

Es cierto que los niveles de consumo urbano en España están por debajo de otros referentes, como por ejemplo los estándares californianos, pero se está ignorando el coste ambiental originado por la producción de vertidos, y los niveles de exigencia cada vez más altos de calidad de las aguas de abastecimiento y devueltas al sistema.

3.7.2. PROBLEMÁTICA DE LOS ABASTECIMIENTOS URBANOS

La falta de control por parte de las Administración se muestra en la ausencia, casi total, de directrices y normas relativas a redes de distribución, a esto se suma la fragmentación de competencias en materia del agua. Esta última imposibilita la uniformidad de los criterios de gestión y esto ocasiona que el suministro de agua sea uno de los servicios peor valorados en muchas ocasiones.

⁴⁰ Pedregal Mateos, B. (2004)

Las instituciones responsables, directa o indirectamente, sobre nuestros abastecimientos son:

- Ministerio de Fomento.
- Ministerio de Industria.
- Ministerio de Medio Ambiente.
- Ministerio de Sanidad y Consumo.
- Confederaciones Hidrográficas.
- Consejerías de Obras Públicas.y
- Consejerías de Sanidad.
- Consejerías de Industria.
- Diputaciones Provinciales.
- Ayuntamientos.

Otro problema es no valorar el agua en el más amplio sentido, el agua es considerada como un bien público de coste nulo, debiendo el usuario pagar los costos de las infraestructuras hidráulicas necesarias para su transporte y uso pero no por el agua en sí misma como materia prima, esto supone que el agua tiene un precio político y provoca una separación de los recursos y la gestión, no podemos olvidar que el gran valor del agua está en su escasez⁴¹.

Si el agua no tiene valor los esfuerzos por mejorar su gestión son mínimos, por no decir nulos, en cambio, si sumamos a los costos de funcionamiento y explotaciones el costo del agua como materia prima el abastecimiento se verá obligado a acometer una gestión eficaz y de calidad.

El uso racional y eficiente del agua requiere de una política de costos reales, como recoge el decálogo de la Internacional Water Supply Association, IWSA (Asociación Internacional para el Abastecimiento de Agua) sobre la política de precios del agua cuya traducción se adjunta en la Tabla 3.3.

⁴¹ García-Serra García, J; Cabrera Marcel, E. (1999)

Tabla 3. 3. *POLÍTICA TARIFARIA DE LA INTERNACIONAL WATER SUPPLY ASSOCIATION (I.W.S.A)*

POLÍTICA TARIFARIA DE LA IWSA	
1.	Las autoridades en materia de distribución de agua, tienen la responsabilidad de tratar y suministrar agua en unas condiciones de calidad impecables.
2.	El agua potable es un recurso muy valioso y escaso, por lo tanto, se deberá cobrar siempre al consumidor.
3.	Una compañía suministradora de agua sea privada o pública, debe ser en todos los sentidos independiente. <ul style="list-style-type: none"> - Todos los costes en relación con el agua potable, esto es, captación, tratamiento y distribución (inversiones), así como los costes de explotación y mantenimiento deben ser recuperables con los ingresos obtenidos por la venta del agua. - Los beneficios provenientes de un servicio público no deben ir a parar a las arcas del estado. Por otra parte, las subvenciones estatales deben asignarse prudentemente.
4.	El recibo debe constar de una cuota de servicio y una cuota de consumo, teniendo en cuenta la estructura de costes. La cuota de servicio estará en relación con la capacidad de consumo a través de la acometida, según una serie de parámetros La cuota de consumo será proporcional al volumen registrado. Otras posibilidades son: las tarifas por bloques o progresivas.
5.	Las tarifas deben ser cobradas periódicamente, esto es, al menos una vez al año.
6.	Se deberá contar con una reserva apropiada de fondos, de tal forma que se pueda asegurar la continuidad y mantenimiento del servicio.
7.	Los precios del agua potable deben ser fijados de acuerdo con estándares económicos.
8.	Los consumidores deben ser informados de la política de precios.
9.	Los recibos mandados al consumidor tienen que ser de fácil interpretación e informativos. A cada cliente se le comunicará el volumen de agua consumido así como el precio medio por litro.
10.	En países en los que un determinado estrato social no pueda pagar el precio fijado, se deberá proporcionar un suministro básico, gratis, de al menos 5000-10000 litros por año, esto es, 15-30 litros por persona/día

La política de fijación de precios de España presentan muchos problemas: la gran disparidad de precios del m³, estructuras tarifarias distintas (cuota fija, cuota de servicio más cuota de consumo, cuota de servicio más cuota de consumo con escalones, cuota de servicio más cuota de consumo con mínimos, etc.) y que junto al recibo del agua se cobren cánones y otros servicios (alcantarillado, basuras,...).

Se trata del único suministro doméstico sin una normativa nacional que regule los derechos de los usuarios. La Federación de Consumidores en Acción (FACUA) ha detectado diferencias de hasta el 761% en las tarifas del suministro domiciliario de agua de 28 ciudades españolas, de ellas Córdoba aparece como la tercera ciudad con el agua más cara.

Desde comienzos de la década de los 90, y aprobado por el Decreto 120/91, Andalucía cuenta con un Reglamento, a través del cual se regulan las relaciones entre los usuarios y las entidades suministradoras de agua. Este hecho es pionero en toda España, y supone un avance en la defensa de los derechos de los usuarios y se consigue cubrir parte del vacío normativo existente en el sector.

Sería interesante distribuir el coste real entre los usuarios porque existen muchas contradicciones, por ejemplo hay poblaciones menos favorecidas, con grandes problemas de abastecimiento que pagan por el m³ de agua la mitad o la tercera parte de lo que se paga en otras zonas excedentarias, y permitiendo así su derroche, cuando para la energía eléctrica el precio es el mismo.

El usuario solo paga en la tarifa un canon fijo por m³ consumido igual para todo el Estado, destinado a financiar las inversiones realizadas en infraestructura, junto con un coste de distribución, que depende de la "compra" y el resto del coste se sufraga con diferentes Partidas Presupuestarias de la Administración, de modo que los usuarios de sistemas mejor gestionados o menor "compra" pagan menos por el agua.

Otra dificultad en la gestión de los sistemas de abastecimiento es el desconocimiento del sistema, principalmente en redes de poblaciones de menos de 50.000 habitantes, entre otros problemas destacan:

- Ausencia importante de mantenimiento preventivo del sistema.
- Ausencia de cartografía actualizada de las redes.
- Desconocimiento del funcionamiento hidráulico del sistema.
- No se optimiza el sistema eléctrico para abaratar la factura enérgica.
- Escasa infraestructura de medición.
- Ausencia de medidores para conocer el volumen de agua inyectado al sistema, especialmente en pequeñas poblaciones donde los contadores particulares de los abonados no informan del volumen de agua perdida por diversas razones.

La Administración, por tanto, cuenta con datos escasos de mediciones en los sistemas de abastecimiento, y en muchos casos son estimaciones no contrastadas, por lo que no pueden evaluar realmente sus rendimientos, los datos más serios proceden de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento.

El rendimiento volumétrico h de una red es el cociente entre el volumen de agua registrado (VR) y el volumen de agua inyectada (VI) en el mismo periodo de tiempo. El volumen no registrado (VNR) es la diferencia entre el inyectado y el registrado.

El volumen inyectado no suele tener problemas para su medición por la Compañía explotadora si existen aparatos de medición y se toman lecturas. El volumen registrado representa la parte del inyectado cuyo destino se puede determinar.

El rendimiento volumétrico no tiene por qué dar del 100%, una red con un rendimiento del 85% puede estar en muy buen estado de conservación, el 15% restante es lo que se denomina volumen no

registrado (VNR), del que no se conoce su destino. Hay múltiples factores por los que el agua no está registrada:

- Ausencia de contador en los puntos de consumo, normalmente en consumos institucionales como parques, limpieza de calles, Ayuntamientos, colegios, etc.
- Errores y averías en contadores.
- Tomas fraudulentas.
- Pérdidas por roturas.
- Fugas en redes de distribución.

Según la AEAS en 1992 se estima que el agua no registrada se reparte (Tabla 3.4):

Tabla 3. 4. PORCENTAJE DE AGUA NO REGISTRADA

VOLÚMENES DE AGUA NO REGISTRADOS:	
Fugas en redes de distribución	41
Error y avería de contadores	33
Consumos no controlados	15
Pérdidas en operaciones de tratamiento	4
Otros factores	7
Volumen no registrado total	100

Fuente: AEAS

En los pequeños y medianos abastecimientos es difícil evaluar los rendimientos reales, como el agua no cuesta dinero, no hay demasiada preocupación por las fugas que puedan sufrir, salvo cuando son necesarias las temidas restricciones.

En los grandes abastecimientos, gestionados por empresas especializadas, sí pueden evaluar mejor los rendimientos, aunque no suelen estar interesados en hacer públicos los resultados reales de su propia gestión, e intentan aparentar que son mejores.

Un grave problema que presentan muchos abastecimientos reside en los diámetros de las conducciones y en los volúmenes de depósitos que con el crecimiento rápido de las ciudades han quedado pequeños y envejecidos. Las consecuencias son volúmenes de depósitos insuficientes, niveles de presión mínimos e insuficientes suministros de agua en puntos distantes de la ciudad.

La Administración, tal y como ya se ha comentado, no tiene información suficiente y fiable sobre el estado de conservación de nuestras redes de distribución de agua y/o riego, y no ha supervisado eficazmente el mantenimiento de estas obras, es conveniente, por tanto, realizar controles eficaces tendentes a la mejora del funcionamiento del sistema.

En España los abastecimientos de agua no son atendidos tal cual su importancia demanda. Son necesarias dos medidas concretas⁴², por un lado, la creación de un organismo regulador que defina los estándares de calidad necesarios en la prestación del servicio, diseñe claras directrices para establecer tarifas que recuperen la totalidad de los costes, exija que las inversiones que contemplan las tarifas se ejecuten, todo ello sin abandonar la política de carácter social.

Por otro lado, la segunda medida es la nueva política tarifaria que erradique los subsidios y permita modernizar estos servicios al margen de la actual tutela de la administración.

⁴² Cabrera, E., et al. (2004)

3.7.3. MODALIDADES DE GESTIÓN

Tradicionalmente se han distinguido dos grandes modalidades de prestación de los servicios públicos:

- La gestión directa se puede realizar directamente por la propia Entidad Local (servicios municipales, mancomunidades de servicio), por un organismo autónomo local o por una sociedad mercantil cuyo capital social pertenezca íntegramente a la Entidad Local (Empresa Pública).
- La gestión indirecta puede adoptar la forma de concesión, gestión interesada, concierto, arrendamiento o sociedad mercantil cuyo capital social pertenezca sólo parcialmente a la Entidad Local (Empresa mixta). De estas cinco fórmulas destacan como más utilizadas en el sector del agua: la concesión y la empresa mixta.

La concesión se define como aquel modo de contratación entre Administración y particular por el cual la primera cede al segundo la gestión de un servicio público que el empresario prestará a su riesgo y ventura, normalmente acompañado de una inversión del concesionario (obra e instalaciones) que irá recuperando con las tarifas del servicio⁴³, aunque la Administración sigue siendo titular del servicio. En el servicio de abastecimiento de agua estamos ante un monopolio donde hay una prestación patrimonial de carácter público que tiene naturaleza de tasa.

En la empresa mixta se trata de conseguir que la iniciativa privada aporte ayuda financiera, experiencia industrial y eficacia gerencial a un servicio público, sin que la Administración pierda por ello presencia en la dirección y gestión de aquel. Hay claramente una gestión indirecta, tanto si la participación pública es mayoritaria como si es minoritaria.

Concesión y empresa mixta, aunque se parecen, no son lo mismo (no se "otorga concesión a la empresa mixta, sino que ésta es el

⁴³ Ariño Ortiz, G; Sastre Becerro, M. (1999)

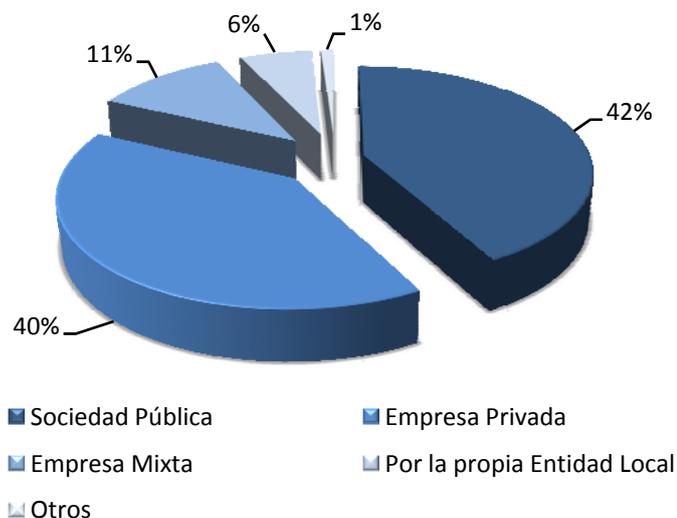
resultado de otro contrato –el de sociedad- que es, en sí mismo, un título o modo de gestión del servicio, sin que sea necesario otorgarle ningún otro). Pero tienen muchos puntos en común, como técnicas que son de gestión de servicios públicos con aportación de capital y dirección privadas, como son:

- a) Las dos son un capital privado adelantado que se pone a disposición de la Comunidad.
- b) Las dos tienen carácter temporal, con un régimen de reversión obligada y gratuita al finalizar el plazo.
- c) Ambas tienen derecho al mantenimiento del equilibrio financiero en la gestión del servicio, incluido un “normal beneficio industrial” para el concesionario o el “beneficio mínimo que se determine” para el capital privado de la empresa mixta.

Según la Encuesta de la AEAS⁴⁴, al 42% de la población se le suministra agua a través de entidades cuyo régimen jurídico es sociedad pública; al 40% a través de sociedades privadas, al 11% a través de empresas mixtas; al 6% a través de las propias corporaciones locales y al 1% restante, a través de otros sistemas de gestión (Figura 3.2).

⁴⁴ Asociación Española de Empresas de Abastecimiento y Saneamiento (2004)

Figura 3. 2. RÉGIMEN DE GESTIÓN DEL SERVICIO DE SUMINISTRO URBANO DE AGUA. PORCENTAJE SEGÚN POBLACIÓN



Fuente: AEAS (2004)

En municipios inferiores a 100.000 habitantes, a la población se le suministra agua mayoritariamente a través de empresas privadas. Por el contrario en municipios mayores a 100.000 habitantes, incluidas las áreas metropolitanas, a la población se le presta el servicio mayoritariamente a través de entes públicos, ya sea a través de la propia corporación o a través de sociedades públicas.

La forma de gestión a través de empresa mixta es más frecuente conforme crece el tamaño de las poblaciones, salvo en las áreas metropolitanas donde no se da este régimen de gestión⁴⁵.

Las tarifas de los servicios de abastecimiento de agua –ámbito municipal- están sometidas a un control financiero por parte de un órgano regulador de las Comunidades Autónomas. Las Comisiones de Precios, que son los órganos reguladores autonómicos, establecen un régimen de precios autorizados, de esta manera la modificación al alza requiere autorización administrativa previa.

⁴⁵ AEAS (2004)

3.7.4. MEDIDAS PARA GESTIONAR LA DEMANDA

Es difícil de prever y cuantificar el grado de aceptación social de las medidas propuestas para gestionar la demanda, su éxito en una población determinada no garantiza el éxito global.

Una de las medidas diseñadas para gestionar la demanda de agua urbana es la actuación sobre la estructura tarifaria, su aplicación no está exenta de controversia. Algunos autores son partidarios de aplicar tarifas de agua urbana que incentiven el ahorro, otros encuentran razones de injusticia social por ejemplo para usuarios con rentas bajas y familias numerosas.

Los partidarios de las medidas de incremento de las tarifas reconocen que el rechazo a estas medidas se encuentra en el postulado: "El régimen económico y financiero del sistema de abastecimiento de agua debe proteger a los usuarios de bajo nivel de ingresos y a los usuarios cuya actividad productiva no permite sufragar los costes íntegros del agua"⁴⁶.

Una postura intermedia se decanta por otras alternativas de gestión de la demanda como campañas educativas e informativas orientadas a concienciar a la población sobre la escasez real del agua, programas de incentivos a la utilización de tecnologías ahorradoras de agua o bien medidas conducentes a mejorar la eficiencia del sistema de distribución evitando fugas o tomas ilegales⁴⁷.

En España, tanto el abastecimiento de agua como el saneamiento son servicios públicos de competencia municipal, de prestación obligatoria por el municipio y reservados a favor de éste. La legislación no siempre cumple el principio de autonomía local, dado que algunas Comunidades Autónomas han promulgado legislaciones para la ordenación y desarrollo del abastecimiento de agua y del saneamiento, de tal forma que los servicios del agua urbana se caracterizan por la superposición de distintos niveles de actuación y por la intervención de diversas Entidades actuantes.

⁴⁶ Garrido Colmenero, A. (1999)

⁴⁷ Arbués Gracia, F. y Barberán Ortí, R. (1999)

Tradicionalmente la tarifa de agua urbana se le ha denominado precio “político” o lo que es lo mismo un precio subvencionado, sin embargo la Administración se ve forzada a eliminar gradualmente estas subvenciones por el aumento de gastos en los Presupuestos Generales del Estado, además ha de cumplir con la Directiva 91/271/CE sobre Tratamientos de las Aguas Residuales Urbanas, por lo que hay que adaptar el sistema a la pretendida autofinanciación del abastecimiento y saneamiento. Esto significa que el servicio de abastecimiento de agua y saneamiento se debe financiar principalmente vía tarifas y que hay que ofrecer un servicio más caro y completo, que incluya la intercepción y la depuración de las aguas residuales urbanas⁴⁸.

El nivel de satisfacción o de queja de los usuarios de un servicio de agua urbana depende de la relación entre la calidad y el precio del servicio. Aunque los usuarios se muestran particularmente sensibilizados con la factura del agua y son reacios a su incremento, demandan una calidad del agua, garantía del suministro, atención e información al público, presión hidráulica en la red, etc., en definitiva exigen un precio justo “no abusivo” que no favorezca ni perjudique a ningún tipo de usuario, es decir que la estructura tarifaria sea equitativa.

La determinación de la tarifa del servicio es una tarea controvertida de búsqueda de equilibrio entre eficiencia económica y reparto equitativo de costes.

3.8. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA CALIDAD DEL AGUA

3.8.1. INTRODUCCIÓN

Las formas de vida terrestre, incluido el ser humano, dependen del agua dulce, un recurso mucho menos abundante que el agua salada, que, además, está resultando más escaso debido a la contaminación, la disminución de las aguas subterráneas no renovables y la reducción de la capacidad de retención consecuencia de la creciente deforestación.

Las estadísticas sobre el acceso al agua potable en condiciones seguras y al saneamiento adecuado son actualizadas periódicamente

⁴⁸ Fernández Pérez, Daniel (1999)

por el Comité Coordinador OMS/UNICEF. Los datos del año 2004 muestran que en el mundo hay 1.100 millones de personas sin acceso a agua potable en condiciones seguras, y 2600 millones de personas sin un adecuado tratamiento sanitario.

La Organización Mundial de la Salud informa que existe una relación directa entre los problemas de abastecimiento y el nivel de salud de la comunidad, y, además, hay que considerar el riesgo de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, dado que puede comprometer seriamente un abastecimiento hídrico suficiente y de calidad para el consumo público.

El Real Decreto 1138/1990 de 14 de Septiembre por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público, tiene en cuenta la directiva 80/778/CEE de 15 de Julio, actualizando así lo dispuesto en el anterior Real Decreto 1423/1982 de 18 de Junio.

Las características organolépticas y físico-químicas del agua que abastece a las comunidades, debe cumplir lo previsto en el Real Decreto publicado en el B.O.E. de 20 de Septiembre de 1990. La cloración sistemática juega un papel determinante en la prevención de las enfermedades de transmisión hídrica y para que las aguas abastecidas sean bien aceptadas por la población, es imprescindible que se vigilen las exigencias de color, turbidez, olor, sabor, dureza y oxígeno disuelto, como principales parámetros, pues con ello se evita que la población recurra para su consumo a otras aguas no controladas⁴⁹.

La calidad del agua es una preocupación fundamental en la Directiva Marco del Agua, marcando principios y actualizando disposiciones ya existentes. En el Plan Hidrológico Nacional se dedican importantes cantidades de dinero a la depuración, permitiendo la reutilización de aguas depuradas.

Los planes Hidrológicos de cuenca deben contener “las características básicas de calidad de las aguas y de la ordenación de los vertidos de aguas residuales” (Artículo 40.e de la Ley de Aguas).

⁴⁹ Romero Martín, M.; San Martín Bacaicoa, J. (1999)

También deben establecerse los “objetivos de calidad que deban alcanzarse en cada río o tramo de río”, según los usos previstos para las aguas (Artículo 79 del Reglamento de la Administración Pública del Agua) y, además, “los procedimientos, líneas de actuación y características básicas de la ordenación de vertidos que se precisen para conseguir la adecuación de la calidad de las aguas a los objetivos de calidad de las mismas” (Artículo 80 del Reglamento de la Administración Pública del Agua).

Definir los objetivos de calidad por parte de la Administración competente en la materia en cada Plan Hidrológico de cuenca supone un compromiso de actuaciones de depuración, prevención y gestión de la contaminación sobre el medio hídrico, debiendo cumplir las condiciones impuestas por las Directivas de la Unión Europea en relación a la calidad mínima exigida al agua para los usos de abastecimiento urbano, vida piscícola y baño.

La Ley de Aguas, en su Artículo 105, establece el canon de vertido “de acuerdo con las previsiones de los Planes Hidrológicos respecto a la calidad de las aguas continentales, de modo que se cubra la financiación de las obras necesarias, incluidas en los respectivos Planes Hidrológicos de cuenca, para el cumplimiento de dichas previsiones”, el valor de este canon se establece con la finalidad de sufragar los gastos en los que la Administración hidráulica deberá incurrir para mantener una calidad de las aguas.

3.8.2. EL CICLO DEL AGUA

El volumen total de agua en el mundo permanece constante. Lo que cambia es la calidad y la disponibilidad. El agua está constantemente reciclándose, un sistema conocido como el ciclo del agua o ciclo hidrológico, impulsado por la energía del Sol, realiza la evaporación del agua superficial, que posteriormente pasa a la atmósfera en forma de vapor y finalmente retorna sobre la superficie.

En este ciclo, el hombre ha ido introduciendo modificaciones para poder utilizar el agua para su provecho, sea para su propio consumo

personal, sea para obtener algún beneficio mejorando cosechas, obteniendo energía o utilizándola en los procesos industriales.

Por tanto, se ha ido originando el establecimiento de diferentes ciclos de agua que modifican su circulación e implican una modificación de sus características, ya que ésta ve degradada su calidad. Este hecho se ha ido incrementando conforme la actividad humana ha sido más intensa, a medida que se va produciendo la concentración de la población en núcleos cada vez más grandes, la cantidad de vertidos y su impacto aumenta.

En términos de volumen total, el 97,5% del agua del mundo es salina con un 99,99% de ella que se encuentra en los océanos, el resto forman los lagos salinos, por ello sólo el 2,5 % del volumen de agua en el mundo es agua dulce. Este volumen de agua dulce no está totalmente disponible para el consumo humano, aproximadamente un 75% de ella está inmovilizada en los casquetes polares y en los glaciares, un 24% está en el subsuelo como aguas subterráneas, y el 1% restante se localiza en ríos y en el suelo⁵⁰.

3.8.3. CALIDAD DEL AGUA POTABLE

3.8.3.1. INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA POTABLE

El agua para el consumo humano proviene de masas de aguas subterráneas, extraída mediante pozos, o aguas superficiales, mediante captaciones situadas en los ríos o embalses. El agua absorbe tanto las sustancias naturales como las producidas por el hombre, convirtiendo el agua, en muchos casos, inadecuada para su consumo sin algún tipo de tratamiento.

Se han ido desarrollando reglamentaciones diversas que definen los indicadores y valores que éstos deben alcanzar para que el agua pueda destinarse al consumo humano, al igual que existen indicadores para evaluar la calidad del agua fluvial.

⁵⁰ Gray, N.F. (1996)

La normativa española viene dada por la Reglamentación técnico-sanitaria para el abastecimiento y control de la calidad de las aguas potables de consumo público del año 1990, que recoge determinados caracteres a considerar como:

- Organoléptico, donde se establecen aspectos como color, turbidez, olor y sabor.
- Fisicoquímicos, que incluyen temperatura, pH, conductividad, cloruros, oxígeno disuelto y sales.
- Referentes a sustancias no deseables, como nitritos, nitratos, amonio, oxidabilidad, carbono orgánico total, hidrocarburos, tensioactivos o compuestos organoclorados.
- Sustancias tóxicas, donde se encuentran metales pesados, pesticidas y otros compuestos orgánicos como hidrocarburos policíclicos aromáticos.
- Microbiológicos, incluyen coniformes fecales y totales.
- Asociados a radiactividad.

La mayoría de estos indicadores están presentes en la Directiva 98/93 de la Unión Europea que estipula como requisitos mínimos que las aguas para consumo humano son salubres y limpias cuando a) no tienen tipo alguno de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un peligro para la salud humana y b) cumplan los requisitos mínimos especificados referidos a un conjuntote parámetros microbiológicos y parámetros químicos (nitritos, nitratos, metales, plaguicidas y diferentes compuestos organoclorados).

Además, la normativa establece una lista de parámetros indicadores, para los que reestablecen unos valores, cuyo incumplimiento provocará la necesidad de estudiar si conllevan algún riesgo para la salud humana, como son el color, olor, sabor, turbidez, conductividad, pH, carbono orgánico total, oxidabilidad, hierro y manganeso.

Las principales sustancias indeseables en el agua las podemos agrupar:

- Color: Presencia de materia orgánica disuelta originada por suelos de turba o minerales de hierro y manganeso.
- Materia suspendida: Mineral o materia vegetal que no sedimenta en las condiciones reinantes.
- Turbidez: Finas partículas de mineral en suspensión, alta concentración de bacterias o burbujas por la excesiva aireación.
- Patógenos: Virus, bacterias, protozoos u otro tipo de organismos patógenos que pueden ser perjudiciales para la salud del consumidor.
- Dureza: la excesiva dureza se alcanza generalmente en los recursos de agua subterránea.
- Sabor y olor: Se deben a varias razones tales como la contaminación por aguas residuales, excesiva concentración de productos químicos como el hierro, manganeso o aluminio, vegetación en estado de putrefacción, condiciones de estancidad debido a la falta de oxígeno en el agua, o a la presencia de algas.
- Productos químicos nocivos: Existen numerosos productos químicos orgánicos e inorgánicos que son tóxicos y nocivos que pueden aparecer en las aguas.

3.8.3.2. PLANTAS DE TRATAMIENTO

El tratamiento y la distribución del agua es el proceso por el cual el agua bruta se convierte en sana, apta para el consumo y agradable de beber y, además, se transporta hasta el consumidor. El tratamiento del agua debe producir agua con las siguientes características:

- Grata: Que no tenga un sabor desagradable.
- Saludable: Que no presente ningún organismo patógeno o producto químico que sea nocivo para el consumidor.
- Limpia: No debe contener materia suspendida ni turbidez.
- Sin color y sin olor: que no sea agua antiestética.
- Razonablemente blanda: Que no necesite un uso excesivo de detergentes y jabones.
- No corrosiva: Que no oxide las tuberías.
- Bajo contenido en materia orgánica: Que no favorezca crecimiento biológico en tuberías y depósitos de almacenamiento.

Una planta de tratamiento tiene que ser capaz de proporcionar agua a la red de distribución de alta calidad y que cumpla con los requisitos que establece la reglamentación.

Para separar los sólidos, se puede realizar a partir de la disminución de la velocidad de la corriente (sedimentación) o a través de barreras físicas que los retienen (filtración), en algunos casos con la ayuda de interacciones químicas entre el sistema filtrante y la sustancia (adsorción con carbón activo).

Cuando las partículas son muy pequeñas y es necesario aumentar su tamaño, se pueden utilizar aditivos químicos que mejoren el rendimiento a través de las operaciones de coagulación.

Por último, para asegurar que el agua distribuida presente unas condiciones sanitarias aceptables, siempre será necesaria una etapa de desinfección.

La etapa final del proceso de tratamiento de aguas potables siempre es la desinfección, en la actualidad el agente desinfectante más usado es el cloro, sea en su forma gaseosa o como hipoclorito.

3.8.3.3. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA.

Después del tratamiento el agua se distribuye a los consumidores mediante una red de tuberías conocidas como conducciones de aguas que están enterradas, generalmente bajo carreteras y aceras. Además se necesitan depósitos de servicio y estaciones de bombeo.

Los depósitos de servicio se necesitan para asegurar que la demanda de agua se satisface completamente, con todos sus máximos, como la electricidad, la demanda de agua varía durante el día, además tienen otra función, que es proveer una capacidad de almacenamiento de reserva en caso de problemas en la planta de tratamiento o en las conducciones principales y también compensan cualquier variación en la calidad del agua.

Las torres de agua sirven para el mismo propósito que los depósitos de servicio excepto que son generalmente mucho más pequeñas, y sirven a una zona de distribución pequeña.

Las conducciones de distribución son una red de tuberías de variadas formas que están muy ramificadas y abastecen a las casas individuales.

Para las grandes ciudades el sistema de distribución está normalmente dispuesto por zonas de presión controlada desde un depósito de servicio específico que permite un mejor control de las fugas y del control de los consumos en cada distrito.

3.9. GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

La protección del Medio Ambiente es uno de los objetivos comunes de la Unión Europea desde el Tratado de Maastricht de 1992. La Directiva Marco del Agua “aspira a mantener y mejorar el medio ambiente acuático en la Comunidad. Este propósito está principalmente interesado en la calidad de las aguas...”. Los estados miembros tienen que preparar la legislación necesaria, controlar los avances y su ejecución en su país y, finalmente, informar de este proceso a Comisión Europea⁵¹.

La contaminación de las aguas por actividades humanas perjudica la calidad de las aguas de los ríos y de los acuíferos, los poderes públicos deben intervenir articulando una política ambiental en materia de calidad de las aguas de acuerdo a la Directiva Marco de las Aguas, con la que se deberá lograr un equilibrio entre los siguientes objetivos:

- Garantizar la seguridad del suministro de agua.
- La calidad y la cantidad de los recursos hídricos debe ser suficiente para satisfacer, además de las necesidades de agua potable, otras necesidades económicas.
- Proteger y preservar el buen estado ecológico y el funcionamiento del medio acuático.
- Prevenir o reducir los efectos adversos de las inundaciones y minimizar la incidencia de la sequía.

La cultura de prevención de la contaminación en origen aún es escasa, mientras el coste a corto plazo de todas las actuaciones dirigidas a controlar la contaminación es caro. Las medidas preventivas a largo plazo serían mucho más baratas que corregir la calidad de un agua cada vez más deteriorada.

⁵¹ Merkel, W. (2003)

El conflicto entre economía y ecología va en aumento, y puede agravarse en el caso de la liberalización del mercado de agua, si no se incluye en los contratos de los municipios con las empresas privadas el compromiso medioambiental.

La política de aguas en España utiliza el enfoque combinado seguido hasta ahora por la Unión Europea: La *norma de emisión* limita la contaminación a un determinado nivel determinado por los poderes públicos y para las sustancias tóxicas y peligrosas resulta la única forma de erradicar sus efectos negativos.

El *canon de vertido* incentiva las actuaciones preventivas o depuradoras de los particulares y los *objetivos de calidad* que son definidos en los Planes Hidrológicos de cuenca.

La Administración debería asumir una parte de los costes de control y supervisión de la calidad de las aguas, así mismo, los costes de gestión y de planificación y, además, los costes de restitución y corrección de impactos ambientales históricos, que serían sufragados por el canon de vertido y, por otra parte, el sector privado, en general, se reserva las medidas de depuración, que serían repercutidas a este mismo sector.

Una dificultad que se puede encontrar la Administración es la de conocer con detalle las curvas de costes marginales de depuración y la de costes sociales soportados por los ciudadanos por la pérdida de calidad en las aguas de sus ríos, por lo que la asignación óptima de un canon de vertido resulta difícil.

Las empresas intentarán transmitir sus costes ambientales a los consumidores, lo que dependerá de las elasticidades precio-demanda de sus productos, para elasticidades muy pequeñas el consumidor soportará dichos costes y, por el contrario, para demandas muy elásticas el productor no podrá transferir el impuesto ambiental al consumidor. El primer caso corresponde al consumo urbano de agua, dado que su demanda precio es muy inelástica, principalmente a niveles de consumos bajos asociados a rentas reducidas, de tal forma que la transmisión de costes de depuración urbana mediante tasas, repercutirá de manera regresiva en estos sectores de la población.

Respecto a las subvenciones que persiguen implementar medidas de prevención o depuración, hay que actuar con prudencia y conforme a lo estipulado por la Comisión de la UE, ya que al favorecer las condiciones de acceso de las empresas del sector al mercado se puede generar un incremento de la contaminación total.

3.10. CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUA

La gran mayoría de los numerosos estudios pronostican aumentos de la temperatura, reducción de las precipitaciones medias y aumento de la frecuencia de sucesos climáticos extremos, por lo que existe un riesgo real de que estos fenómenos en forma de Cambio Climático afecten a los recursos hídricos.

El problema es importante ya que en el caso español durante la segunda mitad del siglo XX se han registrado descensos de la precipitación anual estadísticamente significativos en varias cuencas, que junto con el aumento de temperatura conducen a una reducción de los recursos hídricos⁵².

El cambio climático acentuará la escasez de agua dulce en muchas partes del mundo durante los próximos 25 años, y su disponibilidad estacional será más incierta. La temperatura cada vez más alta de la tierra está originando cambios en la precipitación y la evaporación y, además, está acelerando la subida del nivel del mar, lo que puede salinizar los acuíferos y los cuerpos de agua superficiales a lo largo de la costa. De esta manera, la subida del nivel del mar y el cambio climático agravarán los problemas de escasez de agua y plantearán desafíos considerables a las comunidades de las zonas bajas de la costa.

El Libro Blanco del Agua en España⁵³ plantea dos hipotéticos escenarios: 1) aumento de 1º C en la temperatura media anual para el 2030 ; 2) además, disminución de un 5% en la precipitación media anual. Aún con escenarios tan moderados, llega a la conclusión (mediante modelización) que la aportación total en el conjunto de España

⁵² Ayala-Carcedo F.J. (2002)

⁵³ MMA (1998)

disminuiría como media entre el 5% (primer escenario) y el 14% (el segundo). En este segundo escenario, se producirían disminuciones de las aportaciones del 20% en las siguientes cuencas: Guadiana, Guadalquivir, Segura, Júcar y las Islas Canarias.

El *Principio de Precaución* aprobado por la UE en febrero de 2000 establece respecto a impactos / riesgos cuyos efectos negativos pueden dilatarse en el tiempo que “*los efectos potenciales a largo plazo deben ser tenidos en cuenta al evaluar la proporcionalidad de las medidas en forma de acción rápida para limitar o eliminar un riesgo cuyos efectos no aflorarán hasta diez o veinte años más tarde o afectarán a las generaciones futuras. Esto se aplica en particular a los efectos sobre los ecosistemas*”.

En aplicación al Principio de Precaución, España y en especial el territorio andaluz, están siempre en términos de riesgos hidrológicos y climáticos.

CAPÍTULO 4

LA GESTIÓN DEL AGUA EN ANDALUCÍA

4. LA GESTIÓN DEL AGUA EN ANDALUCÍA

4.1. INTRODUCCIÓN

Andalucía por su extensión, población, agricultura, desarrollo urbano, climatología, hidrología y sus infraestructuras hidráulicas ofrece un potencial inigualable para avanzar en una gestión del agua sostenible. Sin embargo, Andalucía sufrió una severa sequía entre la primavera de 1993 y diciembre de 1995, con una nula preparación para afrontarla y de la que salió fuertemente escarmentada. Además, ha sufrido unos gravísimos procesos de deterioro ambiental y un aumento descontrolado de los usos de agua.

Andalucía como gran parte de territorio español, se enfrenta a tres retos importantes: mejorar la eficiencia de los usos, mejorar la calidad ecológica de las aguas y mejorar las garantías del abastecimiento a toda la población y los usos más importantes.

En el año 2005 se ha creado la Agencia Andaluza del Agua, como organismo autónomo dependiente de la Consejería de Medio Ambiente, para coordinar y ejercer todas las competencias de la Junta de Andalucía en materia de aguas, esto significa un incremento muy importante de las competencias de la comunidad autónoma. La nueva administración andaluza del agua pretende impulsar un cambio en la dirección de la Nueva Cultura del Agua (NCA) en coherencia con la aplicación de la Directiva Marco del Agua. El traspaso de competencias está permitiendo a la administración andaluza asumir un papel más activo en esa transformación.

4.2. AGUA Y TERRITORIO ANDALUZ

Andalucía ya tiene competencias plenas sobre la gestión del agua y el dominio público hidráulico en el litoral andaluz: 31.741 Km² desde la desembocadura del río Chanza en Huelva a la del Almanzora en Almería. Este territorio representa el 36,4% de la superficie total de España y en él se concentra el 46% de la población así como el 40% del consumo de agua.

Las precipitaciones medias, resultantes del régimen pluviométrico de Andalucía, se establecen en 550 mm/año (38.628 hm^3), oscilando entre los 700-800 mm/año del litoral atlántico y la cuenca del Guadalquivir y los 300-350 mm/año del Sureste, presentando una gran irregularidad inter e intranual, es decir la recurrencia de situaciones de sequía¹ con fuertes impactos socioeconómicos junto a ciclos de precipitaciones más regulares, y así mismo, el momento en que las precipitaciones se presentan cada año, se desplaza dentro de un esquema general de periodo secoestival, propio del clima mediterráneo, pero al mismo tiempo con ciertas oscilaciones de avances o retrasos (ver ANEXO).

El clima de Andalucía es singular, la irregularidad de la disponibilidad de agua en el tiempo y en el espacio, hacen que cercanos a climas subdesérticos se encuentren ecosistemas de alta montaña con nieves permanentes o zonas de clima subtropical.

Un gran porcentaje del aporte hídrico de Andalucía, aproximadamente un 60%, se pierde por evapotranspiración, lo que limita la oferta de agua (6.000 hm^3 al año), por el contrario, su demanda (6.407 hm^3 al año) crece conforme aumenta la población, como también crece el índice de consumo/individuo al compás del desarrollo económico y social de la región², lo que refleja el déficit hídrico que soporta Andalucía. Gastamos un 15% de agua por encima de nuestros recursos medios, por tanto, no tenemos capacidad para soportar sin impacto ni un solo año de sequía en algunas zonas, ni dos años en la mayor parte de Andalucía³.

La escasez de agua representa una situación de déficit de agua almacenada con respecto a la demanda de agua, por tanto está directamente asociada al equilibrio entre las demandas locales-regionales y las condiciones climáticas, y a la planificación y gestión de los recursos hídricos, aunque puede ocurrir en ausencia de sequía, por la historia previa de gestión y consumos del agua y de la meteorología de años precedentes. En la cuenca del Guadalquivir la capacidad

¹ El último periodo de sequía severa se sitúa en los comienzos de los años noventa y en la actualidad estamos en el cuarto año de muy escasas lluvias.

² Suárez Japón, J. M. (2007)

³ Corominas Masip J. (2007)

aproximada de almacenamiento de agua se cifra en 7.000 hm³ y en el año hidrológico 2005-2006, aunque fue un año seco, mejoró la precipitación media anual con respecto al año anterior (de 253 mm a 462mm), aportando a los embalses un 37% más, sin embargo la escasez en este año era más alarmante que en el anterior⁴.

Andalucía se caracteriza por una enorme diversidad territorial. Al norte, se encuentra Sierra Morena formada de materiales antiguos, escasamente permeables, que no favorecen los afloramientos de aguas subterráneas, por lo que predominan los cauces superficiales y, por tanto, las presas para regularlos. La vegas del Guadalquivir es la zona preferente de regadío agrícola en Andalucía. En las Sierras Béticas, que se extienden desde el Estrecho de Gibraltar hasta los límites orientales de Andalucía, destaca la presencia de abundantes aguas subterráneas formadas en los macizos calcáreos permeables y en los acuíferos de las vegas fluviales.

El litoral mediterráneo y sus especiales condiciones climáticas, que hacen que los ríos se sequen o se desborden según la estación estival, permite los cultivos subtropicales de la costa granadina y los cultivos protegidos bajo plásticos.

En el litoral atlántico, con la especial configuración costera, se desarrollan sistemas agrícolas avanzados en la provincia de Huelva o procesos de cultivos agrícolas como la desecación de lagunas en las cuencas del Barbate y del Guadalete.

Parece obvio que el agua no es dissociable del resto de factores que componen el territorio y las actividades productivas.

⁴ Polo, M.J. y Losada M.A. (2007)

4.3. GESTIÓN Y USOS DEL AGUA EN ANDALUCÍA

4.3.1. GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA

En el siglo XXI se abre una nueva etapa de gestión del agua en Andalucía que atienda a los principios de su uso sostenible, superando la visión tradicional de financiación de grandes obras hidráulicas. Sostenibilidad, es un término, altamente utilizado, que engloba un uso racional que garantice la renovación y calidad del recurso a largo plazo. Aunque unas crecientes demandas, mayores que las dotaciones y unas actividades que deterioran la calidad del agua son actuaciones muy distantes de considerarse usos sostenibles.

El viejo paradigma de incrementar las posibilidades de oferta con la construcción de embalses y explotaciones de acuíferos ha dejado de ser sostenible social, económica y medioambientalmente, los trasvases son puestos en cuestión socialmente, en suma se requiere un cambio fundamental de gestión. La sostenibilidad del ciclo del agua ha de dirigirse hacia un uso más eficiente y ahorrativo de los recursos disponibles.

El conflicto ha sido resumido por Leandro del Moral, quien señala que la gestión del agua en Andalucía diseña “una realidad notablemente polarizada, tanto desde el punto de vista espacial, como temporal y sectorial: un gran volumen de agua (con variabilidad interanual de dotaciones en el valle medio y bajo del Guadalquivir, frente a menores disponibilidades para usos competitivos, con productividades elevadas, pero con otro tipo de limitaciones territoriales y sociales, localizados básicamente en el litoral mediterráneo y atlántico”⁵.

Para tratar de resolver los problemas de escasez de agua derivados más de las exigencias del consumo que de las condiciones meteorológicas, hay que comenzar por gestionar la demanda. El *Plan Andaluz de Medio Ambiente* (2004-2010) trata de gestionar el déficit hídrico a través del impulso de medidas de racionalización y uso eficiente del agua⁶: reducción de las pérdidas de agua en los usos

⁵ Moral Ituarte, I. y Pita López, M^a F. (2005)

⁶ El PAMA 1995-2000 también apostaba por una gestión eficiente del agua que puede conseguir reducir el déficit hídrico regional desde el 34% en 2002 al 29% en el 2012.

urbanos y agrarios, sistemas eficientes de riegos, análisis y establecimiento de los caudales ecológicos y aumento de la capacidad de depuración de aguas residuales y posibilidades de su reutilización, entre otras.

Las actividades económicas más importantes para el consumo de agua son: el regadío, la industria y los usos energéticos. El regadío es la actividad de mayor consumo de agua en nuestro país. Se suele repetir que el 70% de los recursos hídricos se destinan a la agricultura, este dato es especialmente notorio en Andalucía, por lo que la modernización de regadíos es imprescindible para reducir las pérdidas de agua de riego tanto por mal estado de las conducciones como por el uso de sistemas de riego con menores rendimientos en el uso del agua.

El reto de construir una nueva gestión andaluza de los recursos hídricos, se afronta por la Consejería de Medio Ambiente con la creación el uno de enero de 2005 de Agencia Andaluza del Agua con plenas competencias en materia de aguas, y con el objeto de cumplir la Directiva 2000/60/CE o Directiva Marco de Aguas.

Los usuarios del agua en Andalucía son muy heterogéneos en cuanto a usos, intereses y sistemas de regulación. Se distinguen dos grandes grupos de usuarios: los consumidores domésticos y los consumidores productivos.

En el grupo de los consumidores domésticos se comprueba un avance de la NCA, hay un cierto cambio en los hábitos de consumo en los hogares andaluces, al apreciarse un mayor ahorro⁷. Este consumo doméstico tiene una incidencia relativamente pequeña en el consumo general de agua en Andalucía, aproximadamente un 20% del recurso hídrico, además se ha desarrollado un considerable avance en las plantas depuradoras de aguas residuales de origen urbano.

El segundo grupo, el de los consumidores productivos, es un grupo muy heterogéneo en el que se observan las mayores resistencias a los planteamientos de la NCA y también la mayor incidencia en el

⁷ Según el Ecobarómetro Andaluz, en el año 2002, el 63% de los andaluces dice ahorrar agua en el hogar siempre o casi siempre.

consumo general de agua en Andalucía. Aquí se encuentran la agricultura de regadío, empresas industriales, empresas del sector de la construcción, y empresas del sector turístico, sectores cuya rentabilidad depende de la oferta de este recurso hídrico.

La cultura tradicional del agua está fuertemente arraigada en la población andaluza, el 80% de los andaluces cree que la causa del problema del agua en Andalucía radica en la falta de infraestructuras o en su deficiente estado de conservación⁸, es decir consideran un problema de oferta, y tan sólo el 20% restante lo considera como un problema de demanda, es decir, un uso excesivo de agua en los hogares y determinados sectores como la agricultura.

Según la encuesta del IESA 2001 casi el 60% de los andaluces reconocen que la factura del agua refleja un precio que está muy por debajo del coste real, lo cual es favorable para un avance de la NCA, mediante la implementación de políticas de ahorro basadas en desincentivar el consumo por la vía del encarecimiento de precios. El 70% de la población andaluza se muestra a favor de que el agua se considere como bien público gestionado por el Estado, lo que legitima una política de agua en consonancia con la NCA que regule los recursos hídricos en Andalucía.

La encuesta muestra que los andaluces tienen una fuerte identificación con su agricultura y no la responsabilizan del problema del agua, atribuyen más el problema a la falta de infraestructuras o el derroche de agua en los hogares, aunque conocen que la agricultura tiene una incidencia mayor en el consumo general de agua en Andalucía. Los andaluces apoyan la agricultura de regadío y no están dispuestos a sacrificarla por una nueva cultura del agua, por tanto sería conveniente plantear un acercamiento de la agricultura a la NCA, una nueva agricultura que surge en un marco propicio, ya que, la reforma de la PAC prevé desligar las ayudas del aumento de la producción y cumplir el principio de multifuncionalidad, es decir que la agricultura cumpla funciones productivas y de protección del medio ambiente.

⁸ Según la encuesta IESA-2001, donde los andaluces muestran su nivel de conocimiento sobre temas relacionados con el agua.

Todos estamos abocados a generar una gestión del agua sostenible factible con lo que Juan Corominas demandaba⁹: “evidenciamos que juntos los usuarios, los grupos sociales y las administraciones podemos avanzar, sin traumas, hacia un uso más racional del agua, lo que redundará en un replanteamiento general de la sostenibilidad territorial y del uso de los recursos naturales”.

4.3.2. GESTIÓN DE LOS ABASTECIMIENTOS URBANOS

Los abastecimientos urbanos incluyen actividades comerciales, industriales y centros oficiales conectados a las redes y los usos domésticos¹⁰, así mismo se incluye el turismo residencial y de la industria del ocio. Este último, en Andalucía, origina un consumo de agua similar, en ciertas ocasiones, a la de los riegos agrícolas, como es el caso de la Costa de Sol occidental con las cerca de 10.000 hectáreas de zonas ajardinadas, campos de golf, etc.

Andalucía ha padecido restricciones de agua en el periodo de sequía 1991-1995, en el que se vieron afectadas tres millones y medio de personas. El compromiso fundamental de las administraciones locales y autonómicas es evitar que se repitan esos hechos y, por otra parte, garantizar la calidad del agua.

El abastecimiento o suministro de agua es un servicio de titularidad local, por lo que las corporaciones locales tienen capacidad para determinar su gestión. En Andalucía, según el Informe del Defensor del Pueblo Andaluz¹¹, la gestión del servicio de abastecimiento de aguas se realiza mayoritariamente, por los Ayuntamientos, seguidos de las empresas privadas, sociedades mixtas y, entidades locales.

Sea cual sea el régimen de gestión se deben garantizar los “derechos sociales ciudadanos” de bienestar y cohesión social por encima de criterios de rentabilidad mercantil¹² y fuera de la cuestión

⁹ Corominas, J. (2003)

¹⁰ Según el Reglamento del Suministro Domiciliario de Agua en Andalucía son aquellos usos en los que el agua se utiliza exclusivamente para atender las necesidades primarias de la vida.

¹¹ Defensor del Pueblo Andaluz (2006)

¹² Del Moral Ituarte, L. (2007)

sobre la privatización o no de servicios municipales de agua, es necesaria la existencia de “instituciones públicas de regulación” que velen por la transparencia, incentiven la participación y el control ciudadano y aseguren los objetivos del servicio, por encima de los intereses privados, políticos o burocráticos¹³. La normativa autonómica andaluza regula la obligatoriedad de respetar mecanismos de información, comunicación y participación pública, así mismo potencia la integración en entidades supramunicipales del servicio en alta (captación, transporte, potabilización) para obtener una gestión adecuada.

El consumo de agua bruta para uso urbano en Andalucía se cifra en 102 m³/habitante/año y muestra diferencias significativas entre poblaciones, como Granada con 99 m³/habitante/año y Sevilla con 105,5 m³/habitante/año¹⁴. Lo que significa una dotación media aproximada de 300 litros/habitante/año de suministro urbano total¹⁵, donde los consumos domésticos netos representan 140 litros/habitante/año, prácticamente la mitad del suministro total.

En la actualidad, el agua, como bien de dominio público, se puede decir que es gratis, dado que el precio que se paga por la totalidad del servicio del ciclo urbano del agua- captación, potabilización, distribución, alcantarillado, saneamiento y depuración- solo traslada en parte los costes de la amortización y mantenimiento de las infraestructuras y de operación del sistema.

Los Ayuntamientos son los organismos responsables de aprobar las tarifas del agua y cualquier propuesta de modificación se debe elevar a la Comisión de Precios provincial o de Andalucía, dependiendo de la dimensión de la población. El Reglamento de Suministro Domiciliario de Agua de Andalucía regula la concreción de una estructura tarifaria comprensiva de los diferentes aspectos del servicio y sometida a un régimen de aprobación administrativa y participativa.

¹³ Arrojo, P. y otros (2005)

¹⁴ Defensor del Pueblo Andaluz (2006)

¹⁵ Incluyen usos industriales conectados a las redes de abastecimiento urbano, usos municipales y pérdidas de las redes.

4.4. CONFEDERACIONES HIDROGRÁFICAS

Andalucía está formada geográficamente por tres grandes unidades físicas: Sierra Morena, Valle del Guadalquivir y Cordilleras Béticas.

Sierra Morena es una zona montañosa no muy elevada (sus picos no suelen sobrepasar los 1000 m.) por la que drenan las aguas de los ríos Guadiana y Guadalquivir.

La mayor parte de nuestra comunidad la configura el valle del Guadalquivir, zona abrupta y con escasa altitud que con forma triangular, queda bordeado por las sierras y el océano Atlántico.

En las Cordilleras Béticas se encuentran las cumbres más elevadas de la Península Ibérica, y se extienden meridionales al valle del Guadalquivir. Se pueden dividir en Sierra Subbética y Sierra Penibética.

Entre ambas cordilleras y por una depresión longitudinal discurren el Guadalhorce, Genil y Guadiana Menor.

Toda esta vasta red hidrográfica que fluye por Andalucía se ha dividido en cuencas hidrográficas, que son terrenos en los que las aguas fluyen al mar a través de cauces secundarios que convergen en un cauce principal único, y tienen por objeto mejorar la gestión y planificación del agua. Aquellas cuencas pequeñas que se quieran agrupar con otras vecinas forman una demarcación hidrográfica, unidad principal de gestión. Los organismos de cuenca se denominan Confederaciones Hidrográficas y en Andalucía se encontraban cuatro confederaciones: Guadiana, Guadalquivir Guadalete-Barbate, Sur y Segura, hasta que la Junta de Andalucía asumió desde el 1 de enero de 2006 las competencias plenas en la gestión del agua y del dominio público hidráulico en la totalidad del litoral andaluz con la incorporación de las cuencas de los ríos Guadalete, Barbate, Tinto, Odiel, Piedras y Chanza a la Administración Autónoma.

Las cuencas del Guadalete y Barbate, situadas en Cádiz y hasta el 31 de diciembre de 2005 gestionadas por la Confederación

Hidrográfica del Guadalquivir, y las de Tinto, Odiel, Piedras y Chanza, que comprenden la práctica totalidad de la provincia de Huelva y cuya gestión dependía anteriormente de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, se integran en la Agencia Andaluza del Agua como Dirección General de la Cuenca Atlántica Andaluza.

La Agencia Andaluza del Agua se constituye el 1 de enero de 2005 como organismo autónomo dependiente de la Consejería de Medio Ambiente para coordinar y ejercer todas las competencias de la Junta de Andalucía en materia de aguas. Su creación da respuesta al periodo histórico en la gestión de los recursos hídricos de Andalucía que se ha abierto con el proceso de transferencia de las cuencas intracomunitarias y el nuevo marco de acción en la cuenca del Guadalquivir.

Así, la Junta de Andalucía ha asumido las competencias plenas en la gestión del agua y del dominio público hidráulico en el litoral andaluz con la incorporación el 1 de enero de 2005 de la antigua Confederación Hidrográfica del Sur, actualmente Dirección General de la Cuenca Mediterránea Andaluza, así como de las cuencas de los ríos Guadalete, Barbate, Tinto, Odiel, Piedras y Chanza, que desde el 1 de enero de 2006 se constituye como Dirección General de la Cuenca Atlántica Andaluza.

4.4.1. CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA.

Comprende la cuenca hidrográfica del río Guadiana y los territorios de las cuencas hidrográficas de los ríos Piedras, Odiel y Tinto. Abarca una superficie total de 60.361 Km² repartidos por varias provincias españolas pertenecientes a Extremadura, Andalucía y Castilla La Mancha. En nuestra comunidad ocupan aproximadamente unos 10.329 Km², es decir, un 17% (tabla 4.1.).

La cuenca hidrográfica del Guadiana ocupa una superficie total de 55.514 Km² de los que tan sólo 5.614 Km² se encuentran en Andalucía. Este río recorre en su cabecera el valle de los Pedroches (Córdoba), atravesando Huelva en sus tramos medio y bajo hasta desembocar en el Atlántico.

Las cuencas del río Piedras, Odiel y Tinto se encuentran incluidas en la provincia de Huelva abarcando la mitad de su superficie, unos 4715 Km².

Tabla 4. 1. CUENCAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA

CUENCA	ÁREA (KM ²)
Zujar-Guadalmez	2744
Arroyo de Zafareja	17
Ardilla-Múrtigas	639
Chanza	1675
Guadiana desde Chanza a desembocadura	539
Piedras	547
Odiel	2387
Tinto	1720
TOTAL	10329

Fuente: Plan Director de Riberas de Andalucía

4.4.2. CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR Y CUENCA ANDALUZA DEL ATLÁNTICO.

Como se ha expresado la Junta de Andalucía ha asumido desde el 1 de enero de 2006 las competencias plenas en la gestión del agua y del dominio público hidráulico en la totalidad del litoral andaluz con la incorporación de las cuencas de los ríos Guadalete, Barbate, Tinto, Odiel, Piedras y Chanza a la Administración Autonómica.

Las cuencas del Guadalete y Barbate, situadas en Cádiz y hasta el 31 de diciembre de 2005 gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, y las de Tinto, Odiel, Piedras y Chanza, que comprenden la práctica totalidad de la provincia de Huelva y cuya gestión dependía anteriormente de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, se integran en la Agencia Andaluza del Agua como Dirección General de la Cuenca Atlántica Andaluza.

Comprende el territorio de la cuenca hídrica del río Guadalquivir y las cuencas hídricas del Guadalete-Barbate.

La cuenca hidrográfica del Guadalquivir está delimitada al norte por Sierra Morena, las cordilleras Béticas y el océano Atlántico, y se distribuye por todas las provincias andaluzas, Extremadura, Castilla La Mancha y Murcia. La superficie de la cuenca supone más del 60% de la superficie del territorio andaluz, una extensión de 57.527 Km², perteneciendo a Andalucía 51.900 Km² (tabla 4.2)

El Guadalquivir cuenta con 668 Km de longitud, donde confluyen las aguas de importantes ríos como el Genil, el Guadiana Menor o el Guadiamar en los que a su vez drenan las aguas de multitud de subcuencas de ríos de menor envergadura.

La cuenca hidrográfica del Guadalete-Barbate está constituida por la cuenca vertiente del Guadalete, la del Barbate y la de los ríos de la vertiente atlántica que desembocan entre ellos. Se encuentra delimitada por el valle del Guadalquivir al norte, el extremo occidental del sistema Subbético en la parte oriental y el océano Atlántico al sur y al oeste. Su superficie total asciende a 6.445 Km², que se distribuye principalmente por la provincia de Cádiz, y en mínima parte por Málaga y Sevilla. Se distinguen tres cuencas hidrográficas naturales independientes:

- Río Guadalete: 3.677 Km².
- Río Barbate: 1.329 Km².
- Resto vertiente atlántica: 1.439 Km².

Tabla 4. 2. CUENCAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR Y CUENCA ANDALUZA DEL ATLÁNTICO

CUENCA	ÁREA (KM ²)	CUENCA	ÁREA (KM ²)
Guadalimar	3.438	Guadamar y marismas hasta el mar	3.288
Guadalquivir del Guadalimar al Rumberal	378	El Tranco	520
Rumberal	625	Guadalquivir desde El Tranco al Río de la Vega	569
Guadalquivir del Rumberal al Jándula	200	Guadalquivir del Río de la Vega al Guadalimar	565
Jándula	569	Guadiana Menor	7.079
Guadalquivir del Jándula al Yeguas	69	Guadalquivir del Guadiana Menor al Guadalbullón	966
Yeguas	640	Guadalbullón	1.115
Guadalquivir del Yeguas al Guadalmellato	803	Guadalquivir del Guadalbullón al Guadajoz	2.226
Guadalmellato	1290	Guadajoz	2.429
Guadalquivir del Guadalmellato al Guadiato	379	Guadalquivir del Guadajoz al Genil	669
Guadiato	1491	Alto Genil	4.714
Guadalquivir del Guadiato al Bembezar	142	Bajo Genil	3.547
Bembezar	1549	Guadalquivir del Genil al Corbones	774
Guadalquivir del Bembezar al Retortillo	32	Corbones	1.792
Retortillo	365	Guadalquivir del Corbones al Guadaira	665
Guadalquivir del retortillo al Huesna	645	Guadaira	1.388
Huesna	696	Salado de Morón	647
Guadalquivir del Huesna al Viar	45	Guadalquivir hasta su desembocadura	1.814
Viar	994	Costera	238
Guadalquivir del Viar al Ribera de Huelva	256	Guadalete	3.379
Ribera de Huelva	1.749	Atlántica	796
Guadalquivir del Ribera Huelva al Guadamar	445	Barbate	1.290
		Sur	240
TOTAL	58.345		

Fuente: Plan Director de Riberas de Andalucía

4.4.3. CUENCA ANDALUZA DEL MEDITERRÁNEO

Comprende todas las cuencas vertientes al Mediterráneo situadas entre la provincia de Cádiz y la desembocadura del río Almanzora en la provincia de Almería, con una superficie total de 18.315 Km² que abarca parte de las provincias de Cádiz, Málaga, Granada y Almería (tabla 4.3).

Las cuencas hidrográficas agrupadas en esta cuenca pertenecen a ríos de escasa longitud, la mayoría esporádicos de carácter torrencial debido a dicha orografía y al clima extremo de la región. Destacan las cuencas hidrográficas del Guadalhorce, Almanzora, Andarax y Guadalfeo, que reciben las aguas procedentes de los sistemas penibéticos.

Tabla 4. 3. CUENCAS DE LA CUENCA ANDALUZA DEL MEDITERRÁNEO

CUENCA	ÁREA (KM ²)	CUENCA	ÁREA (KM ²)
Entre Almanzora y Segura	62	Algarrobo-Torrox	318
Almanzora	2.745	Zafarraya	144
Andarax	2.159	Vélez	745
Aguas	931	Guadalhorce	3.856
Campo de Níjar	800	Fuente de piedras	150
Grande de Adra	1.479	Verde-Guadalmansa	616
Guadalfeo	1.294	Guadiaro	1.484
Albunol	512	Guadarranque-Palmones	765
Verde	216		
TOTAL	18.315		

Fuente: Plan Director de Riberas de Andalucía

4.4.4. CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SEGURA

La cuenca hidrográfica del Segura tan sólo cuenta con una pequeña porción en el nordeste de Andalucía, dado que el 90% corresponde a las comunidades autónomas limítrofes. Su extensión es

de 18.815 Km² y pertenecen a Andalucía 1.783 Km², el resto se encuentra distribuido por la región de Murcia, Comunidad Valenciana (Alicante) y Castilla-La Mancha (Albacete) (tabla 4.4).

Tabla 4. 4. CUENCAS DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL SEGURA

CUENCA	ÁREA (KM²)
Alto Segura	688
Chirivel	851
TOTAL	1.783

CAPÍTULO 5

LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ÁREA URBANA

5. LA GESTIÓN DEL AGUA EN UN ÁREA URBANA

5.1. ESTRUCTURA TERRITORIAL.

La presente investigación se ha realizado a partir de los datos mensuales de consumo de agua en la ciudad de Córdoba, correspondientes al periodo 1984-2007. El interés del estudio cobra especial importancia si se considera que se trata de un área especialmente deficitaria en agua .

Córdoba es una de las ocho provincias que forman la Comunidad Autónoma Andaluza, tiene 327.293 habitantes¹, un territorio de 1.263 Km² con una altitud media de 123 m. sobre el nivel del mar, una pluviometría² de 315 litros/m² y una densidad de 245 hab./Km², representa el 2,7% de la superficie española y ocupa, por este concepto, el segundo lugar de Andalucía y el decimotercero de España.

Córdoba ha sido declarada Patrimonio Histórico y Cultural de la Humanidad, por lo que todo trabajo de mantenimiento, reparación, nuevos sistemas de suministro o saneamiento, no debe alterar el entorno urbano.

El municipio limita orográficamente hacia el norte por Sierra Morena, abierta de este a oeste por el Valle de Guadalquivir, y expandida hacia el sur por la conformación de la Campiña miocénica.

En esta zona se producen fuertes contrastes climáticos, pudiendo encontrar inviernos con temperaturas matutinas que no sobrepasan los cero grados y veranos donde el termómetro supera los 45°C. Además la incidencia solar es considerable, proporcionando una media de 143 días despejados frente a los 76 que se muestran cubiertos.

¹ A 1 de Enero de 2008 según Anuario Estadístico de la ciudad de Córdoba.

² En el año 2005 según datos de EMACSA

5.1.1. TERRITORIO E HISTORIA.

Anteriormente a la implantación de la ciudad romana, al este del lugar donde ésta iba a ubicarse, se encontraba un asentamiento estable de primera importancia conocido por *Corduba*, cuyos orígenes se remontan al III milenio a. C.

La ciudad de Córdoba actual se fundó en el año 171 a. C. por el general romano Marco Claudio Marcelo. Floreció como asentamiento romano hasta el siglo V d.C., y después estuvo bajo control de los visigodos (a partir del 572 d. C.) y de los musulmanes (711 d.C.).

Más adelante, en el 756 Abd-Rahman I, que formaba parte de la familia Omeya hizo de Córdoba la capital de la España musulmana y en adelante (los siguientes 250 años fue uno de los mayores centros comerciales e intelectuales del mundo. En el 929, Abd-al-Rahman III, proclamó el califato toda la ciudad alcanzó su máximo esplendor rivalizando con los grandes centros de prosperidad económica e intelectual, como son Damasco y Bagdad.

A raíz de la desintegración del poder musulmán en España, a partir del siglo XI, Córdoba perdió parte del logro cultural, aunque permaneció como centro de literatos y eruditos.

En 1236 Fernando III el Santo tomó la ciudad y la integró en el reino de Castilla. En 1808, con el inicio de la Guerra de la Independencia Española fue saqueada por los franceses.

En el reinado de Isabel II, Córdoba se convirtió en el cuartel de los liberales que en 1868 derrotaron a los realistas en el puente de Alcolea. Esto significó el destierro de la soberana.

En el siglo XX es verdaderamente cuando la ciudad se moderniza y cambia su fisonomía.

5.1.2. INFRAESTRUCTURAS URBANAS DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO DE AGUA

El Embalse del Guadalmellato es la principal fuente de abastecimiento de la ciudad, con una conducción que tiene una longitud aproximada de veintidós kilómetros. Una estación de tratamiento potabiliza el agua, almacenándola en dos depósitos reguladores, desde donde parte la red de distribución.

Antes de la planificación y extensión de un sistema moderno de redes de abastecimiento, la población de la ciudad de Córdoba aprovechaba los veneros procedentes de la sierra, mediante canalizaciones, y las fuentes públicas para su suministro.

Dentro de la ciudad, hay una red primaria en diámetro superior a 600 mm. que malla la ciudad y que facilita el abastecimiento a cualquier punto de las futuras zonas de expansión, sin necesidad de sacar arterias desde los depósitos de Villa Azul.

Las zonas de influencia de Cerro Muriano y Sta. M^a de Trassierra se abastecen de otras fuentes. La primera se abastece desde el embalse de Guadalupe, donde existe una potabilizadora que distribuye el núcleo urbano, a la estación de Obejo y campamentos militares. La segunda se abastece desde captaciones de agua subterránea existentes en la zona y que se encuentran muy próximas a los depósitos.

Respecto a la red de alcantarillado, dispone de arroyos embovedados. Los más importantes son los de Pedroches y el Arroyo del Moro, aunque existen otros como el Hormigueta o el de San Cristóbal que también son destacables. El centro histórico y zonas colindantes poseen un alcantarillado "propio" que forma una bolsa dentro de la ciudad y no es viable la creación de colectores de sección importante.

La red de alcantarillado y su zona de crecimiento queda constituida por una red local, más o menos ramificada jerárquicamente, y por una red de grandes colectores:

- Sistema del Arroyo de Pedroches-Carlos III

- Sistema Avenida de Barcelona-Avenida de Libia-La Ribera
- Sistema Arroyo del Moro
- Sistema Ronda de Poniente
- Sistema Arroyo Cantarranas

La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de La Golondrina permite que las aguas residuales sean tratadas y canalizadas limpias al río Guadalquivir.

En las barriadas de Cerro Muriano y Sta. María de Trassierra el saneamiento es autónomo.

5.2. ANTECEDENTES DE LA GESTIÓN DEL AGUA

En 1891 se fundó la compañía Aguas Potables de Córdoba y se elaboró el primer proyecto de abastecimiento a la ciudad. En 1938 el Ayuntamiento adquirió esta compañía por lo que el servicio de agua se convirtió en municipal. En 1955 se construyó la estación de tratamiento de aguas de Villa Azul y en 1969 se creó la Empresa Municipal de Aguas (EMACSA), siendo uno de los primeros municipios españoles en crear una organización autónoma para la gestión del agua, con lo que el servicio de aguas se transformó en empresa pública. En 1979 se adopta la iniciativa de introducir un sistema de participación ciudadana en el funcionamiento de EMACSA por el que los representantes de entidades ciudadanas, sindicatos y partidos políticos de la oposición pueden participar en la toma de decisiones de la entidad.

EMACSA pertenece al 100% al Ayuntamiento y se encuentra estructurada como una sociedad anónima: Junta General de Accionistas, Consejo de Administración, que es donde se realiza la participación, Presidente y Gerente. Su composición es de 2 consejeros elegidos por los representantes políticos en el Ayuntamiento, 2 consejeros elegidos a propuesta de los dos sindicatos mayoritarios, 1 consejero elegido por el movimiento ciudadano y con voz pero sin voto, el Gerente de EMACSA, el Secretario General y el Interventor del Ayuntamiento.

Este modelo participativo que sigue el Consejo lo convierte en un órgano de deliberación y consenso en la toma de decisiones en relación

a la formulación, elaboración, ejecución y control del presupuesto de la empresa.

El objeto social de EMACSA lo constituye la gestión de los servicios públicos locales que a continuación se detallan:

- El abastecimiento de agua a la población, para todos los usos y necesidades, su distribución y suministro a domicilio.
- La evacuación de las aguas residuales a través de la red de alcantarillado, así como el tratamiento y depuración de aquella.
- La conservación y mejora de las canalizaciones existentes y la realización de las nuevas que resultasen necesarias.
- La recaudación de precios, tasas. Cánones y exacciones locales que se le encomienden por el Ayuntamiento de Córdoba.

A partir de 1980, EMACSA ha modernizado su funcionamiento lo que ha permitido mejoras en la calidad del servicio prestado, mejoras medioambientales y en la atención a las demandas de los ciudadanos. Se han llevado a cabo políticas de ampliación de infraestructuras de captación y almacenamiento, así en 1995, durante la gran sequía, Córdoba fue la única ciudad de Andalucía sin restricciones de agua, además, se han efectuado campañas de concienciación ciudadana, de disminución de pérdidas en la red de abastecimiento y de instalación de contadores.

En el año 2000, se construyó un nuevo laboratorio de control de calidad, donde se realizan todos los controles exigidos por las normativas europeas y ha permitido conseguir una excelente calidad del agua potable actual.

Este modelo de empresa pública participada por los ciudadanos, por tanto, incorpora criterios de carácter social y medioambiental, junto a un enfoque de sostenibilidad técnico-económica.

Algunos logros que se pueden destacar:

- En 1991 se puso en marcha la estación depuradora de aguas residuales de La Golondrina, y en la actualidad, el saneamiento y la depuración cubre al 100% de la población.
- Establecimiento de una política correctora de la contaminación producida por los vertidos industriales a los colectores o al río Guadalquivir.
- Recuperación ambiental del río Guadalquivir a su paso por Córdoba en colaboración con la Confederación Hidrográfica.

En Junio de 2003 y una vez elaborado y auditado el Sistema de Gestión de Medio Ambiente, EMACSA consigue la certificación de Gestión Medioambiental de acuerdo a la Norma UNE-EN ISO 14001.

5.3. LA GESTIÓN DEL AGUA

5.3.1. EL CICLO INTEGRAL DEL AGUA

Los servicios de agua son competencia de las corporaciones locales y, en el caso de Córdoba, es la empresa EMACSA la entidad totalmente pública y municipal responsable de la gestión de tales servicios.

El ciclo integral del agua se inicia, lógicamente, con la captación de agua bruta prepotable para el abastecimiento que se realiza desde el embalse de Guadalmellato (147 hm³), situado a unos 25 km de la ciudad. El vaso del embalse se encuentra ubicado en terrenos graníticos de la cara sur de Sierra Morena, lo que garantiza una muy buena calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, la cual presenta históricamente un contenido salino bajo-medio³.

Como fuente de captación de emergencia se cuenta con el embalse de San Rafael de Navallana (156 hm³), localizado a 2 Km del río Guadalquivir, que ayuda a mantener más o menos constante el

³ Marín Galvín, R. (2008)

caudal circulante de este río, puede recibir aportes del embalse de Guadalmellato y del propio río Guadalquivir e incluso desembalsar a este último en función de las necesidades de cada situación hidrológica concreta.

El agua bruta prepotable se conduce a través de dos conducciones hacia la ETAP de Villa Azul, una planta de potabilización y tratamiento de aguas de la empresa. La media diaria de agua bruta tratada en el periodo de junio de 2004 a mayo de 2007 ha sido de 79.419 m³. El agua cuando llega a la ETAP se somete al proceso de potabilización y una vez tratada, se conduce a dos depósitos locales, desde donde se distribuye a los distintos usuarios de la ciudad. La red de suministro cuenta con más de 1.100 km. de tuberías de distribución y la media de producción de agua que se suministra a la red de distribución en los últimos tres años se cifra en 75.754 m³ al día.

Las aguas residuales urbanas, compuestas por vertidos domésticos y aguas residuales industriales alcanzan un caudal medio de evacuación que accede a la EDAR de La Golondrina de 81.447 m³ al día. El agua residual bruta se compone en un 15% de aguas residuales de origen industrial y el resto de aguas residuales domésticas y naturales. La procedencia mayoritaria de las aguas residuales industriales es de industrias manufactureras del cobre y de pequeñas y medianas empresas de joyería y platería.

El agua residual urbana se vehicula a través de la red de colectores de saneamiento, con más de 1.400 km, hacia la planta de depuración y saneamiento (EDAR) municipal La Golondrina, y una vez allí se someten a un triple proceso de desbaste y eliminación de arenas y grasas, decantación primaria y depuración biológica, una vez depurados los efluentes, son finalmente vertidos al río Guadalquivir.

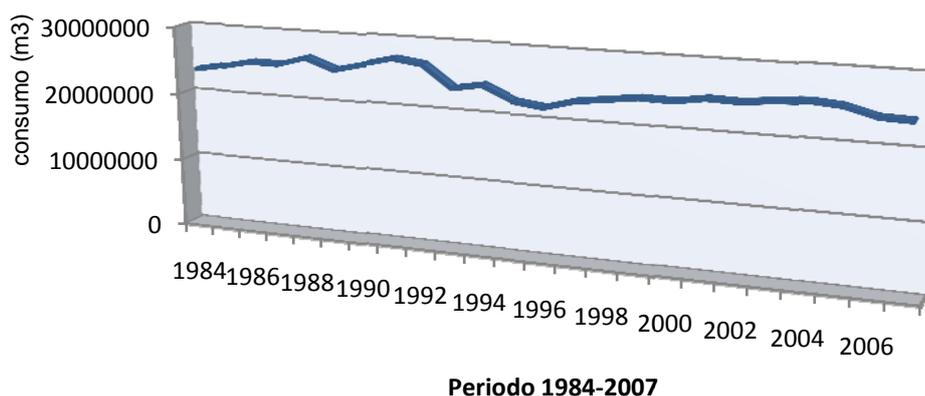
Resumiendo, el ciclo integral del agua se realiza de una forma convencional, comienza con el aprovechamiento del agua de los embalses con destino a potabilización, posterior tratamiento en ETAP, saneamiento integrado de todos los efluentes domésticos e industriales de la ciudad y, por último, depuración en EDAR biológica aerobia. EMACSA recibe una media anual de 28.000.000 m³ en alta, de los cuales factura el 80% (el resto se pierde por filtraciones, escapes y agua

de riego de parques y jardines, que no se factura). Suministra agua al 100% de la población de Córdoba (327.293 habitantes en 2008) y tiene 66.000 abonados, de los cuales, aproximadamente un 75% son domésticos, un 23 % industriales y el resto empresas u organismos públicos. El servicio de alcantarillado tiene una cobertura de prestación del 100% de los abonados y el saneamiento se realiza sobre, aproximadamente, el 90% del agua facturada.

5.3.2. OFERTA Y DEMANDA DE AGUA .

Aunque en el capítulo sexto se analizará detenidamente la demanda de agua urbana en Córdoba, en el gráfico 5.1 se muestra la evolución del consumo de agua en esta ciudad para el periodo 1984-2007. En él se puede observar que en el periodo comprendido entre 1984 y 1988 hay una tendencia con crecimiento sostenido, tendencia que aumenta desde 1989 a 1992, y posteriormente, disminuye coincidiendo con el periodo de sequía más severa, comprendido entre 1993 y 1997. En los años siguientes el consumo aumenta pero sin llegar a los elevados niveles de crecimiento anteriores. Si bien, el efecto de la sequía, el elevado precio de la factura del agua y la concienciación en la necesidad de uso racional del agua han sido determinantes en el cambio estructural experimentado en el comportamiento de los consumidores.

Gráfico 5. 1. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA ANUAL (M^3)



Aunque todavía el consumo de agua se sitúa en unos niveles elevados respecto a la oferta. Respecto a la oferta, los embalses que abastecen de agua a Córdoba se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5. 1. EMBALSES DE CÓRDOBA

Denominación	Tipo presa	Altura coronación (m)	Longitud coronación (m)	Capacidad máxima (Hm ³)	Superficie lámina (Ha)
Guadalmellato	Gravedad	58,00	390,00	145,00	767,87
San Rafael de Navallana	Escollera	57,50	364,00	156,47	1.054,00
Guadalupe	Gravedad	25,50	115,00	1,60	37,44

Fuente: EMACSA

EMACSA cuenta con 9 centrales de tratamiento:

- ETAP Villa Azul: Con una capacidad de tratamiento de 180.000 m³/día y abastece a una población de 317.000 habitantes. Su fuente de abastecimiento es el Embalse de Guadalmellato y en emergencia el embalse de San Rafael de Navallana que a su vez tiene la posibilidad de recargarse del río Guadalquivir. La capacidad de almacenamiento en la propia ETAP es de 55.000 m³.
- ETAP Guadalupe: Su capacidad de tratamiento es de 8.640 m³/día. La fuente de abastecimiento es el embalse de Guadalupe y la capacidad de almacenamiento de 4.000 m³.
- ETAP Cardeña: Posee una capacidad de tratamiento de 1.200 m³/día. El embalse de Tejoneras es la principal fuente de abastecimiento con una capacidad mínima de 0,277 Hm³ y en emergencia el embalse de Buenas Hierbas con capacidad máxima de 3,2 Hm³ y sondeo de Azuel. La capacidad de almacenamiento de la propia ETAP es de 400 m³.
- ETAP Trasierra: La capacidad de tratamiento es de 1.500 m³/día y la población que abastece de 400 habitantes en la

barriada de Santa María de Trassierra. La fuente de abastecimiento es agua subterránea.

- EDAR La Golondrina: Con una capacidad de tratamiento de 108.000 m³/día, para unos 540.000 habitantes equivalentes.
- EDAR Cerro Muriano: La capacidad de tratamiento se cifra en 1.200 m³/día y unos 8.000 habitantes equivalentes.
- EDAR Cardeña: Su capacidad de tratamiento está en 320 m³/día, con unos 1600 habitantes equivalentes.
- EDAR Azuel: Posee una capacidad de tratamiento de 93 m³/día y equivale a 483 habitantes.
- EDAR Venta del Charco: Con una capacidad de tratamiento de 51,8 m³ y unos habitantes equivalentes de 259.

Y, además, con un servicio de Control de la calidad con dos laboratorios, uno instalado en la EDAR La Golondrina y dedicado mayoritariamente al control de proceso en esta EDAR dada su envergadura y complejidad, y el segundo ubicado en la ETAP de Villa Azul que se dedica al resto de actividades llevadas a cabo, y donde se encuentran el grueso del soporte analítico disponible en los Laboratorios de EMACSA.

5.4. PRECIOS Y TARIFAS DEL AGUA

5.4.1. CÁLCULO DE LA TARIFA DE ABASTECIMIENTO Y LA TASA DE SANEAMIENTO

El sistema de tarifas de agua potable en Córdoba, aprobado por la Resolución de 19 de diciembre de 2007, distingue entre cuatro tipos de consumidores: Consumo doméstico, consumos industriales y comerciales, dependencias y servicios municipales y otros usuarios (cualquier consumo benéfico). Se establece para los dos primeros tipos de usuarios, precios progresivos asociados a bloques de consumo, con

el fin de influir en el comportamiento de los consumidores incentivando el ahorro.

El precio de la tarifa de agua, es el resultado de la aplicación de dos tarifas, Tarifa de Abastecimiento y Tarifa de Depuración. Para su estimación se sigue un proceso que consta de tres fases:

- Cálculo de la tarifa media, que resulta de dividir los gastos totales a cubrir con ingresos tarifarios entre el total de m³ a facturar en el año.
- Asignación de los costes de prestación del servicio a los distintos grupos de usuarios.
- Definición de una estructura tarifaria que asegure que se recuperen, por cada grupo, los costes del servicio prestado.

Por tanto, resulta esencial la estimación de los gastos a imputar en el cálculo de las tarifas. Puesto que EMACSA es una empresa pública, no puede considerar retribución alguna del capital o recursos propios ni amortización técnica, por ello los gastos a imputar se limitan a las salidas de caja, como son los gastos generales de explotación, la amortización financiera, los gastos financieros y las inversiones reales financiadas directamente con ingresos ordinarios⁴.

Es importante considerar que la financiación de gran parte de las inversiones realizadas en los últimos tiempos en infraestructuras de servicios de agua en Córdoba se ha realizado en el marco de un convenio firmado ente la Junta de Andalucía y el Ayuntamiento de Córdoba, por lo que se han repartido, al 50% el coste de las inversiones, excepto en el caso de la estación de depuración de aguas residuales de La Golondrina, en el que la participación de la Junta ha sido del 66%. EMACSA, de todas las inversiones realizadas, sólo puede repercutir en tarifas las realizadas con ingresos ordinarios y los intereses y devolución del principal de préstamos concertados para la financiación de inversiones.

⁴ Sáenz de Miera, G. (2002)

Ambas tarifas constan de una parte independiente del consumo (Cuota Fija) y otra variable (Cuota Variable), que varía en función del tipo de consumidor y de la cantidad que consume.

Con este modelo de fijación de precios, se persigue la racionalización de la demanda de un bien escaso como es el agua y fomentar prácticas que redunden en reducir su consumo.

5.4.2. TARIFA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL AÑO 2008

El sistema tarifario del servicio de abastecimiento de agua de EMACSA es un sistema binomio de bloques crecientes, con cuota fija o de servicio, independiente del uso del servicio, y una cuota variable en función de los consumos. Al aplicar esta estructura de tarifa se encarece el metro cúbico de agua progresivamente (Bloques crecientes) para disuadir los consumos excesivos. El suministro de agua a las economías domésticas está concentrado en el primer bloque de la tarifa (0,7059 euros/m³ para consumos hasta 30 m³/vivienda/bimestre), que abarca aproximadamente el 75% del total y tiene una tendencia creciente, debido al incremento del número de abonados y la influencia del mayor consumo en contadores colectivos. Hay una tarifa bonificada para abonados de muy bajo consumo, que no sobrepasen los 14 m³, que tienen un precio más bajo de 0,2056 euros/m³, es decir una bonificación del 30%. El resto de bloques, pertenecientes a consumos más elevados de más de 30m³ y exceso de 42 m³, les corresponde tarifas de 0,9177 euros/m³ y de 1,0941 euros/m³ respectivamente. Además existe una bonificación para familias numerosas que consiste en:

- a) Bonificación del 30% del precio del primer bloque, aplicado sobre la totalidad del consumo facturado en ese bloque.
- b) Bonificación del 30% del precio del segundo bloque, aplicado sobre la totalidad del consumo facturado en ese bloque.

Para consumos industriales y comerciales se establecen tres bloques de tarifa: 0,7059 euros/m³ hasta 30 m³/bimestre, 0,8824 euros/m³ para más de 30 m³ hasta 60 m³/bimestre y 1,0589 euros/m³ para excesos de 60 m³/bimestre.

En los consumos de dependencias y servicios municipales la tarifa aplicable es de 0,7059 euros/m³ y en los consumos de otros usuarios corresponde a cualquier consumo benéfico la tarifa de 0,60 euros /m³.

La Cuota Fija es un importe que se factura en concepto de disponibilidad del servicio y su destino es cubrir las cargas fijas en las que se incurre con la prestación del servicio. Está en función del calibre del contador instalado y del número de inmuebles que se abastecen de un mismo contador, además su facturación es independiente de que se haga o no uso del servicio.

Las cantidades recogidas con anterioridad no incluyen las cuotas de enganche, ni el cargo de depuración y varían de una localidad a otra, tanto en los precios unitarios como en la estructura de bloques.

5.4.3. TASA DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEL AÑO 2008

La Tarifa por Depuración de vertidos de aguas tiene una estructura similar al suministro de agua, consta de una cuota variable, que aumenta de manera escalonada y progresiva (Bloques crecientes) dependiendo del volumen, y una cuota fija en concepto de disponibilidad del servicio destinada a cubrir las cargas fijas de la prestación.

La cuota variable de depuración para usos domésticos goza de una bonificación del 50% para consumos que no sobrepasen los 14 m³ por vivienda y bimestre, con un precio de 0,1543 euros/m³. Además las familias numerosas tendrán derecho a una reducción del 30% del precio del primer y segundo bloque.

En el primer bloque de la tasa de depuración se contemplan los consumos hasta 30m³ por vivienda/bimestre a un precio de 0,3084 euros/m³; en el segundo bloque, de más de 30m³ hasta 42m³ aumenta el precio a 0,4010 euros/m³ y en el tercer bloque, para excesos de 42 m³ el precio es de 0,4782 euros/m³.

En cuanto a los usos industriales, la tasa de depuración también se estructura en tres bloques: el primero contempla los consumos hasta 30 m³ con un precio de 0,3084 euros/m³, el segundo, para más de 30 m³ y hasta 60 m³, con un precio de 0,3855 euros/m³ y el tercero, para excesos de 60 m³, un precio de 0,4627 euros/m³. Quedan el sector de organismos oficiales, para los que cualquier consumo cuesta a 0,3084 euros/m³ y el sector de otros consumos, para el que se fija un precio de 0,2622 euros/m³.

En la cuota fija se establece una cuota lineal por vivienda y mes, que se aplica a los usos domésticos, y para el resto de usuarios, se fija tomando como referencia el contador para suministro de agua instalado.

5.4.4. PLAN DE INDIVIDUALIZACIÓN DE CONTADORES

Una medida municipal, impulsada por el Ayuntamiento de Córdoba y Emacsa, que persigue incentivar el ahorro, es el plan de individualización de contadores, que trata de promover la sustitución de contadores colectivos del agua por unos individuales para que el consumo se modere. Incluye un incentivo económico y una línea de financiación con dos entidades bancarias colaboradoras. En la actualidad, el 54% de los suministros, unas 82.000 viviendas, continúan teniendo contadores comunitarios, aunque todas las viviendas construidas desde 1992, año en el que entró en vigor el código de edificación técnica, disponen de contadores individuales. Este Plan permite la modernización de la instalación interior contando con apoyos técnicos y los siguientes beneficios:

- Pagar sólo por lo que se consuma sin hacer frente a los excesos de otros, pudiendo además obtener bonificaciones en la factura.
- Ahorro al poder controlar el agua a utilizar.
- Sistemas de financiación por entidades bancarias, con condiciones especiales y específicas para este plan.

- Minimización de la tramitación de toda la documentación necesaria.
- Tener contrato individual con relación directa con EMACSA.

En el capítulo social de EMACSA hay que destacar: la cobertura del suministro al 100% de la población; el establecimiento de una Carta de Derechos de los usuarios; el compromiso del Ayuntamiento de mantener un suministro mínimo en caso de impago si se demuestra falta de solvencia en el usuario; el mantenimiento de una plantilla suficiente y cualificada de 214 trabajadores, con uno de los mejores convenios colectivos de la provincia de Córdoba y los aspectos educativos sobre ahorro del agua y sobre el ciclo urbano realizados entre los escolares de la ciudad.

Aunque el diseño de las tarifas y su propuesta de modificación corresponden al Ayuntamiento, las competencias en materia de intervención de precios corresponden a la Comunidad Autónoma de Andalucía, de acuerdo con el Estatuto de Autonomía (R.D. 4110/1982, de 29 de diciembre). Esto obliga al Ayuntamiento o Entidad Gestora del servicio de abastecimiento a remitir un expediente que justifique la revisión de tarifas para obtener la aprobación de las mismas por la Junta de Andalucía. Estos expedientes deben detallar los gastos de explotación del servicio, incluyendo todas las partidas de gasto y teniendo en cuenta el principio de consecución y mantenimiento del equilibrio económico y financiero de la entidad suministradora.

CAPÍTULO 6

MÉTODOS DE PREDICCIÓN UTILIZADOS Y DISCUSIÓN

6. MÉTODOS DE PREDICCIÓN UTILIZADOS Y DISCUSIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

La combinación de técnicas informáticas y estadísticas o Data Mining (DM) se divide en dos tipos, atendiendo a su finalidad: Descriptivo y Predictivo. El DM con finalidad Predictiva, trata de descubrir un modelo de comportamiento futuro de los datos para poder estimar de forma anticipada posibles valores y tendencias de éstos¹ y se está imponiendo en el tratamiento de problemas de gestión de recursos hídricos que tengan como punto de partida series de datos con una gran variabilidad y marcada estacionalidad².

En la actualidad existe una enorme variedad de métodos y técnicas específicas de predicción, se pueden reducir los planteamientos posibles según que utilicen uno o varios de los siguientes tipos básicos de información³:

1. Información estadística sobre un fenómeno aislado a lo largo del tiempo.
2. Información estadística sobre varios fenómenos entre los cuales se supone existe alguna relación de causa a efecto.
3. Información "subjetiva" constituida por opiniones, actitudes y expectativas de ciertos agentes económicos cara al futuro.

El enfoque propio del análisis de series temporales es el primero, donde se trata de predecir el futuro tomando como base una cierta ley estadística que puede deducirse de su comportamiento históricamente observado.

En este capítulo se describen dos tipos de técnicas para la predicción de series temporales: en primer lugar se describen los

¹ Rabasa, A.; Rodríguez, J.J.; Santamaría, L. (2006)

² Babovic, V.; Drécourt J.P.; Keijzer, M.; Hansen, P.F (2002)

³ Pulido, A.; López, A.M^a. (1999)

modelos ARIMA o metodología *Box-Jenkins* y, en segundo lugar, la metodología de Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Los modelos de predicción de *Box-Jenkins* pertenecen a la familia de modelos algebraicos lineales, que considera que una serie temporal real constituye una probable realización de un determinado proceso estocástico.

Los modelos de RNA se basan en modelos matemáticos de arquitectura semejante a la del cerebro humano.

Será necesario evaluar el resultado de la predicción para poder concluir sobre la calidad de los modelos de predicción desarrollados, para ello es fundamental realizar un análisis comparativo, mediante algunos indicadores, de la precisión de las predicciones que se obtienen con los modelos desarrollados

6.2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN CON DATOS TEMPORALES

Los métodos para realizar predicciones en la empresa son muy numerosos, entre ellos destacan los modelos ARIMA, modelos de regresión dinámica, alisados exponenciales Holt-Winter, etc. Menos frecuentes son los métodos VAR, funciones de transferencia, Marma, Filtrados de Kalman, etc. Eurostat propone los programas X12 de la oficina del censo de los Estados Unidos, además, algunos paquetes informáticos, como Forecast Pro o Autobox tratan de facilitar el proceso de predicción incorporando herramientas de especificación de modelos.

Los antecedentes científicos más antiguos de la predicción pueden encontrarse en su componente de *análisis de series temporales*, a mediados del siglo XIX y concernientes a datos meteorológicos, geofísicos, demográficos y observación de los astros. Ejemplos significativos son los trabajos de Verhulst (1845) sobre variación de la densidad de población y los de Buys-Ballot (1847) sobre los cambios periódicos de temperatura. En 1900, Sir Arthur Schuster introduce el análisis del periodograma en el estudio de la declinación magnética y en 1921, Sir William Beveridge estudia el gráfico de evolución periódica del precio del trigo en Europa.

La necesidad de explicar las fluctuaciones en las series económicas desencadena nuevos desarrollos como los trabajos de Yule (1927) y Slutsky (1937) donde se plantean, respectivamente, los primeros esquemas autorregresivos y de medias móviles.

Es a partir de la Segunda Guerra Mundial cuando se acelera el desarrollo de técnicas de análisis de series temporales. *Ciclos económicos y uso de indicadores*, Mitchell y Burns (1946). *Descomposición de series* en sus componentes cíclicos, estacionales y tendenciales, Shiskin (1957). *Filtrado de series*, Kalman (1960). *Análisis espectral*, en concreto a raíz de los trabajos de aplicación de Tukey (1961) en los laboratorios de Bell Telephone y con los antecedentes de los resultados conseguidos por Kolmogoroff (1941) y Wiener (1949). *Alisado exponencial*, Holt (1957), Brown (1959) y Winters (1960). *Modelos ARIMA*, con la publicación de Box y Jenkins (1970).

A su vez, se desarrolla el enfoque de los modelos econométricos, es decir, el análisis relacional o causal en economía. La aplicación de Henry Moore (1911) sobre el mercado de trabajo se ha considerado como el primer hito de la econometría. Uno de sus discípulos, Henry Schultz (1938), estudiará sistemáticamente los modelos de demanda. Cobb y Douglas (1928) y Joel Dean (1941), estudian funciones de producción y funciones de costes, respectivamente, utilizando la técnica de análisis de regresión, que tiene como origen los trabajos del francés Galton en 1877.

La utilización de los primeros modelos econométricos como herramienta de predicción y simulación se encuentra en el trabajo de Lawrence Klein (1950), que toma como base los modelos econométricos multiecuacionales propuestos por Jean Tinbergen (1937). En esta línea aparecen otras variantes como los modelos de dinámica de sistemas, Forrester (1961) y los modelos ARIMA multivariantes y multiecuacionales, Zellner y Palm (1974).

Para el análisis y predicción de series temporales hay que tener en cuenta las ventajas e inconvenientes de los distintos métodos, así como diversos factores: precisión que se desea en las predicciones, disponibilidad de personal especializado, la complejidad del método, los costes y beneficios. Según las circunstancias los modelos son más o

menos precisos, no tiene sentido pensar en un *único y mejor* modelo para la predicción, sino de modelos posibles que se comportan de manera distinta en función del horizonte temporal.

En la selección de un modelo de predicción, se suelen utilizar algunos criterios estadísticos: medidas del grado de ajuste, otras basadas en la teoría de la Información, la medida BIC se emplea como criterio de selección automático de modelos en algunos paquetes informáticos, la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (*RECM*), etc. Algunos modelos son mejores respecto a un criterio y peores respecto a otro.

En general, las medias móviles no se comportan con precisión en el medio plazo y no detectan con rapidez los cambios estructurales. Los métodos de alisado exponencial son útiles a corto plazo pero no a mayor horizonte de predicción. Los modelos Arima suelen ser adecuados a corto plazo y pierden precisión al incrementar el horizonte de predicción. Los modelos que requieren variables exógenas, como los de regresión dinámica o función de transferencia, son más complejos para usar e implican la disponibilidad de datos.

A esto hay que añadir una dificultad adicional como es la necesidad de modelizar un número elevado de series y producir sus informes, para ello algunos paquetes comerciales, como Forecast Pro o Autobox se enfrentan a estos problemas con unas estrategias generales.

La selección de modelos conlleva la posibilidad de incurrir en errores de especificación, y en el mejor de los casos se manifiestan al ampliar el horizonte de predicción. Aconsejándose el uso de predicciones obtenidas con más de un modelo y refundiéndolas con la metodología propuesta.

6.3. MODELOS ARIMA

6.3.1. REVISIÓN HISTÓRICA

Antes de la década de 1920 la predicción se realizaba mediante la extrapolación de la serie utilizando un ajuste global en el dominio temporal. El principio de la predicción moderna de series temporales comienza en 1927 cuando Yule inventó la técnica autorregresiva para predecir el número anual de manchas solares, su modelo pronosticaba el siguiente valor como una suma ponderada de las observaciones previas de la serie.

En el año 1970, la metodología propuesta por George Box y Gwilym Jenkins, dos ingenieros con formación estadística, sistematiza modelos modernos estadísticos para el análisis de series temporales univariantes que tienen en cuenta la dependencia existente entre los datos, cada observación es modelada en función de los valores anteriores, la variable tiempo, por tanto, juega un papel fundamental. Estos modelos se conocen con el nombre genérico de ARIMA (*AutoRegresive Integrated Moving Average*), el cual deriva de sus tres componentes Autoregresivo (AR), Integrado (I) de Medias Móviles (MA). Modelar una serie temporal supone identificar un modelo ARIMA adecuado que se ajuste a la serie objeto de estudio, debe contener los mínimos elementos necesarios para describir el fenómeno y ser útil para realizar previsiones.

Fruto de sus investigaciones es su célebre libro, *Time Series Análisis: Forecasting and Control* (Holden Day, San Francisco, USA) que tuvo una influencia destacada en el análisis de las series temporales, iniciando una extensa literatura de desarrollos teóricos y de aplicaciones empíricas.

Para comprender el gran impacto que tuvo esta nueva metodología es necesario conocer el contexto histórico de su aparición. La econometría, desde sus comienzos como disciplina científica, presta una atención especial al *enfoque estructural*, persiguiendo identificar la estructura causal subyacente en los fenómenos económicos. A su vez se producían desarrollos de relevancia en el campo del tratamiento de series temporales que también se aplicaban a la Economía. Algunos

trabajos como los de Holt, Winters, Brown, Harrison en las décadas de 1950 y 1960 suponen exitosos procedimientos de predicción con series económicas. A estos se unen los trabajos de investigación de Yule, Walter, Wold,... que contienen las bases de lo que hoy conocemos como metodología Box-Jenkins o ARIMA en cuanto a series estacionarias.

En la década de 1970 suceden una serie de hechos, entre los que destacan la incapacidad de los modelos estructurales para predecir los acontecimientos de esos años, se cuestiona la teoría económica al uso y la posibilidad de que, con agentes con expectativas racionales, se puedan simular políticas económicas. En este contexto Box y Jenkins proponen un marco general de análisis de series temporales, donde los datos son los que guían a la especificación del modelo, en lugar de la asunción de suposiciones sobre el mismo.

Los favorables resultados que se obtienen con la metodología ARIMA en la predicción a corto plazo ha provocado, desde entonces, que se haya aplicado en gran cantidad de campos de la economía y ha sido mejorada por la aparición de nuevos desarrollos que completan el análisis inicial.

Las series temporales suelen constar de una componente lineal y otra no-lineal más o menos acusada⁴. El empleo de modelos ARIMA aunque apto para recoger relaciones lineales existentes entre los datos de las series se muestran incapaces en el momento en el que pueden acaecer relaciones de tipo no lineal⁵. En este sentido se hace uso de las técnicas de Redes Neuronales con el objetivo de captar no linealidades que no han sido recogidas totalmente por el modelo, obteniéndose, a partir de combinar las redes neuronales con los modelos ARIMA, una mejora de las predicciones acumuladas obtenidas por los modelos ARIMA⁶.

El objetivo básico perseguido al realizar el análisis de una serie temporal es la predicción, es decir la extrapolación de valores futuros de la serie a partir de los datos disponibles. Para tratar de predecir el

⁴ Zhang, G.P (2003)

⁵ Nansen, J.V.; Nelson, R.D. (2002)

⁶ Sfetsos, A.; Siriopulos, C. (2004)

consumo de agua, numerosos analistas del mercado del agua han utilizado dos tipos de técnicas⁷:

- Los **métodos clásicos**, como los de regresión, alisado exponencial, o medias móviles, empleados si el número de observaciones es pequeño (hasta 40 aproximadamente).
- Los **métodos de Box y Jenkins** o utilización de modelos ARIMA, si el número de observaciones es como mínimo 50.

6.3.2. MODELOS ARIMA DE BOX-JENKINS

Box y Jenkins han desarrollado modelos estadísticos que consideran la dependencia existente entre los datos. Las observaciones correspondientes a instantes de tiempo concretos se modelizan como una función lineal de los datos anteriores.

El objetivo perseguido es obtener, a partir de unos datos, un modelo adecuado al comportamiento de estos, que contenga todos los elementos necesarios para describirlos, pero que sean los mínimos posibles. *Box y Jenkins*, aconsejan un mínimo de 50 observaciones en la serie temporal⁸, para las que siguiendo esta metodología se podría encontrar diferentes modelos explicativos del comportamiento de los datos y adecuados para realizar predicciones a corto plazo, aún en el caso de series con variaciones estacionales⁹.

Las fases necesarias para estimar un modelo ARIMA (figura 6.1), que se ajuste al conjunto de datos, son las siguientes¹⁰:

1. **Recogida de datos:** Es recomendable disponer de 50 o más datos, y en el caso de series mensuales, es conveniente trabajar con entre seis y diez años completos de información.

⁷ Caridad y Ocerin, J.M. (1998)

⁸ Makridakis, S. (1997)

⁹ Greene, W.H. (2000)

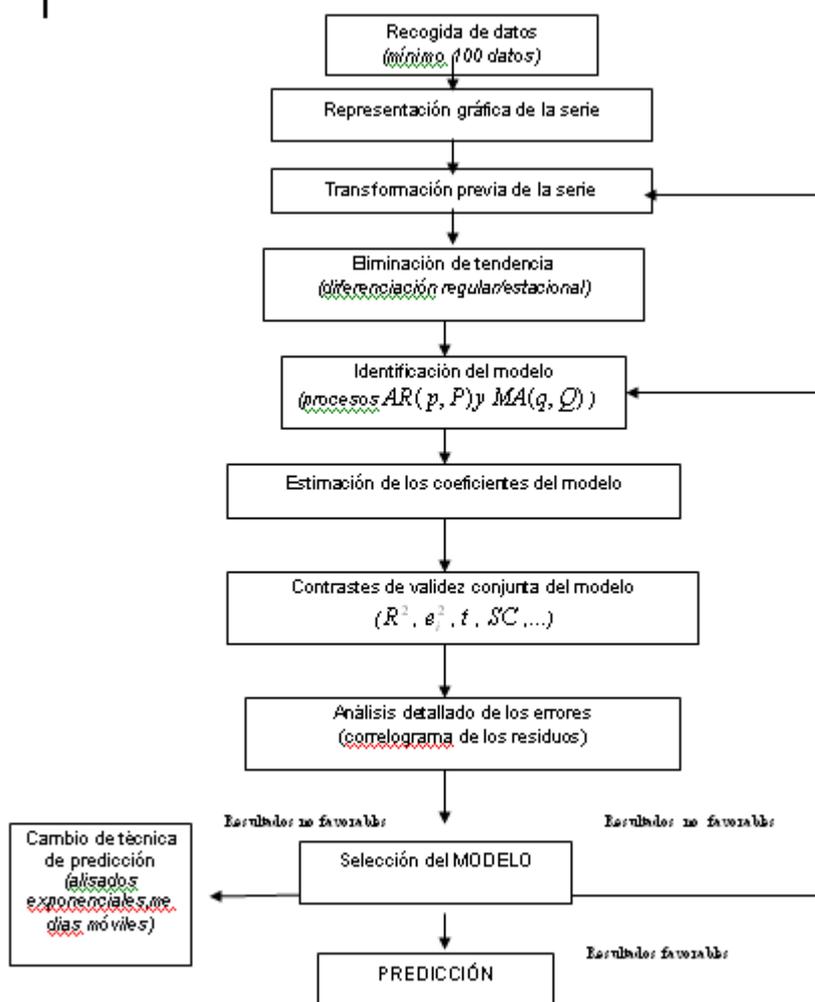
¹⁰ Pérez López, C. (2005)

2. **Representación gráfica de la serie:** Resulta de gran utilidad disponer de un gráfico de la serie para decidir sobre la estacionariedad de la misma.
3. **Transformación previa de la serie:** La transformación logarítmica es necesaria en caso de serie no estacionaria en varianza.
4. **Eliminación de la tendencia:** Al observar el gráfico de la serie se comprobará la existencia o no de tendencia. Una tendencia se corregirá tomando primeras diferencias y una tendencia no lineal suele llevar al uso de dos diferencias como mucho.
5. **Identificación del modelo:** Supone determinar el tipo de modelo más adecuado para la serie objeto de estudio, es decir, el orden de los procesos autorregresivos y de medias móviles de las componentes regular y estacional. Se pueden seleccionar varios modelos alternativos estimarlos y contrastarlos posteriormente, para modelizar definitivamente la serie.
6. **Estimación de los coeficientes del modelo:** A partir del modelo elegido se procede a la estimación de sus parámetros.
7. **Contraste de validez conjunta del modelo:** Se utilizan diversos procedimientos para valorar el modelo o modelos seleccionados: contraste de significación de parámetros, covarianzas entre estimadores, coeficiente de correlación, suma de cuadrados de errores, etc.
8. **Análisis detallado de los errores:** Las diferencias históricas entre valores reales y estimados por el modelo son determinantes para una valoración final del modelo.
9. **Selección del modelo:** Analizando los resultados de las fases anteriores se decidirá sobre el modelo adoptado. Si ninguno de los modelos estudiados nos proporciona

resultados suficientemente satisfactorios se reiniciaría el proceso en la etapa 3, revisando todas las decisiones adoptadas, cambiar de técnica, replantearse los objetivos del estudio o incluso revisar los datos de la primera etapa que pueden contener errores.

- 10. Predicción:** Se tomará el modelo válido como fórmula inicial de predicción. Será necesario comparar las predicciones con los valores ya conocidos y, posteriormente, analizar los errores cometidos.

Figura 6.1. ETAPAS DE UNA APLICACIÓN ARIMA



Fuente: Elaboración Propia

Los modelos ARMA y ARIMA fueron introducidos por Wold (1938) combinando los modelos autorregresivos (AR) ya recogidos, anteriormente, por Yule (1926) y los modelos de medias móviles (MA), indicados por Slutsky (1937), que se puede sintetizar en la búsqueda de dos polinomios de retardos, uno que actúa sobre las observaciones, o parte autorregresiva, y otro que actúa sobre un proceso de ruido blanco o componente de medias móviles. Estos métodos permiten la incorporación de análisis de carácter estacional, el aislamiento de la componente tendencia e, incluso, profundizar las interrelaciones entre

estas componentes que se integran en la evolución de las series en estudio¹¹, y se pueden expresar de forma similar:

$$\phi(B)Y_t = \theta(B)a_t \quad (6.1)$$

Siendo a_t una serie de tipo de ruido blanco y B el operador de retardos.

Los modelos ARMA (p,q) son modelos estacionarios, sin embargo, algunas series económicas presentan tendencia, creciente o decreciente. Esta tendencia se puede eliminar aplicando diferencias sucesivas sobre la serie original, hasta que la serie sea estacionaria en media.

Otra posible fuente de no estacionariedad en las series económicas es la estacionalidad, principalmente cuando los datos se corresponden con una frecuencia mayor que la anual (datos mensuales o trimestrales). Estas series suelen presentar picos que aumentan o disminuyen los valores de la serie siempre en los mismos periodos y este comportamiento se elimina tomando diferencias estacionales.

Un modelo ARIMA (p,d,q) denominado Modelo Autorregresivo-Integrado de Medias Móviles de orden p,d,q no es más que un modelo ARMA (p,q) aplicado a una serie integrada de orden d , $I(d)$, es decir, a la que ha sido necesario diferenciar d veces para eliminar la tendencia, y por tanto, toma la siguiente expresión:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d Y_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) a_t \quad (6.2)$$

Este modelo permite describir una serie de observaciones después de que hayan sido diferenciadas d veces, a fin de extraer las posibles fuentes de no estacionariedad.

Las series con tendencia secular y variaciones cíclicas pueden representarse mediante los modelos ARIMA $(p,d,q)(P,D,Q)$, donde p es

¹¹ Chu, C. and Zhang, G.P (2003)

el orden de la parte autoregresiva, es decir, número de valores anteriores que influyen en la predicción de un valor; d , es el orden de la transformación de diferencias, necesario para alcanzar la estacionaridad; q , es el orden de la parte medias móviles e indica el número de errores cometidos en las predicciones anteriores que vamos a utilizar para la predicción del instante posterior. El primer paréntesis se refiere a la tendencia secular o parte regular de la serie y el segundo paréntesis se refiere a las variaciones estacionales, o parte cíclica de la serie temporal.

Si ajustamos un modelo ARIMA (p,d,q) a la serie $y_t, t = 1, 2, \dots, n$, se obtiene el siguiente desarrollo:

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + a_t + \theta_1 a_{t-1} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (6.3)$$

Siendo $\phi_1, \dots, \phi_p, \theta_1, \dots, \theta_q$ los coeficientes estimados a partir de los datos y a_t los residuos o estimaciones del ruido blanco original:

$$a_t = y_t - \hat{y}_t \quad (6.4)$$

El criterio que suele utilizarse para la estimación de modelos ARIMA es obtener los parámetros de manera que la suma cuadrática de los errores sea lo menor posible. Box y Jenkins sugirieron diversos test de verificación del modelo seleccionado para comprobar su ajuste al conjunto de datos, como es el de Durbin-Watson (para la autocorrelación de primer orden) que se aplica a los residuos para comprobar que sus funciones de autocorrelación sean nulas en todo su recorrido, excepto en cero, y así los residuos tienden a comportarse como ruido blanco.

Box y Pierce proponen el estadístico $Q = \sum_{k=1}^m r_k^2$ donde

$$r_k = \sum_{t=k+1}^n a_t a_{t-k} / \sum_{t=1}^n a_t^2, \text{ donde } a_t = \text{residuos estimados y } n = \text{número}$$

de observaciones, que para un m suficientemente grande comprueban que Q se distribuye como una Chi-cuadrado con $m - p - q$ grados de libertad y la hipótesis de que los residuos son un ruido blanco se rechaza, generalmente, para valores de Q muy altos.

Además, suele hacerse una inspección del gráfico de los residuos, que ofrecerá una buena especificación del modelo si están incorrelacionados entre sí, lo que les hará alternar en signo, si por el contrario, los residuos consecutivamente se encuentran con el mismo signo indican una mala especificación del modelo.

Sin embargo, la validación última de cualquier modelo de predicción es la que proporciona la comparación de realizaciones con predicciones ex post¹².

Para realizar predicciones de la serie y_t , para $t = n + 1, n + 2, \dots$, se utilizan las ecuaciones de predicción

$$\hat{y}_{n+1} = \phi_1 y_n + \dots + \phi_p y_{n+1-p} + \theta_1 a_n + \dots + \theta_q a_{n+1-q} \quad (6.5)$$

$$\hat{y}_{n+2} = \phi_1 y_{n+1} + \dots + \phi_p y_{n+2-p} + \theta_1 a_n + \dots + \theta_q a_{n+2-q} \quad (6.6)$$

Y así sucesivamente. Los modelos ARIMA proporcionan la distribución de probabilidad completa para los valores futuros de la serie, y obtendremos una predicción óptima cuando el error cuadrático medio de predicción sea mínimo. A partir de un horizonte de predicción posterior al instante $n+q$, la influencia de la parte media móvil del modelo desaparece, siendo la ecuación de predicción

$$\hat{y}_{n+q+i} = \phi_1 \hat{y}_{n+q+i-1} + \dots + \phi_p \hat{y}_{n+q+i-p} \quad (6.7)$$

Esto es debido a que las mejores predicciones futuras del ruido blanco son nulas, pues se supone que $\hat{a}_{n+i} = E[a_{n+i}] = 0$, para $i=1, 2, \dots$. De manera que la predicción tiende a ser de tipo autorregresiva y, por ello, su variabilidad disminuye convergiendo asintóticamente hacia una constante¹³.

Algunas ventajas de los modelos ARIMA es que el mecanismo de búsqueda de los modelos es más o menos rápido gracias al uso del ordenador, dado que la complejidad y cantidad de operaciones así lo requiere. De las aplicaciones informáticas específicas podemos resaltar

¹² Otero, J.M (1993)

¹³ Caridad y Ocerin, J.M; Moreno Campos, I. (2002)

el programa E-view que es el que se ha utilizado en la realización de este trabajo. A partir del momento en que se encuentra el modelo, es inmediato la realización de previsiones y comparaciones entre los datos reales y las previsiones para los periodos pasados y así poder comprobar gráficamente la bondad del modelo seleccionado.

Dado que el horizonte de predicción con un modelo ARIMA es bastante limitado, una forma de incorporar mayor información en el proceso de predicción es intentando predecir los valores futuros del ruido a_t , de manera que la ecuación de predicción sea la siguiente:

$$\hat{y}_{n+t} = \sum_{i=1}^p \phi_i \hat{y}_{n+t-i} + \hat{a}_{n+t} + \sum_{i=1}^p \theta_i \hat{a}_{n+t-i} \quad (6.8)$$

En las primeras predicciones los valores \hat{y}_{n+t-i} coincidirán con los últimos datos de la serie, y, asimismo, $\hat{a}_{n+t-i} = a_{n+t-i}$ para $t \leq i$. A partir de la predicción $t = q + 1$, utilizar predicciones de a_{n+t-i} obtenidas con un modelo no lineal, como es la red neuronal, son una alternativa que pueden mejorar las predicciones. Precisamente, esta es la metodología que se propone para el desarrollo de un modelo Híbrido que mejore los resultados obtenidos con la aplicación de los modelos ARIMA.

6.3.3. METODOLOGÍA ARIMA

Una vez obtenidos los datos de la serie temporal, se debe examinar si esta es estacionaria, para ello resulta de utilidad representar el cronograma de la serie. A partir del conocimiento sobre la serie objeto de estudio y de la observación de su representación gráfica, se consigue una idea sobre la tendencia, la estacionalidad y la heterocedasticidad.

Para la identificación de todos los componentes del modelo ARIMA se utiliza la función de autocorrelación (FAC) y la función de autocorrelación parcial (FAP), la primera mide la correlación entre pares de valores separados por un intervalo K y así se procede a la identificación de los componentes estacional y no estacional por separado, en base a los gráficos de los distintos modelos teóricos¹⁴.

¹⁴ Makridakis, S. and Hibon, M. (1997)

Una vez que se ha identificado el modelo, si no está clara la elección del mismo se puede estimar y contrastar varios modelos alternativos para posteriormente seleccionar el más adecuado.

A continuación, hay que estimar los parámetros del modelo, que según los trabajos de numerosos autores que siguieron a los pioneros *Box y Jenkins* (1970), los procedimientos más utilizados son: método de la máxima verosimilitud, método de mínimos cuadrados y método de los momentos¹⁵.

En la fase de validación se analizan y contrastan los resultados obtenidos. Los criterios de validez se refieren, por una parte, a la validez de los coeficientes obtenidos y, por otra al término de error. En caso de que el modelo elegido no supere la fase de validación se ha de volver a la fase de identificación, donde, de nuevo, se procederá a seleccionar otro modelo. Aunque, la validación definitiva de un modelo se ha de buscar en la validez del modelo en la predicción, analizando comparativamente los valores obtenidos en la predicción con los valores reales.

Algunos autores como Pulido (1989), Murteira *et al.* (1993), González (1999), Greene (2000) y Johnston y DiNardo (2000) aportan los siguientes pasos metodológicos para la fase de validación del modelo:

- **Evaluación de la calidad estadística**

1. **Significado estadístico de los parámetros**

Los coeficientes obtenidos en la estimación que no sean significativamente distintos de cero, a un nivel de significación del 5%, no son necesarios, por lo que deben eliminarse.

2. **Estacionariedad e invertibilidad del modelo estimado**

Para valores de los coeficientes estimados próximos a la frontera de la no estacionariedad $|\alpha| \geq 1$, es conveniente

¹⁵ Murteira, B. et al. (1993)

llevar a cabo un contraste de raíces unitarias $H_0: \alpha=1$, con el estadístico.

$$t = \left| \frac{\sqrt{N}(\hat{\alpha} - 1)}{v_{ii}(\hat{\alpha})} \right| \quad (6.9)$$

3. Estabilidad del modelo estimado

Aunque los parámetros sean significativos, el modelo puede ser rechazado si existe una fuerte correlación entre los parámetros del modelo. Esto ocurre cuando el coeficiente de correlación tiene un valor absoluto superior a 0,7, entonces es conveniente probar con modelos alternativos.

- **Evaluación de la calidad del ajuste**

El análisis de la calidad de ajuste de un modelo se realiza por medio de los residuos. Se comprueba que los residuos tienen un comportamiento análogo a un ruido blanco, y en este caso se admite la hipótesis de ajuste del modelo a la serie objeto de estudio.

Es conveniente la observación de la Función de Autocorrelación (FAC) y la Función de Autocorrelación Parcial (FAP) de los residuos que permite un análisis gráfico de identificación de estos y nos ofrece información sobre su estructura. Además, se utilizan algunos tests estadísticos como son:

1. Test de Barlett (1946)

Para evitar la subestimación del significado estadístico de los residuos, en las aplicaciones prácticas se utilizan los siguientes límites críticos:

$$\pm 1,25 / \sqrt{N}, \text{ para los tres primeros retardos,}$$

$\pm 1,6/\sqrt{N}$, para los cuarto y quinto retardos,

$\pm 2/\sqrt{N}$, para los demás retardos,

donde N es el número de observaciones.

2. Test de Box-Pierce (1970) o test *Potmanteau*

En este caso se plantea el contraste global de que los residuos constituyen un ruido blanco. Para un valor m el estadístico:

$$Q = \sum_{k=1}^m r_{k,e}^2, \text{ con } n = N-d, \quad (6.10)$$

converge asintóticamente, en la hipótesis nula, a una distribución χ^2 con $(m-p-q)$ grados de libertad. La hipótesis de que los residuos son un ruido blanco se rechaza, generalmente, para valores altos de Q .

En la actualidad es más utilizado el estadístico de *Ljung y Box* (1978), dado que mejora la aproximación del anterior:

$$Q = n(n+2) \sum_{k=1}^m \left(\frac{r_k^2}{n-m} \right), \quad (6.11)$$

y converge, de una manera más rápida, a una distribución Chi-Cuadrado con $(m-p-q)$ grados de libertad, reduciendo el sesgo con muestras pequeñas.

Éste test permite evaluar la calidad global del ajuste, contrastando la hipótesis: $H_0: (\rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_m = 0)$. Es decir, los residuos no presentan autocorrelaciones de cualquier orden y se comportan como un proceso de ruido blanco. El ρ -value representa el nivel de confianza marginal de este test.

6.3.4. SELECCIÓN DE MODELOS.

Puede ocurrir que varios modelos describan satisfactoriamente la serie temporal, por lo que sea necesario seleccionar el modelo más adecuado, este proceso de selección puede ser sencillo o un poco más complejo, en este caso se debe recurrir a criterios de selección de modelos.

Los criterios más comunes en la selección de modelos son el *AIC* (Akaike Information Criterion) y el *BIC* (Bayesian Information Criterion) que es una extensión bayesiana del primero.

Ambos criterios fueron introducidos por Akaike, en 1973 y 1979 respectivamente, y se calculan:

$$AIC(q) = n \cdot \ln \hat{\sigma}_a^2 + 2q \quad (6.12)$$

$$BIC(q) = n \cdot \ln \hat{\sigma}_a^2 + q(1 + \ln n) + q \cdot \ln \left[\frac{1}{q} \left(\frac{\hat{\sigma}_y^2}{\hat{\sigma}_a^2} - 1 \right) \right] \quad (6.13)$$

Donde:

q es el número de parámetros del modelo

n es el número efectivo de observaciones, una vez realizadas las diferenciaciones.

$\hat{\sigma}_y^2$ y $\hat{\sigma}_a^2$ son los estimadores máximo-verosímiles de las varianzas de la serie estacionaria y de la de los residuos, respectivamente.

Como se puede observar al comparar ambos criterios, la diferencia entre ambos está en el segundo término de la ecuación, razón por la que el criterio *BIC* lleva, generalmente, a la selección de modelos de menor orden que los obtenidos por el *AIC*¹⁶. Y este último, penaliza los modelos con mayor número de parámetros y mayor varianza residual¹⁷.

¹⁶ Murteira *et al.* (1993)

¹⁷ Thomakos, D. and Guerard, J.B. (2004)

Si se entiende que una predicción es mejor que otra cuando comete menor error, los criterios de selección de modelos deben ser la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (*RECM*), Error Absoluto Medio (*EAM*) y Error Absoluto Porcentual Medio (*EAPM*). Estos indicadores se calculan a período histórico, es decir, se calculan los valores tanto para la estimación como para el periodo de predicción y se comparan con los datos reales. Para un ejemplo donde y_t corresponde al valor real en un tiempo t e \hat{y}_t al valor de la predicción, tenemos:

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{t=T+1}^{T+h} (\hat{y}_t - y_t)^2}{h}} \quad (6.14)$$

$$EAM = \frac{\sum_{t=T+1}^{T+h} |\hat{y}_t - y_t|}{h} \quad (6.15)$$

$$EAPM = 100 \frac{\sum_{t=T+1}^{T+h} \left| \frac{\hat{y}_t - y_t}{y_t} \right|}{h} \quad (5.16)$$

6.3.5. APLICACIONES DE LOS MODELOS ARIMA.

El propio Jenkins señalaba cuatro tipos de situaciones en las que el modelo ARIMA univariante puede resultar útil:

1. Cuando sea preciso trabajar con un número elevado de series, lo que impide un tratamiento más profundo, la metodología ARIMA proporciona predicciones rápidas y poco costosas.
2. Cuando sea imposible encontrar variables relacionadas con la objeto de estudio. En ese caso la modelización univariante es la única opción.

3. Cuando disponemos de series relacionadas, incluso causales, que pueden mejorar la predicción, puede ser útil la definición de la dinámica de comportamiento temporal de la serie.
4. En una amplia variedad de aplicaciones, como etapa previa antes de pasar a modelos más sofisticados, ya que constituye una forma idónea de “filtrado” de datos en un análisis previo de la serie.

La necesidad de realizar predicciones se da en áreas muy dispares; desde las más divulgadas de la economía y la meteorología a las más reservadas de la política, la ecología o la defensa militar. Resulta conveniente tratar en forma conjunta las cuestiones de predicción en economía general y las de carácter específicamente empresarial, por las siguientes razones:

- 1) La relevancia de las predicciones macroeconómicas para el mundo de la empresa.
- 2) La posibilidad de desagregar sectorialmente las predicciones macroeconómicas.
- 3) La existencia de campos de predicción comunes a la actuación de empresas y Administraciones Públicas, como son los tipos de interés, tipo de cambio, cotizaciones de acciones, etc.

En la tabla 6.1 se recoge un resumen de los temas de predicción económica y empresarial clasificados según el ámbito de aplicación.

Tabla 6. 1. ALGUNAS APLICACIONES DE LA PREDICCIÓN EN ECONOMÍA Y GESTIÓN DE EMPRESAS

ECONOMÍA INTERNACIONAL
-Tasas de crecimiento comparativas. -Cuentas nacionales agregadas. -Comercio internacional. -Relación entre las cotizaciones de las acciones en diferentes países. -Conflictos, mediación internacional y desarrollo económico. -Incidencias de nuevas tecnologías de informática, biotécnica y nuevos materiales. -Financiación internacional y riesgo-país
ECONOMÍA NACIONAL
-Renta y gasto. -Relación entre ondas largas y otros ciclos macroeconómicos. -Desempeño de larga duración. -Ciclos de negocios y ciclos políticos. -Confianza empresarial e ilusión monetaria. -Pensiones por jubilación.
ECONOMÍA REGIONAL
-Empleo y salarios. -Consumo regional de electricidad. -Consumo regional de agua. -Comercio interregional. -Indicadores económicos regionales. -Turismo regional.
ECONOMÍA SECTORIAL
-Costes de la construcción. -Desarrollo sectorial. -Impacto de nuevas tecnologías. -Consumo de energía.
MERCADOS FINANCIEROS
-Tipos de cambio. -Cotizaciones de acciones. -Riesgo bancario.
ECONOMÍA INTEREMPRESARIAL
-Transferencia de información entre empresas. -Difusión de nuevas tecnologías en un mercado competitivo. -Competencia y <i>cash-flow</i> .
GESTIÓN DE EMPRESAS
-Sistemas de información. -Planificación estratégica. -Planificación de resultados.
COMERCIALIZACIÓN
-Planificación de ventas. -Mercados potenciales de nuevos productos.
FINANCIACIÓN
-Planificación financiera. -Previsión de estados financieros. -Rentabilidad.
PRODUCCIÓN
-Planificación de la producción -Gestión y control de inventarios. -Nuevas tecnologías.

Fuente: Elaboración Propia y Pulido, A.; López, A. (1999)

El campo en el que la metodología ARIMA alcanza su mayor protagonismo a efectos de predicción lo constituye la predicción a *corto plazo* y en series con componente estacional. Aunque existen otras técnicas que también han sido utilizadas en la predicción con resultados aceptables. Por lo que sería provechoso pensar en una utilización simultánea o, mejor todavía, en una combinación de técnicas, para una posterior comparación de resultados.

6.3.6. LIMITACIONES DE LOS MODELOS ARIMA

La modelización ARIMA ha estado vigente durante más de veinticinco años, aunque presenta una serie de inconvenientes¹⁸ que se derivan básicamente de su incapacidad para ajustar comportamientos irreversibles en el tiempo, asimétricos, o irregulares, además de trabajar únicamente con la información derivada de la función de autocorrelación o espectro de potencia de la serie temporal.

En este último aspecto se centra la gran crítica al modelo ARIMA, siempre que el espectro de potencia no proporcione información clara, ésta modelización no presentará utilidad. Existen casos simples para los que la metodología ARIMA no es adecuada, series temporales aparentemente complicadas puedan ser generadas por ecuaciones muy simples, esto hace necesario un marco teórico más general para el análisis y predicción de series temporales. Debido a esto surgen diversos estudios que trataban series no estacionarias y/o no lineales, con nuevos métodos: modelos bilineales, biespectrales, de umbral, etc. (Tong, 1983, 1990; Priestley, 1988; Tsay, 1991; Subba Rao, 1992).

La utilización de esta metodología a efectos de simulación es muy limitada, nada nos dice de las relaciones causales existentes en la economía, aunque no es este su objetivo, sino descubrir el mecanismo subyacente que generó tales datos. Sin embargo, nos ofrece unos resultados muy interesantes para la predicción en economía y gestión de empresas.

¹⁸ Tong, H. (1990)

Uno de los riesgos de la metodología de Box y Jenkins es la sobrediferenciación¹⁹. Puede verse acentuado en el caso de series temporales en las que sea difícil distinguir si son estacionarias o no.

En los años 80 se da el gran cambio de paradigma en el análisis de series temporales, dos acontecimientos lo fundamentan, por una parte, el desarrollo de la potencia de los ordenadores personales que facilitó el estudio de series temporales más amplias y, por otra parte, la emergencia de las técnicas de aprendizaje automático (machina learning), en concreto, las Redes Neuronales Atificiales (RNAs²⁰).

Otro problema que presenta el empleo de modelos ARIMA en la predicción es que al aumentar el horizonte de predicción suelen aparecer desviaciones sistemáticas en las predicciones. Por tanto, hay que tener en cuenta las ventajas e inconvenientes de los distintos modelos, según las circunstancias, unos serán más prácticos que otros y suele ser más favorable en términos de precisión el uso de diversos modelos combinando adecuadamente las respectivas predicciones.

6.4. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

6.4.1. REVISIÓN HISTÓRICA

Las primeras explicaciones teóricas sobre el cerebro y el pensamiento las proporcionaron algunos filósofos griegos, como Platón y Aristóteles, quienes fueron apoyados después por Descartes y filósofos empiristas. Aunque, la historia de las redes neuronales artificiales no tuvo su inicio hasta que en 1888 el científico aragonés Santiago Ramón y Cajal demostró que el sistema nervioso estaba compuesto por una red de células individuales que se encuentran interconectadas entre sí.

En las redes neuronales artificiales subyace la idea de emular la estructura de las redes neuronales biológicas con la intención de construir sistemas de procesamiento de la información paralelos,

¹⁹ Makridakis y Hibon (1997)

²⁰ ANNs, del inglés, Artificial Neural Network

distribuidos y adaptativos, que posibiliten un cierto comportamiento “inteligente”²¹.

Alan Turing, en 1936, fue el primero en estudiar el cerebro como una forma de ver el mundo de la computación, pero se suele fijar el origen de los fundamentos de la computación neuronal en Warren McCulloch y Walter Pitts en 1943 que formularon una teoría referente a la forma de trabajar de las neuronas e intentaron simular el modo de funcionamiento de las redes neuronales biológicas, más adelante su trabajo será conocido como neurona McCulloch y Pitts. Aunque, sin embargo, existen trabajos anteriores que abrieron el camino a estos investigadores. Entre estos trabajos destaca el realizado por Kart Lashley, que en 1920 comienza una investigación de treinta años en la que determina que el proceso de aprendizaje es un proceso distribuido y no local a una determinada área del cerebro²². En 1949, Donald Hebb, un estudiante de Lashley, reveló en su libro *The Organization of Behavior* que las redes neuronales podían aprender y presentó su conocida regla de aprendizaje hebbiano. Hebb defendió que la repetida activación de una neurona por otra a través de una sinapsis determinada, aumenta su conductividad y la hacía más propensa a ser activada sucesivamente, induciendo a la formación de un circuito de neuronas estrechamente conectadas entre sí²³.

En 1956, Rochester, Holland, Haibt y Duda realizan un trabajo práctico en el que verifican una teoría neuronal basada en el postulado de Hebb. Pero sólo hasta 1957, Frank Rosenblatt comenzó el desarrollo de la primera arquitectura de red artificial de neuronas con capacidad de aprendizaje y generalización a la que llamó *Perceptron*, así, una vez aprendidos una serie de patrones era capaz de reconocer otros similares. Una red neuronal con aprendizaje supervisado que trabaja con patrones de entrada binarios y su funcionamiento, por tratarse de una red supervisada, se realiza en dos fases: en la primera se presentan las entradas y las salidas deseadas; en esta fase la red aprende la salida que debe dar para cada entrada y la adaptación de los pesos se realiza teniendo en cuenta el error entre la salida ofrecida por la red y la salida deseada.

²¹ Martín del Brio, B.; Sanz Molina, A. (2006)

²² Soria, E. y Blanco, A. (2001)

²³ Basheer, I.A. and Ha BASHEER, I.A. AND HAJMEER, M. (2000):

Bernard Widrow y Marcial Hoff desarrollaron en 1959 una red neuronal llamada *ADALINE*²⁴ basada en el Perceptron de Rosenblatt, sin embargo, la regla de aprendizaje empleada es distinta, en este modelo hace que la variación de los pesos se produzca en la dirección y sentido contrario del vector gradiente del error y se denomina Delta. Las siglas tienen una curiosa historia: cuando se dio el auge de las redes neuronales eran el acrónimo de *Adaptative Linear Neuron*, y cuando las redes fueron criticadas se cambió a *Adaptative Linear Element*. Esta red diseñada por Widrow se regía por un algoritmo de aprendizaje muy sencillo denominado LMS (*Least Mean Square*) que con un sistema adaptativo puede aprender de forma más precisa y rápida que los perceptrones existentes, lo que permitió el desarrollo de un área del procesamiento digital de señales (control de sistemas) conocido con el nombre de control adaptativo.

Block, en 1962, presenta resultados sobre el perceptrón "MARK I" con 400 dispositivos receptores fotosensitivos repartidos en una matriz 20 por 20 con un conjunto de 8 unidades de salida.

Stephen Grossberg realizó *Avalancha* en 1967. A finales de los 60 Marvin Minsky y Seymour Papert publicaron el libro *Perceptrons*, en el que puntualizaban las importantes limitaciones de esta red para resolver ciertos problemas, sólo podía resolver problemas linealmente separables. A partir de entonces surgieron muchas críticas que paralizaron durante 10 años el avance de este campo, sin embargo, como se demostró más tarde, se equivocaron en sus conjeturas. Algunos investigadores como James Anderson que desarrolló el Asociador Lineal, Teuvo Kohonen y Kunihiro Fukushima continuaron desarrollando modelos de red neuronal.

En 1980, Stephen Grossberg, establece un nuevo principio de auto-organización desarrollando las redes neuronales conocidas como *ART (Adaptative Resonante Theory)*.

Dos años después, en 1982, John Hopfield publica un trabajo clave para reactiva de nuevo el interés por la aplicación de redes

²⁴ *Adaptative Linear Neuron*

neuronales. Ese mismo año Kohonen publica un artículo sobre mapas autoorganizativos cuyo aprendizaje es de tipo no supervisado.

Un año después, Fukushima, Miyake e Ito presentan una red neuronal, el *Neocognitron*, que supone un perfeccionamiento del modelo que anteriormente presentaron ellos mismos y conocido por *Cognitron*.

Rumelhart, Hinton y Williams desarrollan en 1986 el algoritmo de aprendizaje de retropropagación (*back-propagation*) para redes neuronales multicapa. Son muchas las organizaciones, congresos y reuniones científicas que se consolidan, como es el caso de *International Neural Network Society* (INNS), *Internacional Joint Conference on Neural Networks* (IJCNN), la *Internacional Conference on Artificial Neural Networks* (ICANN) y la *Neural Information Processing Systems* (NIPS)²⁵.

Actualmente, son numerosos los trabajos que se realizan y publican, apareciendo un gran número de aportaciones respecto a los métodos de aprendizaje, a las arquitecturas y aplicaciones de las redes neuronales. Revistas como *Neural Networks*, *Transactions on Neural Networks*, entre otros, son las encargadas de la publicación de los últimos avances.

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos, la Sociedad Europea de Redes Neuronales son algunos de los ejemplos del resurgir de la investigación sobre redes neuronales.

Las redes de neuronas artificiales más utilizadas en la actualidad son las llamadas multicapa o perceptrón multicapa (MLP) que son redes más grandes y más complejas que el perceptrón, dado que se añaden capas ocultas y se obtiene mayor capacidad para abordar problemas de clasificación de gran envergadura de una manera eficaz y relativamente simple.

²⁵ Hilera, J.R.; Martínez, V.J. (1995)

6.4.2. SIMPLIFICACIÓN DEL MODELO BIOLÓGICO

Las redes neuronales son modelos artificiales que buscan reproducir una de las características propias de los seres humanos: la capacidad de memorizar y asociar hechos, por tanto, son un modelo simplificado del cerebro humano.

El cerebro es capaz de procesar a gran velocidad grandes cantidades de información procedentes de los sentidos, combinarla o compararla con la información almacenada y dar respuestas adecuadas incluso en situaciones nuevas. Lo más interesante es su capacidad de aprender a representar la información necesaria para desarrollar tales habilidades sin instrucciones explícitas para ello.

Una de las principales preocupaciones de los investigadores a lo largo de la historia es construir máquinas computacionales que sean capaces de realizar procesos con cierta inteligencia

El cerebro humano contiene aproximadamente 12 billones de células nerviosas o *neuronas*, que poseen la característica de poder comunicarse. Cada una de las neuronas tiene entre 5.600 y 60.000 *conexiones dendríticas* provenientes de otras neuronas (Figura 6.2), que están conectadas a la membrana de la neurona y transportan los impulsos enviados desde otras neuronas. Cada neurona tiene una salida llamada *axón*, y el contacto de éste con una dendrita se lleva a cabo a través de la *sinapsis*. El axón y las dendritas transmiten la señal en una única dirección.

Figura 6. 2. NEURONA Y CONEXIONES SINÁPTICAS



Fuente: Adaptado de Schalkoff, R. (1997)

Puede decirse que el cerebro humano está compuesto de decenas de billones de neuronas interconectadas entre sí formando circuitos o redes que desarrollan funciones específicas²⁶.

Las neuronas son eléctricamente activas y entre ellas interactúan mediante un flujo de corrientes eléctricas locales, que surgen como consecuencia de las diferencias de potencial entre las membranas celulares de las neuronas. Un impulso nervioso es un cambio de voltaje que tiene lugar en una zona localizada de la membrana celular. Así, el impulso es transmitido a través del axón hasta llegar a la sinapsis, y aquí se produce la liberación de una sustancia química, que se denomina neurotransmisor, que se esparce por el fluido que hay en el espacio sináptico. En el instante en el que este fluido alcanza el otro extremo transmite la señal a la dendrita, que puede excitar a la neurona o inhibirla, es decir, sinapsis con peso positivo o peso negativo respectivamente.

La señal generada por la neurona y trasladada a lo largo del axón es de tipo eléctrico y la señal que se transmite entre los terminales axónicos de una neurona y las dendritas de la otra es de tipo químico. Todos los impulsos recibidos desde la sinapsis se suman o restan a la magnitud de las variaciones del potencial de la membrana y si alcanzan un valor aproximado a 10 milivoltios, se disparan, con una determinada frecuencia o tasa de disparo, uno o más impulsos que se propagarán a lo largo del axón²⁷.

El aprendizaje se produce mediante la variación de la efectividad de las sinapsis, así cambia la influencia que unas neuronas ejercen sobre otras y la arquitectura, el tipo y la efectividad de las conexiones representan en cierto modo la memoria o estado de conocimiento de la red²⁸.

²⁶ Basheer I.A. and Hajmeer, M. (2000)

²⁷ Haykin, S. (1999)

²⁸ Balkin, S. D. and Ord, J.K.(2001)

6.4.3. ELEMENTOS DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL.

Según la literatura internacional²⁹ la utilización de modelos no lineales de series temporales ha aumentado considerablemente en los últimos años y, en particular, las redes neuronales artificiales (RNA), que han mostrado una gran capacidad predictiva en múltiples campos, aunque históricamente, el dominio lo han tenido las especificaciones lineales, por haber presentado un mayor desarrollo teórico y una mayor difusión³⁰. Son muchos los autores que han definido qué son las redes neuronales, entre ellos cabe destacar a Swanson y White (1995, 1997a, 1997b) que consideran los modelos de redes neuronales artificiales como una clase de modelos matemáticos no lineales que tratan de simular la organización y el funcionamiento de las neuronas biológicas³¹. Dentro del campo de la inteligencia artificial tratan de modelizar la capacidad de aprendizaje del cerebro humano.

La neurona artificial, denominada así por analogía con el cerebro humano, es el elemento básico de la red, a partir de un vector de entrada procedente del exterior o de otras neuronas proporciona una única respuesta o salida (véase Figura 6.3). Cada neurona se modeliza mediante unidades de proceso y se compone de un núcleo encargado de los cálculos, una red o vector de conexiones de entrada y una salida³². Una red neuronal es una estructura que establece la topología de la red, la agrupación de las neuronas en unidades estructurales llamadas capas, pudiéndose hablar de redes de una, de dos o de más de dos capas, de manera que cada una de ellas alimenta a todas las neuronas de la capa siguiente, y la intensidad de las distintas interconexiones. Las neuronas están conectadas entre sí por unos enlaces representados por unos pesos sinápticos o ponderaciones que

²⁹ Dijk, V.; Teräsvirta, T. y Franses, P.H. (2001)

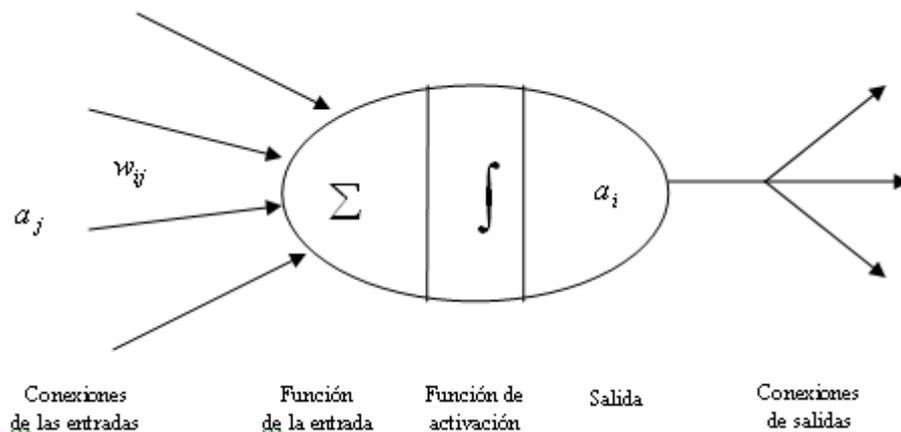
³⁰ Es de señalar que, según el comentario de Watson (2005), en determinadas ocasiones las especificaciones no lineales pueden servir para replicar de manera adecuada procesos lineales cuya especificación es desconocida para el investigador.

³¹ La estructura cerebral está compuesta de un elevado número de neuronas interconectadas entre sí. Una neurona recibe señales de otras a través de receptores de estructura fina, llamados dendrites, estas señales circulan por un canal o medio llamado axon que se divide en cientos de ramas. Una neurona se activa si la señal total recibida de todas las neuronas que conectan con ella excede un cierto nivel, conocido como nivel de activación. Durante el desarrollo de un ser vivo, el cerebro se modela, ya que existen muchas cualidades que se adquieren por la influencia del medio externo, este sería el aprendizaje.

³² Draghici, S. (2002)

reflejan la intensidad e importancia del enlace y que se ajustan conforme a un algoritmo de aprendizaje especificado para minimizar la función de coste determinada en base al error en que se incurre comparando los datos obtenidos por la red con los datos reales. La salida de cada neurona es el resultado que suministra una función, denominada función de activación, a la suma de sus entradas multiplicadas por los pesos sinápticos.

FIGURA 6.3. MODELO MATEMÁTICO PARA UNA NEURONA.



Fuente: Russel, S; Norvig, P. (2004)

Se distinguen tres tipos de capas: de entrada, de salida y ocultas. La capa de entrada está formada por las neuronas que reciben datos del entorno, almacenando la información suministrada a la red. En la capa de salida están las neuronas que ofrecen la respuesta de la red neuronal hacia el exterior y las capas ocultas, que no tienen conexión directa con el entorno, sino que son interna a la red, son las encargadas de extraer, procesar y memorizar la información, el número de capas ocultas puede estar entre cero y un número elevado³³. Las neuronas de las capas ocultas pueden estar interconectadas de distintas maneras, lo que determina, junto con su número las distintas tipologías de redes neuronales.

³³ García et al. (1996)

Por tanto, para especificar una red neuronal se necesitan los siguientes elementos³⁴ (véase la Figura 6.4):

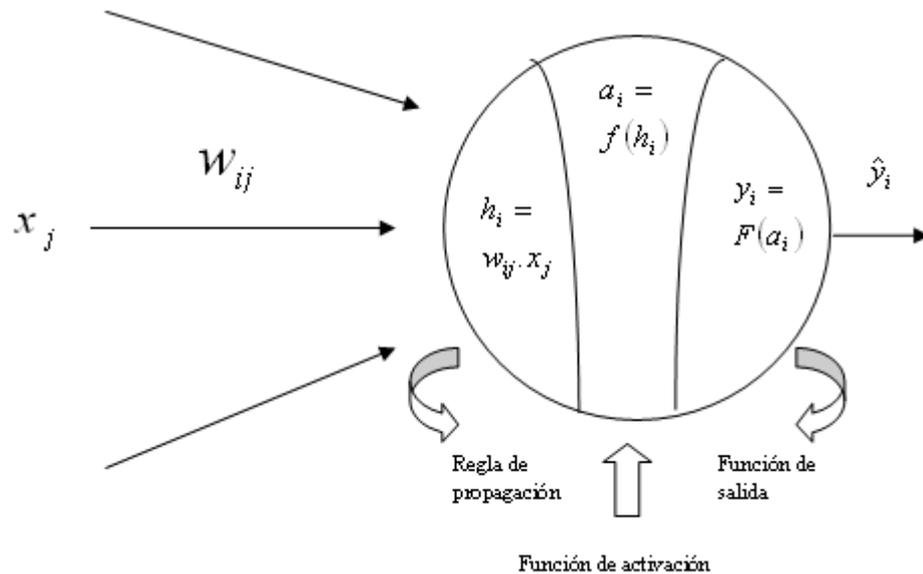
- Conjunto de **entradas**, $x_j(t)$.
- **Pesos sinápticos** de la neurona i , w_{ij} que representa la intensidad de interacción entre cada neurona presináptica j y la neurona postsináptica i . El patrón de conexión se representa por una matriz de pesos w_{ij} , donde cada conexión de entrada tiene asociado un peso o fuerza de conexión que determina el efecto cuantitativo de unas unidades sobre otras y corresponde a la sinapsis biológicas, de tal forma, que cada neurona tendrá tantos pesos como entradas.
- **Regla de propagación** $\sigma(w_{ij}, x_j(t))$, que proporciona el valor del potencial postsináptico $h_i(t) = \sigma(w_{ij}, x_j(t))$ de la neurona i en función de sus pesos y entradas. Así pues, combina las salidas de cada neurona con las correspondientes ponderaciones establecidas por el patrón de conexión para especificar cómo se valoran las entradas que reciba de cada neurona.
- **Función de activación** $f_i(a_i(t-1), h_i(t))$, que proporciona el estado de activación actual $a_i(t) = f_i(a_i(t-1), h_i(t))$ de la neurona i en función de su estado anterior $a_i(t-1)$ y de su potencial postsináptico actual. En definitiva, es la característica principal de las neuronas, la que mejor define el comportamiento de la misma. Se pueden utilizar diferentes tipos de funciones.
- **Función de salida** $F_i(a_i(t))$, que proporciona la salida actual $y_i(t) = F_i(a_i(t))$ de la neurona i en función de su estado de activación.

De esta manera, la operación de la neurona i puede expresarse como:

³⁴ Martín del Brío, B.; Sanz Molina, A. (2006)

$$y_i(t) = F_i \left(f_i \left[a_i(t-1), \sigma_i(w_{ij}, x_j(t)) \right] \right) \quad (6.17)$$

Figura 6. 4. MODELO GENÉRICO DE NEURONA ARTIFICIAL



Fuente: Elaboración Propia

Derivado de que numerosas áreas del conocimiento (neurobiólogos, psicólogos, matemáticos, físicos, ingenieros, economistas, etc.) trabajan con redes neuronales y, también, de la relativa juventud de esta disciplina, coexisten diferentes terminologías y nomenclaturas, aunque se persigue unificar conceptos, como así lo pretende el comité de estandarización de la Neural Network Society del IEEE, o algunos investigadores.

A continuación se describen con mayor profundidad los conceptos introducidos³⁵.

Las variables de **entrada** y **salida** pueden ser binarias (digitales) o continuas (analógicas). En el caso de perceptrón multicapa o MLP (*Multilayer Perceptron*) son posibles ambos tipos de señales, por

³⁵ Martín del Brio, B.; Sanz Molina, A. (2006)

ejemplo para tareas de clasificación se utilizarían salidas digitales $\{0,+1\}$, y para un problema de ajuste funcional se aplicarían salidas continuas pertenecientes a un cierto intervalo.

Dependiendo del tipo de salida, las neuronas reciben nombres específicos³⁶. Así, las neuronas estándar cuya salida sólo puede tomar los valores 0 ó 1 se suelen denominar genéricamente **neuronas de tipo de McCulloch-Pitts**, mientras que las que tienen salidas -1 ó +1 se suelen denominar **neuronas tipo Ising**, y si es posible adoptar diversos valores discretos en la salida, como por ejemplo -2, -1, 0, +1, +2 se dice que es una **neurona de tipo Potes**.

A partir de las entradas y los pesos, con la **regla de propagación** se puede obtener el valor del potencial postsináptico h_i de la neurona. La función más usual es la de tipo lineal, que se basa en la suma ponderada de las entradas con los pesos sinápticos, es decir el producto escalar de los vectores de entrada y pesos

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j \quad (6.18)$$

Aunque, existe otra forma de función de propagación, denominada función de base radial. Es una función no lineal que permite interpretar la contribución de cada unidad en el comportamiento global de la red, dado que cada unidad es activa solamente en una zona limitada del espacio de entrada y representa la distancia a un determinado patrón de referencia³⁷.

$$h_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - w_{ij})^2} \quad (6.19)$$

El peso sináptico w_{ij} determina la intensidad de conexión entre la neurona presináptica j y la postsináptica i . Pueden presentarse varios tipos de conexiones entre las neuronas:

³⁶ Müller, B.; Reinhardt, J. (1990)

³⁷ Zemouri et al. (2003)

- Conexiones **intracapa o laterales**: las que se producen entre las neuronas de una misma capa.
- Conexiones **intercapa**: las que se producen entre neuronas de diferentes capas.
- Conexiones **realimentadas**: las que tienen sentido contrario al de entrada-salida (se representarían de derecha a izquierda).
- Conexiones **autorrecurrentes**: las de realimentación de una neurona consigo misma.

A partir de una entrada positiva, si el peso es positivo tenderá a excitar a la neurona postsináptica y se denomina sinapsis excitadoras, si, por el contrario, el peso es negativo tenderá a inhibirla y se habla de sinapsis inhibitorias. Normalmente no se va a definir explícitamente el tipo de conexión, sino que mediante el aprendizaje se obtiene un valor para el peso que incluye tanto el signo como la magnitud.

Una red de propagación habitual en las redes basadas en el cálculo de la distancia entre vectores (como RBF, mapas de Kohonen o LVQ) es la **distancia euclídea**

$$h^2(t) = \sum_j (x_j - w_{ij})^2 \quad (6.20)$$

que representa la distancia al cuadrado que existe entre el vector de entradas y el de pesos. Por tanto, cuando ambos vectores son muy similares, la distancia es muy pequeña, y cuando son muy diferentes, la distancia aumenta.

La **función de activación o función de transferencia** combina las entradas con el estado actual de la neurona para producir un nuevo estado de activación, es decir proporciona el estado de activación actual $a_i(t)$ a partir del potencial postsináptico $h_i(t)$ y del propio estado de activación anterior $a_i(t-1)$

$$a_i(t) = f_i(a_i(t-1), h_i(t)) \quad (6.21)$$

Aunque se puede considerar, como ocurre en numerosos modelos de redes, que el estado actual de la neurona no depende de su estado anterior, sino sólo del actual

$$a_i(t) = f_i(h_i(t)) \quad (6.22)$$

Se suele considerar determinista y, en la mayoría de los casos, es monótona creciente y continua, como son habitualmente las neuronas biológicas. Destacan la función Lineal, Sigmoidea, Identidad, Escalón, Gaussiana o Sinusoidal.

La **función de salida** proporciona la salida global de la neurona $y_i(t)$ en función de su estado de activación actual $a_i(t)$. En los modelos más comunes, como el MLP o la adalina la función de salida es sencillamente la identidad $F(x) = x$, de manera que el estado de activación de la neurona se considera como la propia salida.

$$y_i(t) = F_i(a_i(t)) = a_i(t) \quad (6.23)$$

En otros modelos, como en la máquina de Boltzmann, se trata de una función estocástica de la activación, con lo que la neurona tendrá un comportamiento probabilístico.

6.4.4. ESTRUCTURA DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL.

Una vez analizados los elementos esenciales de un sistema neuronal artificial, en este apartado se profundiza en la estructura genérica de la red neuronal. Es esencial la elección del número de capas ocultas, del número de neuronas de dichas capas y del número de unidades de entrada o inputs.

Para el número de capas ocultas puede ser suficiente trabajar con una³⁸, con dos o con más dependiendo del número de inputs, nunca superando el doble de ellos. Una red constituida por una única capa

³⁸ Zhang, G.; Patuco, B.E. y Hu, M.Y. (1998)

recibe el nombre de **perceptrón de una capa** y cuando tiene al menos una capa de neuronas entre la capa de entrada y la de salida, se le denomina **perceptrón multicapa**³⁹. Al principio, las redes tenían una sola capa, limitando el tipo de problemas a resolver, la utilización de capas ocultas permite obtener diferentes regiones de decisión utilizando un número suficiente de neuronas en cada capa⁴⁰.

Más determinante para la predicción es la elección del número de neuronas o nodos de entrada, que recoge información relevante sobre la complejidad de la estructura de la red. Un número alto de unidades ocultas lleva a un sobre entrenamiento que impide que la red alcance una generalización óptima⁴¹ y, por el contrario, pocas unidades ocultas dificulta el aprendizaje del patrón entre el input y el output.

Todas las neuronas de un mismo nivel presentan las mismas características, lo que supone que tendrán la misma función de activación y el mismo modelo de conexiones. Así por ejemplo, si una neurona de un nivel oculto está conectada con otra del nivel de salida, entonces cada neurona del nivel oculto estará conectada a todas las neuronas del nivel de salida.

La función de activación se diseña con dos objetivos. En primer lugar se pretende que la unidad esté “activa” (cercana a +1) cuando se proporcionen las entradas “correctas” e “inactiva” (cercana a 0) cuando se den las entradas “erróneas”. En segundo lugar, la activación no puede ser lineal, en otro caso se colapsaría la red neuronal. Existen diversas funciones de activación, en la tabla 6.2 se recogen las más habituales. La función **sigmoidea o logística** es la más utilizada, por su sencillez para ser manejada en la programación informática y, además, tiene la ventaja de ser diferenciable en cierto intervalo, por ejemplo en el $[-1,+1]$ o en el $[0,+1]$, y esto es importante para el algoritmo del aprendizaje de los pesos. Este modelo de neurona es el utilizado en el perceptrón multicapa.

³⁹ Marques, J. S. (1999)

⁴⁰ Ahmed, M. and Al-Dajani, M.A. (1998)

⁴¹ Gradojevic, N.; Yang, J. (2000)

Tabla 6. 2. FUNCIONES DE ACTIVACIÓN

	FUNCIÓN	RANGO
Identidad	$y = x$	$[-\infty, +\infty]$
Escalón	$y = \text{signo}(x)$ $y = H(x)$	$\{-1, +1\}$ $\{0, +1\}$
Lineal a Tramos	$y = \begin{cases} -1, & \text{si } x < -1 \\ x, & \text{si } -1 \leq x \leq +1 \\ +1, & \text{si } x > +1 \end{cases}$	$[-1, +1]$
Sigmoidea	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ $y = \text{tgh}(x)$	$[0, +1]$ $[-1, +1]$
Gaussiana	$y = A \cdot e^{-Bx^2}$	$[0, +1]$
Sinusoidal	$y = A \cdot \text{sen}(wx + \varphi)$	$[-1, +1]$

Las dos estructuras de redes neuronales principales son: acíclicas o **redes con alimentación-hacia-delante** y cíclicas o **redes recurrentes**. La primera de ellas representa una función de sus entradas actuales, su único estado interno es el de sus pesos. La red recurrente, sin embargo, permite que sus salidas alimenten sus propias entradas, la información puede volver a lugares por los que ya había pasado, y se admiten las conexiones intra-capa (laterales), permitiendo conexiones de una unidad consigo misma. Las redes recurrentes pueden tener memoria a corto plazo, lo que puede parecer más semejante al modelo del cerebro, pero son más difíciles de entender.

Las redes neuronales con alimentación hacia delante normalmente se organizan en **capas**, donde la información fluye de forma unidireccional de una capa a otra, desde la capa de entrada a las capas de ocultas y de éstas a la capa de salida, de tal manera que cada unidad recibe entradas exclusivamente de las unidades de la capa que la precede inmediatamente. No se permiten conexiones intra-capa, y las conexiones pueden ser totales, cuando cada unidad se puede conectar con todas las unidades de la capa siguiente, o parciales, cuando una

unidad se conecta sólo con algunas de las capas de la unidad siguiente, siguiendo algún patrón aleatorio o pseudos-aleatorio⁴².

La selección del mejor modelo es muy importante aunque no es fácil, pueden existir modelos que ofrecen resultados mejores en ciertas medidas de evaluación y no tanto en otras, es conveniente realizar un análisis de todas las medidas mediante un esquema rolling de evaluación de pronóstico fuera de muestra⁴³.

6.4.5. MODOS DE OPERACIÓN: APRENDIZAJE Y RECUERDO

Las RNA están concebidas para presentar características análogas a las del funcionamiento del cerebro humano. La capacidad de aprender es una de las características de la red neuronal que la diferencian de la programación tradicional y que imita, de forma semejante y en pequeña escala, el funcionamiento del cerebro. Son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar de casos anteriores a nuevos casos, de abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, etc.

Como la red neuronal no posee ningún tipo de conocimiento útil almacenado, es necesario entrenarla, o lo que es lo mismo enseñarla para que sea capaz de realizar una determinada tarea. Se distinguen dos modos de operación en las redes neuronales: el modo aprendizaje o entrenamiento y el modo recuerdo o ejecución.

Una definición de **aprendizaje** enunciada muchos años antes de que surgieran las redes neuronales y que se puede aplicar al proceso de aprendizaje de estos sistemas, podría ser⁴⁴: *La modificación del comportamiento inducido por la interacción con el entorno y como resultado de experiencias conducente al establecimiento de nuevos modelos de respuesta a estímulos externos.* Una característica fundamental de las redes neuronales es que son sistemas entrenables, capaces de aprender a partir de un conjunto de patrones de entrenamiento.

⁴² Zemouri, R. et al. (2003)

⁴³ Swanson, N.R.; White, H. (1995)

⁴⁴ Hilera, J.R; Martínez, V. J. (1995)

En el proceso de aprendizaje de las RNA_s, se ajustan los parámetros libres de la red a partir de un proceso de interacción con el entorno que rodea la red, es de carácter secuencial⁴⁵ y adaptativo, de tal manera, que la red adquiere conocimiento continuamente, como resultado de la acumulación de experiencias ocurridas, similar al proceso de aprendizaje del cerebro humano en lo que se refiere a considerar los errores pasados.

Se puede considerar que el conocimiento se encuentra almacenado en los pesos de las conexiones entre neuronas, al igual que biológicamente el conocimiento parece estar más relacionado con las sinapsis o conexiones entre neuronas que con ellas mismas. Los pesos de las conexiones son las unidades de memoria de la red y sus valores representan el estado actual de conocimiento. El proceso de aprendizaje se entenderá finalizado cuando el valor de los pesos se mantenga estable.

Al construir un modelo neuronal se especifica una determinada arquitectura de red en la que los pesos sinápticos iniciales son nulos o aleatorios. Para que la red resulte operativa es necesario entrenarla, lo que constituye el modo aprendizaje. El entrenamiento o aprendizaje convencional modifica los pesos sinápticos en respuesta a una información de entrada o regla de aprendizaje, conseguida optimizando una función de error o coste, que valora la eficacia de la red. Se suelen considerar dos tipos de reglas: las que responden a un aprendizaje supervisado y las que lo hacen a un aprendizaje no supervisado. Normalmente es un proceso iterativo, que actualiza los pesos reiteradamente hasta que la red neuronal llega al rendimiento deseado.

⁴⁵ Kuan, C.M y White, H. (1994)

Se distinguen cuatro tipos de aprendizaje⁴⁶:

- **Aprendizaje supervisado.** La red tiene siempre disponible para cada patrón de entrenamiento de entrada, un patrón de salida, que representa la respuesta deseada para esa entrada y que se indica a la red, por parte de un agente externo o supervisor. La red ajusta sus pesos hasta que su salida tiende a ser la deseada y minimice el error de salida de la red, posteriormente será evaluada por el agente externo o supervisor, que controla el proceso de aprendizaje de la red. El aprendizaje finaliza cuando se ha obtenido una secuencia de modelos que tiene asociado un vector de salida.
- **Aprendizaje no supervisado.** Se presenta a la red un conjunto de patrones para los que no se parte de una respuesta de salida deseada de la red, sino que es ésta la que reconoce regularidades presentes en los datos de entrada. La red modifica los pesos para poder asociar a la misma unidad de salida los vectores de entrada más similares.

Mediante el aprendizaje (no supervisado) la red tiene que descubrir las regularidades presentes en los datos para poder clasificarlos en categorías no determinadas a priori⁴⁷. La red no recibe ninguna información del entorno que le indique si la salida generada es o no correcta.

- **Aprendizaje híbrido.** Como su nombre indica coexisten en la red los dos tipos de aprendizaje anteriores, el supervisado y el no supervisado, generalmente en distintas capas de neuronas. El modelo de contra-propagación y las RBF son ejemplos de redes que hacen uso de este tipo de aprendizaje.
- **Aprendizaje reforzado.** Es similar a la idea del aprendizaje supervisado en cuanto que se puede definir un criterio de actuación de la red dependiendo de las salidas que origine, aunque en este caso no se suministra explícitamente la salida

⁴⁶ Haykin, S. (1999)

⁴⁷ Bonilla Musoles, M.; Puertas Medina, R. (1997)

deseada y, por tanto, la evaluación del resultado de la red es global, se decidirá si está actuando bien o mal pero sin proporcionar detalles. En este caso no se puede determinar la fracción de error correspondiente a cada salida, por lo que son necesarios algoritmos de mayor complejidad y un conjunto de entrenamiento de mayor tamaño. En ocasiones se denomina **aprendizaje por premio-castigo**.

Una red neuronal tiene una buena capacidad de **generalización** si responde adecuadamente ante patrones no utilizados en su entrenamiento, es decir, fuera de la muestra en la cual recibió su entrenamiento⁴⁸.

El error de aprendizaje suele calcularse como el error cuadrático medio de los resultados de la red, además existe un error de generalización, que se puede cuantificar en base a un conjunto de patrones no coincidentes con los utilizados en el entrenamiento.

A partir de que el sistema ha sido entrenado, los pesos y la estructura quedan fijos y la red neuronal ya está dispuesta para procesar datos, este modo de operación corresponde al **modo recuerdo o de ejecución**.

Es usual disponer de un conjunto de datos distintos a los utilizados para el entrenamiento, de los que se conoce la respuesta correcta, y usarlos como test, valorando si la red responde adecuadamente frente a datos distintos a los usados en el aprendizaje. Si la red funciona bien se puede pasar a la fase de aplicación, por lo que se puede usar para obtener un resultado frente a datos totalmente nuevos para los que no se conoce la respuesta correcta⁴⁹.

Para el caso de las redes unidireccionales, donde no existe realimentación, las neuronas responden proporcionando directamente la salida del sistema, sin problemas de estabilidad, pero en las redes con realimentación, que son sistemas dinámicos no lineales, es más difícil dar una respuesta estable, por ello, algunos teoremas generales recogen

⁴⁸ Plasmans J., Verkooijen, W. y Daniels (1998)

⁴⁹ Moutinho, L. (2000)

las condiciones necesarias para asegurar la estabilidad de la respuesta, bajo determinadas condiciones, para numerosas redes neuronales.

Las redes neuronales son sujeto de sobreajuste cuando hay demasiados parámetros en el modelo. Si se utilizan redes totalmente conectadas, la preocupación se centra en el número de capas ocultas y su tamaño, el enfoque más usual es probar varias y quedarnos con la mejor, por ello, se necesitan las técnicas de *validación cruzada* para elegir la arquitectura de la red que proporcione la mayor precisión de predicción en la validación.

Si se consideran redes que no están totalmente conectadas, es necesario utilizar un método de búsqueda efectivo a través del gran espacio de topologías de posibles conexiones, como es el algoritmo del *daño cerebral óptimo* (*optimal brain damage*) que comienza con una red totalmente conectada y va eliminando conexiones.

Las redes de una única capa poseen un algoritmo de aprendizaje más simple y eficiente, pero tienen un poder de expresividad muy limitado. Por otra parte, las redes multicapa son más difíciles de entrenar, pero son más expresivas, es decir pueden representar funciones no lineales generales. Pretendiendo proporcionar lo mejor de ambos modelos han surgido métodos de aprendizaje, relativamente nuevos, denominados **máquinas de vectores soporte** (SVMs) o **máquinas núcleo**, que usan un algoritmo de aprendizaje eficiente y pueden representar funciones no lineales complejas, aunque sus resultados son relativos.

6.4.6. ALGORITMO DE RETROPROPAGACIÓN

En el entrenamiento de una red se utiliza un algoritmo que ajusta los pesos sinápticos de las conexiones entre las neuronas. De todos los algoritmos desarrollados, el más utilizado es el algoritmo de *retropropagación*⁵⁰ (*backpropagation*), por su sencillez de implementación, versatilidad y relativa eficiencia computacional⁵¹.

⁵⁰ También conocido por propagación hacia atrás o Regla BP.

⁵¹ Yao, J. et al. (2000)

El algoritmo fue ideado a principios de los años 70 por Verbos, y redescubierto una década después por Parker y Rumelhart independientemente, aunque no fue conocido hasta que lo presentaron Rumelhart, Hinton y Williams en 1986. Ha ido evolucionando en el tiempo, aumentando su velocidad de convergencia y superando algunos inconvenientes⁵².

Su nombre deriva de la propagación del error hacia atrás, desde la capa de salida hacia la capa de entrada, pasando por las capas ocultas intermedias y ajustando los pesos de las conexiones con el fin de reducir el error. Los aspectos que más destacan son⁵³:

- a) **Número de capas y de neuronas.** No existen procesos definitivos para decidir cuál es el óptimo número de capas y/o neuronas en las RNA. Normalmente, se determina de forma intuitiva y/o experimental, donde la experiencia supone una gran ayuda.
- b) **Conjunto de entrenamiento.** Ocurre de forma análoga al anterior aspecto, sólo se puede decir que si se pretende un buen aprendizaje del dominio de un problema, o una buena generalización de los ejemplos, este conjunto debe de cubrir todo el espectro del dominio y, la experiencia sirve de mucha ayuda.
- c) **Preparación de los datos.** Generalmente, es necesario realizar un procesamiento previo para adaptar los datos reales al modelo que se va a utilizar. En el caso de una función de activación sigmoidea hay que normalizar las salidas a $[0,1]$.
- d) **Velocidad de convergencia.** Se han propuesto modificaciones para mejorar la velocidad de entrenamiento, ya que el algoritmo de retropropagación es relativamente lento.
- e) **Mínimos locales.** En alguna variante del algoritmo, como el método de descenso del gradiente, se puede quedar "atrapado" en un mínimo local, del que no se puede salir y, entonces, el

⁵² García, M. (1993)

⁵³ Han J. (2002)

aprendizaje no se procesa de forma óptima. Para evitar este problema se realiza un aprendizaje varias veces, partiendo de pesos diferentes en cada ocasión y se selecciona la ejecución que mejor resuelva el problema.

- f) **Sobreentrenamiento.** Puede ocurrir cuando la red no es capaz de dar buenas respuestas al presentar otros vectores de entrada que el conjunto utilizado para el entrenamiento, de tal forma que es posible que el conjunto de entrenamiento seleccionado no caracteriza completamente el total de las situaciones posibles del problema. Para evitarlo hay que seleccionar muy bien el conjunto de entrenamiento y utilizar otro conjunto para determinar los pesos de las conexiones en el proceso de entrenamiento, que se denomina de validación.
- g) **Saturación.** Puede ocurrir cuando las salidas esperadas en cada neurona de salida son 0 o 1, y se resuelve cambiando los valores de las salidas esperadas a 0,1 ya 0,9, lo que puede necesitar una adaptación de los datos reales.
- h) **Estabilidad o robustez.** Se refiere a variaciones en los pesos y/o en las entradas, para ello existen medidas de estabilidad estadística que pueden servir para seleccionar la RNA entrenada más estable de entre varias y, además, están los métodos que tienen en cuenta estas medidas en el propio entrenamiento de la red, aunque son más lentos.

La creación y perfeccionamiento del algoritmo de retropropagación dio un gran impulso al desarrollo de campo de las RNA. El algoritmo está basado en un buen fundamento matemático y, a pesar de sus limitaciones, ha expandido significativamente el rango de problemas susceptibles de aplicar RNA⁵⁴.

Para entrenar una red utilizando el algoritmo retropropagación se necesita un vector de entrada, un vector de salida y una función del error que es la que debe minimizarse, normalmente esta función, que mide el

⁵⁴ Moutinho L. (2000)

error entre las salidas de la red y las salidas deseadas, es el error cuadrático medio⁵⁵

$$E(t) = \frac{1}{2N_p} \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_j} (d_j^p - y_j^p(t))^2 = \frac{1}{N_p} \sum_{p=1}^{N_p} E^p(t) \quad (5.24)$$

Donde:

p , representa el patrón de la entrada asociado a un determinado ejemplo de entrenamiento;

j , representa una neurona de la capa de salida;

d_j^p , salida deseada de la neurona j cuando, en el ciclo t , con patrón de entrada presentado en la red es p ;

$y_j^p(t)$, salida de la neurona j cuando, en el ciclo t , con patrón de entrada p ;

N_j , Número de neuronas de la capa de salida;

N_p , número de ejemplos de entrenamiento;

$E^p(t)$, error de la red en el momento t con el patrón de entrada p ;

$E(t)$, error de la red en el momento t

Esta situación se conoce como aprendizaje supervisado y en este proceso se distinguen tres pasos secuenciales⁵⁶:

1. Consiste en el procesamiento de una entrada para la obtención de una salida y se conoce por feedforward.
2. El vector de salida del procesamiento anterior se compara con el vector pretendido y retropropaga el error asociado a las capas anteriores en el sentido de las unidades de entrada.

⁵⁵ Haykin, S. (1999)

⁵⁶ Rodrigues, P. J. (2000)

3. Se ajustan los pesos de acuerdo al error propagado en la etapa anterior.

Este proceso se repite hasta que el error global entre el comportamiento de la salida obtenida y la que se pretende alcanzar sea mínima.

Una vez concluido el proceso de entrenamiento y calculados los pesos de la red neuronal, es interesante comprobar la calidad del modelo, para ello, se evalúan los errores entre los valores de salida deseados y los obtenidos por la red neuronal mediante medidas del error, algunas de ellas se recogen en el apartado 3.4.6.

Existe un gran número de variantes que se han originado del algoritmo de entrenamiento, a continuación se muestra una pequeña relación de la filosofía en que está basada la variante del algoritmo⁵⁷.

- **Término de inercia/momentum.** (Algoritmo “Gradient descent with momentum backpropagation-trainingdm”). La red, además de responder al gradiente local, tiene en consideración las últimas alteraciones en la superficie del error. Permite que la red ignore pequeñas alteraciones en la superficie del error (low-pass-filter).
- **Tasa de aprendizaje variable.** (Algoritmo “Gradient descent with adaptive learning rate backpropagation-trainingda”). Tradicionalmente los algoritmos de gradiente descendiente utilizan una tasa de aprendizaje constante. Este algoritmo utiliza una tasa de aprendizaje adaptativo, buscando que la tasa de aprendizaje sea lo más elevada posible para que pueda garantizar la estabilidad del algoritmo.
- **Resilient backpropagation.** (Algoritmo “Resilient backpropagation-trainingrp”). En el caso de redes multicapa, es usual utilizar una función hiperbólica en la capa oculta, ésta comprime una gama infinita de valores de entrada en una salida limitada y tiene una derivada casi nula en los extremos. Este algoritmo utiliza el signo de las derivadas para determinar la

⁵⁷ Teixeira, J. P. (2004)

dirección de la actualización de los pesos, sin tener en cuenta el valor absoluto de las derivadas en la actualización de estos pesos.

En definitiva, para cada tipo de fenómeno en estudio será más recomendable un tipo de algoritmo que otro, en ciertas ocasiones, será preferible un algoritmo que trabaje mas lento, teniendo en cuenta el resultado que se quiere obtener, y en otras, se necesitará rapidez.

6.4.7. ARQUITECTURAS DE REDES NEURONALES

La topología o arquitectura de las redes neuronales consiste en la organización y disposición de las neuronas en la red formando capas o agrupaciones de neuronas más o menos alejadas de la entrada y salida de la red⁵⁸. Dependiendo del número de capas, del tipo de conexión entre neuronas, del tipo de respuesta, de la forma de los datos de entrada y salida o del algoritmo de aprendizaje surgirán múltiples modelos de redes neuronales diferentes⁵⁹.

- Según el **número de capas** se suele distinguir entre las redes con una sola capa o nivel de neuronas o monocapas y las redes con múltiples capas o multicapas.

Las **redes monocapa** son las más sencillas ya que tiene una capa de neuronas que proyectan las entradas a una capa de salida en la que se realizan diferentes cálculos, siendo ésta la única que se cuenta porque en la capa de entrada no se realiza ningún cálculo. Se utilizan tradicionalmente en tareas de autoasociación. Ejemplos de redes monocapa son la red Hopfield y la red Brain-State-in-a-box.

En las **redes multicapa** existen un conjunto de capas intermedias entre la entrada y la salida (capas ocultas). Puede ocurrir que esté total o parcialmente conectada.

⁵⁸ Hilera, J.R.; Martínez V.J. (1995)

⁵⁹ Soria y Blanco (2001); Pérez y Martín (2003)

- Según el **tipo de conexión** u origen de las señales que recibe a la entrada y el destino de la señal de salida tenemos *redes no recurrentes* o alimentadas hacia delante o unidireccionales o feedforward, y *redes recurrentes* o realimentadas o feedback.

En las **redes no recurrentes**, relativamente sencillas, las neuronas de cada nivel tan solo están conectadas con las neuronas de los niveles posteriores por lo que la información se propaga hacia delante: las señales externas entran por la capa de entrada, pasan por las capas ocultas y llegan hasta la capa de salida, no hay conexión hacia las capas anteriores y, normalmente, tampoco hacia su propia entrada o autorrecurrentes. Ejemplos de redes no recurrentes son el Perceptron, Adaline, Madaline, Linear Adaptive Memory (Lam), Drive-Reinforcement, Backpropagation.

Las **redes recurrentes** son aquellas en las que la información circula tanto hacia delante como hacia atrás. Al introducir realimentación en este esquema, la información se propagará hacia adelante y hacia atrás como un sistema dinámico, más complicado, en el que la respuesta de la red se estabilizará tras un determinado número de iteraciones, convergiendo a un estado estable. Las neuronas, por tanto, admiten cualquier conexión: conectadas con neuronas de niveles previos, de niveles posteriores, con neuronas de su mismo nivel (conexiones laterales) o incluso con ellas mismas (conexión autorrecurrente). Las redes más habituales suelen ser bicapas (dos capas) como es el caso de la red ART (Adaptive Resonante Theory), la red BAM (Bidirectional Associative Memory) y la Neocognitron.

- Según el **grado de conexión**, podemos distinguir entre redes neuronales totalmente conectadas y redes parcialmente conectadas.

En el caso de las **redes totalmente conectadas**, todas las neuronas de una capa se encuentran conectadas con las de la capa siguiente (redes no recurrentes) o con las de la anterior (redes recurrentes).

Las **redes parcialmente conectadas** no tienen conectadas totalmente las neuronas entre las diferentes capas.

Resulta difícil dar una clasificación de todos los modelos de red neuronal dado que se aproximan a unos cincuenta los medianamente conocidos, y a unos quince los más utilizados, pero podemos destacar los dos conceptos que más caracterizan a un modelo neuronal: el tipo de aprendizaje y la arquitectura de la red, según ambos aspectos podemos clasificar los modelos tal y como se muestra en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. CLASIFICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES

	SUPERVISADOS	NO SUPERVISADOS	HÍBRIDOS	REFORZADOS
Realimentados	BSB Mapa Fuzzy	ART 1,2,3 Hopfield BAM	RBF Contrapropagación	Aprendizaje reforzado
Unidireccionales	Perceptrón Adelina Madalina Perceptrón Mult. BackPropagati on GRNN LVQ Máq. Boltzmann Correlación en cascada	LAM y OLAM Map. de Kohonen Neocognitrón		

Fuente: Martín del Brío y Sanz y elaboración propia

De todos los tipos de redes neuronales, resultan especialmente importantes, por ser el conjunto más numeroso las redes no realimentadas y de aprendizaje supervisado y, dentro de estos, resaltan por su generalidad y utilidad para aplicaciones prácticas los casos del Perceptrón Simple, Adelina y Perceptrón Multicapa (Multilayer Perceptron, MLP), además de ilustrar muy bien una amplia clase de problemas frecuentes en las redes neuronales. El popular algoritmo de aprendizaje denominado back-propagation (retropropagación o BP se aplica en este último modelo que es el más empleado en las aplicaciones prácticas de las redes neuronales.

6.4.7.1. EL PERCEPTRÓN MULTICAPA

El Perceptrón Multicapa (MLP) se basa en el Perceptrón Simple, introducido por Frank Rosenblatt en 1958⁶⁰, que es un modelo unidireccional formado por dos capas de neuronas, una de entrada y otra de salida, y que permite determinar automáticamente mediante un algoritmo de aprendizaje⁶¹ los pesos sinápticos, útiles para abordar tareas de clasificación. Este tipo de red tiene una gran limitación: no puede hacer clasificaciones en conjuntos de datos que no sean linealmente separables y, por tanto, las tareas de clasificación que puede realizar son sencillas. Con el fin de solventar esta limitación se convierte el perceptrón simple en un perceptrón multinivel, mediante la introducción de alguna capa oculta, al menos una.

El MLP es una red más grande, compleja y con mayor poder computacional que el perceptrón y es el más utilizado. El algoritmo utilizado para el entrenamiento es el conocido por *retropropagación de errores* o BP (“error backpropagation⁶²”), por eso en ocasiones este tipo de arquitectura se reconoce con el nombre de **red de retropropagación** o **BP** y está basado en la regla delta. Este tipo de algoritmo o regla de aprendizaje es susceptible de aplicación en redes con más de dos capas.

Cada neurona de una capa, excepto las de entrada, recibe entradas de las neuronas de la capa anterior y envía su salida a las neuronas de la capa siguiente, sin existir conexiones hacia atrás *feedback*, ni de tipo lateral en una misma capa. La disposición de las neuronas se realiza por capas con una fuerte restricción en la conectividad que consiste en no permitir conexiones que unan neuronas creando ciclos o bucles. La ventaja de añadir capas ocultas es que se amplía el espacio de hipótesis que puede representar la red⁶³.

⁶⁰ Rosenblat, F. (1958)

⁶¹ Es un algoritmo de aprendizaje de los denominados por corrección de errores que tienen por objetivo minimizar el error de la red, ajustando los pesos proporcionalmente a la diferencia que existe entre la salida de la red y la salida deseada.

⁶² Rumelhart, D.E; McClelland, J. (1986)

⁶³ Russell, S. ; Norvig, P. (2004)

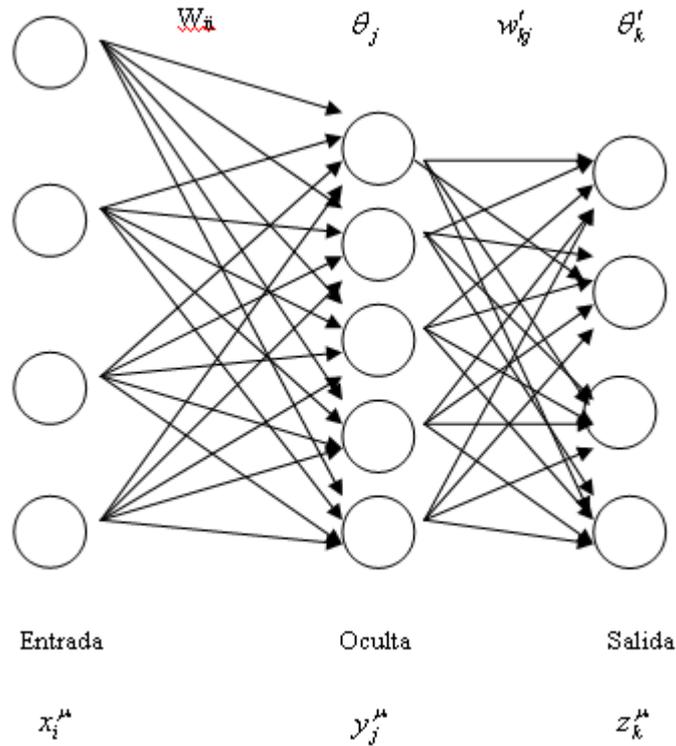
El proceso de desarrollo del BP ha resultado curioso⁶⁴, fue Werbos⁶⁵ quién en 1974 realizó la primera descripción formal de este tipo de red y, posteriormente D. Parker y, principalmente, el grupo del PDP, compuesto por Rumelhart⁶⁶, Hinton, MacClelland, ..., fueron quienes lo descubrieron como una técnica útil de resolución de problemas complejas. En esta época los computadores no eran suficientemente potentes para los requisitos del BP, hubo que esperar hasta los años ochenta para mostrar su gran potencial.

La estructura del perceptrón multicapa, para unas entradas de la red x_i , unas salidas de la capa oculta y_j , las de la capa final z_k , y donde w_{ij} son los pesos de la capa oculta, θ_j sus umbrales, w'_{kj} los pesos de la capa de salida y θ'_k sus umbrales, se muestra en la figura 6.5.

⁶⁴ Martín del Brío; Sanz Molina (2006)

⁶⁵ Werbos, P.J. (1974)

Figura 6. 5. ARQUITECTURA DEL PERCEPTRÓN MULTICAPA CON UNA CAPA OCULTA



Fuente: Elaboración Propia

La operación de un MLP con una capa oculta y neuronas de salida lineal se expresa matemáticamente:

$$z_k = \sum_j w'_{kj} y_j - \theta'_k = \sum_j w'_{kj} f \left(\sum_i w_{ji} x_i - \theta_j \right) - \theta'_k \quad (6.25)$$

Siendo $f(\cdot)$ de tipo sigmoideo:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6.26)$$

Proporcionando una salida en el intervalo $[0, +1]$. Esta es la arquitectura más común de MLP, otras variantes se pueden obtener al

incluir neuronas no lineales en la capa de salida, introducir más capas ocultas, utilizar otras funciones de activación, limitar el número de conexiones, etc.

Con una capa de neuronas ocultas en la red BPN es posible encontrar los pesos adecuados para establecer la correspondencia entre la entrada y la salida de la red, cuestión imposible en otros tipos de redes. Su funcionamiento se basa en la aplicación de un ciclo propagación-adaptación de dos fases:

- **Hacia delante:**

El patrón de entrada se presenta a la red en la primera capa de neuronas, esta información se propaga a través de las capas superiores hasta llegar a la capa de salida, obteniéndose los valores de salida de la red. Mediante la función de activación las entradas netas de cada nodo de una misma capa se transforman en salidas de los nodos de dicha capa que constituirán las entradas de los nodos de la capa siguiente. La salida total de la red, se compara con la salida deseada, y se calcula el error para cada neurona de salida.

- **Hacia atrás:**

Se reajustan los pesos de la última capa proporcionalmente al error y los errores se propagan hacia atrás, es decir, de la capa de salida hacia las capas intermedias, comenzando por la capa más próxima a la salida y siguiendo sucesivamente hasta la capa de entrada, y ajustando los pesos de las conexiones con el fin de reducir el error cometido. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red reciban un error que describa su aportación relativa al error total. Los pesos de conexión de cada neurona se reajustan en función del valor del error recibido y así, la próxima vez que se presente el mismo patrón, la salida estará más cercana a la deseada, disminuyendo, por tanto, el error⁶⁷.

La primera capa del modelo, la capa de entrada, desempeña una única función de transmisión de las señales de entrada al resto de la red.

⁶⁷ Hilera, J.R.; Martínez, V. (1995)

La última capa, la capa de salida, proporciona el vector salida de la red o resultado. Son las capas intermedias, capas ocultas, las que procesan la información extrayendo los rasgos característicos de las señales de entrada. Mediante un proceso de entrenamiento, el más utilizado es el algoritmo backpropagation, se ajustan y obtienen los pesos sinápticos que favorecen el acercamiento a la salida deseada.

Este sistema de entrenamiento permite a la red autoadaptarse, es decir, las neuronas de las capas intermedias aprenden a reconocer la relación entre un conjunto de entradas y sus salidas correspondientes, así la red identifica una representación interna que le permite proporcionar una salida activa cuando se le presente una nueva entrada. Esta característica es muy importante y se denomina capacidad de *generalización*, es decir, genera las salidas deseadas cuando se le presentan las entradas de entrenamiento y además, puede producir salidas satisfactorias para entradas no presentadas en el aprendizaje.

En los algoritmos de retropropagación hay dos grandes bloques: el denominado **aprendizaje en serie** (on line) y el **aprendizaje por lotes**. El primero actualiza los pesos sinápticos tras la presentación de cada patrón μ (en vez de presentarlos todos y luego actualizar), es más agresivo y sensible al ruido, aunque muy útil para la actualización de sistemas en tiempo real, recientemente se ha demostrado⁶⁸ que estima mejor el gradiente, permite emplear ritmos de entrenamiento mayores y suele ser más rápido. El segundo actualiza los pesos tras realizar un completo barrido, es decir, se lleva a cabo una fase de ejecución para todos y cada uno de los patrones del conjunto de entrenamiento, se calcula la variación en los pesos debida cada patrón, se acumulan, y por último se procede a la actualización de los pesos, esta posibilidad es más robusta y prudente, dado que el paso de entrenamiento se realiza sobre la media de todos los patrones de entrenamiento, aunque necesita más tiempo de cálculo.

El aprendizaje en serie se emplea habitualmente para problemas con extensos conjuntos de patrones de aprendizaje para no demorar el entrenamiento, y el orden en la presentación de los patrones debe ser aleatorio, esto es para que no prevalezca el último patrón del conjunto

⁶⁸ Wilson, D.R., Martinez T.R. (2003)

de entrenamiento frente a los anteriores y, además, se facilita el escape de mínimos locales logrando mínimos del error más profundos⁶⁹.

El algoritmo BP presenta ventajas e inconvenientes. Su principal ventaja radica en su generalidad, dado que se puede aplicar a diferentes problemas, obteniendo soluciones aceptables en breve tiempo de desarrollo, aunque si se pretenden soluciones excelentes el tiempo de desarrollo sería mayor. Sus inconvenientes principales son su lentitud de convergencia y que puede incurrir en el denominado sobreaprendizaje o sobreajuste.

6.4.8. SELECCIÓN DE MODELOS

Los criterios de selección de modelos suelen estar relacionados con la medida del error de predicción⁷⁰. Es el caso de la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (*RECM*), Error Absoluto Medio (*EAM*) y Error Absoluto Porcentual Medio, estos indicadores se calculan a período histórico, es decir, se calculan los valores tanto para la estimación como para el periodo de predicción, que son comparados con los datos reales. Siendo y_t el valor real en un tiempo t e \hat{y}_t el valor de la predicción, tenemos:

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{t=T+1}^{T+h} (\hat{y}_t - y_t)^2}{h}} \quad (6.27)$$

$$EAM = \frac{\sum_{t=T+1}^{T+h} |\hat{y}_t - y_t|}{h} \quad (6.28)$$

$$EAPM = 100 \sum_{t=T+1}^{T+h} \left| \frac{\hat{y}_t - y_t}{y_t} \right| / h \quad (6.29)$$

⁶⁹ Bishop, C.M. (1994)

⁷⁰ Thawornwong, S. and Enke, D. (2004)

6.4.9. APLICACIONES DE LAS REDES NEURONALES

Desde el punto de vista de las aplicaciones de las redes neuronales, su principal ventaja frente a otras técnicas reside en el procesado paralelo, adaptativo y no lineal. En la actualidad las RNA son un campo muy consolidado en el que continuamente se desarrollan nuevos métodos y aplicaciones.

Los campos de aplicación de las redes neuronales son numerosos, se han desarrollado aplicaciones para fines tan variados como tratamiento de señales e imágenes, reconocimiento de caracteres manuscritos y de voz, sistemas expertos, análisis de imágenes médicas, inspección industrial, predicciones económicas y problemas de gestión, etc.⁷¹, se pueden analizar dichas aplicaciones⁷² desde el punto de vista del campo de conocimiento donde se emplean.

- **Medicina.**

Aplicaciones en predicción y diagnóstico médico como cardiopatías, predicción de enfermedades degenerativas, predicción de erupciones solares, predicción del riesgo de intoxicación por digoxina, predicción de la respuesta emética, predicción del nivel de Tacrolimus en sangre, predicción del nivel de ciclosporina, etc.

- **Economía.**

En este campo es de especial interés la aplicación de redes neuronales frente a otros métodos por sus características intrínsecamente no lineales. Algunos problemas donde se aplican serían: viabilidad en concesión de créditos, determinación del riesgo de quiebra, predicción de gastos, predicción del cambio de moneda, predicción de la evolución de los mercados de valores, predicción de stocks, detección del fraude en el I.V.A., etc.

⁷¹ Alon, I. et al. (2001)

⁷² Soria, E. y Blanco, A. (2001)

- **Procesado de la señal.**

En este campo ya existe una sociedad internacional sobre la aplicación de redes neuronales. Algunas de las aplicaciones serían: ecualización de canales de comunicación, reconocimiento de patrones en imágenes, reconocimiento de voz, clasificar objetos, eliminación activa de ruido, etc.

- **Medio Ambiente.**

El ambiente por ser dinámico y no lineal conduce a la aplicación de redes neuronales. Algunas aplicaciones serían: predicción de irradiación solar, predicción de niveles tóxicos de ozono, predicción de variaciones globales de temperatura, etc.

A modo de conclusión en la aplicación de redes neuronales se pueden exponer una serie de características generales⁷³ que deben tener los problemas para que sea aconsejable la utilización de estas técnicas en su resolución y, por el contrario, las características que las desaconsejan.

- Características que aconsejan la aplicación de RNA:
 - No hay disponibilidad de reglas sistemáticas que describan totalmente el problema.
 - Existen muchos ejemplos o casos históricos.
 - Los datos del problema son imprecisos o incluyen ruido.
 - El problema tiene una elevada dimensionalidad.
 - La aplicación de RNA es una técnica más rápida y sencilla que los métodos convencionales.
 - Si las condiciones de trabajo se alteran, la red tiene capacidad de re-entrenar el sistema con nuevos ejemplos.

⁷³ Martín del Brio, B.; Sanz Molina, A. (2006)

- Características que desaconsejan la aplicación de RNA:
 - En el caso de problemas puramente algorítmicos o numéricos.
 - Cuando no se dispone de un número adecuado de casos para entrenar la red neuronal.
 - En tareas críticas o potencialmente peligrosas, en las que su resolución sea perfectamente predecible y explicable.

En especial, en el campo económico, las redes neuronales son una herramienta de gran ayuda para la elaboración de diagnósticos empresariales, así como para la clasificación y predicción de situaciones financieras que ayuden a la toma de decisiones, dado que poseen suficiente flexibilidad para adaptarse a los cambios acaecidos en el entorno y, además, son capaces de extraer las características esenciales de un gran volumen de datos.

Las RNA, en la actualidad se están utilizando principalmente en una doble dirección: predicción y clasificación⁷⁴. Hay que hacer mención especial a uno de los “motores” en el desarrollo de las redes neuronales: la predicción en series temporales.

En problemas financieros donde existen dificultades de programación y mantenimiento en los sistemas expertos, se ha demostrado la capacidad de las redes neuronales para dar una respuesta satisfactoria a estos problemas, incluso en los que la información está incompleta o presenta algún fallo.

Existen numerosos estudios que analizan series financieras en las que se comparan redes neuronales con otros modelos econométricos clásicos utilizados en las ciencias económicas, y delatan que las redes neuronales se comportan mejor y obtienen mejores resultados predictivos. Destacan los trabajos correspondientes a Hruschka (1993), García y Díez (1995), Church y Curram (1996), García *et al.* (1996), Luxhoj *et al.* (1996), Kohzadi *et al.* (1996), Swanson y White (1997), Ainscough y Aronson (1999), Nelson *et al.* (1999), Moshiri

⁷⁴ Aragón Torre y otros (1997)

y Cameron (2000), Prybutok *et al.*(2000), Choudhury *et al.* (2002), Tseng *et al.*(2002), BuHamra (2003) y Chu y Zhang (2003).

De las múltiples aplicaciones que pueden tener las redes neuronales en el campo económico, como son predicción de precios, segmentación de mercados, etc. destacan los trabajos de Fish *et al.* (1995), Nam y Schaefer (1995), Kuan y Liu (1995), Moutinho y Curry (1995), Chiang *et al.* (1997), Hill *et al.*(1996), Kaastra y Boyd (1996), Kohzadi *et al.* (1996), Nam *et al.* (1997), Pattie y Zinder (1996), Serrano-Cinca (1996), Bode (1998), Faraway y Chatfield (1998), Gaubert y Cottrell (1999), Lawy Au (1999), Natter (1999), Vellido *et al.*(1999b), Ahn *et al.* (2000), Law (2000), Moshiri y Cameron (2000), Oh y Han (2000), Burger *et al.* (2001), Tracz (2001), Walczak (2001), Chiu (2002), Goh y Law (2002) Moutinho (2000), Tsaur *et al.*(2002), Cho (2003), Chen y Leung (2004), Caridad y Ocerin *et al.* (2004) y Thawornwong y Enke (2004).

Dentro del ámbito de predicción de consumo de agua destacan las aportaciones de Caridad y Ocerin (2000), Caridad, Millán y Dios (2001), Rabasa, A., Rodríguez, J.J., Santamaría, L. y Monge, J.F. (2006), que tratan de aplicaciones de redes neuronales en la predicción del consumo de agua en las ciudades de Córdoba y Elche.

6.4.10. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LAS REDES NEURONALES

Las redes neuronales se han intentado que sean muy similares al cerebro humano para que sean capaces de aprender de la experiencia. Su estructura le permite resolver problemas que necesitarían gran cantidad de tiempo con otros sistemas “clásicos” y, además poseen otras propiedades que las hacen especialmente atractivas, como son las ventajas que detalla Maren⁷⁵:

- **Aprendizaje adaptativo.** Los sistemas neuronales son capaces de aprender a base de ejemplos ciertas tareas mediante un proceso de entrenamiento, de manera que puedan responder al

⁷⁵ Maren, A.J; Harston, C.T. (1990)

entorno adaptándose continuamente al nuevo entorno de trabajo. Se trata, por tanto de sistemas dinámicos y autoadaptativos.

- **Autoorganización.** Tienen capacidad para autoorganizar la información que perciben durante el aprendizaje y, posteriormente, durante la operación.
- **Tolerancia a fallos.** Las redes neuronales al estar compuestas de múltiples elementos de proceso dotados todos ellos de información, permite el fallo de algunos elementos individuales (neuronas) sin alterar significativamente la respuesta total del sistema. Además, son capaces de aprender a reconocer patrones distorsionados o incompletos.
- **Operación en tiempo real.** Los computadores neuronales están compuestos por muchos procesadores elementales implementados paralelamente, de esta manera las funciones se pueden realizar de forma simultánea y conseguir acelerar el proceso de cálculo y la toma de decisiones.
- **Fácil inserción dentro de la tecnología existente.** Una red se puede entrenar para una tarea específica y, posteriormente, se puede implementar en otros sistemas a fin de mejorar su capacidad para la realización de ciertas tareas específicas.

Una red neuronal, aparte de las ventajas anteriores, posee una propiedad muy interesante, es un sistema distribuido no lineal, lo que permite la simulación de sistemas no lineales y caóticos, simulación que era imposible realizar con los sistemas clásicos lineales.

Además, la gran ventaja de las redes neuronales sobre los computadores tradicionales radica en que éstas no necesitan instrucciones para resolver un problema, no tienen que ser programadas para realizar una determinada tarea, son capaces de aprender a partir de ejemplos reales y, destaca su aprendizaje no lineal y su capacidad de interpolar. Las redes neuronales no tienen necesidad de ser reprogramadas cuando se producen cambios en el problema; con la nueva información sencillamente tienen que reconvertirse mediante un ajuste de pesos, dado que en el aprendizaje el sistema crea su propia

base de conocimiento que le permite adaptarse y mejorar ante los cambios.

Los sistemas neuronales, tienen la habilidad de auto-organizarse y funcionar sin una base de datos preprogramada, esto es ventajoso respecto a los sistemas tradicionales, ya que supone que el sistema puede generalizar la entrada para obtener una respuesta. Esta característica es esencial para resolver problemas con una información de entrada poco clara o incompleta.

Las redes neuronales, también, poseen ciertas limitaciones, son modelos especializados que deben aplicarse a situaciones muy concretas, lo que limita su utilidad como herramienta general de ayuda en la toma de decisiones. La principal limitación se encuentra en que no es posible determinar cómo se procesa internamente la información para obtener un resultado pero son mayores las grandes ventajas y los buenos resultados que se obtienen con la aplicación de las redes neuronales que los alcanzados con modelos estadísticos y econométricos.

CAPÍTULO 7

PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELOS ARIMA

7. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELOS ARIMA

7.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Ya se ha destacado que la predicción de la demanda de agua de uso urbano es fundamental para la planificación de las actividades de las empresas suministradoras, estrategias de gestión de la demanda, facilitar el desarrollo de medidas estratégicas capaces de obtener un uso eficiente del agua, etc. Por lo que es necesario comparar distintas técnicas de predicción para seleccionar la más precisa.

En el presente capítulo la metodología de predicción que se aplica es la de *Box-Jenkins* o modelos ARIMA, en el siguiente capítulo se utilizarán Redes Neuronales Artificiales (RNA) y en el capítulo 9 se construirá un modelo Híbrido, con el objeto de combinar las características de los dos métodos anteriores y mejorar la predicción. Por último, se procederá a evaluar las predicciones obtenidas mediante cada uno de los métodos y se concluirá el modelo que es más idóneo para utilizarse como herramienta de predicción.

La predicción de valores futuros de la serie objeto de estudio mediante un modelo ARIMA, a través de la metodología Box-Jenkins, consiste en obtener un modelo adecuado que represente el proceso estocástico generador de la serie objeto de estudio basándose únicamente en valores anteriores de la propia serie, de modo que se puedan realizar predicciones a corto y medio plazo que es el objeto central de este trabajo.

Para tal predicción se utiliza la serie temporal de datos mensuales de consumo de agua (en metros cúbicos) en Córdoba, y referente al periodo comprendido entre enero de 1984 y diciembre de 1999, aunque los datos totales corresponden al período 1984-2007. Se reservan una parte de los datos para poder medir la calidad de la predicción comparándola con los datos reales.

En el análisis de una serie temporal, las fases que se deben considerar en la elaboración de un modelo ARIMA se pueden englobar

en tres: Identificación, estimación y validación, que son necesarias superar para que el modelo se pueda utilizar en la predicción, tal y como se recoge en la figura 7.1.

Figura 7. 1. Fases de Elaboración de un Modelo ARIMA



En la primera etapa o fase de identificación se establecen los órdenes del modelo ARIMA que con mayor parsimonia haya podido generar la serie objeto de estudio, para lo cual resulta de gran utilidad la representación gráfica de la serie. En concreto, se determina el orden de integración de la serie (numero de diferencias necesarias para alcanzar la estacionariedad), el orden de la parte autorregresiva (p) y el de la parte de medias móviles (q). Para encontrar el modelo que mejor se ajusta a la serie tendremos que probar varios modelos alternativos.

En la fase de estimación se obtienen unos valores estimados para los parámetros que serán validados en la siguiente fase y, por último, se realizarán predicciones a corto plazo, es decir con un horizonte temporal de un año, orientada a la planificación operativa y el análisis de las tarifas para el siguiente ejercicio, y serán comparadas con los datos reales para así comprobar la validez del modelo seleccionado.

7.2. PREDICCIÓN CON MODELOS ARIMA

7.2.1. PRESENTACIÓN Y ESTACIONARIEDAD DE LA SERIE

En la predicción del modelo ARIMA se han utilizado los paquetes econométricos EViews y SPSS.

Para comenzar la primera fase de identificación del modelo ARIMA más adecuado para la serie objeto de estudio, es necesario, previamente, analizar de forma gráfica la serie temporal que refleja el consumo urbano de agua potable en la ciudad de Córdoba desde enero de 1984 hasta diciembre de 2007 (gráfico 7.1), obtenida en el Instituto Nacional de Estadística (INE). Además, se representa el gráfico del consumo anual por meses (gráfico 7.2), en el que se pueden observar curvas características que se repiten de año en año.

La estacionalidad del consumo en una ciudad de clima mediterráneo es muy acusada, aunque se dan ciertas diferencias en determinados meses, de un año con respecto a otros, que obedecen, tal vez, a causas climatológicas y poblacionales.

Si se observa la evolución del consumo mensual de agua (en metros cúbicos) se puede apreciar que en el periodo comprendido entre 1984 y 1988 hay una tendencia con crecimiento sostenido, tendencia que se estabiliza desde 1989 a 1992, y, posteriormente, disminuye coincidiendo con el periodo de sequía más severa, comprendido entre 1993 y 1997. A partir de aquí aumenta el consumo pero sin llegar a los elevados niveles anteriores. Si bien, el efecto de la sequía, 1998 fue un año excepcionalmente seco (menos de 400 mm), el largo periodo de escasez de lluvias y la concienciación en la necesidad de uso racional del agua han sido determinantes en el cambio estructural experimentado

en el comportamiento de los consumidores, aunque en los últimos años está creciendo la demanda de agua.

Gráfico 7. 1. CONSUMO MENSUAL DE AGUA EN CÓRDOBA (1984-01 A 2007-12)

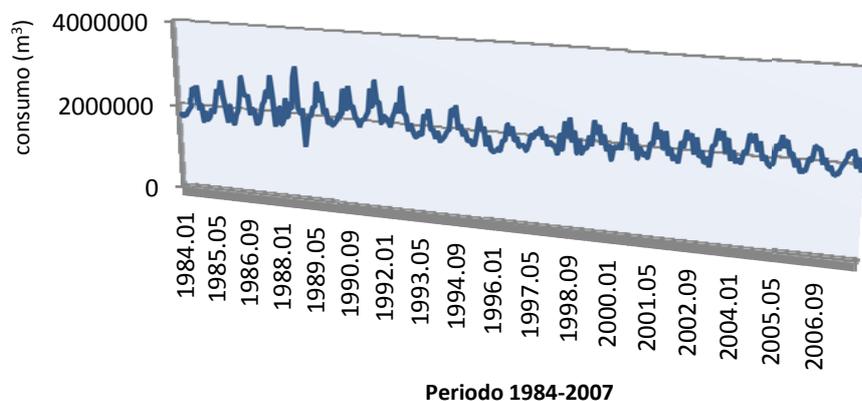
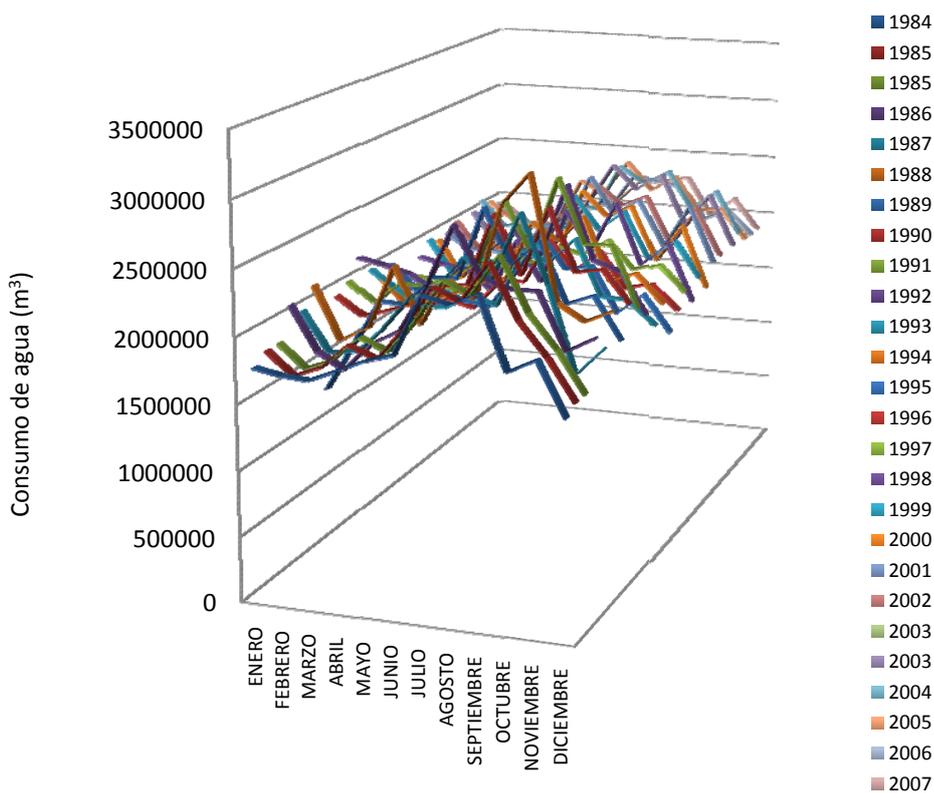


Gráfico 7. 2. CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CONSUMO ANUAL POR MESES (1984-2007)



Podemos observar ciertos picos de consumo en los meses de julio y septiembre, que por afluencia de la población, mayor que en agosto, es lógico, que en esos meses de calor, aumente el consumo global de agua, sugiriendo una estacionalidad de periodo doce, puesto que se trabaja con valores mensuales.

El menor crecimiento del consumo de agua, con respecto a la década de los ochenta, asociado al extenso período de escasas lluvias y, en cierto grado, a las campañas de concienciación ciudadana ha provocado un cambio en el comportamiento de los abonados. Sin embargo, en la actualidad se está produciendo un crecimiento de la demanda de agua.

Para convertir la serie en estacionaria, es necesario tomar diferencias. Tales transformaciones, a pesar de que conserven la estructura general de la serie, ejercen efectos considerables sobre el conjunto de datos que pueden permitir su estudio más cómodo, alterando su escala, atenuando asimetrías, disminuyendo residuos y finalmente estabilizando varianzas y tendencias¹.

7.2.2. IDENTIFICACIÓN, ESTIMACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

El proceso de identificación del modelo está basado en el análisis de la serie temporal, realizado en el apartado anterior, y en las funciones de autocorrelación (FAC) y autocorrelación parcial (FAP) estimadas. Cada modelo lineal estacionario construido teóricamente, tiene una FAC y una FAP asociadas a los retardos.

Entre los modelos alternativos sugeridos se identifica que el modelo ARIMA $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$, es el que mejor se ajusta a la serie y cumple satisfactoriamente todos los requisitos necesarios para utilizarse como herramienta de predicción del consumo urbano de agua. La tendencia y componente cíclica estacional se han eliminado mediante una diferenciación ordinaria y otra estacional.

¹ Otero (1993)

Sin embargo, existen otros modelos que se pueden tener en cuenta en el estudio, por ejemplo el modelo ARIMA (0,1,0)x(0,1,1)₁₂, que será considerado, posteriormente, como candidato en el proceso de selección del modelo más idóneo.

Una vez identificado el modelo ARIMA (0,1,1)x(0,1,1)₁₂, se procede a su estimación y validación, para ello se comprueba que todos los parámetros estimados son estadísticamente significativos y que la serie temporal formada por los residuos del modelo tiene un comportamiento similar a un ruido blanco. Este modelo ARIMA se especifica en la ecuación 7.1, la expresión obtenida indica que en la determinación del consumo de agua de un periodo intervienen el consumo del mes anterior y también de los doce y trece meses anteriores, con las ponderaciones indicadas por los parámetros correspondientes. Esta expresión posibilita su utilización a efectos de predicción en la ecuación 7.2.

Ecuación 7. 1. ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA

$$y_t = y_{t-1} + y_{t-12} - y_{t-13} + a_t - 0,803489a_{t-1} - 0,876478a_{t-12} + 0,70424043a_{t-13}$$

Ecuación 7. 2. ECUACIÓN DE PREDICCIÓN

$$\hat{y}_{t+1} = y_t + y_{t-11} - y_{t-12} - 0,803489\hat{a}_t - 0,876478\hat{a}_{t-11} + 0,70424043\hat{a}_{t-12}$$

$$\hat{y}_{t+2} = \hat{y}_{t+1} + y_{t-10} - y_{t-11} + \theta\hat{a}_{t-10} + \theta_1\hat{a}_{t-11}$$

Y así sucesivamente, donde la influencia de la media móvil del modelo desaparece, esto es debido a que las predicciones del ruido blanco son nulas, es decir $\hat{a}_{n+i} = E[a_{n+i}] = 0$, para $i = 1, 2, \dots$, de tal forma que la predicción tiende a ser de tipo autorregresiva, y por tanto su variabilidad disminuye convergiendo asintóticamente hacia cero. En la tabla 7.1 aparecen recogidos los resultados de la estimación del modelo.

Tabla 7. 1. ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA

VARIABLE DEPENDIENTE: $\nabla\nabla_{12}$ CONSUMO OBSERVACIONES INCLUIDAS:180				
Variable	Coficiente	Error Estándar	Estadístico t-Student	Prob.
MA(1)	-0,803489	0,044602	-18,01482	0,0000
SMA(12)	-0,876478	0,033357	-26,27558	0,0000
R-cuadrado	0,6235990	Media variable dependiente		389,1341
R-cuadrado corregido	0,621473	Cuasi desv. típica var. dependiente		270040,7
Cuasi desviación típica residual	166141,4	Criterio información Akaike		26,89018
Suma de cuadrados del error	4,89E+12	Criterio Schwarz		26,92579
Log. Máxima verosimilitud	-2.404,671	Durbin-Watson stat		1,962042

Como se puede apreciar examinando la citada tabla, los coeficientes son estadísticamente significativos, siendo la probabilidad límite $<0,0001$ y, por tanto, necesarios.

El grado de ajuste del modelo es un 62,35%, que resulta aceptable, y se debe indicar que se estimaron otros modelos alternativos que si bien a priori eran buenos candidatos, se rechazaron tras la aplicación de los criterios de selección de modelos, entre los que destaca el criterio Schwarz o criterio BIC, que es en este modelo en el que obtiene un valor más bajo. La elección del modelo final debe ser un equilibrio entre simplicidad y eficacia.

El ajuste de un modelo ARIMA implica cumplir satisfactoriamente la etapa de identificación del modelo y si a la serie se le ajusta el modelo correcto, los residuos deben avalar que las a_t no difieren de un ruido blanco, por tanto, no deben presentar autocorrelación de ningún orden.

A continuación se analiza la calidad global del ajuste estudiando los residuos. Si el modelo explica correctamente la serie, los residuos estimados tienen que tener un comportamiento análogo al de un ruido blanco (*white noise*). En la tabla 7.2 se recogen los residuos del modelo.

Tabla 7. 2. RESIDUOS MENSUALES DEL MODELO ARIMA (m³)

1986			-146993,938	-5556,62684	25924,1853	264745,4
	304385,832	5156,16056	-305265,164	206110,775	-178421,531	204267,081
1987	16449,0429	-88997,8555	-78970,3053	15352,0894	181038,429	100509,164
	-68139,9318	-44718,3995	266522,774	101076,032	-452992,733	40492,6019
1988	178734,364	-55956,6327	43723,618	398858,352	-211289,905	50385,2578
	-461792,823	518029,639	420841,216	-200135,889	-97435,2193	157037,751
1989	-833780,606	-84581,6053	267372,34	27101,5381	206979,406	27007,316
	263626,34	-157142,923	-169028,129	-120928,657	160604,147	-78081,2405
1990	46483,5418	61880,5053	29858,204	-54368,8851	37845,1299	-70391,8846
	158463,985	-230797,705	112052,508	86350,1694	250116,394	88580,316
1991	15539,1545	26989,852	106329,341	-66201,0317	-20902,5905	-42279,0558
	108943,322	-159919,211	194691,407	135446,547	239154,118	-128972,704
1992	76332,6636	176008,188	-2773,30613	-251639,562	-49885,882	-51008,9868
	-236722,076	-200015,713	94079,9647	-15661,4527	24085,5846	-114060,383
1993	22419,4839	23606,5874	-175686,271	-232050,575	-166934,166	-315419,404
	-170821,256	-36498,1086	-165603,542	-86550,5546	24602,4854	57089,3283
1994	149067,843	61352,3576	49441,0328	30252,5066	37933,9005	-23344,9101
	69001,7411	87151,6772	-43931,0111	-45900,9892	127175,034	95391,2569
1995	109058,941	45902,0255	5018,93714	-159784,071	-246179,6	-14849,5814
	-56924,5098	-151813,529	-390794,898	-194603,716	83472,5127	-6834,22687
1996	-85939,8589	98753,6051	108182,368	-25597,4387	127879,135	-2215,07402
	-19720,203	-76509,6665	-165499,646	51215,6319	138090,957	133416,793
1997	111785,484	212669,195	23204,5865	105000,587	210458,897	3991,28326
	-226200,431	-45993,9098	-167111,224	85985,9356	157592,361	135327,394
1998	127197,096	175108,526	81291,7911	-147834,801	195437,269	-255291,743
	51398,2271	-97856,1403	69838,0718	-18033,4894	206147,755	-86488,9531
1999	175153,46	-23163,6492	97466,1578	28024,0123	134736,835	-109118,993
	59147,3814	-37642,2313	-127593,277	-53893,6198	116610,01	43331,5175

El gráfico de los residuos (Gráfico 7.3) nos proporciona una visión de conjunto de la cuantía de los errores, sesgos sistemáticos y puntos de errores excepcionales. Se observan algunos años atípicos como 1988, 1989, 1993 y 1995. También se observan fluctuaciones de

un año a otro, en los meses de Julio y Septiembre. Estos picos pueden estar justificados, respectivamente, por la diferencia en el comportamiento de los consumidores antes y durante la gran sequía, y por el mayor consumo de agua en los meses de calor, debido a que se alcanzan temperaturas extremas.

Posteriormente, se muestran los gráficos del Correlograma (Gráfico 7.4) y del Correlograma Parcial (Gráfico 7.5) y en ambos gráficos se comprueba que los residuos oscilan en torno a cero, considerando que no difieren significativamente de un ruido blanco, circunstancia que se comprobó realizando los correspondientes test de hipótesis.

Gráfico 7. 3. RESIDUOS OBTENIDOS (M³)

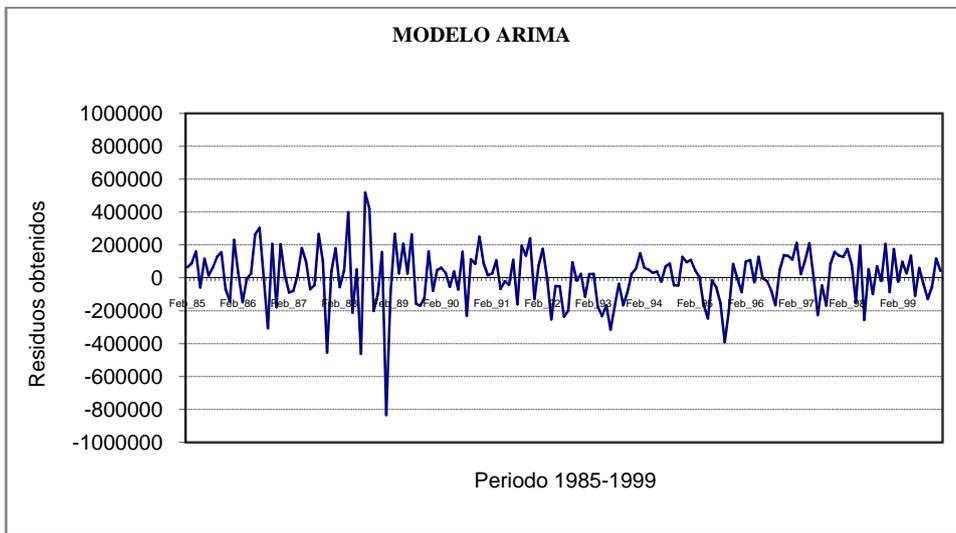


Gráfico 7. 4. CORRELOGRAMA DE LOS RESIDUOS

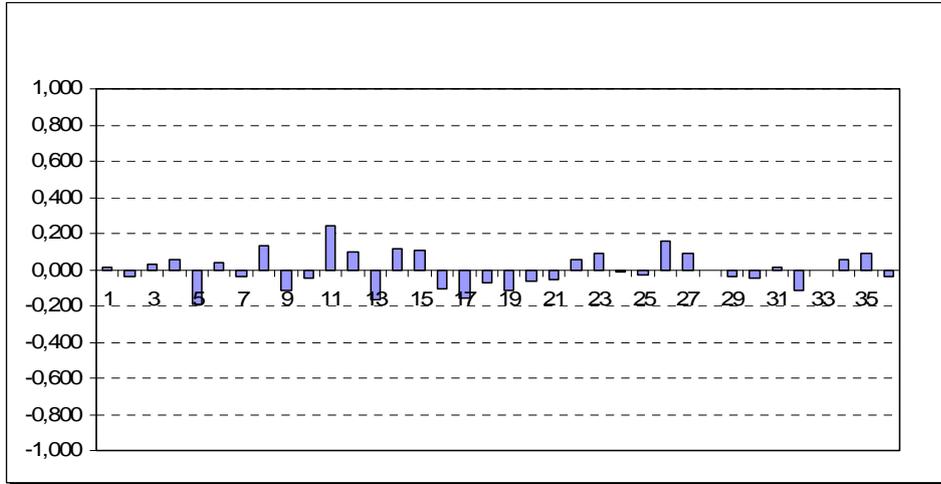
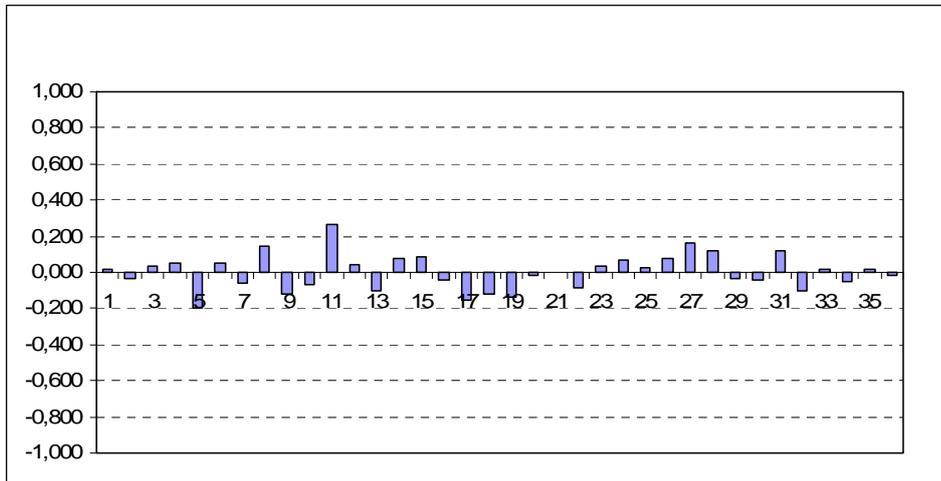


Gráfico 7. 5. CORRELOGRAMA PARCIAL DE LOS RESIDUOS



Continuando con el proceso de validación se calcula la raíz del error cuadrático medio ($RECM$)² y se obtiene 165.210,6 m³ y, además se calcula el Porcentaje de error medio absoluto que es del 24,8% sobre el consumo real de agua, que se recogen en la siguiente tabla 7.3.

$$\sqrt{\frac{\sum_{t=T+1}^{T+h} (\hat{y}_t - y_t)^2}{h}} ; \text{ siendo } y_t \text{ el valor real en un tiempo } t \text{ e } \hat{y}_t \text{ el valor de la predicción y } h \text{ el total de observaciones utilizadas.}$$

Tabla 7. 3. RESULTADOS OBTENIDOS CON MODELO ARIMA SELECCIONADO

	MODELO ARIMA SELECCIONADO
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM)	165.210,6
Error medio absoluto	123.907,69
Desviación media del error	2,48

En resumen, considerando los diferentes aspectos y criterios analizados, es este modelo el que presenta las mejores características y resultados. Sin embargo, la prueba concluyente del modelo elegido para captar el comportamiento de una serie es la predicción, pues se determina su efectividad.

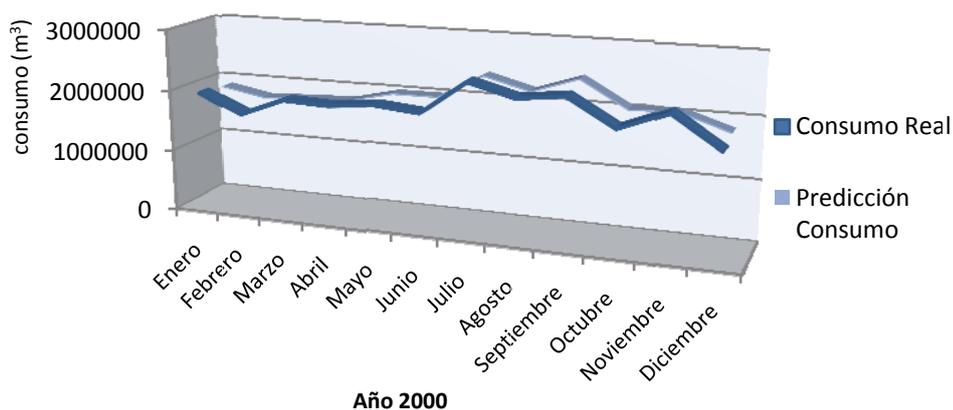
7.2.3. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

Las predicciones del modelo ARIMA seleccionado vienen dadas por la ecuación 7.2, recogida en el apartado anterior, con ella se han obtenido los resultados de las predicciones mensuales de la demanda de agua, en m³, para el año 2000.

En la fase de predicción se utiliza el modelo estimado en la predicción de valores futuros y se consideran las discrepancias ente los valores pronosticados y los reales para comprobar la validez del modelo seleccionado, para ello en la tabla 6.4 se recogen los datos reales de consumo de agua y los resultados obtenidos en el periodo de predicción correspondiente al año 2000 y en el gráfico 7.6 se comparan dichos valores.

Tabla 7. 4. VALORES REALES Y PREDICCIONES CON EL MODELO ARIMA (M^3)

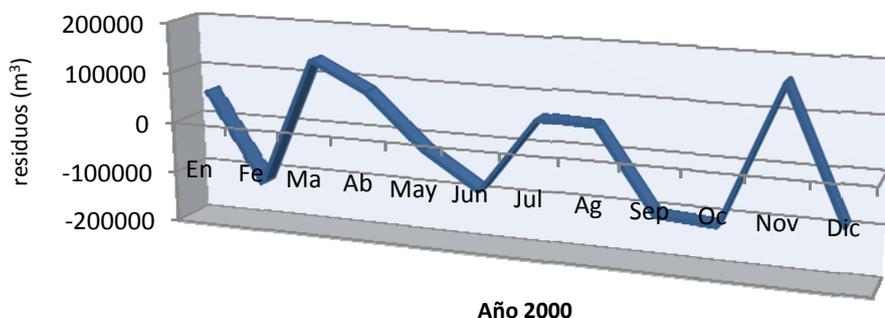
Año 2000	y_t	\hat{y}_t
Enero	1942154	1881628
Febrero	1635220	1751699
Marzo	1925229	1787573
Abril	1897287	1813541
Mayo	1965266	1983869
Junio	1898223	1987319
Julio	2445335	2386505
Agosto	2250862	2196106
Septiembre	2346299	2450288
Octubre	1919858	2030527
Noviembre	2223116	2060258
Diciembre	1725181	1815491

Gráfico 7. 6. CONSUMO REAL- CONSUMO PREVISTO (M^3)

Los residuos obtenidos en la predicción se representan en el gráfico 7.7.

Gráfico 7. 7. RESIDUOS (M³)

PREDICCIÓN MODELO ARIMA (Año 2000)



Analizando los errores cometidos en la predicción, se obtiene que $RECM= 98.182,08$, lo que supone una mejora con respecto al obtenido en la estimación, por tanto, el modelo sigue siendo válido para el periodo de predicción. En la tabla 7.5 se muestran los resultados de la predicción.

Tabla 7. 5. RESULTADOS PREDICCIÓN MODELO ARIMA SELECCIONADO (M³)

	PREDICCIÓN MODELO ARIMA SELECCIONADO (AÑO 2000)
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM)	98.182,08
Error medio absoluto	90.626,50
Desviación media del error	0,05

7.2.4. MODELO ARIMA ALTERNATIVO

Finalmente, se va a considerar el modelo ARIMA alternativo $(0,1,0) \times (0,1,1)_{12}$, propuesto con anterioridad, para así facilitar, en la fase final del estudio, la selección del modelo de predicción más idóneo y la comprobación de la validez y generalización del Modelo Híbrido que se

propone. En la tabla 7.6 aparecen recogidos los valores obtenidos al estimar el modelo alternativo.

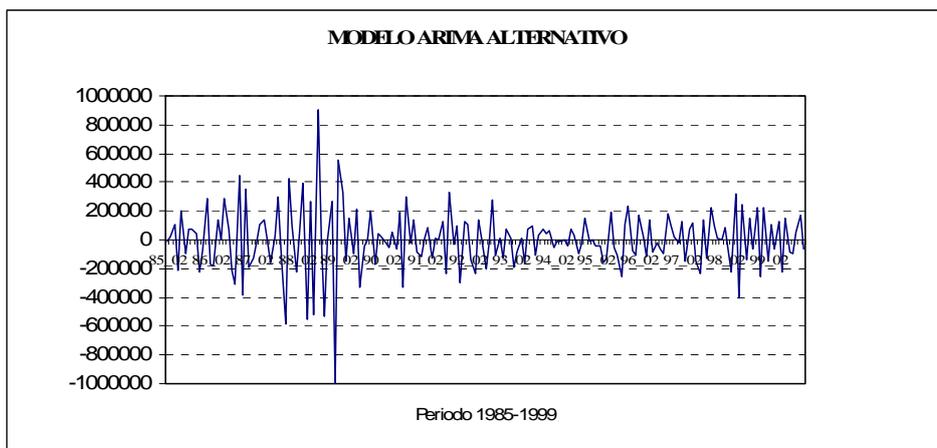
Tabla 7. 6. ESTIMACIÓN MODELO ARIMA ALTERNATIVO

VARIABLE DEPENDIENTE: $\nabla\nabla_{12}$ CONSUMO OBSERVACIONES INCLUIDAS:180				
Variable	Coeficiente	Error Estándar	Estadístico t-Student	Prob.
SMA(12)	-0,911596	0,022995	-39,6428	0,0000
R-cuadrado	0,393856	Media variable dependiente	389,1341	
R-cuadrado coregido	0,393856	Cuasi desv. típica var. dependiente	270040,7	
Cuasi desviación típica residual	210240,917.	Criterio información Akaike	27,35547	
Suma de cuadrados del error	87E+12	Criterio Schwarz	27,37327	
Log. Máxima verosimilitud	-2.447,314	Durbin-Watson stat	2,928689	

En este nuevo modelo, el coeficiente resulta estadísticamente significativo, aunque empeora sensiblemente en términos del coeficiente de determinación. El modelo ARIMA seleccionado permite aumentar la capacidad explicativa, con respecto a este modelo ARIMA alternativo (de 0,393856 a 0,623599), y además, consigue un valor más bajo del estadístico Schwarz y, por tanto, es más idóneo.

Al igual que en el modelo precedente, se muestran los residuos del modelo alternativo que aparecen representados en el gráfico 7.8.

Gráfico 7. 8. RESIDUOS OBTENIDOS (M³)



El *RECM* en este modelo ARIMA alternativo (tabla 7.7) resulta ser 209.652,78 m³ y además, se obtiene un 21,3 % de porcentaje de Error Medio Absoluto sobre el consumo real de agua. Así pues, el modelo alternativo consigue unos resultados menos satisfactorios en la estimación que el modelo ARIMA seleccionado y aplicado con anterioridad.

Tabla 7. 7. RESULTADOS OBTENIDOS CON MODELO ARIMA ALTERNATIVO (M³)

	MODELO ARIMA ALTERNATIVO
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (<i>RECM</i>)	209.652,78
Error medio absoluto	149.155,53
Desviación media del error	2,13

A continuación se recogen las predicciones obtenidas con el modelo alternativo en la tabla 7.8 y gráficamente se observa la evolución de las predicciones finales con respecto a los datos reales de consumo de agua (gráfico 7.9) y los residuos obtenidos (gráfico 7.10)

Tabla 7. 8. VALORES REALES Y PREDICCIONES CON EL MODELO ARIMA ALTERNATIVO (M^3)

Año 2000	y_t	\hat{y}_t
Enero	1942154	1926464,88
Febrero	1635220	1793494,54
Marzo	1925229	1835622,71
Abril	1897287	1874531,38
Mayo	1965266	2031076,42
Junio	1898223	2051197,49
Julio	2445335	2447981,28
Agosto	2250862	2262622,02
Septiembre	2346299	2518850,52
Octubre	1919858	2092516,2
Noviembre	2223116	2103178,82
Diciembre	1725181	1868556,67

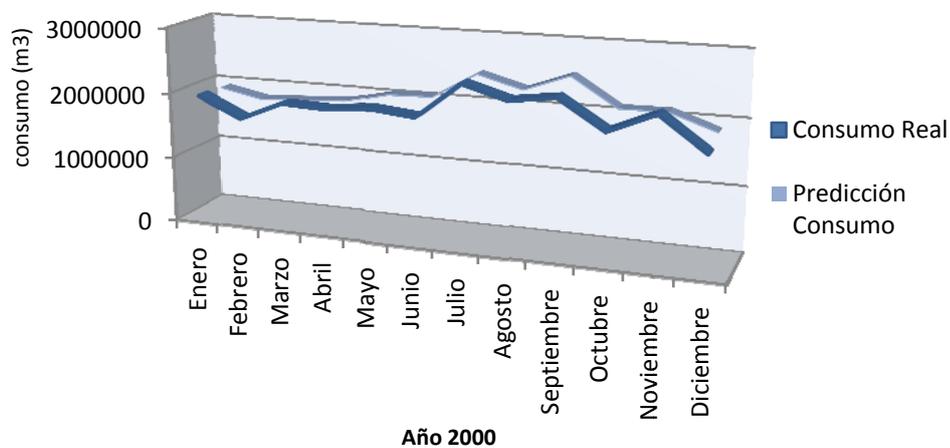
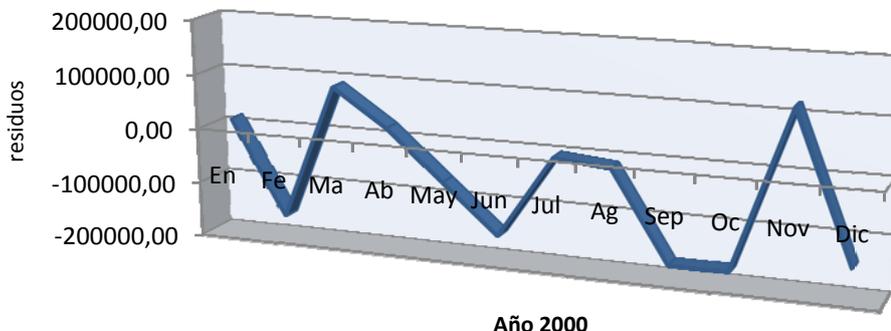
Gráfico 7. 9. CONSUMO REAL – CONSUMO PREVISTO (M^3)

Gráfico 7. 10. RESIDUOS (M³)

PREDICCIÓN MODELO ARIMA ALTERNATIVO (Año 2000)



Para concluir este apartado, se calcula el *RECM* en la predicción a corto plazo (tabla 7.9), del año 2000, para confirmar que este modelo alternativo es menos preciso que el seleccionado. Resultando un *RECM*= 114.108,14 m³ y un 21,3 % de porcentaje de error medio absoluto, mayores que los obtenidos en el modelo ARIMA seleccionado, así pues se verifica que el modelo ARIMA elegido proporciona predicciones más precisas que el alternativo.

Tabla 7. 9. RESULTADOS PREDICCIÓN MODELO ARIMA ALTERNATIVO (M³)

	PREDICCIÓN MODELO ARIMA ALTERNATIVO (AÑO 2000)
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (<i>RECM</i>)	114.108,14
Error medio absoluto	94.003,25
Desviación media del error	0,048

7.3. RESULTADOS

Con un modelo ARIMA $(p, d, q)(P, D, Q)_s$ se pueden calcular predicciones de valores futuros de una serie de datos, información decisiva para la toma de decisiones en cualquier mercado y es un dato fundamental para la planificación operativa y tarifaria en el mercado de suministro del agua.

El modelo ARIMA seleccionado $(0,1,1)_x(0,1,1)_{12}$ se ajusta a la serie de datos de consumo de agua desde 1984 hasta 1999 y se puede concluir que satisface los requerimientos para utilizarlo como herramienta de predicción en los datos objeto de estudio.

Los coeficientes son significativos, se estudia el comportamiento de los errores, no encontrándose correlaciones significativas entre ellos y se calcula, entre otros, el *RECM* que validan el modelo.

La aplicación del modelo ARIMA es una herramienta útil de predicción, a corto plazo, del consumo de agua y permite realizar un análisis comparativo de los valores de predicción con los datos reales, siendo destacable la mejora conseguida en el *RECM* para la predicción. Aunque, el horizonte de predicción es bastante limitado y las hipótesis a priori sobre el comportamiento de a_t no suelen ser realistas. Por ello, en el modelo Híbrido, propuesto en este estudio, se pretende incorporar información adicional y mejorar la precisión en la predicción sobre los modelos ARIMA.

Comparando el modelo ARIMA seleccionado $(0,1,1)_x(0,1,1)_{12}$ con el modelo ARIMA alternativo $(0,1,0)_x(0,1,1)_{12}$, los mejores resultados tanto en cuanto al *RECM* como al Error medio absoluto, se consigue con el primero de ellos.

Se puede concluir que el modelo ARIMA permite la predicción a corto plazo del consumo de agua en zonas urbanas, dicha predicción y errores serán comparados con otros métodos predictivos (redes neuronales y modelo híbrido) que se analizan a continuación con la intención de identificar aquél que sea más preciso.

CAPÍTULO 8

PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES

8. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES

8.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

En el capítulo sexto de este trabajo se han expuesto las principales características y el funcionamiento de las Redes Neuronales Artificiales (RNA) que, según estudios anteriores, han sido ampliamente utilizadas en los últimos años en el marco de predicción de series temporales y se pone de manifiesto que pueden ser más precisas que el modelo ARIMA, seleccionado utilizando la metodología tradicional. Por ello se probarán diversas topologías y procesos de entrenamiento, validando, posteriormente, la red hasta encontrar una que proporcione un error aceptable y mejorado.

Para realizar un estudio sobre la predicción del consumo de agua en Córdoba, expresado en metros cúbicos, al igual que con los modelos ARIMA, se recurre a la serie temporal de consumo y referente al periodo comprendido entre enero de 1984 y diciembre de 1999, el resto de valores históricos, hasta diciembre de 2007, no se dan a conocer a la red, aunque si se consideran para validar las predicciones y conocer mejor la serie temporal.

Es necesario determinar los inputs o variables de entrada, su preprocesamiento o transformación antes de su presentación a la red y su posprocesamiento o transformación de los datos de salida de la red, así como la arquitectura de la red (número de capas ocultas, número de neuronas en cada capa oculta, conexiones entre capas, algoritmo de aprendizaje, función de activación, etc.).

En la selección de los inputs o variables de entrada pueden existir problemas en los que el número de variables de entrada relevantes para el problema no se conoce con exactitud. No es recomendable utilizar todas las variables explicativas, puede que todas no aporten información relevante a la red y, además, es probable que se

complique el aprendizaje incurriendo en un sobreentrenamiento¹, existen dos formas de luchar contra el fenómeno del sobreentrenamiento: la parada temprana (validación cruzada) y limitar el tamaño de la arquitectura de la red². Si, por el contrario, se toman pocas variables de entrada es muy probable que se de un incremento del sesgo. Por tanto, es conveniente realizar un análisis previo de las variables de entrada más relevantes descartando las de escaso poder explicativo.

El Perceptron Multicapa (MLP) es una de las arquitecturas más utilizadas en la resolución de problemas, debido a su capacidad como aproximador universal de funciones y a su fácil uso y aplicabilidad³. Esta arquitectura suele entrenarse mediante el algoritmo BP o de retropropagación de errores. La red elegida para este estudio es precisamente de tipo perceptron multicapa, en base a trabajos como el realizado por Thawornwong y Enke (2004). No es necesario el preprocesamiento de los datos mediante su re-escalado, que consiste en sumar o restar una constante a todas las componentes del vector, y después multiplicar o dividir por otra constante, esto se puede realizar mediante la normalización o conversión del rango de la variable a un intervalo $[0,1]$ o $[-1,1]$.

En lo que respecta al postprocesamiento de las variables de salida, será recomendable en redes neuronales multicapa y dependerá de la función de error que se haya utilizado. En nuestro caso, el Perceptron Multicapa, las neuronas de una capa se conectan con las neuronas de la siguiente capa, es decir, son unidireccionales y se les denomina redes “feedforward” y existe una sola capa de entrada y otra de salida.

Para la selección del número de capas ocultas y el número de neuronas en estas capas no existe un método o regla determinada. Generalmente es el diseñador quien determina estos parámetros por la experiencia, o por prueba y error, y teniendo en cuenta que un número excesivo de capas puede generar ruido, pero se puede conseguir mejor

¹ Sobreaprendizaje o sobreajuste tiene lugar en aquellos casos en los que la red está aprendiendo demasiado, ya que recoge la estructura de datos e incluso el ruido que presentan, de tal manera que se degrada la capacidad de generalización de la red.

² Martín de Brio, B.: Sanz Molina, A. (2006)

³ Isasi Viñuela, Pedro (2004)

tolerancia a fallos⁴, y que el número de neuronas ocultas puede influir en la eficacia del aprendizaje y generalización de la red⁵.

Por último, es necesario determinar las funciones de activación de las neuronas de las capas ocultas⁶. Por lo general en las redes tipo multicapa generalizado la función de activación suele ser sigmoideal.

$$F(x) = 1 / (1 + e^{-x})$$

En el diseño de la red neuronal se introducen los inputs o variables de entrada y la salida deseada ó output. Mediante la función de activación se produce la transformación de las entradas de cada neurona de una misma capa en salidas de neuronas de esta capa a la siguiente, convirtiéndose en las entradas de la capa superior. Una vez obtenida la salida de la red, se compara con la salida deseada y se calcula el error global por unidad de salida y la contribución relativa de los nodos a dicho error.

Idealmente, una vez diseñada la arquitectura de la red neuronal, ésta debería entrenarse hasta un punto óptimo en el que el error de generalización es mínimo. El procedimiento más ampliamente utilizado en la fase de desarrollo de una red neuronal supervisada es el denominado **validación cruzada** que consiste en entrenar y validar a la vez para detenerse en el punto óptimo⁷.

En definitiva, la capacidad de generalización de la red la determinan en buena medida las siguientes tres circunstancias: 1) la arquitectura de la red, 2) el número de casos usados en el entrenamiento y 3) la complejidad del problema⁸.

⁴ Bonilla (1997)

⁵ Hiler, J.R.; Martínez, V.J. (1995)

⁶ Lineal, sigmoide o logística, etc.

⁷ Martín de Brio, B.: Sanz Molina, A. (2006)

⁸ Haykin, S. (1999)

8.2. PREDICCIÓN CON REDES NEURONALES ARTIFICIALES

8.2.1. ESTRUCTURA DE LA RED NEURONAL

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) están siendo utilizadas, en los últimos años, en múltiples campos, uno de ellos es la predicción de series temporales. En este apartado se utilizan las RNA para obtener predicciones de la serie temporal “Demanda de agua”, en base a datos históricos.

En la elaboración de una red con mayor capacidad de predicción que otras técnicas, se diseñan numerosas redes combinando arquitecturas, funciones de activación, retardos de entrada y nodos en la capa oculta, y de ellas se selecciona una red neuronal de tipo perceptrones multicapa⁹. Estas redes están formadas por varias neuronas o nodos conectados entre sí y organizados por capas; cada capa se compone de una o más neuronas, donde su número es independiente del número de nodos de cualquier otra capa. La arquitectura de la red se define por el número de capas, el número de nodos por capa y las conexiones entre estos.

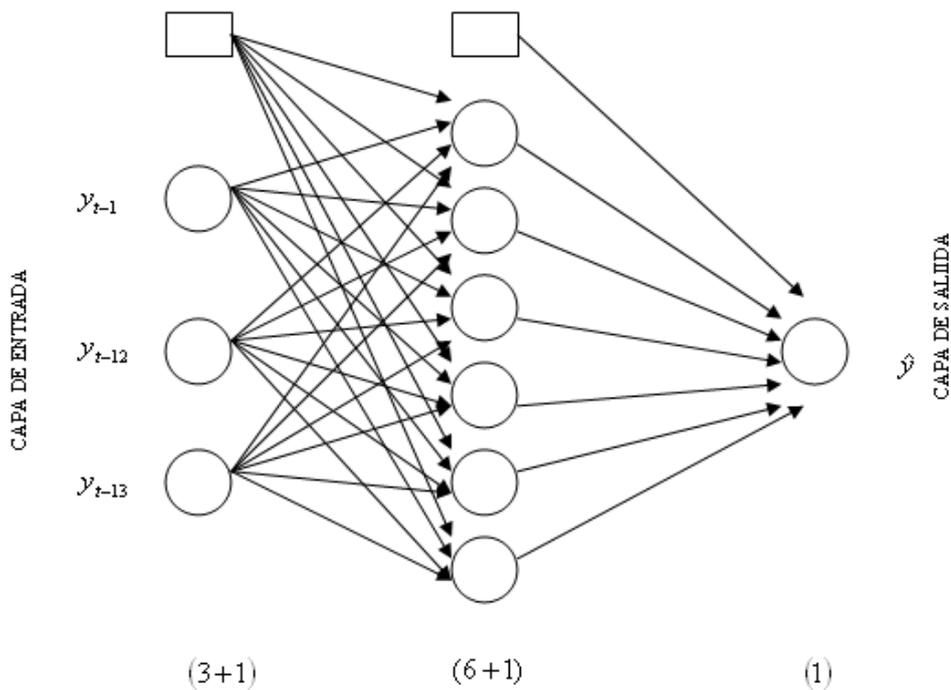
La RNA seleccionada en este trabajo es de tres capas: una de entrada, una oculta y una de salida, por tanto MLP (3x6x1), de propagación hacia atrás (backpropagation) con conexiones estándar y cada nivel conectado con el inmediatamente anterior (véase figura 8.1). Las funciones de activación utilizadas son de tipo lineal, donde el conjunto de valores de activación será el intervalo [0,1] para la primera capa, y sigmoïdal o logística, para la única capa oculta y la capa de salida, tomando como variables de entrada: $y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-3}$.

Como consecuencia, el número de inputs es tres, el número de neuronas en la capa oculta es seis y el número de unidades en la capa de salida se reduce a una, la única variable dependiente, lo que da lugar a un total de 31 pesos (24 hasta la capa oculta, más 7 hasta la capa de salida).

⁹ Esta elección se fundamenta en trabajos como el de Thawornwong y Enke (2004)

No existe una fórmula mágica para seleccionar el número óptimo de nodos para la capa oculta y se recomienda que se debe comenzar con una o dos capas ocultas¹⁰. La estructura y topología de la red puede variarse y dadas las diversas redes propuestas en la literatura, se han probado otras arquitecturas y otras longitudes de la secuencia temporal que se presenta como patrón de entrada a la red, es decir el número de entradas a la red. Después de un análisis previo de la serie temporal y mediante prueba y error, se experimentan diferentes arquitecturas, comprobando que la red seleccionada es la más adecuada en este estudio, ya que consigue mejorar la predicción.

Figura 8. 1. RED (3 x 6 x 1)



¹⁰ García *et al.*(1996) y Kaastra y Boyd (1996)

8.2.2. MÉTODO DE APRENDIZAJE

En el aprendizaje de la red se presenta un patrón de entrada que es supervisado en relación a la información de la salida deseada. Se optó por el algoritmo de entrenamiento por retropropagación del error (*Backpropagation o BP*), por conseguir mejores resultados con él.

Una vez probadas cada una de las arquitecturas con diferentes datos de entrada, funciones de activación, nodos en la capa oculta, número de capas, etc., el criterio utilizado para elegir el mejor resultado de las distintas sesiones es la raíz del error cuadrático medio (*RECM*). Así se elegirá como mejor red la que minimice el *RECM*.

La serie temporal de la demanda de agua, que se presenta a la red, corresponde al periodo comprendido entre enero de 1984 y diciembre de 1999, con un número de 192 observaciones. De las 192 observaciones, se pierden los 13 datos iniciales correspondientes a los retardos de las variables de entrada y_{t-1} , y_{t-12} , y_{t-13} , por lo que se quedan en 179 observaciones. El resto de la serie temporal, hasta diciembre de 2007 se reserva para verificar predicciones y estudiar la serie temporal completa.

El tiempo de entrenamiento o aprendizaje de la red seleccionada ha sido de 5 horas 40 minutos con el programa Neuroshell. A continuación se presentan los pesos finales para la capa oculta y la capa de salida (tabla 8.1 y 8.2).

Tabla 8. 1. PESOS DE LA CAPA OCULTA

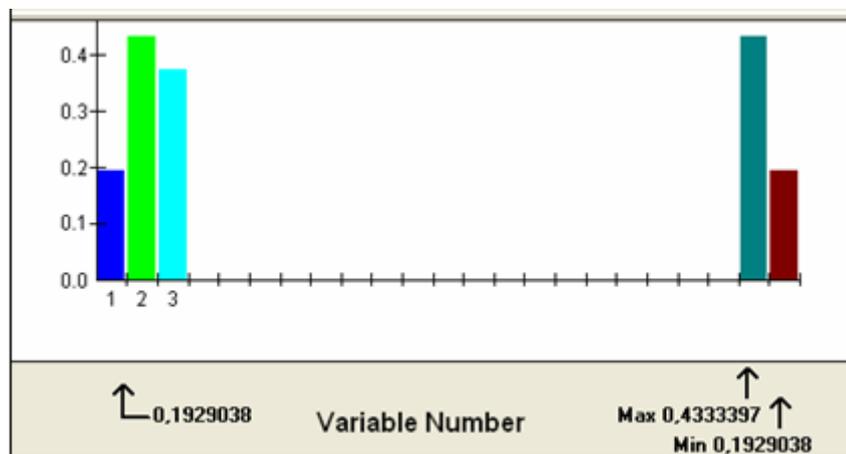
4 X 6	BIAS	1	2	3
1	-0,8857	-2,4460	20,1832	-7,3233
2	7,5275	14,0259	-6,0577	20,7681
3	-6,9893	-6,1390	5,1686	13,5506
4	11,3011	9,0218	34,6806	-3,7526
5	-0,0556	3,4395	18,3107	8,5004
6	6,6698	8,1662	-18,7815	15,0111

Tabla 8. 2. PESOS DE LA CAPA DE SALIDA

7 x 1	BIAS	1	2	3	4	5	6
1	7,0860	-3,7209	2,9324	3,9767	0,6182	-3,1946	-7,2984

Si analizamos la influencia de los inputs en el consumo de agua (Gráfico 8.1), observamos que la variable retardada y_{t-12} es la que más influye en el consumo final estimado, contribuyendo en un 43,3% en este consumo. Los otros dos retardos y_{t-1} , y_{t-13} , contribuyen con un 19,3% y 37,4% respectivamente.

Gráfico 8. 1. CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES

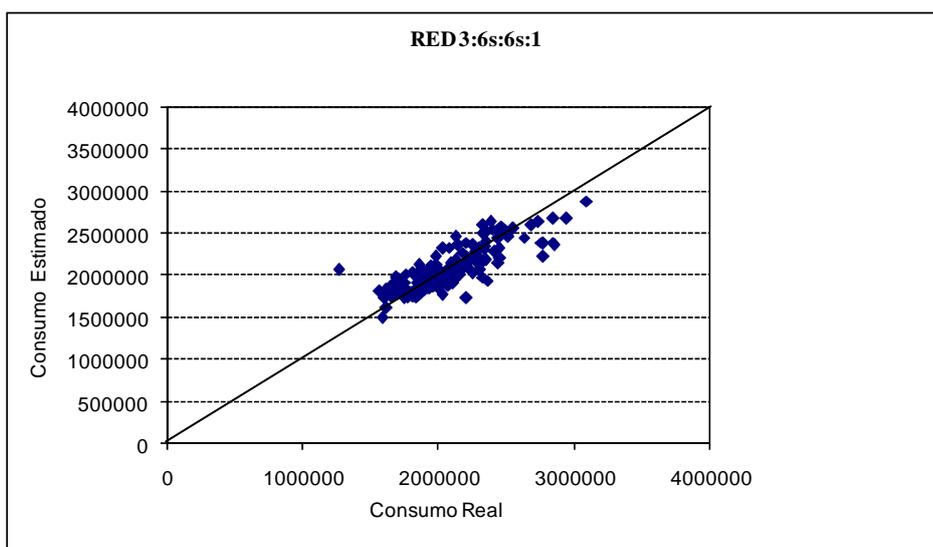


8.2.3. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA.

Ya se ha destacado el papel predominante que tiene el consumo de agua para la vida y la importancia que tiene el disponer de predicciones precisas para la planificación y gestión sostenible del agua. Por ello, una vez seleccionada la red neuronal que mejor se ajusta a la evolución del consumo de agua en el periodo considerado, se procede al análisis de la predicción con el objetivo de su comparación con otros métodos que pueden ser susceptibles de ser utilizados como instrumentos de predicción.

A continuación se representa un gráfico comparativo (gráfico 8.2) del consumo real de agua y el consumo estimado por la red, en metros cúbicos, en el que se puede observar un ajuste a la bisectriz, que representa la predicción perfecta.

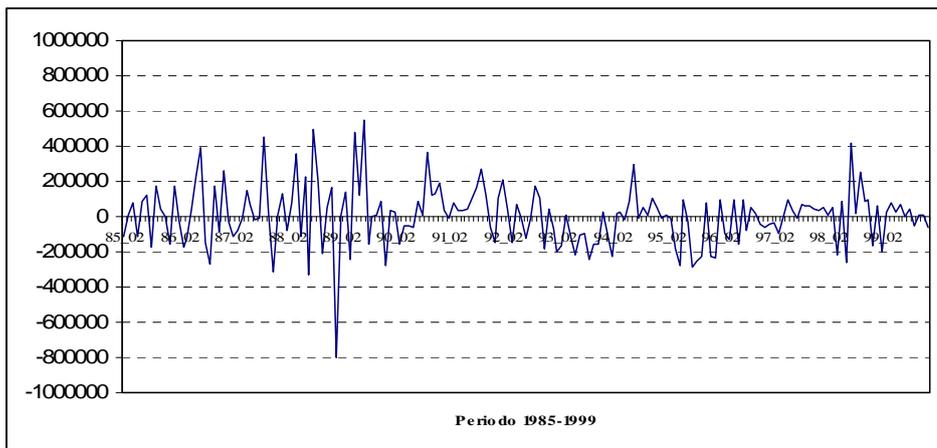
Gráfico 8. 2. *CONSUMO REAL Y CONSUMO ESTIMADO (M³)*



En el gráfico 8.3 están representados los errores en los que incurre la red elegida, es decir la diferencia entre el consumo real y el consumo estimado. Se observa que la red incurre en errores por

sobrevaloración –consumo estimado superior al consumo real- y por infravaloración –consumo estimado inferior al consumo real-, lo que origina picos de errores negativos y positivos respectivamente. Los mayores picos de error se dan entre los años 1986 y 1989, destacando este último año con un pico de error por sobrevaloración de más de 700.000 m³.

Gráfico 8. 3. ERRORES COMETIDOS POR LA RED



Para realizar predicciones del consumo de agua con RNA es necesario calcular la ecuación implícita que desarrolla la red. Como se ha comentado anteriormente, la red utilizada es del tipo Perceptrón Multicapa (MLP) con una única capa oculta y con funciones de activación de tipo lineal para la capa de entrada, con un rango de valores dentro del intervalo $[0,1]$, y logístico para la capa oculta y la de salida, donde cada neurona de la red procesa la información recibida por sus entradas y produce una respuesta o activación que se propaga, a través de las conexiones correspondientes¹¹.

Para calcular la entrada neta del elemento j de la capa oculta se toma la suma ponderada de las entradas con los pesos sinápticos.

¹¹ Isasi Viñuela, P.; Galván León, I.M. (2004)

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j ; x_0 = 1$$

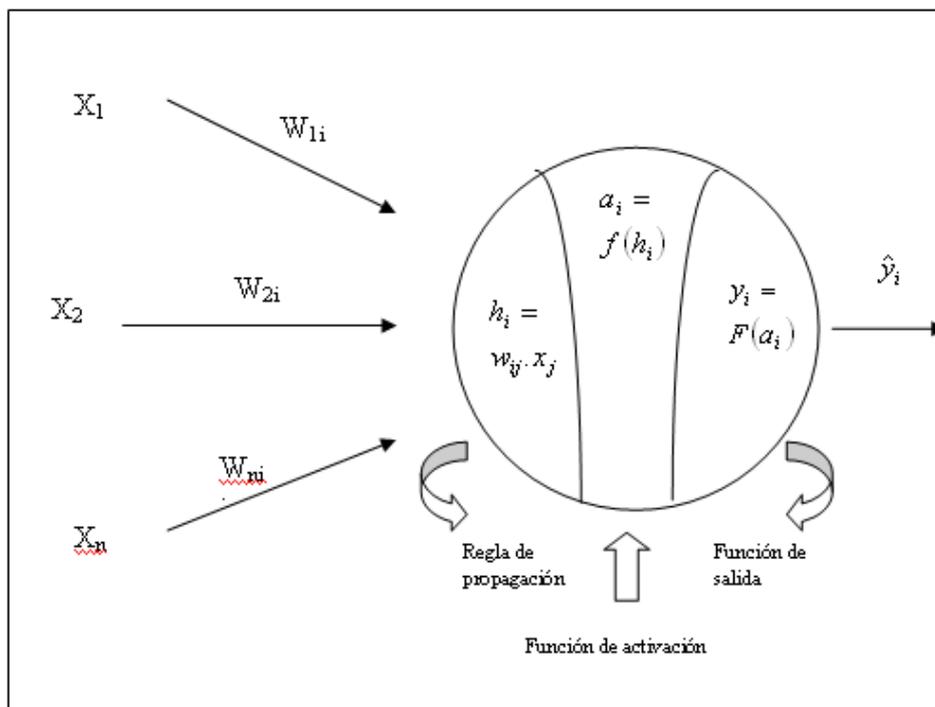
Siendo w_{ij} = pesos de entrada a las neuronas de la capa oculta.

El valor de salida vendrá dado por la función de activación, función logística, que combina las entradas netas con su estado de activación.

$$a_i(t) = f_i(h_i(t))$$

Gráficamente el funcionamiento de una neurona artificial lo podemos observar representado en la figura 8.2.

Figura 8. 2. MODELO DE NEURONA ARTIFICIAL



Así pues, tras normalizar los inputs, se utilizan las matrices de pesos y se aplican las funciones de activación para poder obtener predicciones

con esta red neuronal. Para comprender mejor este proceso se muestra como se realiza la primera predicción correspondiente al mes de enero del año 2000:

- Se normalizan o escalan los inputs en el intervalo $[0,1]$ y para el periodo considerado de estimación (1985:02-1999:12). Por ejemplo nos fijamos en la normalización de los inputs para el primer mes de estimación (febrero de 1985), una vez normalizados se obtiene como vector de entrada:

$$x = [1 \ 0,31 \ 0,25 \ 0,27]$$

donde aparecen los valores de los seis inputs y el valor 1 como primer componente que permitirá la actuación del umbral.

- Se calculan las entradas netas de los nodos ocultos. Para ello se multiplica el vector de entrada anterior por la matriz de pesos de las conexiones entre la capa de entrada y la oculta.

$$\begin{aligned}
 h_i(t) &= \sum_j w_{ij} x_j = \\
 &= [1 \ 0,31 \ 0,25 \ 0,27] * \\
 &\begin{bmatrix} -0,8857 & 7,5275 & -6,9893 & 11,3011 & -0,0556 & 6,6698 \\ -2,4460 & 14,0259 & -6,1390 & 9,0218 & 3,4395 & 8,1662 \\ 20,1832 & -6,0577 & 5,1686 & 34,6806 & 18,3107 & -18,7815 \\ -7,3233 & 20,7681 & 13,5506 & -3,7526 & 8,5004 & 15,0111 \end{bmatrix} = \\
 &= [1,4439 \ 4,7142 \ -3,9027 \ -0,7401 \ -1,2792 \ 8,5882]
 \end{aligned}$$

- Se aplica la función logística a cada nodo de la capa oculta para obtener el vector de salida de la capa oculta.

$$a_i(t) = f_i(h_i(t))$$

La función logística viene dada por la siguiente expresión

$$f_1(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Así se obtiene:

$$a_i = [0,8091 \ 0,9911 \ 0,0198 \ 0,3230 \ 0,2177 \ 0,9998]$$

- Se multiplica el vector de salida de la capa oculta por el vector de pesos de las conexiones entre las neuronas ocultas y la de salida para obtener la entrada neta de la capa de salida. Al igual que para calcular las entradas netas de las neuronas ocultas, se añade un primer componente de valor 1 en el vector

$$[1 \ 0,8091 \ 0,9911 \ 0,0198 \ 0,3230 \ 0,2177 \ 0,9998]^*$$

$$\begin{bmatrix} 7,0860667 \\ -3,7209842 \\ 2,9324872 \\ 3,9767687 \\ 0,6182052 \\ -3,1946509 \\ -7,2984099 \end{bmatrix} = 0,73210884$$

- La salida de la red se calcula aplicando, de nuevo, la función logística a la entrada anterior.

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{-0,73210884}} = 0,3247$$

- Mediante una regresión simple donde la variable “y” viene dada por los valores de consumo estimados por la red y se toma como “x” los datos obtenidos como salida de la red, se obtienen los siguientes coeficientes necesarios para proceder a la predicción.

	<i>Coeficientes</i>
C	1035411,61
\hat{y}	2286273,74

- Una vez calculados los coeficientes, se utilizan con el propósito de predecir valores en el futuro, basta repetir los pasos anteriores en el periodo de tiempo deseado: normalizar inputs, aplicar matriz de pesos y función de activación y, por último, obtener la salida de la red que proporciona la predicción.

Se calcula a modo de ejemplo para el mes de enero del año 2000:

$$= [1 \ 0,3210 \ 0,3959 \ 0,2430] * \begin{bmatrix} -0,8857 & 7,5275 & -6,9893 & 11,3011 & -0,0556 & 6,6698 \\ -2,4460 & 14,0259 & -6,1390 & 9,0218 & 3,4395 & 8,1662 \\ 20,1832 & -6,0577 & 5,1686 & 34,6806 & 18,3107 & -18,7815 \\ -7,3233 & 20,7681 & 13,5506 & -3,7526 & 8,5004 & 15,0111 \end{bmatrix} =$$

$$= [4,5400 \ 4,5849 \ 3,6207 \ 4,4138 \ 4,1350 \ 5,5037]$$

$$a_i = [0,9894 \ 0,9899 \ 0,0261 \ 0,9880 \ 0,0157 \ 0,9959]$$

$$[1 \ 0,9894 \ 0,9899 \ 0,0261 \ 0,9880 \ 0,0157 \ 0,9959]^*$$

$$\begin{bmatrix} 7,0860667 \\ -3,7209842 \\ 2,9324872 \\ 3,9767687 \\ 0,6182052 \\ -3,1946509 \\ -7,2984099 \end{bmatrix} = -0,29742774$$

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{0,29742774}} = 0,4262$$

Predicción Consumo (Enero 2000): 2.009.790,42 m³.

Los valores predichos de consumo de agua mediante la Red Neuronal seleccionada, son comparados con los datos de consumo reales para ese mismo año y se muestran en la tabla 8.3.

Tabla 8. 3. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES RED NEURONAL

Año 2000	RED	CONSUMO REAL
Enero	2009790,42	1942154
Febrero	1785700,3	1635220
Marzo	1931681,6	1925229
Abril	1917269,98	1897287
Mayo	2065667,72	1965266
Junio	1974148,13	1898223
Julio	2395722,89	2445335
Agosto	2262241,53	2250862
Septiembre	2419617,86	2346299
Octubre	2005335,28	1919858
Noviembre	2127892,06	2223116
Diciembre	1910463,07	1725181
Total	24805530,8	24174030

Por tanto, el consumo global del agua previsto para el año 2000 se estima en 24.805.530,8 m³.

La representación gráfica de los valores estimados para el año 2000 con la red neuronal seleccionada y los valores observados se encuentra en el Gráfico 8.4. Ambas líneas representadas se encuentran muy próximas, lo que significa que la red ha aprendido y que tiene capacidad de generalización. Los residuos obtenidos con la red se muestran en el Gráfico 8.5.

Gráfico 8. 4. CONSUMO REAL – CONSUMO PREVISTO (M³)

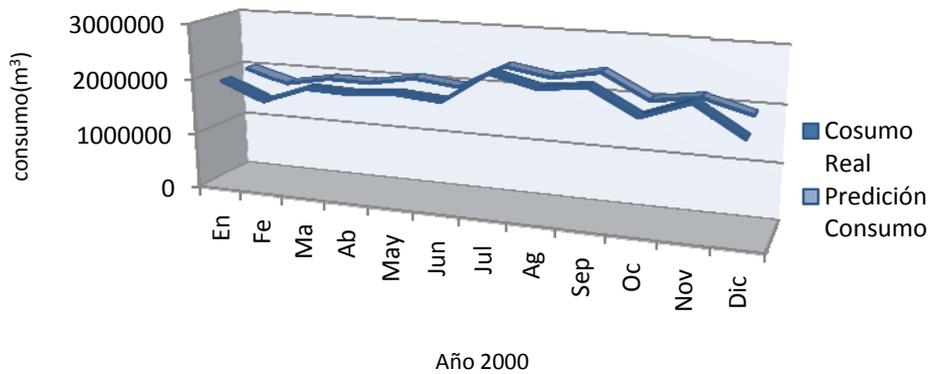
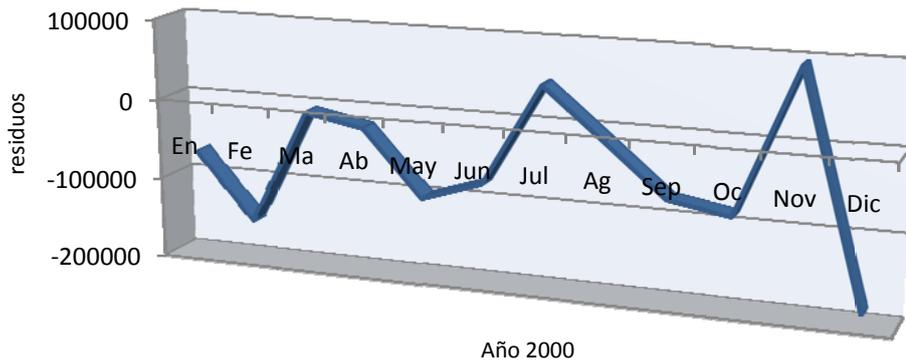


Gráfico 8. 5. RESIDUOS OBTENIDOS- PREDICCIÓN (M³)



8.3. RESULTADOS

En la tabla 8.4 se recogen comparativamente los resultados obtenidos en la predicción del año 2000 tras la aplicación del modelo ARIMA seleccionado y la Red Neuronal Artificial a los datos de la serie temporal correspondiente al consumo global de agua durante el periodo 1984-1999.

Tabla 8. 4. COMPARACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS EN PREDICCIÓN ARIMA Y RNA

	MODELO ARIMA SELECCIONADO	RED NEURONAL ARTIFICIAL
Bondad de ajuste (R²)	62%	69,28%
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM)	98.182,08	92.274,51
Error Medio Absoluto	90.626,50	76.764,41

Como se puede observar los resultados obtenidos en la predicción aplicando la RNA 3(I):6(log):1(log) mejoran a los resultados que se obtienen con el Modelo ARIMA. Con la red se consigue un grado de ajuste (R²) mayor, del 69,28%, que el alcanzado con el Modelo ARIMA, del 62%.

Se optó por el criterio de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM) para elegir el mejor resultado y se aprecia que la Red Neuronal minimiza el RECM, pasa de 98.182,08 a 92.274,51, y, a su vez, disminuye el error medio absoluto. En este punto se debe indicar que el proceso de estimación de la red neuronal se realiza con un número de parámetros superior a la estimación del modelo ARIMA tradicional lo que favorece la obtención de mejores resultados en la bondad de ajuste del modelo y en la capacidad predictiva del mismo, al menos en el corto plazo.

Por tanto, se comprueba que la utilización de redes neuronales para resolver problemas de predicción de series temporales es más eficiente que recurrir a modelos basados en técnicas clásicas y lineales como es el modelo ARIMA.

CAPÍTULO 9

PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELO HÍBRIDO

9. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA CON MODELO HÍBRIDO

9.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Los problemas de predicción de series temporales, como es el estudio que nos ocupa, tradicionalmente han sido resueltos mediante métodos estadísticos clásicos, como los modelos ARIMA, y métodos más recientes, como las Redes Neuronales Artificiales, ya examinados en las secciones precedentes. En este estudio se propone un enfoque distinto al empleado hasta el momento, que se centra en la implementación de las dos técnicas anteriores: modelos ARIMA y Redes Neuronales, persiguiendo obtener mejoras en la precisión de la predicción del consumo de agua en un área urbana y menores errores de los que se obtenían si se consideraba exclusivamente uno de los métodos tratados por separado.

En este modelo Híbrido la predicción de valores es la proporcionada por la estimación del modelo ARIMA complementada con la predicción del error obtenido con la Red Neuronal, alimentada con los residuos ARIMA. Por ello la predicción debe ser más precisa, dado que incorpora información adicional con la predicción de valores futuros del ruido a_t que obtenemos con una red neuronal que toma como entradas los errores ARIMA.

Además, la idea de combinar las Redes Neuronales con los modelos ARIMA es tratar de captar las no linealidades que en general cabe esperar que existan entre los datos de una serie, que el modelo ARIMA no es capaz de reflejar y las redes sí. Con el modelo Híbrido, que se propone en este estudio, se pretende extraer las relaciones lineales temporales entre los datos, con el modelo ARIMA seleccionado, y en la parte residual restante, extraer las posibles relaciones no lineales, mediante la Red Neuronal.

Para validar las posibilidades de este método híbrido se aplicará análogas topologías de red a los residuos obtenidos del modelo ARIMA seleccionado y del modelo ARIMA alternativo. Además se realizará un

estudio comparativo entre los resultados de ambos modelos ARIMA, la red neuronal y el método Híbrido.

Por último, se llevará a cabo una valoración de los pronósticos obtenidos con el modelo ARIMA seleccionado, la Red Neuronal, y el modelo ARIMA+RED y se identificará el modelo más robusto, en base al criterio que se ha venido utilizando para tal fin, que es hacer mínima la Raíz del Error Cuadrático Medio (*RECM*).

9.2. PREDICCIÓN CON MODELO HÍBRIDO

9.2.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HÍBRIDO

La construcción del modelo híbrido combina diferentes modelos (ARIMA y Redes Neuronales Artificiales) con distintas características. Como se ha indicado anteriormente, la predicción del consumo de agua será la proporcionada por la estimación del modelo ARIMA seleccionado, $(0,1,1)_x(0,1,1)_{12}$, completada con la predicción del error obtenido con una red neuronal.

Para obtener la red neuronal más precisa se diseñan numerosas redes combinando arquitecturas, funciones de activación, retardos de entrada y nodos en la capa oculta. A continuación en la tabla 9.1 se recoge el comportamiento de algunas de las arquitecturas empleadas, para ello se han calculado el R^2 y el *RECM*.

Tabla 9. 1. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CADA ARQUITECTURA

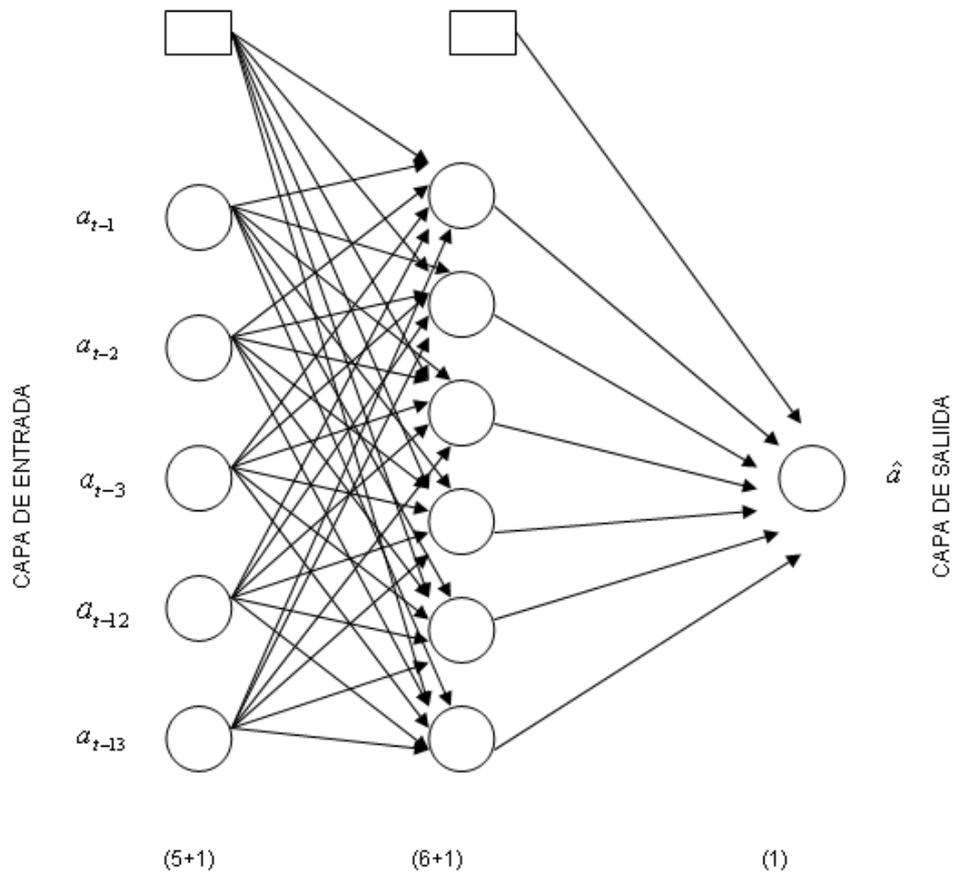
ARQUITECTURA	FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN	VARIABLES DE ENTRADA	R^2	RECM
(6 x 9 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-4}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,7822	250.635,3
(6 x 4 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-4}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,4829	150.024,4
(6 x 4 x 1)	Lin (-1,-1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-4}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,4572	864.062,5
(5 x 9 x 1)	Lin (-1,-1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,6904	542340,2
(6 x 4 x 1)	Logística Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,4637	434.246,3
(5 x 4 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,4047	127.978,59
(6 x 16 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-4}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,9475	267.587,3
(5 x 9 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,6956	104408,61
(4 x 4 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}$	0,2271	224.540,52
(5 x 4 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-3}, a_{t-4}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,3854	216.407,8
(4 x 9 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-12}, a_{t-13}$	0,3662	242.473,26
(5 x 4 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}$	0,4143	208.342,1
(9 x 4 x 1)	Lin (0,1) Logística Logística	$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-4}, a_{t-5}, a_{t-6}, a_{t-12}, a_{t-13}, a_{t-14}$	0,6254	121.759,89

La red seleccionada, en base al criterio *RECM*, es una red multicapa (5 x 6 x 1) de propagación hacia atrás (backpropagation), con funciones de activación: lineal (0,1), para la primera capa, y sigmoideal o

logística, para la única capa oculta y la capa de salida (véase figura 9.1). Las variables de entrada son los residuos del modelo ARIMA seleccionado con la siguiente estructura de retardos:

$$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}.$$

Figura 9. 1. Red (5 x 6 x1)



El tiempo de entrenamiento o aprendizaje de la red que se ha seleccionado fue de 6 horas y 25 minutos, y los pesos finales relativos a cada una de las capas se presentan a continuación en las tablas 9.2 y 9.3.

Tabla 9. 2. PESOS DE LA CAPA OCULTA

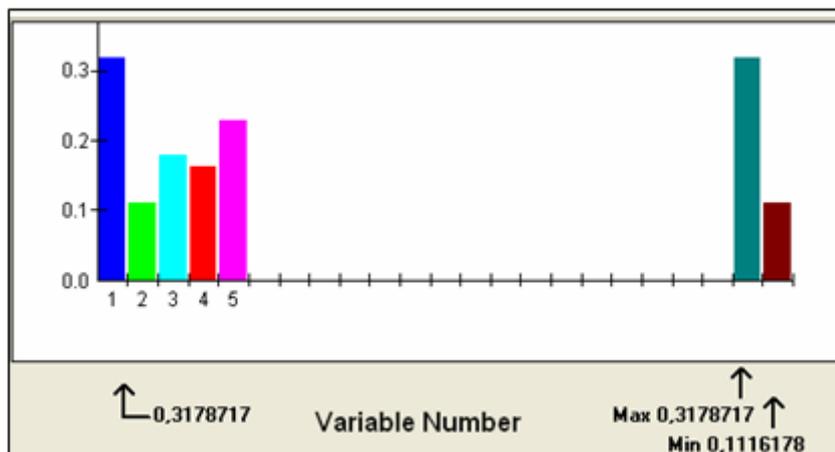
6X 6	BIAS	1	2	3	4	5
1	34,1369	-3,6628	9,0125	50,0416	-8,2242	18,5127
2	3,5491	1,8634	19,3064	-2,2679	16,7471	-2,2675
3	-8,3729	13,2287	-4,4947	7,9025	-3,6849	11,0063
4	2,8476	-2,8764	22,6916	1,7523	16,1314	-5,8293
5	-6,2833	18,9470	43,0283	-4,8807	37,6807	-0,8363
6	-4,5941	9,6631	-0,1892	4,4542	-3,4654	6,0675

Tabla 9. 3. PESOS DE LA CAPA DE SALIDA

7 X 1	BIAS	1	2	3	4	5	6
1	11,1469	1,3483	-3,1600	12,7601	3,0104	0,9146	23,0478

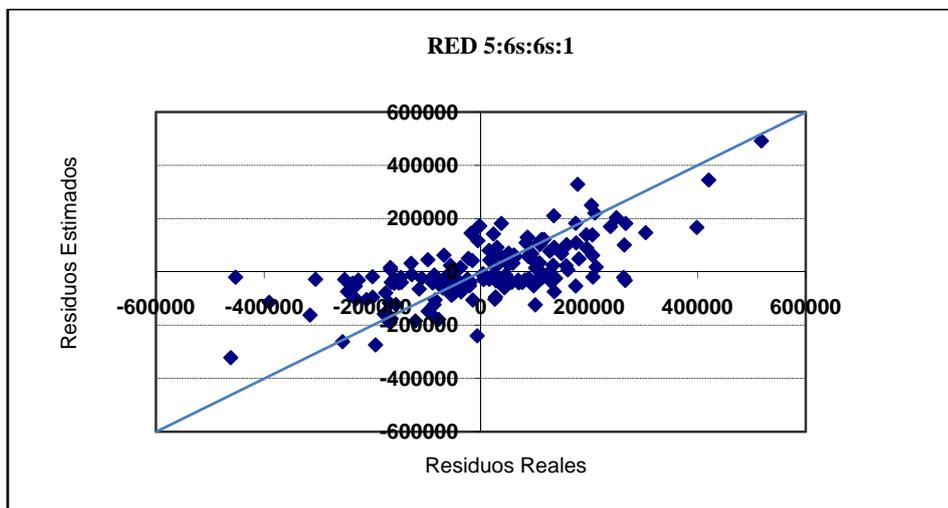
Si analizamos la contribución de los factores, tal y como aparece en el gráfico 9.1, observamos que el error retardado que mayor influencia tiene en el consumo de agua es a_{t-1} , que contribuye en un 31,8%, y los restantes errores retardados, a_{t-2} , a_{t-3} , a_{t-12} , a_{t-13} , determinan un 11,2%, 17,8%, 16,27% y 22,9% respectivamente.

Gráfico 9. 1. CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES



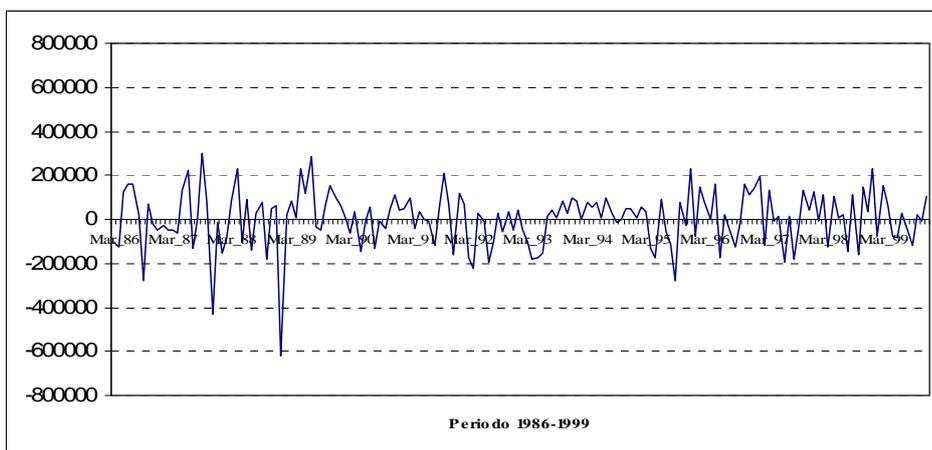
Se procede a representar en el Gráfico 9.2 los errores reales y los errores estimados por la red, se observa que la nube de puntos se ajusta a la bisectriz.

Gráfico 9.2. RESIDUOS ESTIMADOS RED vs. RESIDUOS REALES (M^3)



A continuación, en el gráfico 9.3, se representan los errores cometidos por la red neuronal propuesta, como resultado de la diferencia entre los errores reales y los errores estimados. Se puede observar que la red incurre tanto en sobrevaloración como en infravaloración, destacan los mayores picos de error en los años 1988 y 1989 que se dan por sobrevaloración –consumo estimado superior al consumo real-.

Gráfico 9.3. ERRORES COMETIDOS POR LA RED



9.2.2. PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

La precisión en la predicción de valores es particularmente importante en la predicción de la demanda de agua. El consumo de agua es imprescindible para la población, por lo que se hace necesario precisar al máximo tal predicción, máxime en periodos de escasez como viene ocurriendo en los últimos años.

Para realizar predicciones de valores futuros del ruido a_t con RNA, con las que complementar la predicción de valores proporcionada por la estimación del modelo ARIMA, es necesario calcular la ecuación implícita que desarrolla la red. Si bien la red utilizada es similar a la del capítulo anterior, del tipo Perceptrón Multicapa (MLP), y el proceso de cálculo de la ecuación implícita también es análogo: normalizar los inputs, utilizar las matrices de pesos y aplicar las funciones de activación, es necesario recordar que las variables de entrada son los residuos del modelo ARIMA seleccionado con la siguiente estructura de retardos: $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$ y con seis neuronas en la única capa oculta.

Al igual que se analizó este proceso para el mes de enero, en el capítulo anterior, en este apartado se presentan los pasos a seguir para obtener la primera predicción de errores correspondiente al mes de enero del año 2000:

- Se normalizan o escalan los inputs en el intervalo $[0,1]$ y para el periodo considerado de estimación (1986:03-1999:12). La normalización de los inputs para el primer mes de estimación (marzo de 1986):

$$[0,64 \ 0,79 \ 0,51 \ 0,68 \ 0,67]$$

- Las entradas netas de los nodos ocultos, se calculan multiplicando el vector de entrada anterior por la matriz de pesos de las conexiones entre la capa de entrada y la oculta.

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j$$

$$= [1 \ 0,64 \ 0,79 \ 0,51 \ 0,68 \ 0,67]^*$$

$$\begin{bmatrix} 34,1369 & 3,5491 & -8,3729 & 2,8476 & -6,2833 & -4,5941 \\ -3,6628 & 1,8634 & 13,2287 & -2,8764 & 18,9470 & 9,6631 \\ 9,0125 & 19,3064 & -4,4947 & 22,6916 & 43,0283 & -0,1892 \\ -50,0416 & -2,2679 & 7,9025 & 1,7523 & -4,8807 & 4,4542 \\ -8,2242 & -16,7471 & -3,6849 & 16,1314 & 37,6807 & -3,4654 \\ 18,5127 & -2,2675 & 11,0063 & -5,8293 & -0,8363 & 6,0675 \end{bmatrix} =$$

$$= [19,9978 \ 5,8313 \ 5,3674 \ 4,8819 \ -5,4039 \ 5,3640]$$

Se aplica la función logística con la siguiente expresión:

$$f_1(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

Y se obtiene:

$$a_i = [1,0000 \ 0,9971 \ 0,9954 \ 0,9925 \ 0,0045 \ 0,9953]$$

- Entrada neta de la capa de salida:

$$[1 \ 1,0000 \ 0,9971 \ 0,9954 \ 0,9925 \ 0,0045 \ 0,9953]^*$$

$$\begin{bmatrix} -11,1469 \\ 1,3469 \\ -3,1600 \\ -12,7601 \\ 3,0104 \\ 0,9146 \\ 23,0478 \end{bmatrix} = 0,28207811$$

- Se calcula la salida de la red aplicando, de nuevo, la función logística a la entrada anterior.

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{0,28207811}} = 0,5701$$

- Obtención de coeficientes:

	<i>Coficientes</i>
C	1002756,78
\hat{y}	1689762,63

Predicción de errores para el mes de enero del año 2000:

$$= [1 \ 0,6488 \ 0,7030 \ 0,5769 \ 0,7463 \ 0,5528] *$$

$$\begin{bmatrix} 34,1369 & 3,5491 & -8,3729 & 2,8476 & -6,2833 & -4,5941 \\ -3,6628 & 1,8634 & 13,2287 & -2,8764 & 18,9470 & 9,6631 \\ 9,0125 & 19,3064 & -4,4947 & 22,6916 & 43,0283 & -0,1892 \\ -50,0416 & -2,2679 & 7,9025 & 1,7523 & -4,8807 & 4,4542 \\ -8,2242 & -16,7471 & -3,6849 & 16,1314 & 37,6807 & -3,4654 \\ 18,5127 & -2,2675 & 11,0063 & -5,8293 & -0,8363 & 6,0675 \end{bmatrix} =$$

$$= [13,3224 \ 3,2703 \ 4,9436 \ 2,6832 \ 0,6044 \ 4,8801]$$

$$a_i = [1,0000 \ 0,9634 \ 0,9929 \ 0,9360 \ 0,6467 \ 0,9925]$$

$$[1 \ 1,0000 \ 0,9634 \ 0,9929 \ 0,9360 \ 0,6467 \ 0,9925] *$$

$$\begin{bmatrix} -11,1469 \\ 1,3469 \\ -3,1600 \\ -12,7601 \\ 3,0104 \\ 0,9146 \\ 23,0478 \end{bmatrix} = 0,77069652$$

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{0,77069652}} = 0,6837$$

Predicción error (enero 2000): 152.485,855 m³

Las predicciones mensuales del ruido para el año 2000 se recogen en la tabla 9.4.

Tabla 9. 4. *PREDICCIONES DEL RUIDO CON MODELO HÍBRIDO (M³)*

AÑO 2000	PREDICCIONES RUIDO RED
Enero	152485,8
Febrero	-25763,4
Marzo	-41723,3
Abril	-4051,7
Mayo	39796,8
Junio	-58021,8
Julio	-21489,3
Agosto	-34580,7
Septiembre	-56783,9
Octubre	-51048,9
Noviembre	102053,1
Diciembre	-31928,9

La ecuación de predicción (Ecuación 7.2) del modelo ARIMA seleccionado nos ofrecía un horizonte de predicción limitado por considerar las predicciones futuras del ruido blanco nulas, y mediante este método híbrido se incorpora información adicional con la predicción obtenida por la red neuronal de los valores futuros del ruido a_t . Así que la ecuación de predicción resulta ser la siguiente:

Ecuación 9. 1. *ECUACIÓN DE PREDICCIÓN. MODELO HÍBRIDO*

$$\hat{y}_{t+1} = y_t + y_{t-11} - y_{t-12} + a_{t+1} + \theta_1 a_t + \vartheta a_{t-11} + \vartheta_1 \theta a_{t-12}$$

En la tabla 9.5, se recogen los resultados de consumo global de agua previsto para el año 2000, obtenidos al aplicar la ecuación de predicción, que son comparados con los datos de consumo reales para ese mismo año.

Tabla 9. 5. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (m³)

Año 2000	HÍBRIDO	CONSUMO REAL
Enero	2034114,67	1942154
Febrero	1755900,762	1635220
Marzo	1770752,354	1925229
Abril	1826193,012	1897287
Mayo	2039573,055	1965266
Junio	1953024,541	1898223
Julio	2377341,656	2445335
Agosto	2169627,955	2250862
Septiembre	2394810,566	2346299
Octubre	1969626,316	1919858
Noviembre	2142428,549	2223116
Diciembre	1783733,371	1725181
Total	24217126,81	24174030

Por tanto, el consumo global de agua previsto para el año 2000, en Córdoba, se estima en 24.217.126,81 m³.

9.3. AMPLIACIÓN DEL HORIZONTE TEMPORAL DE PREDICCIÓN

Con el fin de analizar la capacidad de predicción del modelo Híbrido, se procede a ampliar el periodo predictivo a dos años (2000-2001).

De nuevo la predicción del consumo de agua será la proporcionada por la estimación del modelo ARIMA seleccionado, $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$, completada con la predicción del error obtenido con la red neuronal utilizada en el apartado anterior.

Como lo que se pretende es observar el funcionamiento predictivo del modelo híbrido para un periodo mayor al corto plazo, se mantendrán por completo todas las características descritas para dicho modelo. Recordemos que estamos ante una red perceptrón multicapa (MLP), con una arquitectura (5x6x1), con funciones de activación: lineal-logística-logística y algoritmo de entrenamiento BP.

Para realizar predicciones de valores futuros del ruido para dos años con RNA, con las que complementar la predicción de valores proporcionada por la estimación del modelo ARIMA, de forma análoga que en el apartado anterior, se necesita calcular la ecuación implícita que desarrolla la red, normalizar los inputs, utilizar las matrices de pesos y aplicar las funciones de activación, es necesario recordar que las variables de entrada son los residuos del modelo ARIMA seleccionado con la siguiente estructura de retardos: $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13} \dots$

Una vez calculadas las predicciones del ruido para los años 2000 y 2001 se recogen en las tablas 9.6 y 9.7.

Tabla 9. 6. PREDICCIONES DEL RUIDO CON MODELO HÍBRIDO. AÑO 2000 (m^3)

AÑO 2000	PREDICCIONES RUIDO RED
Enero	152485,8
Febrero	-25763,4
Marzo	-41723,3
Abril	-4051,7
Mayo	39796,8
Junio	-58021,8
Julio	-21489,3
Agosto	-34580,7
Septiembre	-56783,9
Octubre	-51048,9
Noviembre	102053,1
Diciembre	-31928,9

Tabla 9. 7. PREDICCIONES DEL RUIDO CON MODELO HÍBRIDO. AÑO 2001 (M³)

AÑO 2001	PREDICCIONES RUIDO RED
Enero	17130,8
Febrero	-55859,8
Marzo	-60491,3
Abril	11168,4
Mayo	79792,6
Junio	-28833,2
Julio	-47213,7
Agosto	-38125,7
Septiembre	46779,6
Octubre	51374,6
Noviembre	112744,1
Diciembre	51862,1

Seguidamente se procede a calcular la predicción para dos años (2000-2001) del consumo de agua, para ello tenemos las siguientes ecuaciones de predicción:

Ecuación 9. 2. Ecuación de Predicción (Año 2000). Modelo Híbrido

$$\hat{y}_{t+1} = y_t + y_{t-11} - y_{t-12} + a_{t+1} + \theta_1 a_t + \vartheta a_{t-11} + \vartheta_1 \theta a_{t-12}$$

Ecuación 9. 3. Ecuación de Predicción (Año 2001). Modelo Híbrido

$$\hat{y}_{t+2} = y_{t+1} + y_{t-10} - y_{t-11} + a_{t+2} + \theta_1 a_{t+1} + \vartheta a_{t-10} + \vartheta_1 \theta a_{t-11}$$

En las siguientes tablas -9.8 y 9.9- se recogen los consumos previstos obtenidos al aplicar las ecuaciones de predicción, que se presentan de forma comparativa con los datos de consumo reales.

Tabla 9. 8. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M³)

Año 2000	HÍBRIDO	CONSUMO REAL
Enero	2034114,67	1942154
Febrero	1755900,762	1635220
Marzo	1770752,354	1925229
Abril	1826193,012	1897287
Mayo	2039573,055	1965266
Junio	1953024,541	1898223
Julio	2377341,656	2445335
Agosto	2169627,955	2250862
Septiembre	2394810,566	2346299
Octubre	1969626,316	1919858
Noviembre	2142428,549	2223116
Diciembre	1783733,371	1725181
Total	24217126,81	24174030

Tabla 9. 9. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M³)

Año 2001	HÍBRIDO	CONSUMO REAL
Enero	1906265,746	1956036
Febrero	1688395,339	1832624
Marzo	1706064,27	1838454
Abril	1795445,57	1768803
Mayo	2041910,064	2086070
Junio	1941297,211	2072929
Julio	2319541,341	2521753
Agosto	2126813,167	2223407
Septiembre	2361266,486	2356666
Octubre	1927048,891	1996566
Noviembre	2128475,603	2346682
Diciembre	1830908,846	1889984
Total	23773432,5	24889974

Por tanto, el consumo global de agua previsto para el año 2000, se estima en 24.217.126,81 m³ y para el año 2001 en 23.773.432,5 m³, un total de 47.990.559,3 m³ para los dos años.

9.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la tabla 9.10 se recogen comparativamente los resultados obtenidos en la predicción de valores de consumo de agua, para el año 2000, a partir de la serie temporal correspondiente al consumo de agua, tras aplicar tres enfoques, uno clásico – modelos ARIMA-, otro más reciente –redes neuronales artificiales- y el nuevo método híbrido propuesto en este trabajo.

Tabla 9. 10. COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON MODELOS ARIMA, RNA E HÍBRIDO

	ARIMA (0,1,1)X(0,1,1) ₁₂		ARIMA (0,1,0)X(0,1,1) ₁₂ (Modelo Alternativo)			Red Neuronal	
	ARIMA		HÍBRIDO	ARIMA		HÍBRIDO	
	Estimación	Predicción		Estimación	Predicción	Predicción	
Bondad de ajuste R²	0,62		0,4468	0,39		0,7011	0,6928
Raíz Cuadrada del ECM (RECM)	165.210,60	98.182,08	84.879,28	209.652,78	114.108,14	111.169,71	92.274,51

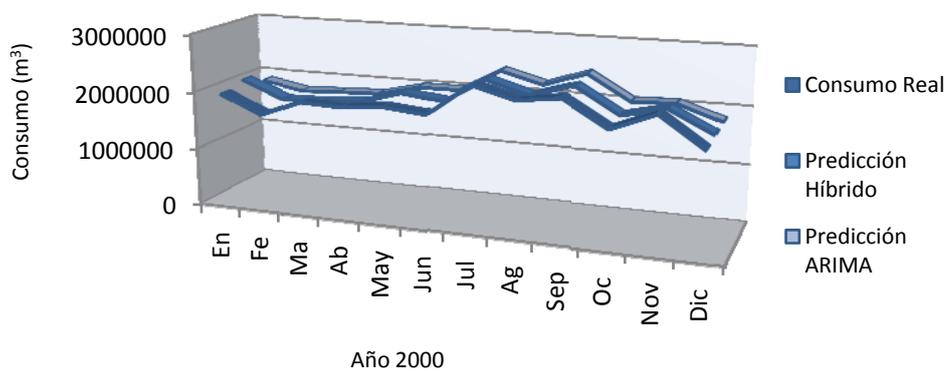
Es necesario recordar que el criterio utilizado para medir la precisión e idoneidad del modelo es el *RECM*. Como se puede observar en la predicción de valores de consumo de agua mediante el uso de redes neuronales, se consigue disminuir el *RECM* con respecto al modelo ARIMA – de 98.182,08 pasa a 92.274,51- y es con el modelo híbrido con el que se consiguen los resultados más óptimos, el *RECM* disminuye hasta un valor de 84.879,28 m³, el menor error obtenido de los tres enfoques estudiados.

En el modelo ARIMA alternativo (0,1,0)x(0,1,1)₁₂ se confirman estas generalizaciones, se obtienen resultados más satisfactorios con el modelo híbrido. El menor valor del *RECM* se consigue al aplicar el modelo híbrido, de 114.108,14 obtenido con el modelo ARIMA alternativo se pasa a con el modelo híbrido.

Además, como cabría esperar, el modelo ARIMA alternativo se comporta peor que el modelo ARIMA seleccionado, mientras que el primero consigue un *RECM* en la predicción de 114.108,14 m³, el segundo obtiene 98182,08 m³, e igual ocurre al aplicar el modelo híbrido, los resultados son más favorables en el modelo ARIMA seleccionado. Se deduce que el modelo alternativo es el que consigue la peor predicción, sin embargo es útil para elegir el modelo híbrido como modelo predictivo más adecuado.

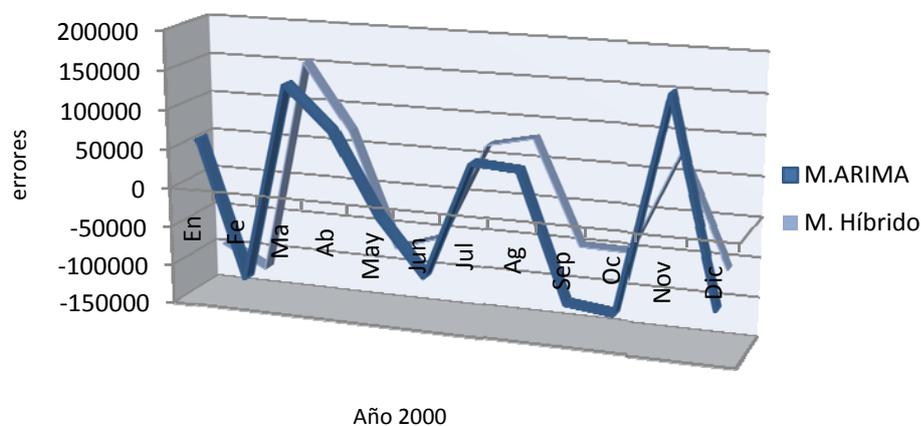
En el gráfico 9.4 se comparan las predicciones de consumo de agua para el año 2000, obtenidas mediante el modelo ARIMA seleccionado, que únicamente es capaz de reflejar el comportamiento lineal de series temporales y la predicción realizada utilizando el modelo híbrido, con los datos de consumo de agua reales, y como se puede apreciar es el modelo híbrido el que más se aproxima a los datos reales.

Gráfico 9.4. PREDICCIÓN MODELO ARIMA Y MODELO HÍBRIDO (m³)



El modelo híbrido, obtenido con la nueva metodología, permite evidenciar la mejora en las predicciones con respecto al modelo ARIMA y a redes neuronales Artificiales, por ello es el modelo que se propone en este estudio para la predicción a corto plazo de valores de consumo de agua.

El gráfico 9.5 muestra una gráfica comparativa de los errores en la predicción, con los modelos: ARIMA e híbrido (ARIMA+RED).

Gráfico 9. 5. GRÁFICA COMPARATIVA DE ERRORES: ARIMA-HÍBRIDO (M^3)

Por último señalar con respecto a la ampliación del horizonte predictivo a dos años, que el *RECM* obtenido al aplicar el modelo híbrido es de 102.758,7 frente a un *RECM* del modelo ARIMA de 107.001,88, por tanto, el modelo híbrido sigue ofreciendo mejores resultados al ampliar el periodo de tiempo considerado para la predicción. Aunque, el óptimo comportamiento de este modelo no es tan significativo conforme aumenta el horizonte temporal de la predicción.

A la vista de los resultados obtenidos, se desprende que de los modelos aplicados y propuestos, para los datos de la serie temporal de consumo de agua en el periodo de tiempo considerado, la predicción obtenida con el modelo híbrido es más precisa y minimiza la raíz del error cuadrático medio, por lo que ha evidenciado ser más adecuada para la modelización y predicción de la serie temporal estudiada.

CAPÍTULO 10

APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO EN LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DESAGREGADA DE AGUA

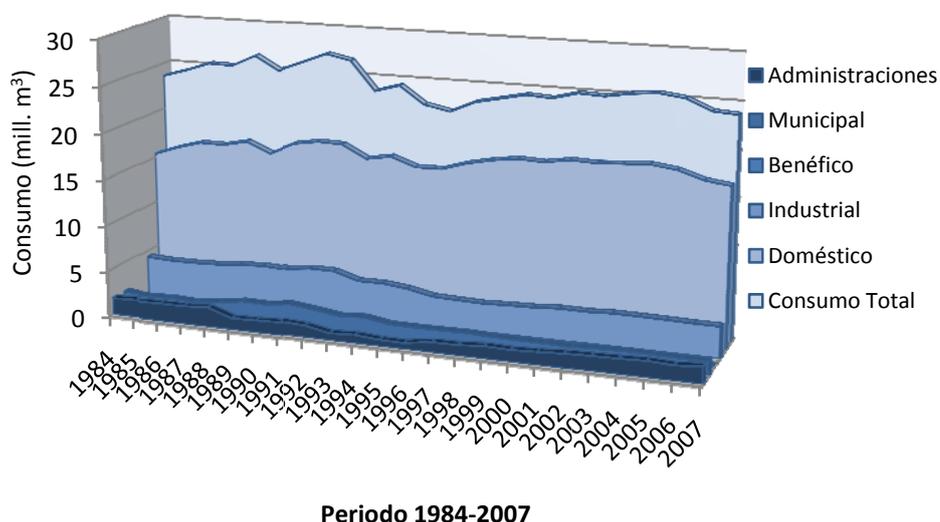
10. APLICACIÓN DEL MODELO HÍBRIDO EN LA PREDICCIÓN DE LA DEMANDA DESAGREGADA DE AGUA

10.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Una vez comprobado en el capítulo anterior que el modelo híbrido propuesto en este trabajo ofrece mejoras en la precisión de las predicciones globales de consumo de agua, se pretende aplicar dicha metodología al consumo desagregado de agua.

El sistema de tarifas de las compañías suministradoras suelen distinguir entre cinco tipos de consumidores: Domésticos, Industriales, Benéfico, Municipal y Administraciones. Este sistema de tarifas establece, para los dos primeros tipos de usuarios, precios progresivos asociados a bloques de consumo, lo que influye en el comportamiento de los consumidores incentivando el autoabastecimiento, en empresas o consumidores particulares con necesidades elevadas. El consumo anual para cada uno de los tipos de consumidores se muestra en el Gráfico 10.1.

Gráfico 10. 1. CONSUMO DE AGUA ANUAL DESAGREGADO (MILLONES m^3)

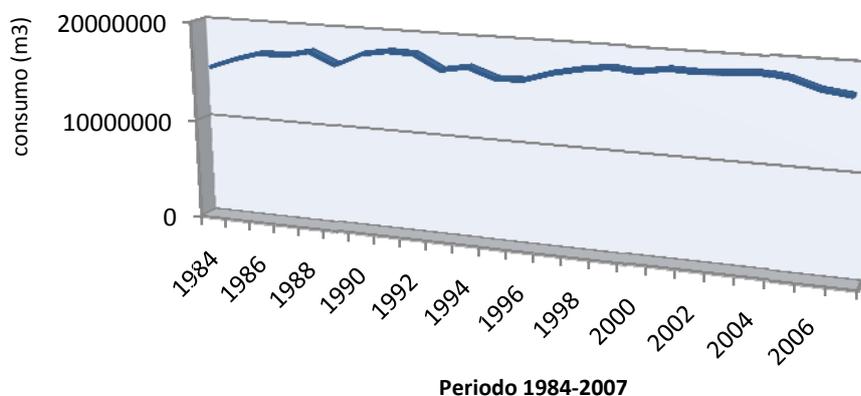


Los usuarios domésticos son los de mayor consumo, seguidos de los Industriales, Benéficos, Municipales y Administraciones. Es necesario analizar el consumo de agua en cada tipo de consumidores, que presenta claras diferenciaciones entre ellos, y obtener la predicción a corto plazo, aplicando el modelo híbrido, y así comprobar los mejores resultados y posibilidades de aplicación de este método.

10.2. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DOMÉSTICO

La evolución del consumo anual de agua (en millones de m^3), por parte de los usuarios domésticos en el periodo comprendido entre 1984 y 2007 (Gráfico 10.2), es muy similar a la evolución del consumo total: disminuye coincidiendo con el periodo de sequía comprendido entre 1993 y 1997, y a partir de esta fecha aumenta, aunque en menor grado. La concienciación en la necesidad de uso racional del agua ha propiciado un cambio en el comportamiento de los consumidores, así como la no instalación de nuevos contadores colectivos.

Gráfico 10. 2. CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO DOMÉSTICO (M^3)



Es evidente, que el comportamiento de los abonados depende del tipo de contador utilizado, en el caso de un contador comunitario, que representan el 65 por ciento de los hogares, no hay conciencia sobre el consumo del agua y por tanto, tienen una menor capacidad de disminución del consumo. En cambio, el abonado individual sí percibe la

incidencia del coste del agua en la renta familiar, y esto hace que pueda disminuir su consumo más fácilmente en periodos de escasez de lluvias o de concienciación del uso racional del agua.

Actualmente, está establecido un plan de individualización de contadores, que, mediante incentivos económicos, trata de promover la sustitución de contadores colectivos del agua por unos individuales para que el consumo se modere.

Las predicciones se realizan con el modelo ARIMA seleccionado para el consumo total $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$, que se recoge en la ecuación 10.1 y en la tabla 10.1, para posteriormente compararlas con el modelo Híbrido que completa dicha predicción con la del error obtenido con una Red Neuronal.

Ecuación 10. 1. MODELO ARIMA CONSUMO DOMÉSTICO

$$\nabla \nabla_{12} y_t = (1 - 0,860049 B)(1 - 0,751791 B^{12}) a_t$$

Tabla 10. 1. ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO DOMÉSTICO

Variable	Coeficiente	Error Estándar	Estadístico t-Student	Prob.
VARIABLE DEPENDIENTE: $\nabla \nabla_{12}$ CONSUMO OBSERVACIONES INCLUIDAS:180				
MA(1)	-0,860049	0,037915	-22,683480	0,0000
SMA(12)	-0,751791	0,051894	-14,487150	0,0000
R-cuadrado	0,628297	Media variable dependiente		73,5865
R-cuadrado corregido	0,626197	Cuasi desv. típica var. dependiente		204862,1
Cuasi desviación típica residual	125251,6	Criterio información Akaike		26,3251
Suma de cuadrados del error	2,77E+12	Criterio Schwarz		26,3607
Log. Máxima verosimilitud	2354,10	Durbin-Watson stat		2,3067

Con este modelo que resultó válido tras efectuar los pertinentes contrastes de validación y se realizan las previsiones de consumo doméstico correspondientes al año 2000 (tabla 10.2).

Tabla 10. 2. VALORES REALES Y PREDICCIONES CON MODELO ARIMA. CONSUMO DOMÉSTICO (M^3)

Año 2000	y_t	\hat{y}_t
Enero	1597351	1525610
Febrero	1170543	1332412
Marzo	1563066	1445478
Abril	1307744	1331217
Mayo	1596976	1601849
Junio	1318163	1422405
Julio	1922328	1838777
Agosto	1440569	1512713
Septiembre	1817395	1816392
Octubre	1338299	1425838
Noviembre	1742458	1676272
Diciembre	1226174	1339871

A continuación se calcula el *RECM* cometido en la predicción con el modelo ARIMA y se obtiene un resultado de 88.399,4 m^3 , que será comparado, posteriormente, con el error que se consiga con el modelo Híbrido. Para ello, es necesario diseñar una RNA robusta, por lo que se diseñan numerosas redes combinando arquitecturas, funciones de aprendizaje y algoritmos de entrenamiento, de las que se selecciona una red multicapa (5x7x1) de propagación hacia atrás (backpropagation), con funciones de activación: lineal (0,1), para la primera capa, y sigmoideal o logística, para la única capa oculta y la capa de salida. Las variables de entrada son los residuos del modelo ARIMA con los siguientes retardos:

$$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}.$$

El tiempo de entrenamiento o aprendizaje de la red seleccionada fue de 7 horas y 10 minutos, y los pesos finales relativos a cada una de las capas se presentan a continuación en las tablas 10.3 y 10.4.

Tabla 10. 3. PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO DOMÉSTICO

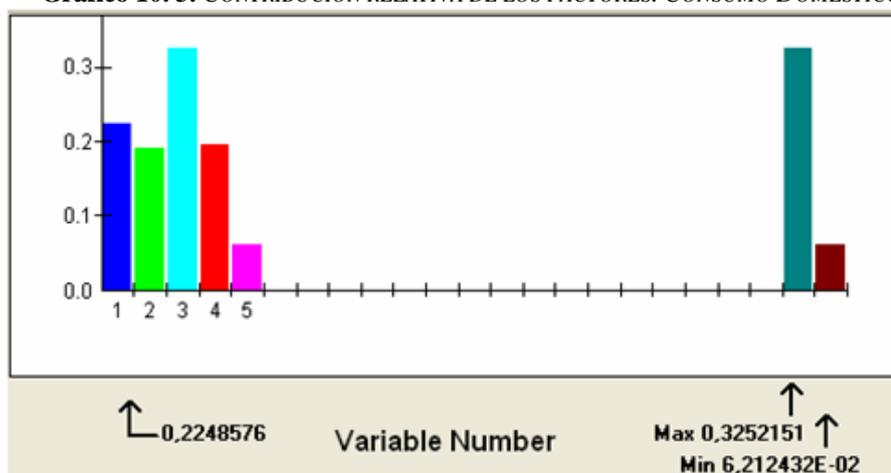
7X6	BIAS	1	2	3	4	5
1	-21,2677	13,8813	13,4848	9,2979	-5,9364	4,5795
2	-67,0860	19,4906	-0,2301	50,8686	48,5053	-19,4923
3	-2,1922	-1,4916	-2,0209	7,7721	3,0115	0
4	15,6910	-77,4629	-10,6403	79,7763	28,4942	-8,6789
5	-5,1214	21,0857	24,397	17,2607	-19,3336	8,3147
6	16,3236	-40,8917	-43,8895	86,6367	37,4676	-40,2503
7	-6,7741	11,0668	11,9869	-3,6864	-9,2732	4,7017

Tabla 10. 4. PESOS DE LA CAPA DE SALIDA. CONSUMO DOMÉSTICO

7 X 1	BIAS	1	2	3	4	5	6	7
1	4,9339056	2,4544041	0,3459432	-9,618639	4,682826	3,4235067	0,9774058	-7,083447

En la contribución de los factores (Gráfico 10.3), el error retardado que mayor influencia tiene en el consumo de agua es a_{t-12} , que contribuye en un 32,52%, y los restantes errores retardados, a_{t-1} , a_{t-2} , a_{t-3} , a_{t-13} , determinan un 22,48%, 19,19%, 19,58% y 6,21% respectivamente.

Gráfico 10. 3. CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO DOMÉSTICO



Los errores reales y los errores estimados por la red se muestran en el Gráfico 10.4 y de estos últimos se representa su evolución en el Gráfico 10.5, en el que se puede observar errores por sobrevaloración e infravaloración.

Gráfico 10. 4. RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M^3). CONSUMO DOMÉSTICO

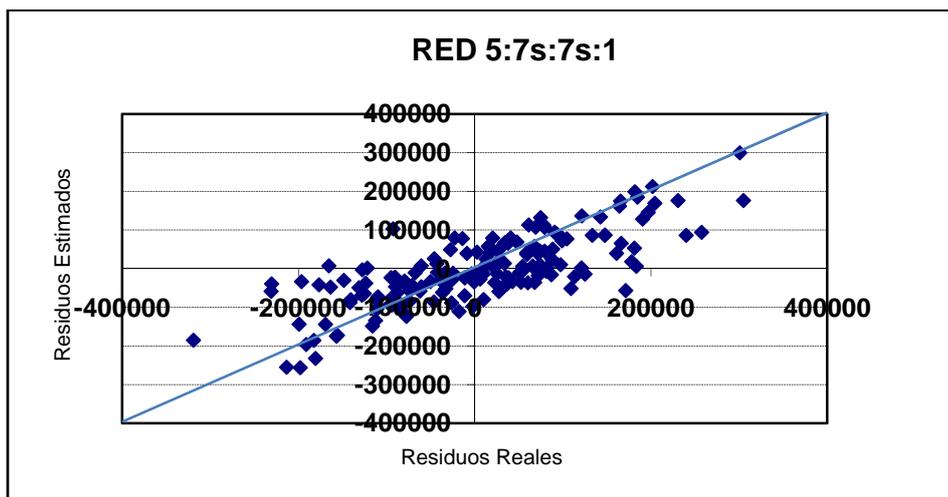
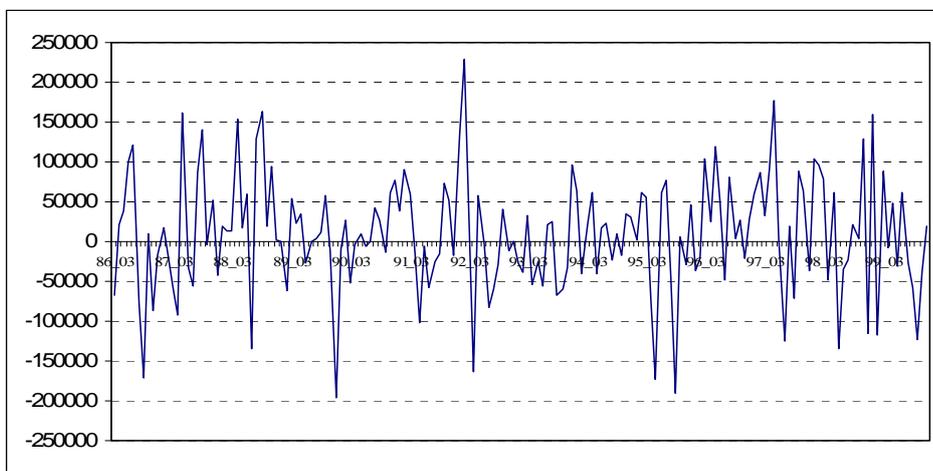


Gráfico 10. 5. ERRORES COMETIDOS POR LA RED. CONSUMO DOMÉSTICO (M^3)



Las predicciones obtenidas a corto plazo, para el año 2000, de valores futuros del ruido a_t con la RNA, con el objeto de complementar la

predicción final de consumo proporcionada por el modelo ARIMA, se muestran en la Tabla 10.5.

Tabla 10. 5. PREDICCIONES DEL RUIDO CON RED NEURONAL (M^3). CONSUMO DOMÉSTICO

AÑO 2000	PREDICCIONES RUIDO RED
Enero	97623,13259
Febrero	-85478,37169
Marzo	85585,06352
Abril	-26476,32038
Mayo	83745,10867
Junio	-86994,28787
Julio	124039,0382
Agosto	-48575,94714
Septiembre	79776,25667
Octubre	-42292,42141
Noviembre	78666,67124
Diciembre	-23130,77244

Por último, se obtienen los valores previstos de consumo para el año 2000 (Tabla 10.6), mediante el modelo Híbrido, que incorpora las predicciones de los errores, calculadas anteriormente, a la ecuación de predicción proporcionada por el modelo ARIMA.

Tabla 10. 6. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M^3). CONSUMO DOMÉSTICO

Año 2000	RED+ARIMA	CONSUMO REAL
Enero	1623233,55	1597351
Febrero	1260596,26	1170543
Marzo	1532763,12	1563066
Abril	1318417,86	1307744
Mayo	1695566,38	1596976
Junio	1357103,02	1318163
Julio	1972333,76	1922328
Agosto	1491014,17	1440569
Septiembre	1916246,82	1817395
Octubre	1414788,84	1338299
Noviembre	1780263,21	1742458
Diciembre	1353073,91	1226174
Total	18715400,9	18041066

La predicción final obtenida con el modelo híbrido para el consumo doméstico en el año 2000 asciende a 18.715.400,9 m³.

En la tabla 10.7 se recogen los resultados obtenidos en la predicción del año 2000 mediante el modelo ARIMA y el modelo híbrido.

Tabla 10. 7. RESULTADOS PREDICCIÓN: ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO DOMÉSTICO

	MODELO ARIMA	MODELO HÍBRIDO
Bondad de ajuste (R²)	62,82%	66,63%
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM)	88.399,41	70.266,5

Se verifica que el modelo que minimiza el *RECM* (70.266,5) y que, por tanto, proporciona una predicción más precisa es el modelo Híbrido propuesto en este estudio.

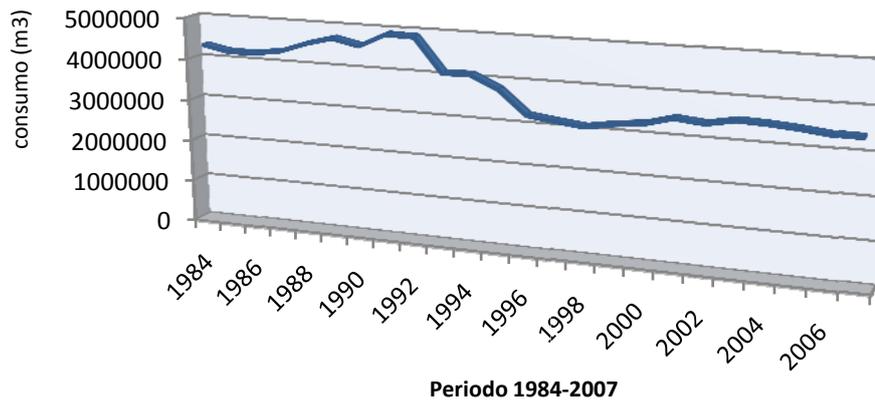
10.3. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA INDUSTRIAL

El sistema de tarifas con precios progresivos asociados a bloques de consumo también está generalizado para los usuarios industriales, así se incentiva el autoabastecimiento de las empresas. La evolución del consumo industrial ha seguido las pautas del consumo global, aunque con variaciones más pronunciadas que las registradas en el consumo doméstico, debido al efecto que produce el uso de contadores individuales y el bloque de tarifas, aunque el consumo doméstico es más estacional para el caso del uso de contadores individuales.

En el Gráfico 10.6 se aprecia una fase de crecimiento sostenido (1984-1989), seguida de una fase de estabilización (1990-1992), a continuación una fase de disminución del consumo en la época de sequía (1993-1998), y, en los últimos años se aprecia un repunte de aumento de consumo seguido de un periodo de evolución decreciente. Los abonados domésticos han ido incrementando su participación en el

consumo global, frente a los de tipo industrial, debido a la disminución del número de industrias.

Gráfico 10. 6. CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO INDUSTRIAL (M^3)



El modelo ARIMA que se utiliza para estimar las predicciones del consumo industrial a corto plazo es el seleccionado para el consumo total $(0,1,1)_x(0,1,1)_{12}$, y se expresa en la Ecuación 10.2 y en la tabla 10.8.

Ecuación 10. 2. MODELO ARIMA CONSUMO INDUSTRIAL

$$\nabla \nabla_{12} y_t = (1 - 0,808357 B)(1 - 0,679505 B^{12})a_t$$

Tabla 10. 8. ESTIMACIÓN MODELO ARIMA. CONSUMO INDUSTRIAL

Variable	Coeficiente	Error Estándar	Estadístico t-Student	Prob.
VARIABLE DEPENDIENTE: $\nabla \nabla_{12}$ CONSUMO OBSERVACIONES INCLUIDAS:180				
MA(1)	-0,808357	0,043560	-18,557180	0,0000
SMA(12)	-0,679505	0,054749	-12,411330	0,0000
R-cuadrado	0,535939	Media variable dependiente		188,664
R-cuadrado corregido	0,533317	Cuasi desv. típica var. dependiente		56518,84
Cuasi desviación típica residual	38610,40	Criterio información Akaike		23,9715
Suma de cuadrados del error	2,64E+11	Criterio Schwarz		24,0071
Log. Máxima verosimilitud	-2143,45	Durbin-Watson stat		1,9038

Una vez realizados los contrastes habituales de validación, se calculan las previsiones de consumo industrial correspondientes al año 2000 (tabla 10.9)

Tabla 10. 9. VALORES REALES Y PREDICIONES CON MODELO ARIMA (M^3). CONSUMO INDUSTRIAL

Año 2000	y_t	\hat{y}_t
Enero	233169	211673,8
Febrero	205060	215143,5
Marzo	223358	200640,3
Abril	271089	224883,1
Mayo	241358	2435311
Junio	279767	263082,2
Julio	342522	307707,8
Agosto	328999	321154,8
Septiembre	345986	322731,3
Octubre	287631	287709,3
Noviembre	290075	244153,3
Diciembre	233848	238245,5

El *RECM* cometido en la predicción resulta ser de 95.981,19 m³. A continuación, se diseñan numerosas redes neuronales combinando arquitecturas, funciones de aprendizaje y algoritmos de entrenamiento, de las que se selecciona una red multicapa (5x7x1) de propagación hacia atrás (backpropagation), con funciones de activación: lineal (0,1), para la primera capa, y sigmoidea o logística, para la única capa oculta y la capa de salida. Los residuos del modelo ARIMA con los siguientes retardos: $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$, son las variables de entrada.

El tiempo de entrenamiento o aprendizaje de la red seleccionada fue de 6 horas y 25 minutos, y los pesos finales relativos a cada una de las capas se presentan a continuación en las tablas 10.10 y 10.11.

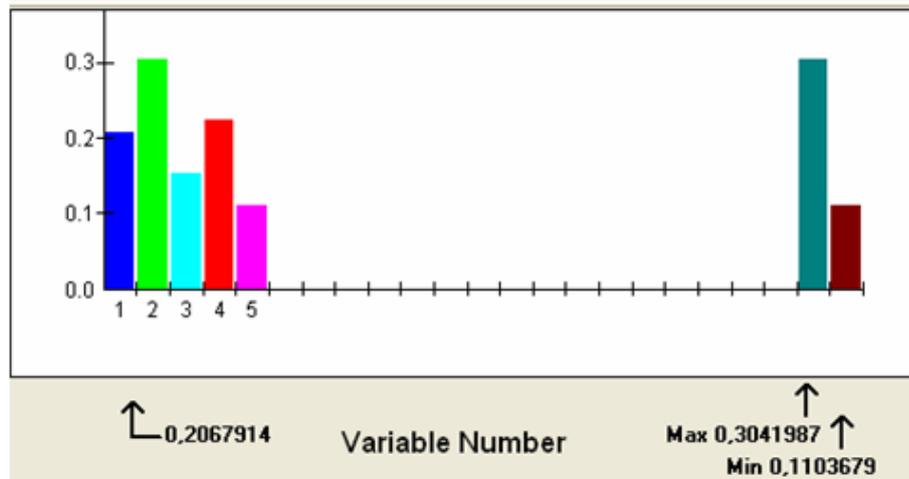
Tabla 10. 10. PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO INDUSTRIAL

7X6	BIAS	1	2	3	4	5
1	18,7827	-53,1520	32,7644	13,9875	3,2037	-11,2699
2	-1,2280	-0,5184	15,0690	6,2735	-10,7648	4,6749
3	7,6229	-18,3712	-2,4781	-21,5864	-6,4599	15,5453
4	27,6201	-20,8076	-25,2173	-27,9092	12,3889	-16,2932
5	-22,8919	33,4884	25,5348	-14,1923	21,2548	15,0081
6	-26,1114	34,4440	31,3456	-19,4663	23,1958	18,8886
7	5,4919	-7,1633	14,0526	4,2607	-10,2582	0,3310

Tabla 10. 11. PESOS DE LA CAPA DE SALIDA. CONSUMO INDUSTRIAL

7 X 1	BIAS	1	2	3	4	5	6	7
1	3,7324	1,2086	14,9747	-2,9404	2,5257	16,6642	13,1810	16,4297

Respecto a la contribución de los factores (Gráfico 10.7), el error retardado que mayor influencia tiene en el consumo de agua es a_{t-2} , que contribuye en un 30,42%, y los restantes errores retardados, $a_{t-1}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$, determinan un 20,67%, 15,39%, 22,47% y 11,03% respectivamente.

Gráfico 10. 7. *CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO INDUSTRIAL*

Los residuos estimados por la red, junto con los errores reales se ajustan a la bisectriz como se observa en el Gráfico 10.8 y la evolución de los errores cometidos por la red se representa en el Gráfico 10.9.

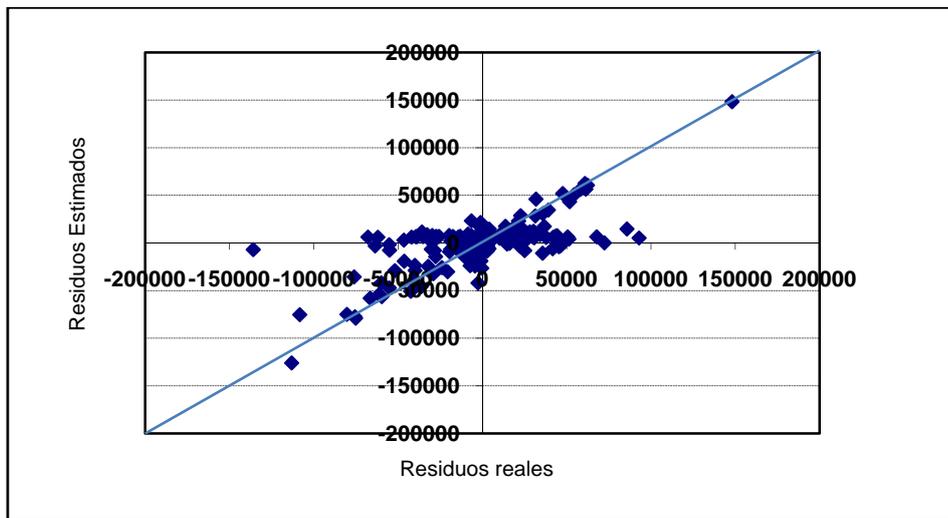
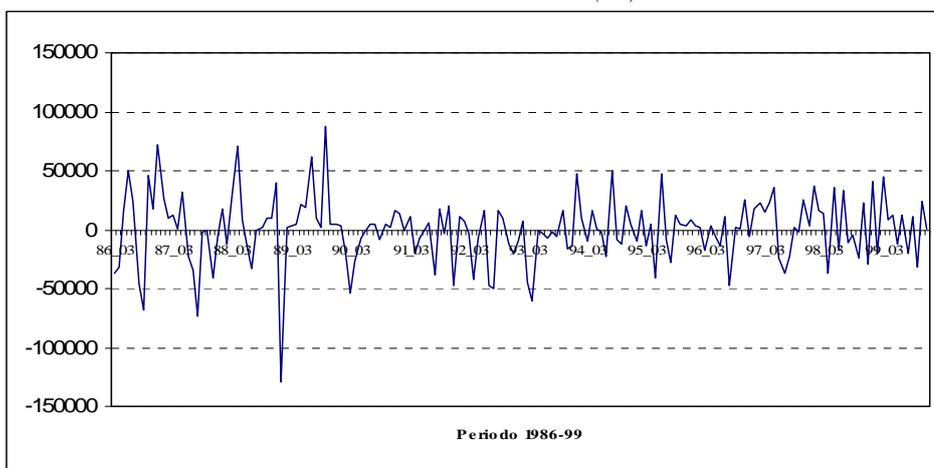
Gráfico 10. 8. *RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M^3), CONSUMO INDUSTRIAL*

Gráfico 10.9. ERRORES COMETIDOS POR LA RED (M^3). CONSUMO INDUSTRIAL



Las predicciones que se obtienen con la RNA para el año 2000 aparecen en la tabla 10.12.

Tabla 10.12. PREDICCIONES RUIDO CON RED NEURONAL (M^3). CONSUMO INDUSTRIAL

AÑO 2000	PREDICCIONES RUIDO RED
Enero	4430,0978
Febrero	6997,5166
Marzo	6048,1452
Abril	8116,4397
Mayo	7541,3329
Junio	6895,8238
Julio	6196,4023
Agosto	6688,4837
Septiembre	5913,6304
Octubre	6437,2669
Noviembre	3661,6925
Diciembre	7248,5321

A partir de estas predicciones del ruido, se calculan las predicciones de consumo industrial para el año 2000, según el proceso ya explicado en el consumo total, mediante el modelo híbrido, que son comparadas con los datos de consumo reales en la tabla 10.13.

Tabla 10. 13. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M^3). CONSUMO INDUSTRIAL

Año 2000	RED+ARIMA	CONSUMO REAL
Enero	129800,19	233169
Febrero	209641,32	205060
Marzo	115221,01	223358
Abril	159447,56	271089
Mayo	150798,98	241358
Junio	234288,11	279767
Julio	222192,41	342522
Agosto	310881,82	328999
Septiembre	278712,01	345986
Octubre	255008,66	287631
Noviembre	157147,61	290075
Diciembre	181427,80	233848
Total	2404567,54	3282862

La predicción obtenida con el modelo híbrido, en metros cúbicos, para el consumo industrial en el año 2000 asciende a 2.404.567,54.

Por último en la tabla 10.14 se comparan los resultados obtenidos en la predicción del año 2000 mediante el modelo ARIMA y el modelo híbrido, comprobándose que es este último el que incurre en un menor *RECM*.

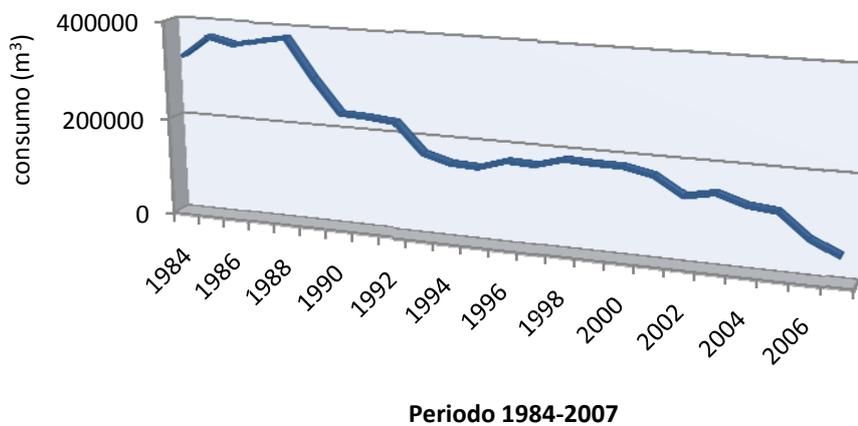
Tabla 10. 14. RESULTADOS PREDICCIÓN: ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO INDUSTRIAL

	MODELO ARIMA	MODELO HÍBRIDO
Bondad de ajuste (R^2)	53,59%	50,12%
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (<i>RMSE</i>)	95.981,19	84.630,46

10.4. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

En el consumo de agua benéfico (Gráfico 10.10), si bien su evolución reciente ha sido decreciente, desde 1996 hasta el año 2000 tuvo una tendencia creciente, debido, principalmente, a la no existencia de un incentivo para el control del gasto del agua.

Gráfico 10. 10. CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO BENÉFICO (M³)



Utilizando el mismo modelo ARIMA $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$ aplicado para los consumos anteriores, para estimar las predicciones del consumo benéfico en el año 2000, se obtiene la ecuación 10.3. y la tabla 10.15.

Ecuación 10. 3. MODELO ARIMA CONSUMO BENÉFICO

$$\nabla \nabla_{12} y_t = (1 - 0,724732 B)(1 - 0,865212 B^{12})a_t$$

Tabla 10. 15. ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

VARIABLE DEPENDIENTE: $\nabla\nabla_{12}$ CONSUMO OBSERVACIONES INCLUIDAS:180				
Variable	Coficiente	Error Estándar	Estadístico t-Student	Prob.
MA(1) SMA(12)	-0,724732 -0,865212	0,051774 0,029311	-13,9979 -29,5184	0,0000 0,0000
R-cuadrado	0,514634	Media variable dependiente		16,3129
R-cuadrado corregido	0,511892	Cuasi desv. típica var. dependiente		5669,775
Cuasi desviación típica residual	3961,1720	Criterio información Akaike		19,4176
Suma de cuadrados del error	2,7E+9	Criterio Schwarz		19,4532
Log. Máxima verosimilitud	-1735,873	Durbin-Watson stat		2,0417

La serie residual, al igual que en los consumos anteriores, se comprueba que es generada por un proceso de tipo ruido blanco. La predicción obtenida con este modelo para el año 2000, en metros cúbicos, aparece en la tabla 10.16.

Tabla 10. 16. VALORES Y PREDICCIONES CON MODELO ARIMA (m^3). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

Año 2000	y_t	\hat{y}_t
Enero	11621	14803,01
Febrero	14511	11218,58
Marzo	11816	12548,66
Abril	15848	12774,47
Mayo	11500	14524,36
Junio	14191	14618,42
Julio	13773	188745,65
Agosto	22693	17530,13
Septiembre	12601	19221,53
Octubre	21651	13838,38
Noviembre	12901	13105,86
Diciembre	18397	11308,09

Se calcula el *RECM* de la predicción, obteniéndose un valor de 4.535,26 metros cúbicos.

A continuación, se aplican RNA, comenzando con el diseño de numerosas redes neuronales combinando arquitecturas, funciones de aprendizaje y algoritmos de entrenamiento, de ellas se selecciona una red multicapa (5x6x1) de propagación hacia atrás (backpropagation), con funciones de activación: lineal (0,1), para la primera capa, y sigmoïdal o logística, para la única capa oculta y la capa de salida. Seguidamente, se seleccionan los mismos retardos que para anteriores consumos: $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$, como variables de entrada.

El tiempo de entrenamiento o aprendizaje de la red seleccionada fue de 6 horas y 55 minutos.

Los pesos finales generados para cada una de las capas se resumen en las tablas 10.17 y 10.18.

Tabla 10. 17. PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

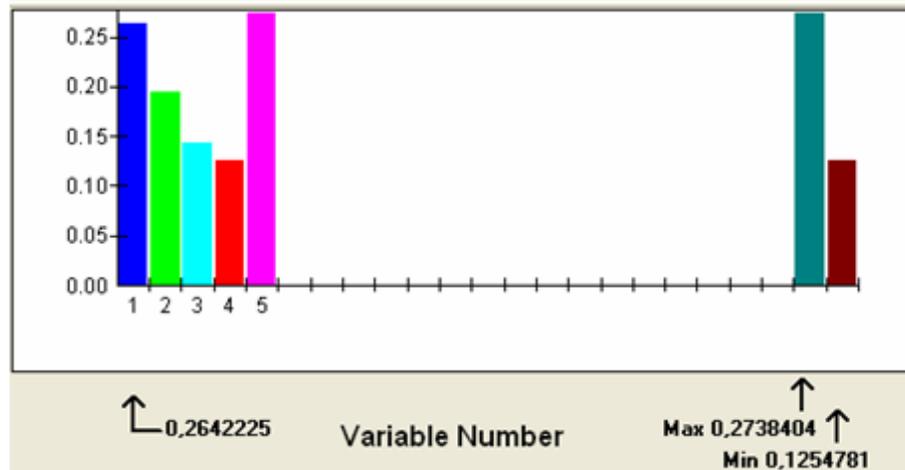
6X 6	BIAS	1	2	3	4	5
1	-4,4333	96,3318	-21,1357	77,3850	-10,4194	-87,8250
2	-0,0154	27,6274	-9,0569	18,0376	-0,3891	-23,5759
3	-61,8792	-14,7242	40,2370	1,5857	20,5364	31,6555
4	-2,1971	4,1773	1,6419	0,1956	3,167	-6,5361
5	56,5918	-108,8845	84,1811	-56,4660	14,4587	30,8299
6	-99,3209	50,7558	-30,9784	-20,9589	91,6344	32,2210

Tabla 10. 18. PESOS DE LA CAPA DE SALIDA CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

7 X 1	BIAS	1	2	3	4	5	6
1	0	2,9259	-3,9772	-4,3432	0,8265	0,8749	1,6890

El factor que más contribuye al consumo de agua es a_{t-13} , que contribuye en un 27,38%, y el resto de errores retardados, $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}$, determinan un 26,42%, 19,42%, 14,22% y 12,54% respectivamente (gráfico 10.11)

Gráfico 10. 11. *CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO*



El gráfico 10.12. representa los errores estimados por la red y los errores reales, en él se puede observar como se ajustan a la bisectriz, y en el gráfico 9.13 se muestra la evolución de los errores cometidos por la red.

Gráfico 10. 12. *RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (m^3). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO*

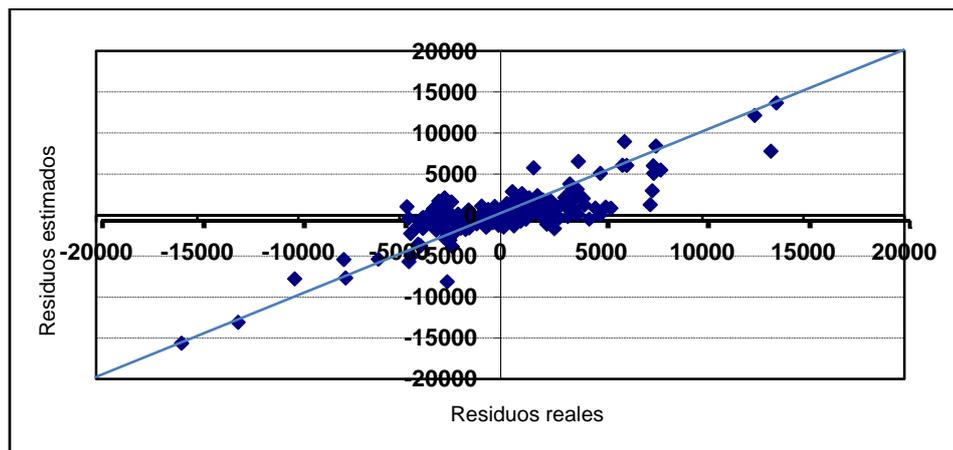
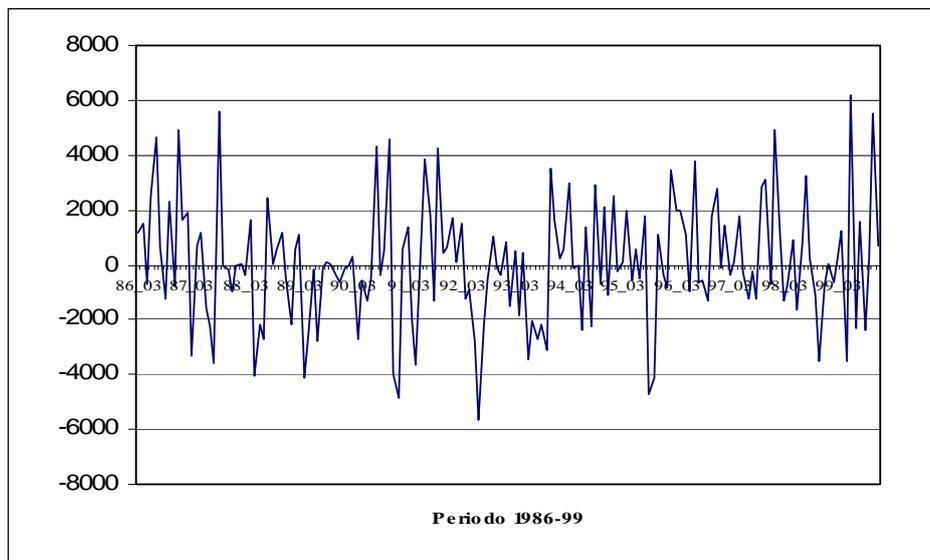


Gráfico 10. 13. ERRORES COMETIDO POR LA RED (M³). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO



La tabla 10.19. presenta las predicciones mensuales del ruido para el año 2000 obtenidas con la RNA

Tabla 10. 19. PREDICCIONES DEL RUIDO CON LA RED NEURONAL (M³). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

AÑO 2000	PREDICCIONES RUIDO RED
Enero	-2039,5363
Febrero	1113,32
Marzo	-792,4037
Abril	383,9944
Mayo	-1149,8199
Junio	2160,2760
Julio	-1281,883
Agosto	3629,0342
Septiembre	-2249,5659
Octubre	3912,2253
Noviembre	-1758,3972
Diciembre	1515,1179

De acuerdo con el proceso descrito, con anterioridad, de aplicación del modelo Híbrido, se calculan las predicciones de consumo

benéfico que se comparan con los datos de consumo reales (tabla 10.20)

Tabla 10. 20. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (m^3). CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

Año 2000	RED+ARIMA	CONSUMO REAL
Enero	12763,47	11621
Febrero	11770,48	14511
Marzo	11501,29	11816
Abril	12685,38	15848
Mayo	13007,15	11500
Junio	16094,80	14191
Julio	17374,52	13773
Agosto	20717,07	22693
Septiembre	17528,81	12601
Octubre	17688,23	21651
Noviembre	12361,99	12901
Diciembre	13353,72	18397
Total	176846,964	181503

La predicción obtenida con el modelo Híbrido para el consumo benéfico en el año 2000 asciende a 176.846,96 m^3 .

Por último en la tabla 10.21 se comparan los *RECM*, que es el criterio utilizado para elegir el mejor resultado de entre los distintos modelos, y como cabría esperar, es el modelo híbrido el que consigue mejores resultados.

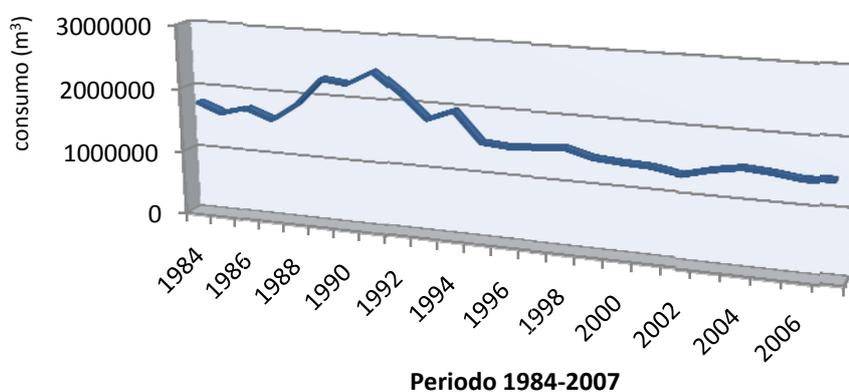
Tabla 10. 21. RESULTADOS ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO DE AGUA BENÉFICO

	MODELO ARIMA	MODELO HÍBRIDO
Bondad de ajuste (R^2)	51,46%	69,20%
Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (<i>RMSE</i>)	4.535,26	2.991,65

10.5. PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA MUNICIPAL

Según la serie temporal del consumo de agua de uso municipal correspondiente al periodo 1984-2006, se ha venido manteniendo una evolución más o menos constante en los últimos años (gráfico 10.14). No ocurrió igual en el periodo comprendido entre 1987 y 1991, en el que se observa un crecimiento muy acusado, para dar paso a unos años de disminución en el consumo coincidentes con el periodo de sequía (1993-1997).

Gráfico 10. 14. CONSUMO ANUAL DE AGUA DE USO MUNICIPAL (M^3)



A continuación, se estima, de nuevo, el modelo ARIMA $(0,1,1)_x(0,1,1)_{12}$ para obtener predicciones del consumo municipal en el año siguiente al periodo considerado. Se contempla en la ecuación 10.4 y en la tabla 10.22.

Ecuación 10. 4. MODELO ARIMA CONSUMO MUNICIPAL

$$\nabla \nabla_{12} y_t = (1 - 0,748074 B)(1 - 0,663404 B^{12})a_t$$

Tabla 10. 22. ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO MUNICIPAL

Variable	Coficiente	Error Estándar	Estadístico t-Student	Prob.
VARIABLE DEPENDIENTE: $\nabla \nabla_{12}$ CONSUMO OBSERVACIONES INCLUIDAS:180				
MA(1)	-0,748074	0,044418	-16,8418	0,0000
SMA(12)	-0,663404	0,062307	-10,6474	0,0000
R-cuadrado	0,534738	Media variable dependiente		227,9721
R-cuadrado corregido	0,532109	Cuasi desv. típica var. dependiente		39153,60
Cuasi desviación típica residual	26782,06	Criterio información Akaike		23,2400
Suma de cuadrados del error	1,27E+11	Criterio Schwarz		23,2756
Log. Máxima verosimilitud	-2077,9770	Durbin-Watson stat		2,4679

La serie estimada de ruidos a_t supera los contrastes usuales de validación y se considera que no difiere significativamente de un ruido blanco. Se realizan predicciones de la serie para el año 2000, aplicando la ecuación de predicción, los valores futuros obtenidos se muestran en la tabla 10.23.

Tabla 10. 23. VALORES REALES Y PREDICCIONES CON MODELO ARIMA (M^3). CONSUMO MUNICIPAL

Año 2000	y_t	\hat{y}_t
Enero	34557	81963,86
Febrero	140354	127956,7
Marzo	61170	84496,21
Abril	161556	130827,2
Mayo	61620	97565,41
Junio	164388	134812,8
Julio	79102	121208
Agosto	212975	172653,2
Septiembre	59969	133338,2
Octubre	195331	141421
Noviembre	81221	92739,95
Diciembre	162725	144617,5

Se calcula el *RECM* de la predicción, obteniéndose un valor de 38.949,63 metros cúbicos.

La red neuronal MLP (5x6x1) de propagación hacia atrás (backpropagation), es utilizada, con funciones de activación: lineal (0,1), para la primera capa, y sigmoidea o logística, para la única capa oculta y la capa de salida. Las variables de entrada son los residuos con los siguientes retardos: $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$.

El tiempo de entrenamiento o aprendizaje de la red seleccionada fue de 7 horas y 45 minutos. Los pesos finales generados para cada una de las capas se recogen en las tablas 10.24 y 10.25.

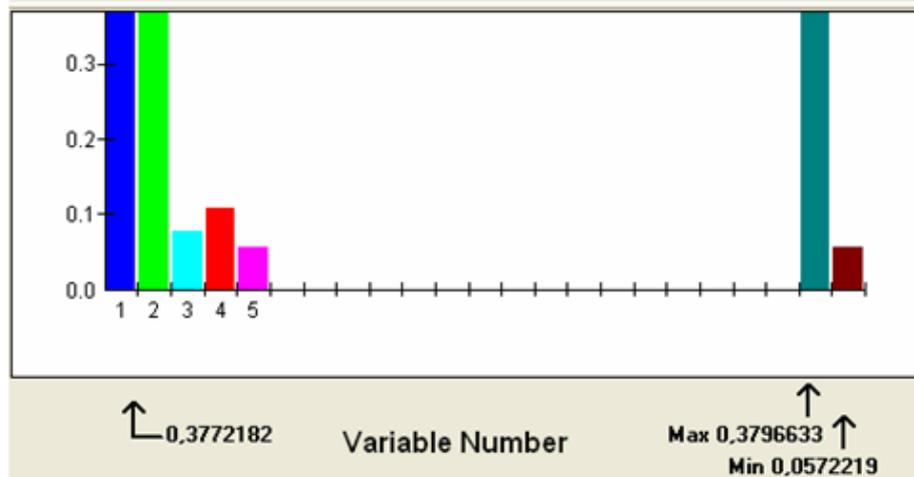
Tabla 10. 24. PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO MUNICIPAL

6X 6	BIAS	1	2	3	4	5
1	8,8965	-11,1783	8,1084	-0,0475	2,0028	-1,5975
2	-33,8847	14,5058	88,9628	6,1191	2,1483	6,1124
3	3,8267	72,1520	-25,6252	-11,1128	-11,9562	5,4442
4	101,2580	150,3775	-149,8765	27,0190	-111,3205	-23,6436
5	137,7366	-114,7914	-93,2852	-63,4421	-81,3054	81,2904
6	6,4736	6,8779	16,3101	-30,8832	14,8488	-0,6423

Tabla 10. 25. PESOS DE LA CAPA SALIDA. CONSUMO MUNICIPAL

7 X 1	BIAS	1	2	3	4	5	6
1	-1,7231	4,4484	-2,3150	-2,5949	1,4136	-0,3983	1,0317

El factor que más contribuye al consumo de agua es a_{t-2} , que contribuye en un 37,96%, y el resto de errores retardados, $a_{t-1}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$, determinan un 37,72%, 7,84%, 10,74% y 5,72% respectivamente (gráfico 10.15)

Gráfico 10. 15. *CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO MUNICIPAL*

Los errores reales y los errores estimados por la red se representan en el gráfico 10.16, en el que se observa que la nube de puntos se ajusta a la bisectriz. También, se representan gráficamente y de forma independiente los errores en los que incurre la red elegida (gráfico 10.17.)

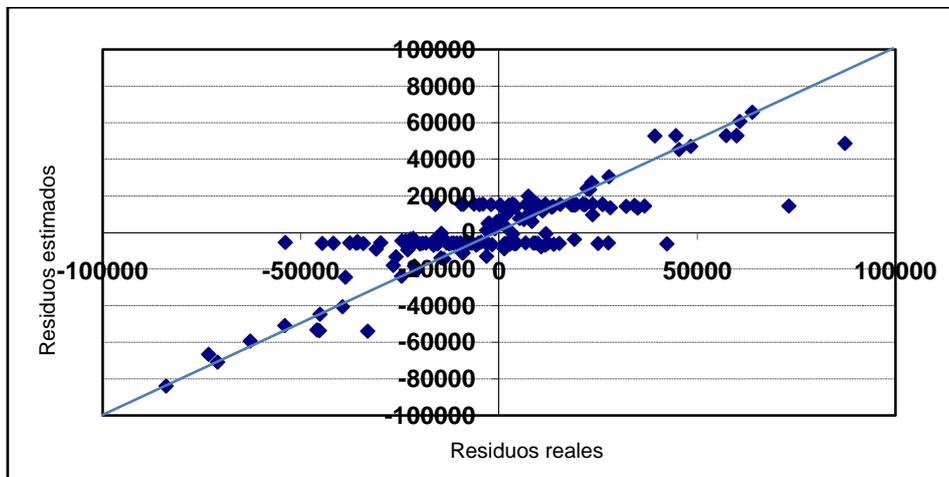
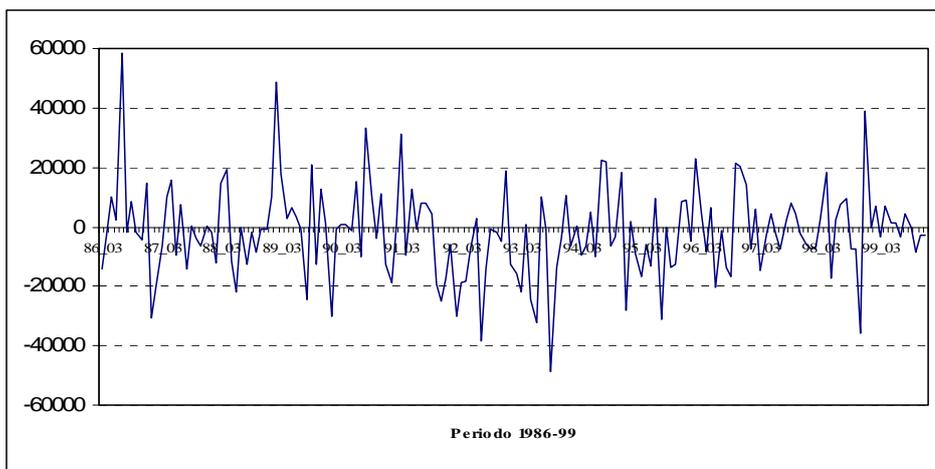
Gráfico 10. 16. *RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES. CONSUMO MUNICIPAL*

Gráfico 10. 17. ERRORES COMETIDOS POR LA RED (M^3). CONSUMO MUNICIPAL



Se necesitan realizar predicciones de valores futuros del ruido a_t con la red neuronal para complementar la predicción de valores proporcionada por la estimación del modelo ARIMA. Utilizando la ecuación implícita que desarrolla la red se obtienen las predicciones del ruido para el año 2000, que se muestran en la tabla 10.26.

Tabla 10. 26. PREDICIONES DEL RUIDO CON LA RED NEURONAL (M^3) CONSUMO MUNICIPAL

AÑO 2000	PREDICIONES RUIDO RED
Enero	-63926,74225
Febrero	63956,70026
Marzo	-90453,61918
Abril	63950,14894
Mayo	-91215,20267
Junio	49697,48066
Julio	-84720,81257
Agosto	49697,5269
Septiembre	-84697,44321
Octubre	49709,29269
Noviembre	-69865,62924
Diciembre	49697,41632

Estas predicciones de ruidos son utilizadas en la ecuación de predicción del modelo ARIMA, con el objetivo de mejorar la precisión en la predicción sobre este modelo. La incorporación de este modelo híbrido consigue unos resultados para el año 2000 que son comparados con los valores reales (tabla 10.27)

Tabla 10. 27. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M³). CONSUMO MUNICIPAL

Año 2000	RED+ARIMA	CONSUMO REAL
Enero	79924,33	34557
Febrero	128556,18	140354
Marzo	83470,47	61170
Abril	130778,27	161556
Mayo	96079,36	61620
Junio	136347,195	164388
Julio	119844,43	79102
Agosto	175877,67	212975
Septiembre	131598,31	59969
Octubre	145276,18	195331
Noviembre	91910,06	81221
Diciembre	146618,10	162725
Total	1466280,61	1414968

La predicción final obtenida con el modelo híbrido para el consumo municipal en el año 2000 asciende a 1.466.280,61 m³.

En la tabla 10.28 podemos comprobar la mejora en la precisión de la predicción a corto plazo mediante el modelo híbrido.

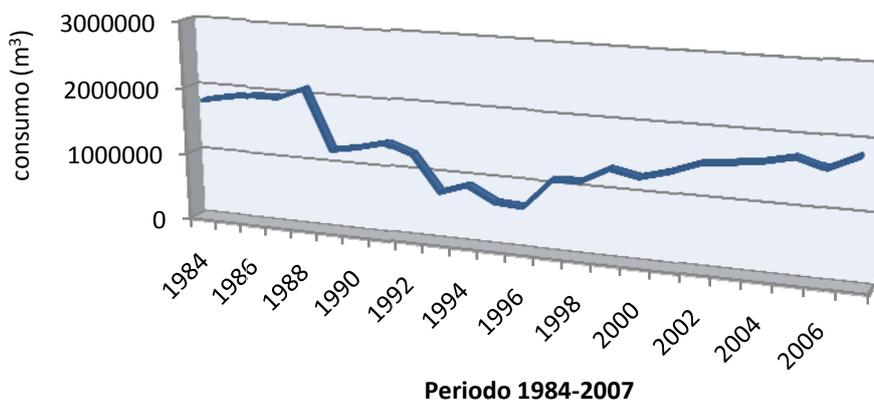
Tabla 10. 28. RESULTADOS PREDICCIÓN: ARIMA Y MODELO HÍBRIDO. CONSUMO MUNICIPAL

	MODELO ARIMA	MODELO HÍBRIDO
Bondad de ajuste (R²)	53,47%	68,34%
Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE)	38.949,63	37.262,34

10.6. PREDICIONES DEL CONSUMO DE AGUA DE LAS ADMINISTRACIONES

El comportamiento de las Administraciones en su consumo de agua es diferente al resto de consumidores, el crecimiento que ha experimentado este sector, en los últimos años, es muy superior (gráfico 10.18). Al no existir incentivo para el control del gasto del agua, una vez superada la mayor sequía entre 1993 y 1997, no se percibe cambio en el comportamiento de estos consumidores, y recuperan, casi inmediatamente, el nivel de consumo anterior.

Gráfico 10. 18. CONSUMO ANUAL DE AGUA DE LA ADMINISTRACIONES (m^3)



Aplicando el modelo ARIMA $(0,1,1)_x(0,1,1)_{12}$ para estimar las predicciones del consumo benéfico en el año 2000 se obtiene la ecuación 10.5 y la tabla 10.29.

Ecuación 10. 5. MODELO ARIMA CONSUMO ADMINISTRACIONES

$$\nabla \nabla_{12} y_t = (1 - 0,632592 B)(1 - 0,754250 B^{12}) a_t$$

Tabla 10. 29. ESTIMACIÓN DEL MODELO ARIMA. CONSUMO ADMINISTRACIONES

Variable	Coficiente	Error Estándar	Estadístico t-Student	Prob.
VARIABLE DEPENDIENTE: $\nabla\nabla_{12}$ CONSUMO OBSERVACIONES INCLUIDAS:180				
MA(1)	-0,632592	0,049569	-12,7618	0,0000
SMA(12)	-0,754250	0,045417	-16,6073	0,0000
R-cuadrado	0,540846	Media variable dependiente	-84,7765	
R-cuadrado corregido	0,538252	Cuasi desv. típica var. dependiente	34550,89	
Cuasi desviación típica residual	23478,04	Criterio información Akaike	22,9766	
Suma de cuadrados del error	9,76E+10	Criterio Schwarz	23,0122	
Log. Máxima verosimilitud	-2054,4080	Durbin-Watson stat	2,5015	

Las predicciones obtenidas con este modelo, en metros cúbicos aparecen en la tabla siguiente (tabla 10.30).

Tabla 10. 30. VALORES REALES Y PREDICCIONES CON MODELO ARIMA (m^3). CONSUMO ADMINISTRACIONES

Año 2000	y_t	\hat{y}_t
Enero	65456	94864,71
Febrero	104752	128812,6
Marzo	65819	94413,32
Abril	141050	130483,1
Mayo	53812	98419,18
Junio	121714	140015,4
Julio	87610	109172,2
Agosto	245626	160207,9
Septiembre	110348	118622,1
Octubre	76946	159174
Noviembre	96461	102064,2
Diciembre	84037	125139,8

Se calcula el *RECM* de la predicción, obteniéndose un valor de 19.184,45 metros cúbicos.

Utilizando la red neuronal MLP (5x6x1) con funciones de activación: lineal (0,1), para la primera capa, y sigmoideal o logística, para la única capa oculta y la capa de salida. Se toma, de nuevo, como variables de entrada los residuos con los siguientes retardos: $a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$.

El tiempo de entrenamiento o aprendizaje de la red seleccionada fue de 6 horas y 30 minutos. Se generan unos pesos para cada una de las capas, que se recogen en las tablas 10.31 y 10.32.

Tabla 10. 31. PESOS DE LA CAPA OCULTA. CONSUMO ADMINISTRACIONES

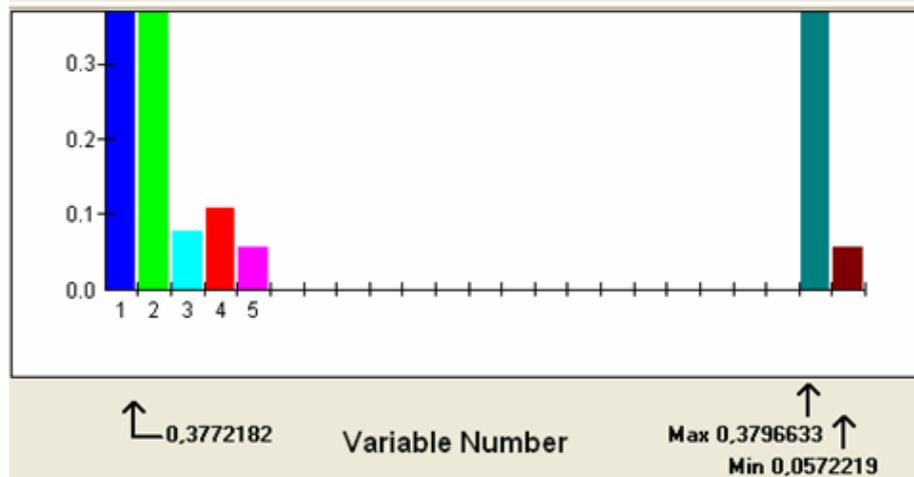
6X 6	BIAS	1	2	3	4	5
1	74,7034	-47,5812	39,9019	29,2508	-30,0524	-100,3563
2	9,9093	9,0714	-3,1302	27,4397	34,8048	-47,4923
3	9,2287	3,9132	-14,5474	-3,9432	-6,8543	-4,2692
4	7,7485	23,2785	0,2685	-15,0506	3,0497	-18,8592
5	9,2675	9,9015	-15,3119	-13,0628	-4,3496	-4,9438
6	3,4501	154,4028	1,7621	-140,6537	63,7979	-55,1371

Tabla 10. 32. PESOS DE LA CAPA SALIDA. CONSUMO ADMINISTRACIONES

7 X 1	BIAS	1	2	3	4	5	6
1	0,9028	0,6486	-0,7534	-9,0746	-1,4380	9,3233	1,2079

El factor que más contribuye al consumo de agua es a_{t-2} , que contribuye en un 31,51%, y el resto de errores retardados, $a_{t-1}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}$, determinan un 18,63%, 20,67%, 14,52% y 14,65% respectivamente (gráfico 10.19)

Gráfico 10. 19. *CONTRIBUCIONES RELATIVA DE LOS FACTORES. CONSUMO ADMINISTRACIONES*



En el gráfico 10.20, se representan los errores reales y los errores estimados por la red, ajustándose ambos a la bisectriz. A continuación, en el gráfico 10.21. se pueden observar exclusivamente los errores en los que incurre la red elegida.

Gráfico 10. 20. *RESIDUOS ESTIMADOS RED VS. RESIDUOS REALES (M³). CONSUMO ADMINISTRACIONES*

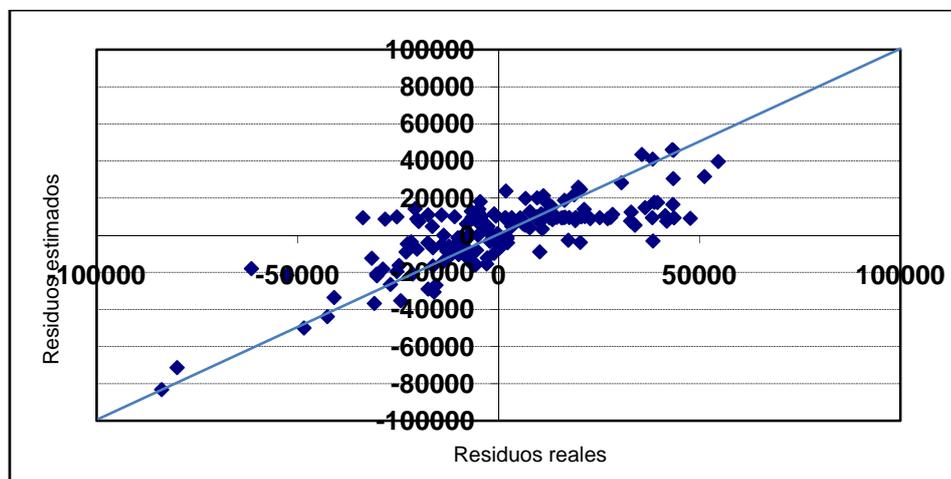
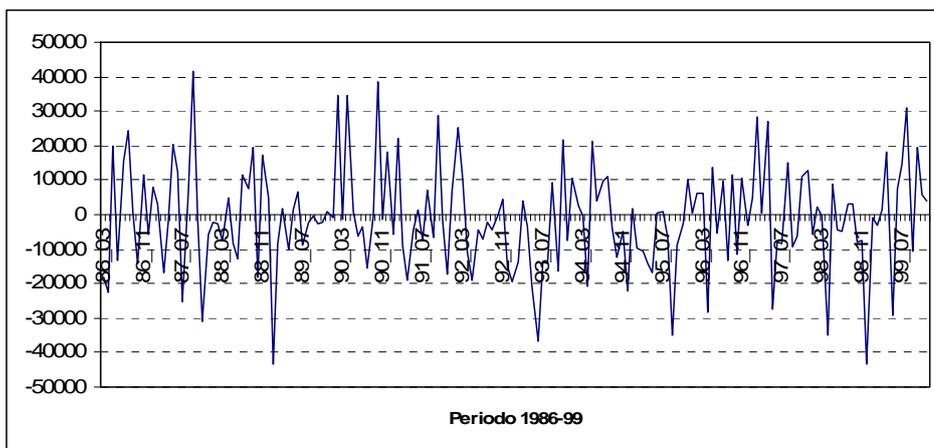


Gráfico 10. 21. ERRORES COMETIDOS POR LA RED. CONSUMO ADMINISTRACIONES



Los valores predichos del ruido para el año 2000 se presentan en la tabla 10.33.

Tabla 10. 33. PREDICCIONES DEL RUIDO CON LA RED NEURONAL (M³). CONSUMO ADMINISTRACIONES

AÑO 2000	PREDICCIONES RUIDO RED
Enero	1130,943595
Febrero	183,9808389
Marzo	-705,3215974
Abril	-91,10592092
Mayo	357,7552056
Junio	-647,9177916
Julio	-970,6334976
Agosto	-660,1861247
Septiembre	-299,9964676
Octubre	-658,2597051
Noviembre	-983,7070521
Diciembre	-636,336316

Finalmente, se calculan las predicciones de consumo de las Administraciones para el año 2000, siguiendo el proceso ya comentado anteriormente para el modelo híbrido, que son comparadas con los datos de consumo real para ese mismo año (tabla 10.34)

Tabla 10. 34. CONSUMO REAL Y PREDICCIONES CON MODELO HÍBRIDO (M^3). CONSUMO ADMINISTRACIONES

Año 2000	RED+ARIMA	CONSUMO REAL
Enero	95995,652	74068
Febrero	129412,064	117138
Marzo	94191,1002	78768
Abril	130615,988	132125
Mayo	98967,417	71773
Junio	139689,361	131295
Julio	108285,492	83129
Agosto	159274,961	173111
Septiembre	117806,78	90040
Octubre	157890,23	182972
Noviembre	100213,09	78089
Diciembre	123274,612	12176
Total	1455616,75	1334277

Al igual que en el caso de los otros tipos de consumidores (doméstico, industrial, benéfico y municipal) y en el consumo global, y dado que la optimización del criterio *RECM* ha sido el utilizado para elegir el mejor modelo, es el modelo híbrido el que consigue mejores resultados (tabla 10.35)

Tabla 10. 35. RESULTADOS PREDICCIÓN ARIMA Y MODELO. CONSUMO ADMINISTRACIONES

	MODELO ARIMA	MODELO HÍBRIDO
Bondad de ajuste (R^2)	54,08%	58,60%
Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (<i>RECM</i>)	19.184,45	19.143,62

Como conclusión, y después de analizar, calcular y comparar predicciones a corto plazo en las series de consumo global y consumos desagregados, para verificar cuál es el que presenta mejor comportamiento, se propone el modelo híbrido para predecir el consumo

de agua, puesto que los resultados obtenidos mejoran a los que se obtuvieron con los modelos ARIMA y redes neuronales artificiales. El modelo híbrido demuestra una mayor capacidad y precisión predictiva.

CAPÍTULO 11

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

11. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

11.1. CONCLUSIONES

El estudio de la demanda de agua y su predicción a corto plazo constituye una componente vital de la estrategia de gestión “de demanda” y sostenibilidad de cualquier país o región, en coherencia con la Directiva Marco de Aguas de la Unión Europea a la que debemos adaptarnos progresivamente, hasta culminar el proceso en el año 2015. La Directiva Marco propugna cambiar del tradicional enfoque de la oferta a nuevas estrategias de gestión de la demanda basadas en la asignación más eficiente del agua y la introducción de mecanismos que incentiven el ahorro y el cambio de hábitos de consumo. Desde esta perspectiva los precios que pagan los consumidores por el agua deben corresponder con su coste real, incluyendo el coste medioambiental.

El clima mediterráneo, predominante en España se caracteriza por la irregularidad estacional e interanual de las lluvias y por el desequilibrio entre agua y calor, lo que provoca sequías y, en ocasiones, lluvias torrenciales, el *cambio climático*, que supone una elevación de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones, el déficit hídrico de Andalucía, cercano a los 200 hm³, el aumento del consumo de agua, todos estos factores agravan la situación hídrica actual, lo cual no es alarmante pero si preocupante si no se toman las medidas oportunas. El propósito de este trabajo es construir un modelo de predicción de la demanda de agua, basado en diferentes técnicas, que reflejara esta preocupación, testándolo de manera econométrica.

El problema del agua supone un elemento central de la actual situación de emergencia planetaria¹ y su solución puede concebirse como parte de una reorientación global del desarrollo tecnocientífico, de la educación ciudadana y de las medidas políticas para la construcción de un futuro sostenible. Un nuevo enfoque denominado Nueva Cultura del Agua recoge esa Nueva Cultura de la Sostenibilidad que los tiempos

¹ Vilches y Gil, (2003)

exigen, es decir un cambio cultural integrador de valores en materia de gestión de aguas.

En este contexto, es necesario desarrollar herramientas que permitan avanzar en la implantación de criterios de eficacia y modernización de la gestión del agua. El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un nuevo modelo econométrico que permita conjugar las ventajas de la metodología de *Box-Jenkins* o modelos ARIMA y las Redes Neuronales Artificiales (RNA), con el fin de obtener mejoras en la precisión de la predicción de la demanda de agua en zonas urbanas, de tal manera que los sectores productivos y los abastecimientos domésticos vean garantizadas sus necesidades presentes y futuras de agua.

Para el estudio del consumo de agua, se ha tomado como base ambas metodologías –modelos ARIMA y RNA- con las que se ha construido un modelo híbrido que se ha aplicado a la serie temporal de consumo mensual de agua en Córdoba correspondiente a los años 1984 a 2006. Este modelo ha sido sometido a una evaluación de calidad de ajuste y precisión en la predicción a corto plazo, lo que ha permitido extraer algunas conclusiones:

➤ Respecto a la **metodología de *Box-Jenkins*** y según los criterios de selección empleados: el modelo ARIMA (0,1,1) x (0,1,1)₁₂ es el que mejor describe la serie objeto de estudio, aunque una vez analizados sus residuos, se observaron algunos años atípicos como 1988, 1989, 1996 y 1997, derivado por el cambio del comportamiento de los consumidores como efecto de la sequía sufrida, y algunos picos de consumo en los meses de Julio y Septiembre, que pueden estar justificados por mayor afluencia de la población y las altas temperaturas.

La modelización ARIMA ha estado vigente durante más de veinticinco años, aunque presenta una serie de inconvenientes, las series temporales suelen constar de una componente lineal y otra no-lineal más o menos acusada² y el empleo de modelos ARIMA aunque apto para recoger relaciones lineales existentes entre los datos de las series se muestran incapaces en el momento en el que pueden acaecer

² Zhang, G.P (2003)

relaciones de tipo no lineal³. Otro problema que presenta el empleo de modelos ARIMA en la predicción es que al aumentar el horizonte de predicción suelen aparecer desviaciones sistemáticas en las predicciones.

El desarrollo de las Redes Neuronales Artificiales supone importantes ventajas, permitiendo captar no linealidades que no han sido recogidas totalmente por el modelo ARIMA, supone una alternativa a los métodos econométricos de modelización y predicción tradicionales.

➤ Utilizando las **Redes Neuronales Artificiales** como herramienta predictiva del consumo de agua, se experimentan diferentes arquitecturas, cambiando datos de entrada, funciones de activación, algoritmos de entrenamiento, número de capas, etc. En base al criterio utilizado para elegir el mejor resultado de las distintas sesiones, que es la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM), se elige una red de Perceptrones Multicapa (tres capas) con funciones de activación lineal, para la primera capa, y sigmooidal o logística, para la única capa oculta y la capa de salida, tomando como variables de entrada: $y_{t-1}, y_{t-12}, y_{t-13}$, por ser esta arquitectura la que consigue resultados más satisfactorios en relación con las demás experimentadas.

La gran ventaja de las redes neuronales sobre los computadores tradicionales radica en que éstas no necesitan instrucciones para resolver un problema, no tienen que ser programadas para realizar una determinada tarea, son capaces de aprender a partir de ejemplos reales y, destaca su aprendizaje no lineal y su capacidad de interpolar. Aunque, también, poseen ciertas limitaciones, ya que son modelos especializados que se tienen que aplicar a situaciones muy concretas, y es difícil validar los resultados de las capas intermedias u ocultas, además, en principio se carece de un modelo explícito donde se pueda realizar interpretaciones económicas sobre los datos obtenidos, aunque una vez especificada la red, sí se dispone de modelo causal, así para el consumo de agua cordobés se procede a calcular la ecuación implícita desarrollada por la red estimada para poder comparar las predicciones obtenidas con ambas metodologías.

³ Nansen, J.V.; Nelson, R.D. (2002)

En dicha comparación se observa que, frente a los modelos ARIMA, los modelos RNA presentan mayor poder de predicción. Ese avance se fundamenta esencialmente en que las predicciones obtenidas a través de RNA ofrecen un incremento en el R^2 y disminuyen la raíz cuadrada del error cuadrático medio y el error medio absoluto.

Una vez se han aplicado las dos técnicas, modelos ARIMA y Redes Neuronales Artificiales por separado, se llega al objetivo de este trabajo: desarrollar un modelo que permita conjugar ambas metodologías, persiguiendo minimizar el error de predicción, según el criterio ya mencionado.

➤ En el **modelo híbrido** la predicción del consumo de agua será la proporcionada por la estimación del modelo ARIMA seleccionado, $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$, completada con la predicción del error obtenido con una red neuronal.

Para obtener la red neuronal más precisa se diseñan, de nuevo, numerosas redes combinando arquitecturas, funciones de aprendizaje y algoritmos de entrenamiento, de las que se selecciona, por sus mejores resultados, una red multicapa (5x6x1) de propagación hacia atrás (backpropagation), con funciones de activación: lineal (0,1), para la primera capa, y sigmoideal o logística, para la única capa oculta y la capa de salida, las variables de entrada son los residuos del modelo ARIMA seleccionado con la siguiente estructura de retardos:

$$a_{t-1}, a_{t-2}, a_{t-3}, a_{t-12}, a_{t-13}.$$

➤ El **análisis comparativo** de las predicciones a corto plazo obtenidas para la serie temporal objeto de estudio, bajo los tres enfoques, con el fin de verificar cuál es estadísticamente más satisfactorio, constata que las Redes Neuronales Artificiales son más precisas que el modelo ARIMA y, a su vez, el modelo híbrido presenta mayor poder de predicción que las Redes Neuronales Artificiales, minimizando la Raíz del Error Cuadrático Medio. Por tanto, el modelo híbrido ha evidenciado ser más adecuado para la modelización y predicción de la serie temporal estudiada.

➤ **Modelo ARIMA alternativo:** Para verificar la idoneidad del modelo híbrido se tomó un nuevo modelo ARIMA $(0,1,0) \times (0,1,1)_{12}$, que completado con la predicción del error obtenido con una red neuronal análoga a la utilizada con anterioridad, obtiene unos peores resultados, que confirman el mejor comportamiento predictivo del modelo híbrido.

➤ **Ampliación del periodo predictivo:** Con el fin de analizar la capacidad de predicción del modelo híbrido se amplía el periodo predictivo a dos años. Se comprueba que el modelo híbrido sigue ofreciendo los mejores resultados en cuanto a *RECM*, con respecto a las otras metodologías utilizadas. No obstante, el óptimo comportamiento de este modelo no es tan destacable conforme aumenta el horizonte temporal de la predicción.

➤ **Predicción del consumo de agua desagregado:** Se realizan predicciones con el modelo híbrido para las distintas series de consumo de agua desagregado, según el tipo de consumidores: Domésticos, Industriales, Benéfico, Municipal y Administraciones, con la finalidad de comprobar la capacidad generalizadora del nuevo modelo desarrollado.

El consumo de agua en cada tipo de consumidores presenta claras diferenciaciones entre ellos. En el consumo doméstico, el comportamiento de los abonados depende del tipo de contador utilizado, en el caso de un contador comunitario, no hay conciencia sobre el consumo del agua, en cambio, el abonado individual sí percibe la incidencia del coste del agua en la renta familiar, y esto hace que pueda disminuir su consumo más fácilmente en periodos de escasez de lluvias o de concienciación del uso racional del agua. Recientemente se ha aprobado un plan de individualización de contadores, que, mediante incentivos económicos, trata de promover la sustitución de contadores colectivos del agua por unos individuales para que el consumo se modere.

Los usuarios domésticos son los de mayor consumo, seguidos de los Industriales, Benéficos, Municipales y Administraciones. Además, los abonados domésticos han ido incrementando su participación en el consumo global, frente a los de tipo industrial, debido a la disminución del número de industrias. El sistema de tarifas con precios progresivos

asociados a bloques de consumo también está generalizado para los usuarios industriales, así se incentiva el autoabastecimiento de las empresas.

En el consumo de agua de uso Benéfico, Municipal y Administraciones, al no existir incentivo para el control del gasto del agua, una vez superada la mayor sequía entre 1993 y 1997, no se percibe cambio en el comportamiento de estos consumidores, y recuperan, casi inmediatamente, el nivel de consumo anterior.

La predicción a corto plazo del consumo de agua desagregado, con el modelo híbrido, será la proporcionada por la estimación del modelo ARIMA seleccionado $(0,1,1) \times (0,1,1)_{12}$, completada con la predicción del error obtenido con una red neuronal, que ha de diseñarse y seleccionarse para cada tipo de consumo. Se corrobora el mayor poder de predicción de este nuevo modelo híbrido frente a las otras técnicas estudiadas, para todas y cada una de las series desagregadas de consumo.

➤ ***Se puede concluir que el principal objetivo de este estudio se ha cumplido***, consiguiéndose resultados más satisfactorios para el modelo híbrido construido, siendo susceptible de utilización como instrumento de predicción del consumo de agua, con todos los beneficios que este avance implica para el desarrollo de políticas de aguas integradas sobre la base de la sostenibilidad de los usos presentes y futuros y la garantía de abastecimiento a la población.

El modelo híbrido puede resultar de utilidad para predecir series temporales dado que consigue una mejora sustancial sobre la predicción, aunque no pretende ser un método general aplicable a todos los casos, sino tan sólo en aquellos en los que el investigador considere que sus resultados son más satisfactorios a otros métodos. La precisión de las predicciones no depende únicamente de la óptima elección de un modelo, sino que también es consecuencia de las peculiares características de cada serie, su mayor o menor grado de complicación junto a las posibles distorsiones ocasionales o erráticas que puedan presentarse⁴.

⁴ Odete Fernández, P.; Terroso Cepeda, F.J.; Borge González, L.M. (2007)

En realidad, los distintos modelos son instrumentos utilizados para obtener estimaciones y predicciones de utilidad. En este sentido, este trabajo no persigue conseguir un único mejor modelo para la predicción, sino que se centra en compatibilizar y mejorar las predicciones de modelos alternativos. El descubrimiento de este modelo híbrido constituye una alternativa, que en la serie objeto de estudio y en el horizonte temporal considerado, ofrece unas predicciones a corto plazo más precisas que las que se generan con un único modelo: ARIMA o Redes Neuronales Artificiales.

11.2. CONTRIBUCIONES ORIGINALES

Ante la inexistencia de investigaciones relativas a nuevos métodos de predicción de demanda de agua en zonas urbanas, este estudio cubre una importante laguna, al desarrollar una novedosa metodología, más precisa que las tradicionales, en predicción de datos de consumo de agua, que completa la información necesaria para la toma de decisiones que en materia de política tarifaria será necesario adoptar en próximos años, siguiendo las consignas de la Directiva Marco del Agua.

La originalidad de este trabajo radica en que por primera vez se construye un modelo que compatibiliza las ventajas del modelo ARIMA y las ventajas de las Redes Neuronales Artificiales, contribuyendo así a la predicción de series temporales, debido a los buenos resultados obtenidos con este modelo Híbrido propuesto. Así mismo, contribuye al enriquecimiento de los estudios sobre el mercado del agua, y está dirigido hacia una zona urbana en concreto, lo que entraña una mayor dificultad en la recogida de información y su tratamiento, y en un área de consumo donde no existen estudios similares previos, por ello, el presente trabajo es pionero en España, en el contexto de predicción de consumo urbano de agua.

Aunque históricamente uno de los objetivos prioritarios en materia de aguas ha sido la predicción de la demanda de agua mediante series temporales, los estudios existentes han utilizado los modelos ARIMA o las Redes Neuronales Artificiales, de forma separada, para realizar predicciones, pero no de forma complementada, aumentando así

el poder de predicción. La mayor contribución original reside en el hecho de que la nueva metodología propuesta en este trabajo es capaz de obtener predicciones más precisas que los métodos en los que se basa por separado.

El conocimiento lo más ajustado posible de la demanda de agua puede representar una ayuda imprescindible a fin de gestionar de una forma eficaz las reservas de agua con las que en cada momento se cuentan.

Espero, con mi modesta aportación, haber contribuido a un conocimiento más ajustado de la demanda de agua y proporcionar un nuevo modelo de predicción útil para ofrecer una información más óptima a las entidades suministradoras o involucradas en el sector de consumo de agua, con la finalidad de facilitar el desarrollo de medidas estratégicas de gestión de la demanda y del uso eficiente del agua, que son uno de los grandes desafíos de la humanidad para este siglo XXI.

11.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La línea de actuación futura, pretende ser la aplicación del modelo híbrido de predicción y, comparativamente, modelos clásicos de análisis de series temporales y Redes Neuronales Artificiales a otros mercados como es el inmobiliario. Próximamente se pretende efectuar predicciones sobre precios de venta inmobiliarios efectuando comparaciones entre los distintos métodos de análisis de series temporales.

Otra dirección de investigación consistirá en expandir esta metodología a un ámbito geográfico mayor. Además, sería interesante comparar las distintas estructuras tarifarias y realizar un seguimiento de la evolución de los precios del agua, así como la predicción de los costes de los abastecimientos urbanos de agua, de acuerdo a la Directiva Marco del Agua, que deberá estar vigente en 2010 que determina el marco en el que debe desarrollarse la política de aguas y establece dos cuestiones obligatorias: la unificación del precio del agua para toda la Unión Europea y evitar la fijación de precios altamente subvencionados y por debajo del coste.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA ANDALUZA DEL AGUA (2005): *Informe relativo a los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco de Aguas 2000/CE*. Sevilla.
- AGUILERA KLINK, F. (1996): *Instrumentos útiles para mejorar la gestión del agua*. Cuadernos Aragoneses de Economía, 6, Nº1, pp.15-39.
- AGUILERA KLINK, F.; Arrojo Agudo, P.; Barreira López, A.; Carles Genovés, J. et al. (2004): *El agua en España. Propuestas de futuro*. Ediciones del oriente y del mediterráneo.
- AHMED, M. S. AND AL-DAJANI, M.A. (1998): *Neural Regulator Design*. Neural Networks, Nº 11, pp. 1695-1709.
- AHN, B. S., CHO, S.S. AND KIM, C.Y. (2000): *The integrated methodology of rough set theory and artificial neural network for business failure prediction*. Expert Systems with Applications, Nº 18, pp. 65-74.
- AINSCOUGH, T. L. AND ARONSON, J. E. (1999): *An empirical investigation and compararison of neural networks and regression for ecanner data analysis*. Journal of Retailing and Consumer Services. Nº 6, pp. 205-217.
- ALON, I.; QI, M. AND SADOWSKI, R.; (2001): *Forecasting aggregate retail sales: a comparison of artificial neural networks and traditional methods*; Journal of Retailing and Consumer Services, Nº 8, pp. 147-156.
- ALONSO, A.; FERNÁNDEZ, J.; GALLASTEGUI, I. (2005): *Econometría*. Pearson Educación. Madrid.
- ÁLVAREZ, N. (2004): *Econometría II: Análisis de modelos econométricos de series temporales*. Ed. AC. Madrid.
- ÁLVAREZ GARCÍA, S.; GARCÍA VALIÑAS, M. Y SUÁREZ PANDIELLO, J. (2001): *Tarifas no uniformes: Servicio de Suministro doméstico de agua*. Instituto de Estudios Fiscales.

- ALVAREZ VAZQUEZ, N. (2001): *Econometría II: Análisis de modelos econométricos de series temporales*. Editorial AC. Madrid.
- ALLEN, W.C. AND ZUMWALT, J.K. (1994): *Neural Networks: A word of caution*. Unpublished working paper. Colorado State University.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (2000): *Management in the 21 st Century*. Journal American Water Works Association 92, issue 1.
- ANDERS, U. AND KORN, O. (1999): *Model selection in neural networks*. Neural Networks, Nº12, pp. 309-323.
- ANTONGNETTI, P. AND VELJKO, M.C. (1996): *Neural networks: Concepts, Applications, and Implementations*. Prentice Hall Advanced Reference Series, II.
- ARAGÓN TORRE, A. ET. AL. (1997): *Aplicaciones de redes neuronales en Economía*. Actas V Jornadas ASEPUMA. Málaga.
- ARBIB, M.A. (1998): *The Handbok of Brain Theory and Neural Networks*. MIT Press.
- ARBUÉS, F. (2000): *El consumo de agua de los hogares, Estimación de la función de Demanda para la ciudad de Zaragoza*. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.
- ARBUÉS GRACIA, F. Y BARBERÁN ORTÍ, R (1999): *La demanda de agua con fines residenciales. Estimación para la ciudad de Zaragoza*. XXV Reunión de Estudios Regionales. Las Regiones Españolas en Europa. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- ARBUÉS, F., BARBERÁN, R. Y VILLANÚA, I. (2004): *Price impact on urban residencial water demand: a dynamic panel data approach*. Water Resources Research, 40 (11).
- ARBUÉS, F. GARCÍA-VALIÑAS, M.A Y MARTÍNEZ- ESPIÑEIRA, R. (2003): *Estimation of residencial water demand: a state-of-the-art review*. Journal of Socio-Economics, 32, pp. 81-102.
- ARIÑO ORTIZ Y G.; SASTRE BECERRO, M. (1997): *Los mercados del agua en España: una propuesta de reforma de la Ley de Aguas*. Revista Ingeniería del Agua, vol. 4, Nº 1 (marzo 1997), pp. 77-86.

- ARIÑO ORTIZ, G. Y SASTRE BECERRO, M. (1999): *Leyes de Aguas y Política Hidráulica en España*. Ed. Comares S.L. Granada.
- ARROJO, P. Y NAREDO, J.M. (1997): *La gestión del agua en España y California*. Ed. Bakcaz.
- ARROJO AGUDO, P. (1999): Presentación del Congreso *El agua a debate desde la Universidad. Hacia una nueva cultura de agua*. 1^{er} Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de aguas. Zaragoza.
- ARROJO AGUDO, P. (2003): *El Plan Hidrológico Nacional: una cita frustrada con la historia*. RBA Libros.
- ARROJO, P. Y DEL MORAL, L. (2003): La Directiva Marco del Agua: realidades y futuros. III Congreso Ibérico de Planificación y Gestión del agua. Fundación Nueva Cultura del Agua, Zaragoza, pp. 585.
- ARROJO, P. Y OTROS (2005): Lo público y lo privado en la gestión del agua. Experiencias y reflexiones para el siglo XXI. Ediciones del Oriente y del Mediterráneo. Madrid.
- ARROJO AGUDO, P. (2006): *La gestión del agua en España ¿de dónde venimos y adónde vamos?*. La Vanguardia Dossier. Nº 21, pp.108-111.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE EMPRESAS DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO (1997): *Actualización Manual para la confección de Estudios de Tarifas en los Servicios de Abastecimiento de Agua*. Madrid.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE EMPRESAS DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO (1999): *Manual para la confección de Estudios de Tarifas de Saneamiento de Agua*. Madrid.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE EMPRESAS DE ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO (2004): *VIII Encuesta Nacional de Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España 2002*. Madrid.
- AYALA-CARCEDO, F.J. (2002). Notas sobre impactos físicos previsibles del Cambio Climático sobre los lagos y humedales españoles. En del Moral ed. III Congreso Ibérico de Planificación y Gestión de Aguas, Sevilla, Fundación Nueva Cultura del Agua, pp. 360-364.

- AYALA-CARCEDO, F.J. E IGLESIAS, A. (2000). Impactos del posible Cambio Climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España Peninsular. In Balairón edit., *El Cambio Climático*, El Campo de las Ciencias y las Artes, Servicio de Estudios del BBVA, Madrid, pp. 201-222.
- AZAIEZ, M. N. (2002): A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity cost. *European Journal of Operational Research*. Vol. 143, pp. 611-624.
- AZNAR, A.Y TRÍVEZ (1993a): *Métodos de predicción en Economía. Fundamentos Input-Output, Modelos econométricos y métodos no paramétricos de series temporales*. Ariel Economía. Barcelona.
- AZNAR, A.Y TRÍVEZ (1993b): *Métodos de predicción en Economía II. Análisis de series temporales*. Ariel Economía. Barcelona.
- AZQUETA, D. (2002): *Introducción a la Economía Ambiental*. Ed. McGraw-Hill. Madrid.
- AZQUETA, D. Y FERREIRO, A. (1994): *Análisis económico y gestión de recursos naturales*. Alianza Economía. Madrid.
- BABOVIC, V.; DRÉCOURT, J.P.; KEIJZER AND M.; HANSEN, P.F. (2002): *A data mining approach to modelling of water supply assets*. *Urban Water*, Nº 4, pp. 401-414.
- BALKIN, S. AND ORD J. K. (2001): *Automatic neural network modelling univariate time series*. *International Journal of Forecasting*, Nº 16, pp. 509-515.
- BASHEER, I.A. AND HAJMEER, M. (2000): *Artificial Neural Networks: fundamentals, computing, design and application*. *Journal of Microbiological Methods*, Nº 43, pp. 3-41.
- BATISTA, J.M. Y MARTÍNEZ, M. (1989): *Análisis multivariante: Análisis en componentes principales*. Colección Evade. Hispano Europea.
- BAUMANN, D.D., BOLAND, J.J Y HANEMANN, D. W. (1998): *Urban Water Demand and Management*. McGraw-Hill, Nueva York.
- BERBEL VECINO, J. (2006): *Análisis económico del agua en la Directiva Marco. Su aplicación a la Cuenca del Guadalquivir*. Conferencia ISR, Córdoba.

- BERBEL VECINO, J. Y EXPÓSITO GARCÍA, A. (2005): *Análisis del coste del servicio de abastecimiento urbano de agua en la Demarcación del Guadalquivir*. Revista de Estudios Regionales Nº 76, pp. 151-183.
- BISHOP, C.M. (1994): *Neural networks and their applications*, Review Science Instrument, Nº 65 (6), pp.1803-1832.
- BODE, J. (1998): *Decisión support with neural networks in the management of research and development: concepts and application to cost estimation*. Information & Management, Nº 34, pp. 33-40.
- BONILLA MUSOLES, M. Y PUERTAS MEDINA, R. (1997): *Análisis de las redes neuronales: Aplicación a problemas de predicción y clasificación financiera*. Quaderns de Treball, Nº 43. Facultad de C. Económicas y Empresariales. Universidad de Valencia.
- BÖS, D. (1985): *Public sector pricing*. Handbook of Public Economics. North Holland, Ámsterdam: Elsevier Science, pp. 129-211.
- BÖS, D. (1994): *Pricing and Price Regulation*. North Holland, Ámsterdam: Elsevier Science.
- BOX, G.; JENKINS, G. (1970): *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden- Day. San Francisco. USA.
- BOX, G.; JENKINS, G.; REINSEL, G. (1994): *Time Series Analysis. Forecasting and Control*. Prentice Hall.
- BRISCOE, J. (1996): *Water as an economic good: the idea and what its means in practice*. World Bank. Washington D.C.
- BRUCH, C. (2001): *Charting New Waters: Public Involvement in the Management of International Watercourse*. Environmental Law Reporter. Washington.
- BRUINS, H.J. (2002): *Manejo del Agua en Periodos de Sequía*. Ingeniería del Agua. Vol.10. Nº 3, pp. 327-335.
- BUHAMRA, S. ; SMAQUI, N. AND GABR, M. (2003): *The Box-Jenkins analysis and neural networks: prediction and time series modelling*. Applied Mathematical Modelling, Nº 27, pp. 805-815.

- BURGER, C.J.S.C.; DOHNAL, M.; KATHRADA, M. AND LAW, R. (2001): *A practitioners guide to time-series methods for tourism demand forecasting-a case study of Durban, South Africa*. Tourism Management, Nº 22, pp. 403-409.
- CABRERA E., COBACHO R., DUBOIS M. (2004): *La problemática de los abastecimientos urbanos*. Revista de la Real Academia de Ciencias. Vol. 98, Nº 2, pp. 271-285.
- CALATRAVA J. Y GARRIDO, A. (2006): *Water Markets and Customary Allocation Rules: Explaining Some of the Dificultés of Designing Formal Trading Rules*. Journal of Economic Issues XL (1), pp. 27-44.
- CALDERÓ PUJOL, J. (1995): *Desarrollo de una herramienta de análisis bursátil con redes neuronales*. Proyecto fin de carrera. UPC. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Telecomunicació de Barcelona.
- CARIDAD Y OCERIN, J.M. (1998): *Econometría: Modelos Econométricos y Series Temporales*. (2 tomos), Ed. Reverté, Barcelona.
- CARIDAD Y OCERIN, J.M. (2000): *El consumo de agua en Córdoba*. B.R.A.C. LXXVIII, 138, pp. 257-267.
- CARIDAD Y OCERIN, J.M.; MILLÁN VÁZQUEZ DE LA TORRE, G.; DIOS PALOMARES, R. (2001): *Predicción del Consumo de agua en Córdoba*. vol. 8, no.3, Septiembre, pp. 305-318.
- CARIDAD, J.M. Y CEULAR, N. (2001): *Redes neuronales vs modelos hedónicos en problemas de valoración urbana*. Monográfico de Economía Urbana. Revista de Estudios Empresariales, Nº 8, 2000, pp. 111-130.
- CARIDAD Y OCERIN, J.M.; MORENO CAMPOS, I. (2002): *La Demanda de agua en zonas urbanas: Métodos alternativos de predicción a corto plazo*. Comunicación presentada al III Congreso Ibérico sobre gestión y planificación de aguas, Sevilla.
- CARIDAD Y OCERIN J.M. ET AL. (2004): *Artificial Neural Networks to estimate prices of different real estate properties*. Comunicación XIV Jornadas Hispano-Lusas de Gestión Científica. Azores, Portugal.

- CARRASCAL, U.; GONZÁLEZ, Y. Y RODRÍGUEZ, B. (2000): *Análisis Económico con Eviews*. Ed. Rama.
- CASTRO, J. DE (1995): *Acciones sobre la demanda urbana*. Seminario sobre el desequilibrio hídrico en España. Universidad Internacional Menéndez y Pelayo. Santander.
- CASTRO, F.; DA-ROCHA, J.M.; DELICADO, P. (2002): *Desperately seeking: estimating the distribution of consumers under increasing block rates*. Journal of Regulatory Economics, N° 22.
- CEULAR VILLAMANDOS, N. (2000): Modelos econométricos en valoración urbana. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.
- CESTI R. AND KEMPER, K. (1995): *Initial allocation of water rights in the United States, Australia and Chile*. World Bank, march 1995.
- CHAREMZA, W.; DEADMAN, D. (1997): *New directions in econometric practice*. Edward Elgar.
- CHEN, AN-SING AND LEUNG, M.T. (2004): *Regression neural network for error correction in foreign exchange forecasting and trading*. Computers & Operations Research, N° 31, pp. 1049-1068.
- CHIANG, W.C., URBAN, T.L. AND BALDRIDGE, G.W. (1996): *A Neural Network Fund Net Asset Approach to Mutual Value Forecasting*. Omega, The International Journal of Management Science, N° 24, pp. 205-215.
- CHIU, CH. (2002): *A case-based customer classification approach for direct marketing*. Expert Systems with Applications, N° 22, pp. 163-168.
- CHO, V. (2003): *A comparison of three different approaches to tourist arrival forecasting*. Tourism Management, N° 24, pp. 323-330.
- CHOUDHURY, J.P.; SARKAR, B. AND MUKHERJEE, S.K. (2002): *Forecasting of engineering manpower through fuzzy associative memory neural network with ARIMA: a comparative study*. Neurocomputing, N° 47, pp. 241-257.
- CHU, CHING-WU AND ZHANG, G. P. (2003): *A comparative study of linear and nonlinear models for aggregate retail sales forecasting*.

International Journal of Production Economics, Nº 86, pp.217-231.

- CHURCH, K.B. AND CURRAM, S. P. (1996): *Forecasting consumers expenditure: Acompararison between econometric and neural network models*. International Journal of Forecasting, Nº 12, pp. 255-267.
- CLEMENTS, M.P. AND D. HENDRY (1999): *Forecasting Non-Stationary Economic Time Series*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- CLEMENTS, M.P. (2005): *Evaluating Econometric Forecast of Economic and Financial Variables*. Palgrave Macmillan.
- COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS (2006): *Manifiesto del Agua*. Madrid.
- COLLAZOS, G.; PULIDO, M Y ANDREU, J. (2004): *Metodologías y herramientas para el análisis económico de sistemas de recursos hídricos. Aplicación a la DMA*. IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Tortosa (España), 8-12 Dic. 2004.
- COMTE, J. (2000): *Los usos industriales. El agua, factor limitativo*. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, II (51)
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADALQUIVIR (2005): *Informe Resumen de los Artículos 5 y 6 y Anejo III de la Directiva Marco del Agua*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. www.chguadalquivir.es
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR (2005): *Informe para la Comisión Europea sobre los Artículos 5 y 6y Anejo III de la Directiva Marco del Agua*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- CORCHADO RODRÍGUEZ, J.M. ET AL. (2000): *Redes Neuronales Artificiales: Un enfoque práctico*. Collección "Monografías, tecnoloxía e ciencias experimentais". Servicio de Publicaciones de la Universidad de Vigo.
- COROMINAS MASIP, J. (2003): *Hacia un nueva política de aguas en Andalucía*. En ARROJO, P. Y DEL MORAL, L.(coords.) *La Directiva Marco del Agua: realidades y futuros. III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua*. Zaragoza, Fundación Nueva Cultura del Agua, pp. 505-512.

- COROMINAS MASIP, J. (2007): *Agua y agricultura, secanos y regadíos*. En *El agua en la pintura andaluza. Realidades del agua en Andalucía*. Vol.II. Consejería de Medio Ambiente de Andalucía. Sevilla, pp. 431-441.
- CREEDY, J. AND MARTÍN, V.L. (1997): *Nonlinear Economic Models*. Hardcover
- CREW, M.A.; FERNANDO C.S. AND KLEINDORFER, P.R. (1995): *The theory of peak-load pricing: a survey*, *Journal of peak-load pricing: a survey*, *Journal of Regulatory Economics*, Nº 8, pp. 215-248.
- CUBILLO, F., IBAÑEZ, J.C. Y FERNÁNDEZ, F.J. (2001): *Estudio de la Demanda de Agua para Uso Urbano en la Comunidad de Madrid*. Dirección de Ingeniería y Nuevas Tecnologías, Canal de Isabel II, Madrid.
- CURRY, B.; MORGAN, P. AND SILVER, M. (2002): *Neural network and non-linear statistical methods: an application to the modelling of price-quality relationships*. *Computer & Operations Research*, Nº 29, pp. 951-969.
- DALHUISEN, J.M., DE GROOT, H.L.F., FLORAX, R.J.G.M. AND NIJKAMP, P. (2003): *Price and income elasticities of residential water demand: why empirical estimates differ*. *Land Economics*, 79 (2) 292:308.
- DE GISPERT, C. (2002): *The economic análisis of industrial water demand: a review*, *Environmental and Planing C. Government and Policy*, 22 (1), pp. 15-30.
- DE LOS LLANOS, M. (2002): *Consideraciones en torno a la regulación de las industrias de red. Su aplicación al caso español*. *Economía Industrial*, 344, pp. 129-136.
- DEFENSOR DEL PUEBLO ANDALUZ (2006): *Los servicios domiciliarios de agua en Andalucía*. Informe especial al Parlamento de Andalucía.
- DÍAZ, G. (1997): *Comparación de redes neuronales para predicción de series temporales*. Universitat Jaume I, 78.
- DÍAZ-MARTA PINILLA, MANUEL (1999): *Evolución de las Políticas Hidráulicas españolas desde la Ilustración hasta nuestros días*.

1^{er} Congreso Ibérico sobre Gestión y planificación de aguas. Zaragoza.

- DIOS PALOMARES, R. (1995): *Aplicaciones econométricas con μ -TSP*. Servicio de Publicaciones. Universidad de Córdoba.
- DOCUMENTOS CÍRCULO DE EMPRESARIOS (2007): *El agua en España: un mayor énfasis en la política de demanda*. Junio 2007.
- DRAGHICI, S. (2002): *On the capabilities of neural networks using limited precision weights*. Neural Networks, N° 15, pp. 395-414.
- DUPONT, D.P. Y RENZETI, S. (2001): *The Role of Water Manufacturing*. Environmental and Resource Economics, vol. 18, pp. 411-432.
- ELICES MESTRES, R. (1998): *Análisis económico de variables empresariales y sectoriales mediante redes neuronales autoorganizativas. Aplicación a la economía española, 1991-1994*. Proyecto fin de carrera UPC.
- ESTRELA, T. (2006): *Uso sostenible del agua en Europa: fenómenos hidrológicos extremos: inundaciones y sequías*. Madrid. MMA.
- ESTY, D. C., LEVY, M., SREBOTNJAK, T. Y DE SHERBININ, A. (2005): *Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*. New Haven: Yale Center for Environmental Law and Policy.
- FABRA, A. (2002): *El comienzo de un nuevo camino para la participación pública: El Convenio de Aarhus y su impacto en el Derecho Comunitario*. Boletín Informativo Life Guadajoz, N° 4 , Baena.
- FARAWAY, J. AND CHATFIELD, C. (1998): *Time series forecasting with neural networks: a comparative study using the airline data*. Applied Statistics, N° 47, pp. 231/250.
- FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, P. (2001): *Economía del agua. Algunos aspectos económicos de la Directiva Marco de Aguas de la Unión Europea*. Rev. del Instituto de Estudios Económicos, N° 20, 2001, pp. 3-37.

- FERNÁNDEZ PÉREZ, D. V. (1999): *La equidad, requisito de Calidad en un servicio de agua urbana*. 1º Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas. Zaragoza.
- FERNÁNDEZ PÉREZ, D. V. (1995): *Gestión del Agua Urbana*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección SEINOR, Nº 14. Madrid.
- FIGUEIRAS, A. (1993): *Curso de Redes Neuronales*. Enseñanza a través de Satélite de Ingeniería de Telecomunicación. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid.
- FISH, K. E.; BARNES, J. AND AIKEN, M. (1995): *Artificial Neural Networks: a new methodology for industrial market segmentation*. Industrial Marketing Management, Nº 24, pp. 431-438.
- FLUXÁ CEVA, J.M.; GISTAU GISTAU R.; HERRERAS ESPINO, J.A. Y LÓPEZ CAMACHO, B. (1997): *El mercado del agua*. Revista de Estudios Económicos, 1-2, pp.173-188.
- FREEMAN, J. AND SKAPURA, D.M. (1993): *Redes neuronales algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación*. Ed. Wilmington Addison-Wesley Diaz de Santos, 26-241.
- FUNDACIÓN COTEC PARA LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA. *Redes Neuronales*. Documentos COTEC sobre oportunidades tecnológicas Nº 13, 1998 (<http://www.cotec.es/cas/index.html>).
- GALLANT, S.I. (1993): *Neural Network Learning and Expert Systems*. MIT Press.
- GARCÍA, M. (1993): *Redes de Propagación hacia adelante: Retropropagación del Gradiente*. In *Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos y Aplicaciones*. Ed. Olmeda & Barba-Romero; Actas de un curso de la Universidad de Alcalá; Universidad de Alcalá de Henares, pp. 67-82.
- GARCÍA, D. Y DíEZ, R. (1995): *Análisis comparativo de cálculo de previsiones univariantes y función de transferencia, mediante las metodologías de Box-Jenkins y Redes Neuronales*. Quesito Journal, Vol. 19, pp. 187-215.
- GARCÍA, D.; DíEZ, R.; Riestra, C. Y RODRÍGUEZ, J.L. (1996): *Análisis comparativo de los métodos de previsión univariante*,

Box-Jenkins, redes neuronales artificiales y espacios de estado. Estudios de Economía Aplicada, N° 5, pp. 5-33.

- GARCÍA-SERRA GARCÍA, J. Y CABRERA MARCEL, E. (1999): *Problemática de los abastecimientos urbanos en España.* Propuesta de urgentes soluciones. 1^{er} Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de agua. Zaragoza.
- GARCÍA-VALIÑAS, M.A. (2003): *Tarifificación Óptima para el Servicio de Agua en las Ciudades: Aplicación a Tres Municipios Españoles.* Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- GARCÍA-VALIÑAS, M.A. (2005): *Estimating urban water demands: a dynamic approach,* en Koundouri, P. (ed.). *Econometrics Informing Natural Resources Management. Selected Empirical Analyses,* Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- GARRIDO, A. Y GÓMEZ, A. (1998): *El análisis de demanda de agua para usos urbanos: el estado de la cuestión y las áreas por explorar.* Comunicación presentada en el I Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua. El Agua a debate desde la Universidad. Por una nueva cultura del agua. Zaragoza.
- GARRIDO COLMENERO, A. (1999): "La economía del agua en España. Entre lo público y lo privado, la difícil búsqueda del interés general", *Arbor* CLXIV, N° 646, pp. 203-216.
- GAUBERT, P. AND COTTRELL, M. (1999): *Neural Network and Segmented Labour Market.* *European Journal of Economic and social Systems,* N° 13, pp. 19-39.
- GODAR NORES, J.E. (2002): *SPSS-NE: Redes neuronales.* Data Mining Institute. Madrid.
- GOH, C. AND LAW, R. (2002): *Modeling and forecasting tourism demand for arrivals with stochastic nonstationary seasonality and intervention.* *Tourism Management,* N° 23, pp. 499-510.
- GONZALEZ, C. (1999): *Métodos Económicos.* 1^a Edición, Editorial Ariel, Barcelona.
- GRAY, F.F. (1996): *Calidad del agua potable.* Ed Acribia, S.A.
- GREENE, W. H. (2000): *Econometrics análisis.* Prentice-Hall, Inc; Fourth Edition. USA

- GUAJARATI, D.N. (2004): *Econometría*. Ed. McGraw-Hill. México.
- HAN, J. (2002): *Application of Artificial Neural Networks for Flood Warning Systems*. Doctoral Dissertation; PhD in Civil/Environmental Engineer from North Carolina State University.
- HAIR, J.F. (1999): *Análisis multivariante*. Ed. Prentice Hall (5TH). Madrid.
- HAYKIN, S. (1999): *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. 2ª edición. Prentice-Hall, New Jersey.
- HILERA, J.R. Y MARTÍNEZ, V.J. (2000): *Redes neuronales artificiales: Fundamentos, modelos y aplicaciones*. Ed. Ra-Ma. Madrid. pp. 2-95.
- HENDRY, D. F. (1995), *Dynamic Econometrics*, Oxford University Press.
- HENDRY, D. F. AND M.P. CLEMENTS (2001): *Economic Forecasting: Some lessons from recent research*. European Central Bank, Working Paper N° 82.
- HERAS MORENO, G. (2001): *Usos del agua u eficiencia económica. Una propuesta de revisión y actualización*. Instituto de Estudios Económicos, pp. 62-75.
- HILL, T.; O'CONNOR, M. AND REMUS, W.(1996): *Neural networks models for time series forecasts*. *Management Science*, vol. 42, N° 7, pp. 1082-1092.
- HISPAGUA (2006b): *La desalación*. Suplementos Hispagua.
- HISPAGUA (2006): *Las grandes presas en España*. Suplementos Hispagua.
- HO, S.L.; XIE, M. AND GOH, T.N.(2002): *A comparative study of neural network and Box-Jenkins ARIMA modelling in time series prediction*. *Computers & Industrial Engineering*, N° 42, pp. 371-375.
- HOPFIELD, J.J. (1982): *Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities* . *Proc.of the National Academy of Sciences*, 79, pp. 2554-2558.

- HOPFIELD, J.J. (1984): *Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons*. Proc. of the National Academy of Sciences, 81, pp. 3088-392.
- HOPFIELD, J.J., TANK, D.W. (1985): *Neural computation of decisions in optimization problems*. Biological Cybern, 52, pp. 141-152.
- HOPFIELD, J.J. ; TANK, D.W. (1986): *Computing with neural circuits: A model*. Science, vol. 233, pp. 625-633, 1986.
- HRUSCHKA, H. (1993): *Determining market response functions by neural network modelling: a comparison to econometric techniques*. European Journal of Operational Research. N° 66, pp.27-35.
- HWARNG, H.B. AND ANG, H.T. (2001): *A simple neural network for ARMA (p,q) time series*. Omega, The International Journal of Management Science, N° 29, pp. 319-333.
- HWARNG, H.B. (2001): *Insights into neural-network forecasting of time series corresponding to ARMA (p,q) structures*. Omega, The International Journal of Management Science, N° 29, pp. 273-289.
- IBERAQUA (2002): *La participación pública en la gestión de los recursos hídricos de la Península Ibérica*, <http://iberaqua.com.sapo.pt/inicio.htm>.
- IGLESIAS, E., GARRIDO, A. AND GÓMEZ-RAMOS, A. (2003): *Evaluation of drought management in irrigated area*. Agricultural Economics 29, pp. 211-229.
- INE (2004): *Encuesta sobre el suministro y tratamiento del agua*. Instituto Nacional de Estadística, INE, 2004. www.ine.es
- IRANZO, J.E. (1995): *El mercado del agua*. En el libro *Los problemas del agua*. IBERDROLA. Instituto Tecnológico. Valencia.
- IRANZO, J.E. (1997): *La gestión del agua*. Revista de Estudios Económicos, 1-2, pp. 147-150.
- JAÉN, M. Y LÓPEZ RUIZ, E. (2001): *Modelos econométricos de series temporales: teoría y práctica*. Septem Ediciones. Oviedo.

- JAIN, A.; VARSHNEY, A.K. AND JOSHI, U.C. (2001): *Short-term water demand forecast modelling at IIT Kanpur using artificial neural networks*. Water resources Management, N° 15, pp. 299-321.
- JOHNSTON, J. Y DINARDO, J. (2000): *Métodos Econométricos*. Ed. McGraw-Hill. Portugal.
- JOHNSTON, J. Y DINARDO, J. (2001): "Métodos de Econometría". Vicens Vives.
- JOVÉ, J.L. (1993): *Finançament de les grans infraestructures*. Economía del Agua. Ed. AGBAR, mayo 1993, pp. 306-329.
- KAASTRA, L. AND BOYD, MILTON (1996): *Designing a neural network for forecasting financial and economic time series*. Neurocomputing. N° 10, pp. 215-236.
- KOHONEN, T. (1998): *An introduction to Neural Computing*. Neural Networks,1: 3-16.
- KOHZADI, N., BOYD, M., KERMANSHAHI, B. AND KAASTRA, L. (1996): *A comparison of artificial neural network and time series models for forecasting commodity prices*. Neurocomputing, N° 10, pp. 169-181.
- KUAN, CHUNG-MING AND LIU, T. (1995): *Forecasting exchange rates using feedforward and recurrent neural networks*. Journal of Applied Econometrics, vol. 10, pp. 347-364
- KUAN, CHUNG-MING AND WHITE, H. (1994): *Artificial Neural Network: An econometric perspective*. Econometric Reviews, N° 13, pp. 1-91.
- LAW, R. AND AU, N. (1999): *A neural network model to forecast Japanese demand for travel to Hong Kong*. Tourism Management, N°20, pp. 89-97
- LAW, R. (2000): *Back-propagation learning in improving the accuracy of neural network-based tourism demand forecasting*. Tourism Management, N° 21, pp. 331-340.
- LLAMAS, M.R. (2002): *Las aguas subterráneas bajo la Nueva Directiva Marco*. Universidad Autónoma de Madrid. Canal de Isabel II y Comunidad de Madrid, pp. 15-24.

- LÓPEZ, A. Y PULIDO SAN ROMÁN, A. (1999): *Predicción y Simulación aplicada a la Economía y Gestión de Empresas*. Ed. Pirámide. Madrid.
- LÓPEZ CAMACHO, B. (1997): *La escasez del agua y el modo de abordarla: nuevos abastecimientos versus water conservation*, en Naredo, J.M. (ed.) *La Economía del Agua en España*. Colección Economía y Naturaleza. Fundación Argentaria, Madrid.
- LÓPEZ CAMACHO, B.(2001): *Garantías de recursos en los abastecimientos urbanos. Análisis y Perspectivas*. Ingeniería del Agua. Vol. 8. Nº 2, pp.157-177.
- LÓPEZ MARTOS J. (1997): *La gestión del agua*. Curso del Centro Mediterráneo. Universidad de Granada. Lanjarón.
- LUXHOJ, J.; RIIS, J. O. AND STENSBALLE, B. (1996): *A hybrid econometric-neural network modelling approach for sales forecasting*. International Journal of Production Economics, Nº 43, pp. 175-192.
- MAESTRE, J. Y ROJO, T. (2002): *División de la opinión pública española sobre las estrategias sostenibles del agua. Metodología EASW para la acción consensuada*. Observatorio Medioambiental, vol, 5, pp. 193-216.
- MAKRIDAKIS, S. AND HIBON, M. (1997): *ARMA and the Box-Jenkins Methodology*. Journal of Forecasting, vol. 16, pp. 147-163.
- MAREN, A.J.; HARSTON, C.T. Y PAP, R.M. (1990): *Handbook of Neural Computing Applications*. Ed. Academic Press.
- MARQUES, J.S. (1999): *Reconhecimento de padroes. Métodos Estadísticos e Neurais* MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R. (2002): *Residencial water demand in the northwest of Spain*. Environmental and Resource Economics. Vol. 21, Nº 2, pp. 161-187.
- MARTÍN DEL BRÍO, B. (1994): *Procesamiento Neuronal con Mapas Autoorganizados: Arquitecturas Digitales*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.
- MARTÍN DEL BRIO B. Y SANZ MOLINA A. (2006): *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*. 3ª edición. Ed. Ra-Ma. Madrid. pp. 3-241.

- MARTÍN DEL BRÍO, B. Y SERRANO, C. (1993): *Self-organizing Neural Networks for the Analysis and Representation of Data: Some Financial Cases*. Neural Computing and Applications. Springer-VerLAG, 1: 193-206. MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R. (2003a): *Residential water demand in the northwest of Spain*. Environmental and Resource Economics. Vol. 26, Nº 1, pp. 5-23.
- MARTÍN- ORTEGA, J. Y BERBEL VECINO, J. (2005): *Metodología para el análisis de presiones y tendencias de consumo doméstico de agua en la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir* en: López Geta, J. A., Rubio Campos, J. C. y Martín Machuca, qM (ed.), VI Simposio del Agua de Andalucía. Madrid, pp. 563-574.
- MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R. (2003b): *Price specification issues under block tariffs: a spanish case-study*. Water Policy. Vol. 5, núm.3, pp. 237-256.
- MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R. (2003c): *An Estimation of Residential Water Demand Using Colntegration and Error Correction Techniques*. St. Francis Xavier University, Working Paper Series.
- MARTÍNEZ-ESPIÑEIRA, R. (2007): *An Estimation of residential water demand using co-integration and error correction techniques*. Journal of Applied Economics. Universidad del CEMA. Vol.0, p.161-184, May.
- MARTÍNEZ DE LEJARZA Y ESPARDUCER, I. (1996): *Redes neuronales auto-organizadas y clustering: Una aplicación a la agrupación Económica- Funcional de las Entidades de Población*. Universidad de Valencia. Documento de trabajo, 27.
- MARTÍNEZ LÓPEZ, L. Y MARTÍN BARAJAS, S. (1995): *Por un enfoque de demanda en la gestión del agua*, Ciudad y Territorio, 3, Nº 105, pp. 509-513.
- MASTER, T. (1995): *Advanced Algorithms for Neural Networks*. John Wiley & Sons, New York.
- MERKEL, W. (2003): *El Futuro de la Industria del Agua en el Mundo*. Ingeniería del agua. Vol. 10, Nº 3, pp. 337-353.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (1998): *Libro Blanco del Agua en España*. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y *Calidad de las Aguas*. Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.

- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2007a): *El agua en la Economía Española: situación y perspectivas*. Serie Monografías. Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2007b): *Precios y Costes de los Servicios del Agua en España*. Serie Monografías. Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2007c): *La sequía en España. Directrices para minimizar su impacto*. Centro de publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2007d): *Sistema Integrado de Información del Agua*. Dirección General del Agua. <http://www.mma.es>.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2008): *Situación actual y evolución de los ingresos y tarifas de los servicios urbanos del agua*. XXVIII Jornadas Técnicas AEAS. Zaragoza.
- MONTAÑES, E.; QUEVEDO, J.R.; PRIETO, M.M. Y MENÉNDEZ, C.O. (2002): *Forecasting time series combining machine learning and Box-Jenkins time series*. *Advances in artificial intelligence*, Iberamia 202, Nº 2527, pp. 491-499.
- MORAL ITUARTE, L. DEL (2002): *El tratamiento del agua en la ordenación de territorio en Andalucía*. *Andalucía Geográfica*, núm. 9, mayo, pp. 43-55.
- MORAL ITUARTE, L. DEL (2007): *Los abastecimientos urbanos de agua en Andalucía: Prioridad social y responsabilidad ciudadana*. En *El agua en la pintura andaluza. Realidades del agua en Andalucía*. Vol.II. Consejería de Medio Ambiente de Andalucía. Sevilla, pp. 431-441.
- MORAL ITUARTE, L. Y PITA LÓPEZ, M^a. (2005): *El clima y el Agua*. En ZOIDO, F. *Segundo Informe de Desarrollo Territorial de Andalucía*. Sevilla, Universidad de Sevilla.
- MORAL ITUARTE, L. DEL, VAN DE WERFF, P., BAKKER, K., HANDMER, J. (2003): *Global trends and water policy in Spain*. *Water International*. Vol. 28, Nº 3, pp. 358-366.

- MOSHIRI, S. AND CAMERON, N. (2000): *Neural Network versus Econometric Models in Forecasting Inflation*. Journal of Forecasting, Nº 19, pp. 201-217.
- MOSS, T. (2001): *Solving Problems of Fit at the Expense of Problems of Interplay? The Spatial Reorganisation of Water Management following the EU Water Framework Directive*. Institute for Regional Development and Structural Planning, Erkner.
- MOSTER, E.; VAN BEEN, E. (1999): *River Basin Management and Planning*. Keynote paper for International workshop on River Basin Mangement, La Haya 27-29 Octubre.
- MOUTINHO, L. E CURRY, B. (1995): *Rede Neuronal no Marketing: Um Modelo das Despostas do Consumidor aos Estímulos Publicitários*. Revista Portuguesa de Marketing, Nº 19, pp. 201-217.
- MOUTINHO, L. (2000): *Efeitos Interactivos de Planeamiento Estratégico e Planeamento de Marketing Estratégico sobre a Performance: Uma Análise da Rede Neuronal*. Revista Portuguesa de Marketing, Nº 10, pp. 53-62.
- Moyano, E.; Garrido, F.; Navarro, C. y Burza, B. (2004): *La cuestión hídrica en Andalucía: actitudes y valores de los andaluces respecto al problema del agua*. Revista de Estudios Regionales, nº 70, pp. 85-116.
- MÜLLER, B. AND REINHARDT, J. (1990): *Neural Networks: An Introduction*. Springer-Verlag, 1990.
- NAM, K. AND SCHAEFER, T. (1995): *Forecasting International Airline Passenger Traffic Using Neural Networks*. Logistics and Transportation Review, VOL. 31, nº 3, pp. 239-251.
- NAM, K.; YI, J. AND PRYBUTOK, V.(1997): Predicting airline passenger volume, Journal of Business Forecasting, pp. 14-16.
- NANSEN, J.V. AND NELSON, R.D. (2002): *Data mining of time series using staked generalizers*, Neurocomputing, Nº 43, pp. 173-184.
- NATTER, M. (1999): *Conditional market segmentation by neural networks: a Monte Carlo study*. Journal of Retailing and Consumer Services, Nº 6, pp. 237-248.

- NELSON, M.; HILL, T.; O'CONNOR, M. AND REMUS, W. (1999): *Time series forecasting using neural networks: should the data be deseasonalized first?*. Journal of Forecasting, Nº 18, pp. 359-367.
- NIXON, L. (2004): *El agua en Europa: Una evaluación basada en indicadores*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección de Calidad y Evaluación Ambiental.
- NOVALES, A. (1993): *Econometría*. Ed. McGraw-Hill.
- OCDE (1997): *Análisis de los resultados medioambientales: España*. París.
- OCDE (1998): *Pricing of Water Services in OECD countries: Update*. OCDE, París.
- OCDE (2003): *Water Crisis?. OECD, 236, March 2003*. OCDE, París.
- OCDE (2004): *Análisis de los resultados mediambientales*. España. OCDE, París.
- OCDE (2006): *Infrastructure to 2030: Telecom, Land Transport, Water and Electricity*. OCDE. París.
- ODETE FERNÁNDEZ, P.; TERROSO CEPEDA, F.J. Y BORGE GONZÁLEZ, L.M. (2007): *Modelización de la Demanda turística en la región norte de Portugal: Aplicación de las redes Neuronales*. XI Congreso Internacional de Investigación en Ciencias Administrativas (ACACIA). Guadalajara.
- OH, K. AND HAN, I. (2000): *Using change-point detection to support artificial neural networks for interest rates forecasting*. Expert Systems with Applications, Nº 19, pp. 105-115
- OLMEDA, I. Y BARBA-ROMERO, S.: (1993): *Redes Neuronales Artificiales: Fundamentos y aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá de Henares.
- ORTEGA, J.F. DE JUAN, J.A. Y TARJUELO, J.M. (2004): *Evaluation of the water cost effect on water resource management: Application to typical crops in a semiarid region*. Agricultural Water Management (2004). Vol 66, pp.125-144.
- OTERO, J. M^a (1993): *Econometría. Series temporales y predicción*. Ed. AC. Madrid.

- PALAZÓN GONZÁLEZ, J. (1998): *Modelización de la intensidad de la lluvia: métodos estadísticos y uso de redes neuronales*. Trabajo Fin de Carrera. Universidad de Córdoba. ETSIAM.
- PATTIE, D. AND ZINDER, J. (1996): *Using a neural network to forecast visitor behaviour*. Annals of Tourism Research, vol.23, Nº 1, pp. 151-164.
- PEDREGAL MATEOS, B. (2004): *Sostenibilidad y equidad en el uso de agua urbana: Los mitos de la gestión del agua urbana*, Andalucía Geográfica, Nº 10. pp. 50-54.
- PEDREGAL MATEOS, B. (2004b): *Estimación de la demanda de agua urbana en los planes marco: El caso español a la luz de la experiencia del Plan Hidrológico de California*. Boletín de la A.G.E. Nº 37, pp. 183-204.
- PEIDRÓ, J.M. (2004): *La demanda que no cesa*. Boletín de mercado. CB Richar Ellis, pp. 77-85.
- PEIRO, A. Y URIEL, E. (2000): *Introducción al análisis de series temporales: Modelos ARIMA*. Ed. AC. Madrid.
- PÉREZ DELGADO, M.L.Y MARTÍN MARTÍN, Q. (2003): *Aplicación de las redes neuronales artificiales a la estadística*. Editorial La Muralla. Madrid.
- PÉREZ-DÍEZ, V.; MEZA, J. Y ALVAREZ-MIRANDA, B. (1996): *Política y Economía del Agua en España*. Circulo de Empresarios, Madrid, pp.136.
- PÉREZ LÓPEZ, C. (2005): *Métodos Estadísticos Avanzados con SPSS*. Ed. Thomson. Madrid.
- PEÑA, D. (2005): *Análisis de series temporales*. Alianza Editorial, S.A. Madrid.
- PEÑA, D.; TIAO, G. Y TSAV, R. (2001): *A Course in Time Series Analysis*. John Wiley. New York. USA
- PINDYCK, R.S. Y RUBINFELD, D.L. (1997): *Econometric Models and Economic Forecasts*. Irwin McGraw-Hill. Boston.
- PINDYCK, R.S. Y RUBINFELD, D.L (2001): *Econometría, Modelos y pronósticos*. McGraw-Hill, Madrid.

- POLO, M.J. Y LOSADA M.A. (2007): *El agua en Andalucía: mitos y realidades*. En *el agua en la pintura andaluza. Realidades del agua en Andalucía*. Vol.II. Consejería de Medio Ambiente de Andalucía. Sevilla, pp. 389-399.
- PORTA, F. (2001): *La repercusión de la Directiva Marco en el sector urbano del agua en España*. Curso de Derecho Ambiental del Ilustre Colegio de Abogados de Barcelona, Abril 2001.
- PRADOS, L. (2003): *El progreso económico de España (1850-2000)*. Fundación BBVA.
- PRYBUTOK, V.; YI, J. AND MITCHELL, D. (2000): *Comparison of neural network models with ARIMA and regression models for prediction of Houston's daily maximum ozone concentrations*. European Journal of Operational Research, Nº 122, pp. 31-40.
- PULIDO, A. (1989): *Predicción Económica y Empresarial*. Ediciones Pirámide. Madrid.
- PULIDO, A. Y LÓPEZ, A.M. (1999): *Predicción y Simulación Aplicada a la Economía y Gestión de Empresas*. Pirámide, Madrid.
- PULIDO, A.; PÉREZ GARCÍA, J. (2001): *Modelos Econométricos*. Ed. Pirámide. Madrid.
- QI, M. (2001): *Predicting US recessions with leading indicators vía neural network models*. International Journal of Forecasting, Nº17, pp. 383-401.
- RAMANATHAN, R. (1998): *Introductory Econometrics with Applications*. Dryden Press, USA.
- RABASA, A.; RODRÍGUEZ, J.J.; SANTAMARÍA, L.Y MONGE, J.F. (2006): *Predicción sobre Series Temporales No-lineales con Redes Neuronales y Modelos ARIMA*. Trabajos I+D. Centro reinvestigación Operativa. Elche (Alicante).
- RENZETTI, S. (1992): *Estimating the Structure of Industrial Water Demands: The Case of Canadian Manufacturing*. Land Economics. Vol 68 (4), pp. 396-404.
- RENZETTI, S. (2002): *The Economics of Industrial Water Use*. Elward Elgar Publishing. Cheltenham, UK.

- RICO, A.M. (2004): *Sequías y Abastecimientos de agua potable en España*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 37, 2004, pp.137-181.
- RODRIGUES, P. J. (2000): *Redes neuronais aplicadas à segmentação e classificação de leucocitos em imagens*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações; Universidad de Aveiro.
- ROGERS P., DE SILVA R. AND BHATIA R. (2002) : *Water is an economic good : How to use prices to promote equity, efficiency and sustainability*. Journal of Water Policy, N°4, 2002, Elsevier.
- ROMERO MARTÍN, M. Y SAN MARTÍN BACAICOA, J. (1999): *Aguas de Abastecimiento urbano y salud*. 1º Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas. Zaragoza.
- ROSENBLATT, F. (1958): *The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain*. Psychological Review 65, pp. 386-408.
- ROSENBLATT, R. (1959): *Principles of Neurodynamics*. Spartan Books. New York.
- RUMELHART D.E.; HINTON, G.E. AND MC CLELLAND J.L. (1986): *Learning representations by backpropagation*. Nature, 323: 533-536.
- RUSSELL, S.J. Y NORVIG, P. (2004): *Inteligencia Artificial. Un enfoque moderno*, Ed. Pearson Educación. Madrid. pp. 838-851.
- SAENZ DE MIERA, G. (2002): *Agua y Economía*. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid
- SARLE, W.S. (1994): *Neural networks and Stastical Models*. *Proceeding of the 19th annual SAS Users Group International Conference*. Cary, NC (SAS Institute), pp. 1538-1550.
- SCHALKOFF, R. (1997): *Artificial Neural Networks*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- SERRANO-CINCA, C. (1996): *Self organizing neural networks for financial diagnosis*. Decision Support Systems, N° 17, pp. 227-238.

- SFETSOS, A.Y SIRIOPULOS, C. (2004): *Combinational time series forecasting based on clustering algorithms and neural networks*, Neural computation and Applications, Nº 13.
- SHIN, C.K. AND PARK, S.C. (1999): *Memory and neural network based expert system*. Expert Systems with Applications, Nº 16, pp.145-155
- SIMPSON, P.K. (1989): *Artificial Neural Systems*. Pergamon Press.
- SOHL, J. E. AND VENKATACHALAM, A.R. (1995): *A Neural Network approach to forecasting model selection*. Information and Management, Nº 29, pp. 297-303.
- SORIA, E. Y BLANCO, A. (2001): *Redes neuronales artificiales*. ACTA (Autores científico-técnicos y académicos). Id. Nº 19.
- SPECHT, D.F. (1991): *A general regresión neural network*. IEEE. Transactions on Neural Networks, 2, 6, pp. 568-576.
- SUÁREZ JAPÓN, J. M. (2007): *Agua y medio ambiente: una visión desde Andalucía*. En *el agua en la pintura andaluza. Realidades del agua en Andalucía*. Vol.II. Consejería de Medio Ambiente de Andalucía. Sevilla, pp. 371-379
- SWANSON, N.R. AND WHITE, H. (1997): *Forecasting economic time series using adaptive versus nonadaptive and linear versus nonlinear econometric models*. International Journal of Forecasting, Nº 13, pp. 439-461.
- SWANSON N.R. AND WHITE, H. (1997): *A model selection approach to real-time macroeconomic forecasting using linear models and artificial neural networks*. The Review of Economics and Statistics, pp. 540-550.
- TEIXEIRA, J.P.: *A Prosody Model to TTS Systems*. Doctoral Dissertation; PhD in Electrotechnical and Computer Engineering from Faculty of Engineer of Porto University.
- THAWORNWONG, S. AND ENKE, D. (2004): *The adaptive selection of financial and economic variables for use with artificial neural networks*. Neurocomputing, Nº 56, pp.205-232.
- THOMAKOS, D. AND GUERARD, J.B. (2004): *The adaptive selection of financial and economic variables for use with artificial neural networks*. Neurocomputing, Nº 56, pp. 205-232.

- TKACZ, G. (2001): *Neural network forecasting of Canadian GDP growth*. International Journal of Forecasting, N° 17, pp. 57-69.
- TRUJILLO, L. (1994): *Fijación de precios óptimos en el suministro urbano de agua*. Revista de Economía Aplicada, N° 5, vol.II, pp. 111-135.
- TSAUR, S., CHIU, Y. AND HUANG, CH.(2002): *Determinants of guest loyalty to international tourist hotels-a neural network approach*. Tourism Management, N° 23, pp. 397-405.
- TSENG, F.; YU, H. AND TZENG, G. (2002): *Combining neural network model with seasonal time series ARIMA model*. Technological Forecasting & Social Change, N°69, pp. 71-87.
- UE (2000): *Comunicación de la Comisión Europea al Consejo, al Parlamento Europeo y al Comité Económico y Social. Política de tarificación y uso sostenible de los recursos hídricos (COM (2000) 477 final)*. Bruselas, Bélgica. 26/07/2000.
- UNESCO (2003): *Agua para todos, agua para la vida: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: Resumen*. París: UNESCO; Madrid: Mundi-Prensa.
- UNESCO/IHP (2003): *Internacional Conference on Participatory Processes in Water Management*, Budapest 28-30 Junio.
- UNESCO (2006): *Water: A Shared Responsibility*.
- UNWWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAM) (2003): *Water for people: Water for life*. UN World Water for life. Water Development Report. París.
- URIEL, E. (1985): *Análisis de series temporales. Modelos ARIMA*. Colección Ábaco. Paraninfo. Madrid.
- URIEL, E. (1995): *Análisis de Datos: Series Temporales Y Análisis de la Varianza*. AC. Madrid.
- URIEL, E.Y PEIRÓ, A. (2000): *Introducción al análisis de series temporales*, Ed. AC. Madrid. pp. 63-176.
- VELICER, F.W. Y McDONALD R.P. (1991): *Cross-sectional time series designs: A General Transformation Approach*. Multivariate Behavioral Research, N° 26, pp. 247-254.

- VELLIDO, A.; LISBOA; P.J.G. AND VAUGHAN, J. (1999): *Neural networks in business: a survey of applications (1992/1998)*. Expert Systems with Applications, Nº 17, pp. 51-70.
- VELLIDO, A.; LISBOA, P.J.G. AND MEEHAN, K. (1999b): *Segmentation of the on-line shopping market using neural networks*. Expert Systems with Applications, Nº17, pp. 303-314.
- VELLIDO, A.; LISBOA; P.J.G. AND VAUGHAN, J. (1999): *Neural networks in business: a survey of applications (1992/1998)*. Expert Systems with Applications, Nº 17, pp. 51-70.
- VERGÉS, F. (1996): *Questions Plantejades per a la gestió dels recursos hídrics: El preu de l'aigua*. Anuari de la Societat Catalana d'Economia . Vol.13.
- VERGÉS, J.C. (1998): *Una política económica para el agua*. Monografía 3, Círculo de Empresarios.
- VILLAGARCÍA, T., MUÑOZ, A. (1997): *Imputación de datos censurados mediante redes neuronales: una aplicación a la EPA*. Cuadernos Económicos de ICE, 63, pp. 193-204.
- VOROSMARTY, C.J., GREEN, P. SALISBURY, J., LAMMERS, R,B. (2000): *Global water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth*. Science 289, pp. 284-288.
- WALCZAK, S. AND CERPA, N. (1999): *Heuristic principles for the design of artificial neural networks*. Information and Software Technology, Nº 41, pp.107-117.
- WALCZAK, S. (2001): *Neural Networks as a tool for developing and validating business heuristics*. Expert Systems with Applications, Nº 21, pp. 31-36
- WASSERMAN, P. (1989): *Neural Computing: theory an practice*. Neurocomputing.
- WATER UK (2005): *Towards sustainability 2003-2004*. Water UK, London.
- WERBOS, P.J. (1974): *Beyond Regression: New tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences*. Masters Thesis, Harvard University.

- WHITE, H. (1989): *Neural network learning and statistics*. Al Expert, pp. 48-50.
- WILSON, D.R., MARTINEZ, T.R. (2003): *The general inefficiency of batch training for gradient descent learning*. *Neural Networks*, 16, pp. 1429-1451.
- WOOLDRIDGE, J. (2001): *Introducción a la Econometría. Un enfoque moderno*. Paraninfo Thomson, Madrid.
- WWT/ADENA (2006): *Uso ilegal del agua en España. Causas, efectos y soluciones*. Madrid.
- YAO, J.; LI, Y AND TAN, CH.L (2000): *Option price forecasting using neural networks*. *Omega, The International Journal of Management Science*, N° 28, pp. 455-466.
- ZAFRA, J. L.; CARPINTERO, A. Y OLMEDA, I. (1993): *Algunas Aplicaciones de las Redes Neuronales Artificiales*. In *Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos y Aplicaciones*. Olmeda & Barba-Romero; Universidad de Alcalá de Henares; pp. 197-214.
- ZEMOURI, RYAD; RACOCEANU, D. AND ZERHOUNI, N. (2003): *Recurrent radialbasis function network for time-series prediction*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, N° 16, pp. 453-463.
- ZHANG, G; PATUCO, B AND HU, M. Y. (1998): *Forecasting with artificial neural networks: the state of the art*. *International Journal of Forecasting*, N° 14, pp. 35-62.
- ZHANG, G.P. (2003): *Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model*. *Neurocomputing*, N° 50, pp.159-175.
- ZHANG, G.P. (2004): *Neural networks in business forecasting*. Hershey. Idea Group Publishing.

ANEXO
