

**Resumen**

En este trabajo se presentan los resultados del estudio limnológico de los dos embalses de la cuenca del río Majaceite: Guadalcaçín y Los Hurones. Dicha cuenca forma parte de la red hidrográfrica de la provincia de Cádiz y pertenece a la Confederación Hidrográfrica del Guadalquivir. El estudio de parámetros fisicoquímicos, junto con los datos de las variaciones climatológicas y de la tasa de renovación, han permitido conocer la calidad del agua embalsada, así como, predecir determinadas pautas de comportamiento en la adecuación del agua en las estaciones de tratamiento de aguas potables (ETAP) para su destino final como agua de abastecimiento.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que la mayor calidad de las aguas del embalse de los Hurones frente a las del Guadalcaçín las hace más adecuadas para el abastecimiento público al presentar aguas de menor contenido salino.

**Palabras clave:**

Agua superficial, río Majaceite, embalses, parámetros fisicoquímicos, sequía.

**Abstract**

*Reservoirs of the basin of Majaceite river (Hurones and Guadalcaçín) in Cádiz: waters quality and their influence with the drought*

In this work the results of the limnological study of the two reservoirs of the basin of Majaceite river is presented: Guadalcaçín and Hurones. These reservoirs are part of the hydrography net of the county of Cádiz (south of Spain) and it belongs to the Guadalquivir Hydrography Confederation. The study of physical chemical parameters, together with the data of the climate variations have allowed to know the quality of the dammed water, as well as, to predict certain behaviour rules in the adaptation of the water, in the drinking waters treatment plant for their final destination as water of supply.

The results obtained in this study allow to conclude that the waters quality of the reservoir of Hurones are biggest than the reservoir of Guadalcaçín makes them more appropriate for the public supply because present smaller saline content.

**Keywords:**

Day water, Majaceite river, basin, physical chemical parameters, drought.

# Influencia de la sequía en la calidad de las aguas de los embalses (Hurones y Guadalcaçín) en la cuenca del río Majaceite de la provincia de Cádiz

Por: Rodríguez Barroso, M.R.<sup>(\*)</sup>; Vidal Valderas, L.<sup>(\*\*)</sup>; Sales Márquez, D.<sup>(\*)</sup>; Quiroga Alonso, J.M.<sup>(\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de los Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. Polígono Río San Pedro, s/n. 11510 Puerto Real. Cádiz. Facultad de Ciencias del Mar (CASEM). Universidad de Cádiz. rocio.rodriguez@uca.es

<sup>(\*\*)</sup> Jefe de Sección Laboratorio y Control Sanitario Tratamientos de Aguas Potables. Confederación Hidrográfrica del Guadalquivir. Abastecimiento de Agua a la Zona Gaditana.

**1. Introducción**

Uno de los temas al que el hombre ha prestado más interés a lo largo de los años ha sido el abastecimiento de agua de consumo público a las poblaciones. Así, asegurar tanto un caudal de agua diario y constante como una calidad óptima de la misma se convierten en los principales problemas del suministro de agua a las ciudades.

El agua superficial engloba todos los cursos de agua que, de forma permanente o esporádica, transcurren por la superficie. Así, los grandes ejes fluviales de la provincia de Cádiz se agrupan en varias cuencas que reciben el nombre del cauce más sobresaliente, como la cuenca del Guadalete, la cuenca del Majaceite, la de Barbate, la del Guadarranque y la de Palmones.

La provincia gaditana dispone de forma natural de más cantidad de agua procedente de lluvia que el resto de Andalucía Occidental. Esto se explica gracias a la orografía de la provincia de Cádiz. Por una parte la zona occidental es relati-

vamente llana y de escasa altitud, mientras que la oriental presenta unos relieves muy accidentados e incluso altitudes que rebasan los 1600 metros.

Esta alineación montañosa con un sentido del eje norte/sur constituye una auténtica barrera orográfica para los vientos predominantes en el clima provincial, con dirección oeste/este. Así las nubes cargadas de humedad procedentes del Atlántico y que van hacia el este, se elevan ganando altitud y se enfrían condensándose y provocando precipitaciones al encontrarse con la mencionada alineación montañosa.

Esta es la causa de la desigualdad en la distribución de las precipitaciones. Así aparece una franja oriental de la provincia cuyos niveles pluviométricos superan normalmente los mil litros por metro cuadrado al año (Grazalema, por ejemplo, con una precipitación media de más de 2200 mm/año es el registro máximo de España) y otra occidental donde la pluviosidad se encuentra entre 500 y 700 mm/año.

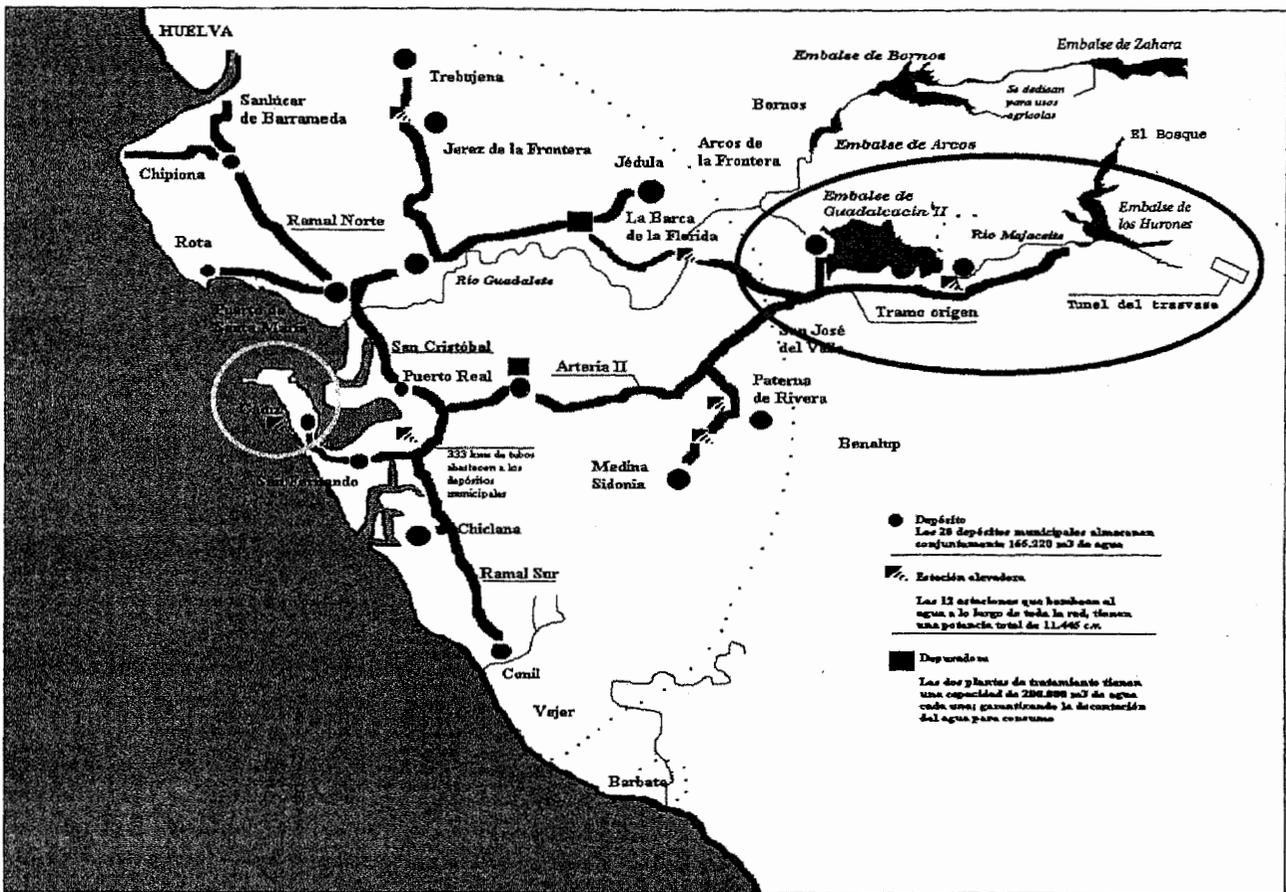


Figura 1. Embalses de la provincia de Cádiz. Embalses de la cuenca del río Majaceite: Hurones y Guadalcazín.

En consecuencia, existe un fenómeno topográfico como es la dirección de las pendientes, que unido a otro meteorológico, como es la relativa abundancia de precipitaciones, justifica que la provincia de Cádiz disponga de abundantes recursos hídricos superficiales. Además, esta misma topografía hace que el piedemonte serrano o las estribaciones montañosas se conviertan en lugar idóneo para emplazar las grandes superficies de almacenamiento de agua, siendo así como se explican básicamente los emplazamientos de los embalses de Bornos, Guadalcazín y Los Hurones.

En la cuenca del río Majaceite se sitúan dos embalses: Guadalcazín y Los Hurones, con 800 y 135 hm<sup>3</sup> de capacidad total respectivamente. Como consecuencia de la sequía sufrida en la década de los noventa, el volumen de agua embalsada en los

Hurones disminuyó drásticamente, por lo que para poder dotar a las localidades de la Bahía de Cádiz hubo que recurrir a la mezcla de agua con los embalses de la cuenca del río Guadalete, caracterizados por una mayor mineralización. Estos dos motivos, sequía y mezcla de agua, hicieron que la calidad de las aguas de suministro domiciliario empeorara, como ocurrió en el municipio de Cádiz (Rodríguez, 1998).

Este trabajo contribuye al estudio limnológico de los embalses de la cuenca del Majaceite, Guadalcazín y Los Hurones, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos, que junto con los datos de las variaciones climatológicas y de la tasa de renovación, permitirán conocer la calidad del agua embalsada, así como, determinar los posteriores tratamientos de potabilización antes de conducir el agua

como suministro domiciliario o como agua para riego.

### 1.1. Localización geográfica

En el plano de la Figura 1 de la provincia de Cádiz, se muestran los embalses de Guadalcazín y de los Hurones en la cuenca del río Majaceite.

El embalse de Guadalcazín se dedica principalmente a agua de riego, excepto en situaciones de escasez de agua en que se utiliza, junto con el embalse de los Hurones, para abastecimiento público. Este embalse cuenta con una superficie de cuenca de 687 km<sup>2</sup>; su superficie al máximo nivel de embalse es de 3670 ha, y la longitud del río al máximo nivel embalsado es de 25 km. La presa ha sido construida aguas abajo de la antigua presa del mismo nombre que

data de principios de siglo y tiene como misión principal aumentar la capacidad del vaso desde los 76 hm<sup>3</sup> antiguos a los actuales 800 hm<sup>3</sup>. El tipo de presa es de materiales sueltos, heterogénea de planta recta, con una cota de coronación de 110,00 m y una altura de 75 m. La longitud y el ancho de coronación son de 267 m y 10 m respectivamente. Los taludes son de paramentos, presentando uno de ellos la cota de máximo nivel normal a 102,00 m y la cota mínima de explotación de 39,50 m. La galería perimetral es de 2,50 por 1,50 m<sup>2</sup> de sección y la torre de toma de agua es de sección circular de 7,00 m de diámetro interior, existiendo dos tomas de desagüe a la cota de 40,00 m y cuatro tomas de aguas limpias a las cotas de 79,20 m, 72,80 m, 66,40 m y 60,00 m. Este embalse se encuentra en una zona donde se recoge una pluviometría anual media de 631 mm/año y proporciona una aportación natural media de 227 hm<sup>3</sup>/año.

El embalse de Los Hurones, situado en el río Majaceite, se construyó a mediados de siglo y supuso un momento clave en el cambio de la fuente de abastecimiento de aguas para los municipios de la Bahía de Cádiz. Ocupa una superficie de más de 900 ha, alcanzando su cola más de 12 km y dispone de una capacidad total de 135 hm<sup>3</sup> (El Abastecimiento de Agua a la zona Gaditana, 1983). La superficie de la cuenca ronda los 290 km<sup>2</sup> estando situado en una de las zonas de mayor precipitación de la provincia (entre las localidades de El Bosque y Ubrique) ya que la lluvia media anual de su cuenca hidrográfica alcanza los 1200 mm y una aportación media anual de 134 hm<sup>3</sup>. En este caso se trata de una presa de gravedad de fábrica de hormigón, de planta recta con una longitud y cota de coronación de 405,00 m y 219,00 m respectivamente. La torre de toma de agua se encuentra adosada al paramen-

to de la presa y dispone de tres compuertas de 2,00 m por 1,50 m situadas a las cotas de 181,50 m, 194,00 m y 205,00 m.

### 1.2. Legislación española

Según la reglamentación española, (Orden 11-5-1988 sobre características básicas de calidad que deben ser mantenidas en las corrientes de aguas superficiales cuando sean destinadas a la producción de agua potable), las aguas superficiales susceptibles de ser destinadas al consumo humano quedan clasificadas en tres grupos, según el grado de tratamiento que deben recibir para su potabilización: aguas de tipo A1, que requieren tratamiento físico simple y desinfección; aguas de tipo A2, que necesitan un tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección, y aguas de tipo A3, a las que se les aplica un tratamiento físico y químico intensivos, fino y desinfección.

La Orden 13-8-1999 que publica las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de Cuenca del Guadalquivir (Real Decreto 1664/1998) clasifica a las aguas del embalse de los Hurones y de Guadalquivir como de tipo A2. Esta Orden estipula en su capítulo V sobre la calidad de las aguas y de la ordenación de los vertidos, que "las aguas destinadas al abastecimiento deberán cumplir las exigencias de calidad que prescribe 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*".

## 2. Material y métodos

### 2.1. Toma de muestras

Se recogieron 12 muestras de agua anuales, a lo largo del período comprendido entre enero de 1991 y diciembre de 1998, espaciadas mensualmente en cada uno

*De los distintos  
parámetros  
determinados en  
cada análisis, se han  
utilizado 21*

de los embalses estudiados (Huronos y Guadalquivir, **Figura 1**), lo que hace un total de 96 muestras. En el embalse de los Hurones, las muestras se tomaron entre 5 y 10 metros de profundidad, correspondiendo a la COTA-II de 194,00 metros sobre el nivel del mar, mientras que en el embalse de Guadalquivir se tomaron por encima de la cota de 79,20 metros.

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio del Abastecimiento de Agua a la Zona Gaditana perteneciente a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y situado en la ETAP - El Montañés, en la localidad de Puerto Real (provincia de Cádiz).

En cada muestreo se recogieron unos 1000 mL de agua para realizar los siguientes análisis físico-químicos: temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto (determinados "in situ"); nitritos, nitratos, amonio, fosfatos y sílice (como nutrientes). Parámetros indicativos de contenido salino: alcalinidad total, cloruros, sulfatos, calcio, sodio y magnesio, oxidabilidad al permanganato (como contenido en materia orgánica) y por último los metales hierro y manganeso. Las muestras eran transportadas inmediatamente después de su recogida en neveras portátiles hasta el laboratorio y conservadas en frigoríficos a 4 °C (Orden de 1 de Diciembre de 1981); las determinaciones analíticas eran realizadas siempre en el

transcurso de las 24 horas siguientes a su recogida. Los análisis correspondientes se llevaron a cabo siguiendo los métodos analíticos de referencia recomendados por la Reglamentación Técnico-Sanitaria, así como el manual de

métodos estandarizados (APHA, AWWA y WPCF, 1989).

**2.2. Tratamiento estadístico de los datos**

De los distintos parámetros determinados en cada análisis, se han

utilizado 21 de ellos, lo que hace un total de 4.032 datos que se han sometido a un tratamiento estadístico recurriendo al uso de los programas informáticos DBASE IV y EXCEL 5.0 utilizados como base de datos, y se emplearon los programas estadísticos STAT-GRAPHICS-PLUS y STATISTICA 5.1. sobre el entorno CD/MS-DOS y PC/WINDOWS. Se han representado los datos mediante líneas de tendencia evolutiva a lo largo de los años de estudio.

**3. Resultados y discusión**

**3.1. Meteorología de la zona**

La evolución del volumen de agua acumulado en los embalses depende principalmente de las precipitaciones, por lo que resulta interesante conocer la evolución pluviométrica de la zona en los años de estudio.

En la **Tabla 1** se adjuntan los datos correspondientes a las precipitaciones totales anuales durante los años 1981 – 1998, registrados en las estaciones meteorológicas que dispone el Servicio de Hidrología de la Comisaría de Aguas del Guadalquivir cercanas a cada uno de los embalses y cuya identificación es la que sigue: embalse de los Hurones (estación número 947) y embalse de Guadalcaçín (estación número 950). También se presentan las precipitaciones medias de este período para cada embalse: 623,4 mm en la estación de Guadalcaçín frente 853,7 mm en Los Hurones. Esta diferencia de pluviosidad en la zona va a influir en la calidad del agua embalsada.

En esta tabla se observa una etapa de precipitaciones relativamente constantes comprendida entre los años 1981 y 1989, excepto los años 1987 y 1989 en que el nivel de lluvias fue algo mayor que la media (829,5 mm y 760,3 mm se recogieron en la estación de Guadalcaçín frente a los

AÑO	GUADALCAÇÍN (mm)	HURONES (mm)
1981	542,9	609,7
1982	-	877,9
1983	-	700
1984	-	860,9
1985	-	940,3
1986	487,3	857,7
1987	829,5	1228,2
1988	449,6	715
1989	760,3	1224,3
1990	644	540,5
1991	312	754,8
1992	425,5	648,6
1993	597,7	675,7
1994	347,4	532,5
1995	1131,5	906,2
1996	1048,9	1626,6
1997	835	1055,1
1998	315,3	612
<b>MEDIA</b>	<b>623,4</b>	<b>853,7</b>

(-): Datos no suministrados

**Tabla 1.** Precipitaciones totales anuales recogidas en las estaciones meteorológicas de los embalses de los Hurones y Guadalcaçín, durante el período 1981 – 1998.

AÑO	GUADALCAÇÍN		HURONES	
	(hm³)	(%)	(hm³)	(%)
1991	24,93	3,1	90,49	67,0
1992	9,24	1,2	57,56	42,6
1993	15,53	1,9	37,39	27,7
1994	18,09	2,3	41,64	30,8
1995	9,04	1,1	17,12	12,7
1996	239,27	29,9	113,83	84,3
1997	506,99	63,4	93,65	69,4
1998	634,42	79,3	121,70	90,1

**Tabla 2.** Evolución del agua acumulada en los embalses de la cuenca del río Majaceite: Guadalcaçín y los Hurones.

1228,2 mm y 1224,3 mm que se registraron en Los Hurones). A continuación sigue una etapa de sequía en la que la precipitación media desciende entre los años 1990 y 1994 por debajo de los niveles medios: 647,4 mm y 532,5

mm para Guadalcacín y Los Hurones; respectivamente. Las precipitaciones entre 1995 y 1997 aumentaron considerablemente hasta alcanzar valores medios de 1131,5 mm en el año 1995 en la estación de Guadalcacín y 1626,6

mm en 1996 en Los Hurones, tratándose de los máximos encontrados en todo el período. Durante el año 1998 vuelven a disminuir por debajo de la media. Así pues, el período objeto de estudio (años 1991 – 1998) se caracteriza como una época de acusada sequía entre los años 1991 y 1994, año en que se recrudece bastante la escasez de agua, y una época de mayores precipitaciones a partir de 1995.

**3.2. Evolución del agua acumulada en los embalses**

El volumen anual acumulado en ambos embalses (hm<sup>3</sup>) junto con el porcentaje que supone respecto a la capacidad total de cada embalse (135 hm<sup>3</sup> para Los Hurones y 800 hm<sup>3</sup> para Guadalcacín) se muestra en la **Tabla 2**.

El embalse de Guadalcacín durante los primeros cinco años contiene muy poca cantidad de agua (sólo un 2 % de capacidad) debido a la sequía de ese período. A partir de 1995 con la avenida de las lluvias las aguas embalsadas aumentan sustancialmente gracias a la enorme capacidad del mismo tras las obras de ampliación de la presa en el año 1992. Se observó una acumulación de agua embalsada que pasó desde 9 hm<sup>3</sup> (1,1 %) a 239 hm<sup>3</sup> (casi 30%) en tan sólo unos meses (principios de 1996), aumentando hasta 634 hm<sup>3</sup> (79,3 %) en 1998.

En la **Tabla 2** también se observa un descenso de las reservas de agua en el embalse de Los Hurones desde el año 1991 hasta el 1995, año en el que Los Hurones alcanza su valor mínimo (12,7 % respecto a la capacidad total de embalse); con las lluvias de 1996, este embalse se recupera considerablemente, llegando a disponer de un volumen medio de 114 hm<sup>3</sup> (84,3 % de su capacidad), que se mantiene en 1997 sobre los 94 hm<sup>3</sup>, alcanzando el mayor nivel de embalse en el último año (90,1 %).

Se evidencia, de manera general y para ambos embalses, que el

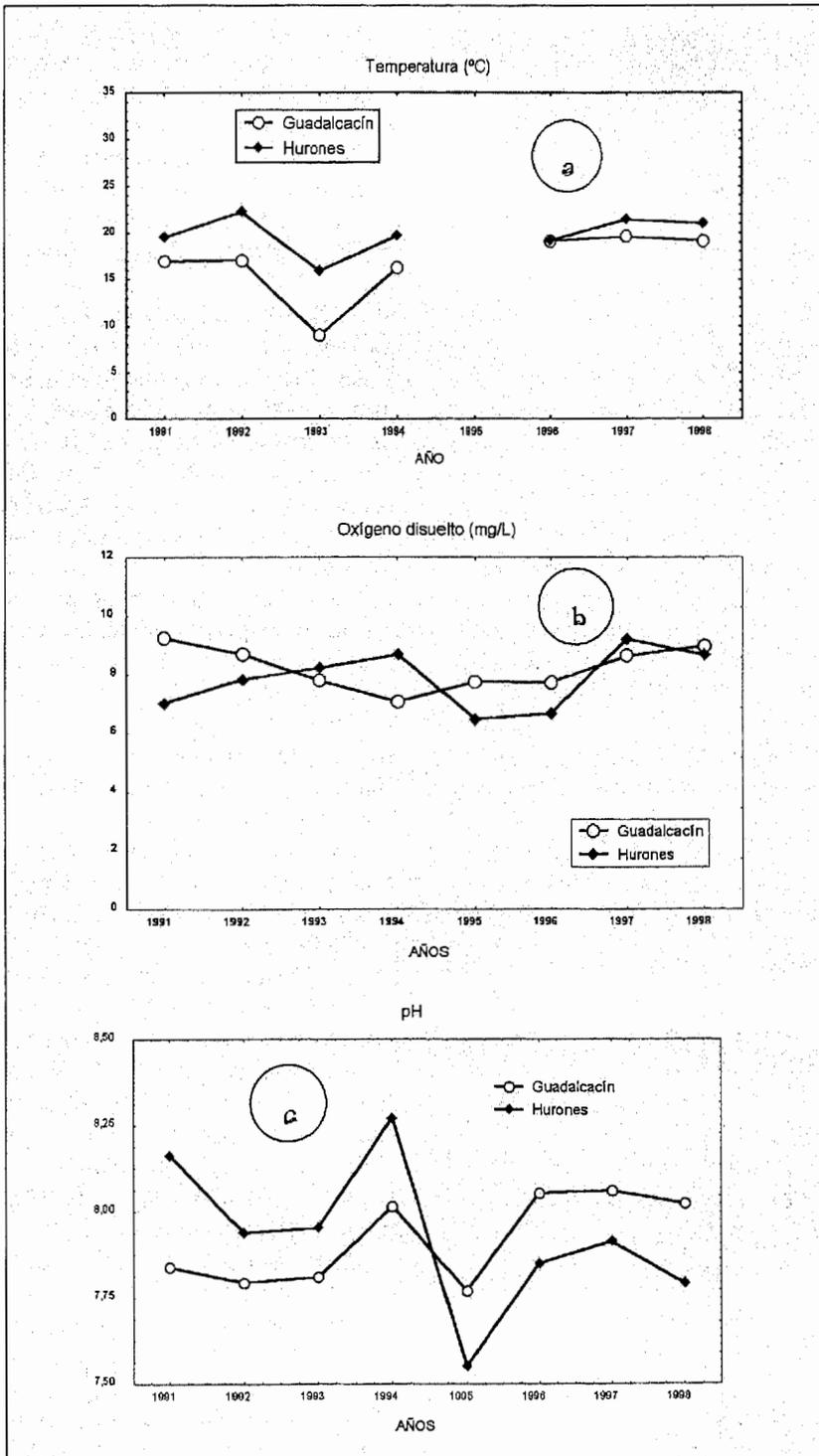


Figura 2. Evolución temporal de los valores medios de (a) temperatura, (b) oxígeno disuelto y (c) pH en los embalses de la cuenca del Majaceite.

volumen acumulado en los mismos y las precipitaciones en este período siguen una tendencia similar, excepto el año 1995, que aparece como un año lluvioso y en cambio el nivel de agua acumulada es mínimo debido a que las precipitaciones se producen al final del año, por lo que la cantidad de agua acumulada a lo largo de ese período es pequeña y los efectos de la lluvia sobre el volumen acumulado no se notan hasta el año siguiente.

**3.3. Análisis estadístico de los resultados**

Las Tablas 3 y 4 recogen los valores medio, máximo y mínimo, la mediana y la desviación típica de los parámetros analizados para los embalses de Guadalcaçín y los Hurones respectivamente. También aparecen, para que sirvan de referencia de la calidad de las

aguas embalsadas antes de su tratamiento en las ETAPs (Estación de Tratamiento de Aguas Potables), los valores establecidos por la *Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público*, como son el nivel guía y la concentración máxima admisible.

**3.3.1. Parámetros determinados "in situ"**

Los parámetros determinados "in situ" fueron: temperatura, pH, oxígeno disuelto y turbidez. En la Figura 2.a. se recoge la evolución de la temperatura en ambos embalses, manteniéndose el valor medio en el embalse de los Hurones siempre por encima del de Guadalcaçín (19,87 °C frente a 17,63 °C, Tablas 3 y 4) hasta el año 1994, ya que durante el año 1995 no se registraron los valores

de la temperatura por la escasa cantidad de agua embalsada; a partir de 1996 esta diferencia disminuye al recuperarse ambos embalses gracias a las lluvias y disponer de un gran volumen de agua (23,9 % para Guadalcaçín y 84,3 % para los Hurones, según la Tabla 2). Cabe destacar las temperaturas extremas alcanzadas en ambos embalses comprendidas entre los 32°C y 36 °C como así lo indican los valores máximos de las Tablas 3 y 4.

El oxígeno disuelto, como es lógico, presenta un comportamiento contrario al de la temperatura, tal y como se puede observar en la Figura 2.b. En el embalse de Guadalcaçín, los menores contenidos de oxígeno aparecieron en el año 1994, debido a los bajos niveles de agua embalsada (2,3 %, Tabla 2) y las altas temperaturas, mientras que en Los Hurones, este

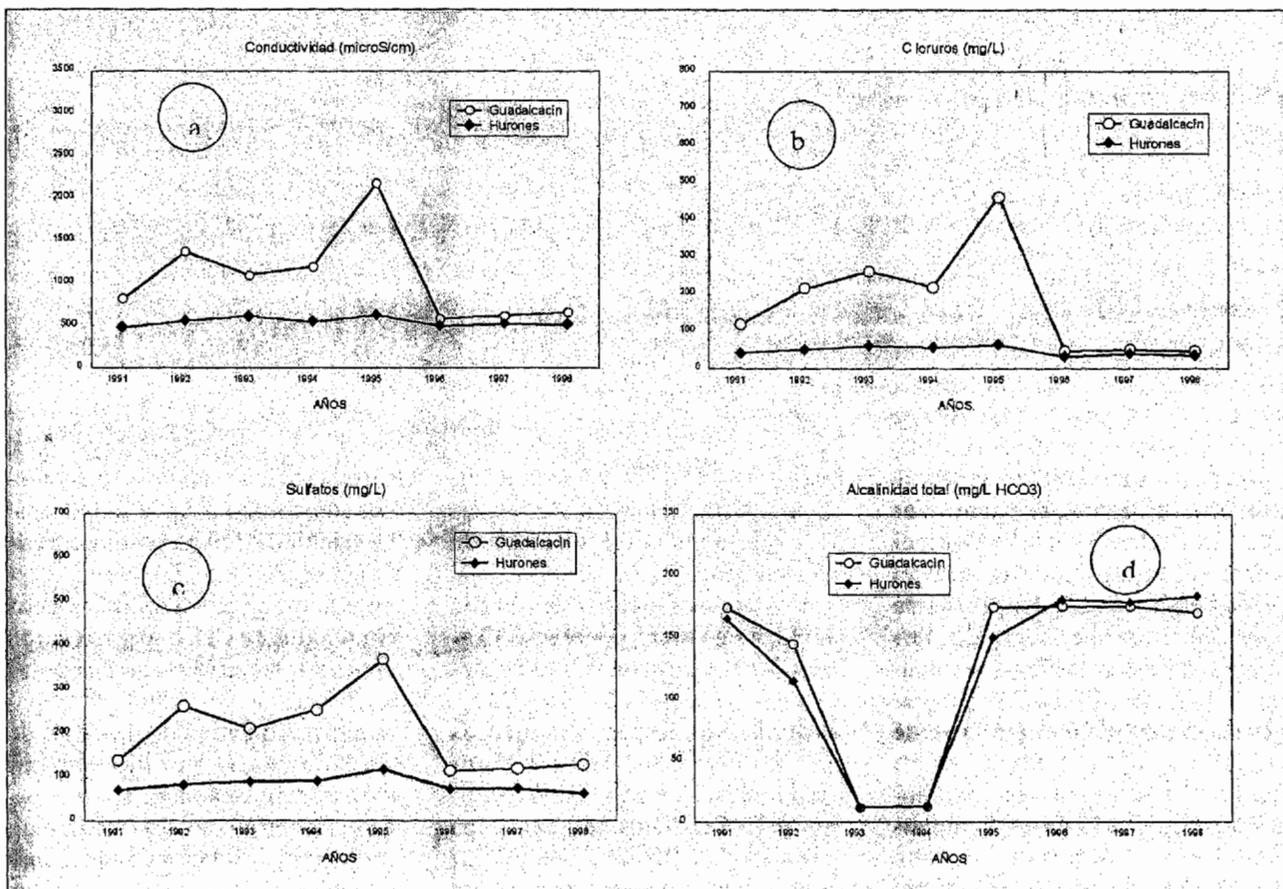


Figura 3. Evolución temporal de los valores medios de (a) conductividad, (b) cloruros, (c) sulfatos y (d) alcalinidad total en los embalses de la cuenca del Mojajete.

	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PERÍODO 1992 - 1998					Reglamentación Técnico-Sanitaria (R.D. 1138/1990)	
	Valor medio	Mínimo	Máximo	Mediana	Desviación	Nivel Guía	Concentración Máxima Admisible
<i>Caracteres organolépticos</i>							
Turbidez (U.N.F.)	2,71	0,32	7,00	2,51	1,98	1	6
<i>Caracteres físico-químicos</i>							
Temperatura (°C)	17,6	3,0	32,6	17,5	5,93	12	25
pH (Unidad pH)	7,94	7,37	8,57	7,89	0,27	6,5 ≤ pH ≤ 8,5	9,5
Conductividad (µS.cm <sup>-1</sup> )	947	472	2380	736	439,58	400	-
Cloruro (mg/L Cl)	138	44	567	101	117,98	25	-
Sulfatos (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	182	76	575	140	107,52	25	250
Alcalinidad total (mg/L HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	142	10	225	165	64,04	-	-
Sílice (mg/L SiO <sub>2</sub> )	3,80	0,20	14,00	3,28	2,67	-	-
Calcio (mg/L Ca)	90	50	162	87	24,21	100	-
Magnesio (mg/L Mg)	24	5	66	20	13,75	30	50
Sodio (mg/L Na)	93	25	387	64	80,26	20	150
Dureza total (mg/L Ca)	321	7	648	276	131,67	-	-
Residuo seco (mg/L)	256	2	1715	52	322,66	-	1500
Oxígeno disuelto (mg/L O <sub>2</sub> )	8,4	1,8	13,0	8,2	1,71	-	-
<i>Caracteres relativos a sustancias no deseables</i>							
Nitratos (mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	3,05	0,04	9,70	2,75	2,03	25	50
Nitritos (mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,06	0,00	0,48	0,03	0,07	-	0,1
Amonio (mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,34	0,00	1,00	0,28	0,23	0,05	0,5
Oxidabilidad (mg/L O <sub>2</sub> )	4,6	1,7	18,8	4,1	2,36	2	5
Hierro (µg/L Fe)	128,31	0,00	700,00	0,33	191,93	50	200
Manganeso (µg/L Mn)	153,16	0,00	1030,00	0,10	254,60	20	50
Fósforo (µg/L P)	134,99	10,00	1467,00	51,00	255,45	400	5000

Tabla 3. Índices estadísticos de los parámetros de control de calidad del embalse de Guadalcaçin, período 1991 - 1998.

año, junto con 1997 son los de mayor cantidad de oxígeno. Según las Tablas 3 y 4, el valor medio de oxígeno disuelto para el primer embalse es 8,4 mg/L frente a 7,9 mg/L para el segundo. Resulta necesario resaltar que mientras que en la Figura 2.a. la temperatura media en el embalse de Guadalcaçin es siempre menor que en el de los Hurones, los valores de oxígeno disuelto de ambos embalses se entrelazan a lo largo del período estudiado. Estas variaciones de la temperatura del

agua, además de la influencia ambiental, están relacionadas con las fluctuaciones en el volumen de agua acumulada.

Los valores medios de pH son análogos en ambos pantanos (Tablas 3 y 4) mostrando un valor medio de 7,94 unidades de pH. La evolución de los valores medios anuales se representan en la Figura 2.c. Se observan mayores valores para Los Hurones entre los años 1991 1995, año a partir del cual los valores de pH descienden hasta casi 7,50. Este descenso ocu-

rre en el año de mayor sequía y menor contención de agua embalsada, y es debido a los procesos de nitrificación (Poch, 1999) que están teniendo lugar, así como a los altos contenidos en CO<sub>2</sub> que provocaron un leve aumento de la acidez de las mismas (Sánchez, 1994). Otro parámetro indicativo de procesos de emisión de CO<sub>2</sub> por biodegradación es la presencia de materia orgánica determinada en este trabajo como oxidabilidad al permanganato potásico, y que según se observa en la Figura 8, aumenta en el año

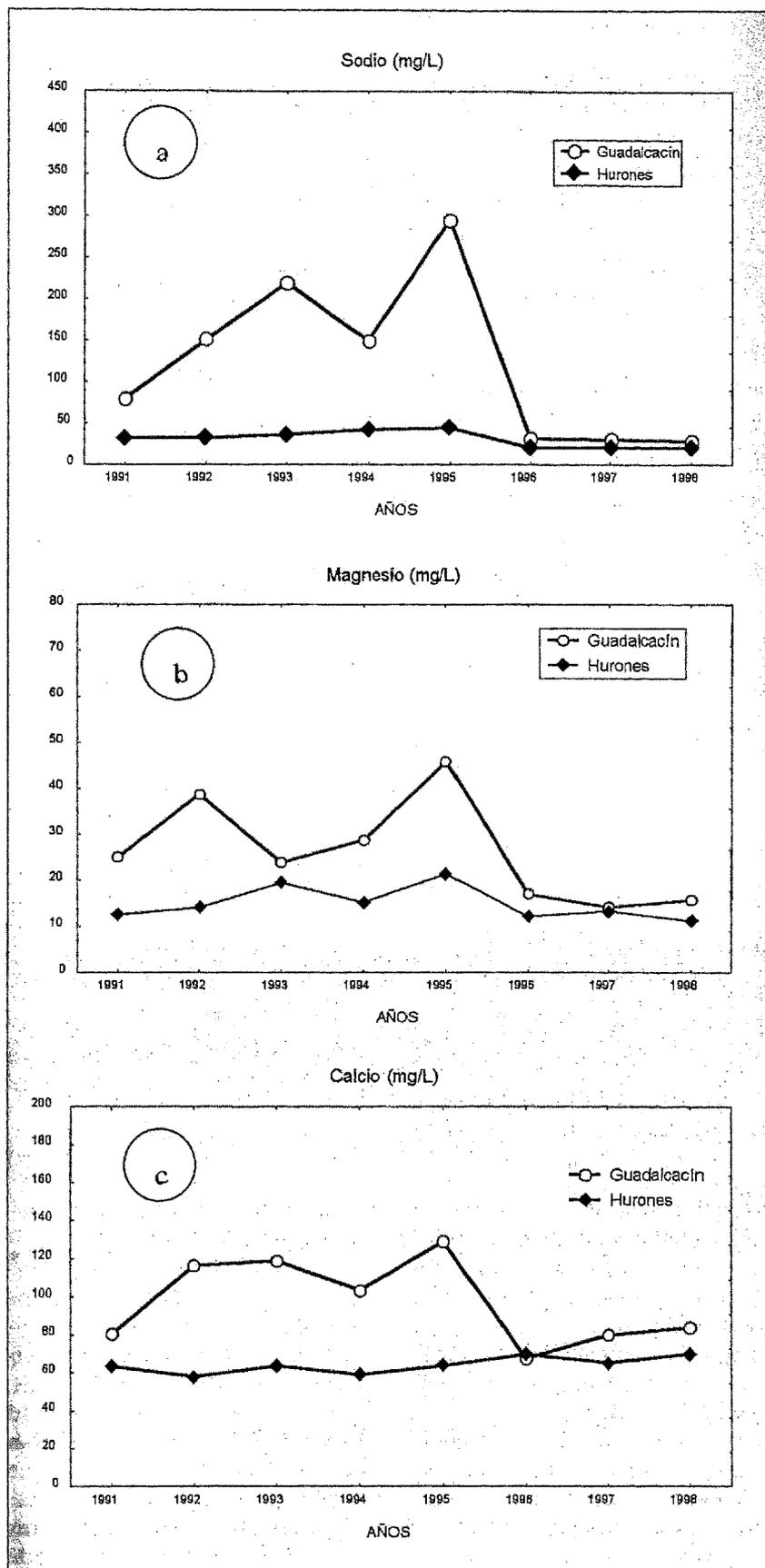


Figura 4. Evolución temporal de los valores medios de (a) sodio, (b) magnesio y (c) calcio en los embalses de la cuenca del Majaceite.

1995 en todos los pantanos, corroborando el empeoramiento de la calidad de las aguas en este año. Posteriormente el pH vuelve a aumentar con la avenida de las lluvias quedando el pH de Guadalcacín por encima de Los Hurones.

### 3.3.2. Contenido salino

El contenido salino está caracterizado por los valores de parámetros tales como conductividad, cloruros, sulfatos y alcalinidad total. La evolución de estos parámetros se muestra en la Figura 3 y a excepción de la alcalinidad total, todos muestran la similitud de presentar valores bastante altos en el año de mayor sequía.

El valor medio que presenta la conductividad para ambos embalses durante el período estudiado es de 947  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 545  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para Guadalcacín y Hurones, respectivamente, registrándose un valor máximo de 2380  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Tabla 3) para el primero que se acerca al límite establecido por la DIRECTIVA 98/83/CE relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Es por ello que la calidad de las aguas del embalse de Guadalcacín se asemeja más, aunque con niveles de conductividad inferiores, a otros embalses de la provincia de Cádiz como son los de la cuenca del río Guadalete, con valores de conductividad entre 1500 y 1800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Rodríguez, 2000). En la Figura 3.a. se observan valores muy constantes para el embalse de los Hurones, en torno a 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que Guadalcacín presenta mayores oscilaciones, además de aumentar considerablemente en el año de mayor sequía. Posteriormente estos valores se restablecen disminuyendo hasta casi los niveles del embalse de los Hurones. Los altos niveles registrados durante los años 1991 - 1996 en el embalse de Guadalcacín son indicativos de una alta concentración en io-

	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PERÍODO 1992 - 1998					Reglamentación Técnico-Sanitaria (R.D. 1138/1990)	
	Valor medio	Mínimo	Máximo	Mediana	Desviación	Nivel Guía	Concentración Máxima Admisible
<i>Caracteres organolépticos</i>							
Turbidez (U.N.F.)	2,00	0,22	7,80	1,74	1,79	1	6
<i>Caracteres fisico-químicos</i>							
Temperatura (°C)	19,8	4,3	36,5	18,9	6,60	12	25
pH (Unidad pH)	7,94	7,30	10,40	7,88	0,45	6,5 ≤ pH ≤ 8,5	9,5
Conductividad (µS.cm <sup>-1</sup> )	545	421	678	544	59,87	400	-
Cloruro (mg/L Cl <sup>-</sup> )	49	25	68	50	12,02	25	-
Sulfatos (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	83	37	163	83	23,72	25	250
Alcalinidad total (mg/L HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	126	10	219	162	72,98	-	-
Sílice (mg/L SiO <sub>2</sub> )	1,46	0,05	5,07	1,07	1,32	-	-
Calcio (mg/L Ca)	64	3	81	65	10,66	100	-
Magnesio (mg/L Mg)	15	6	33	14	5,30	30	50
Sodio (mg/L Na)	31	2	54	33	11,06	20	150
Dureza total (mg/L Ca)	218	40	292	222	30,43	-	-
Residuo seco (mg/L)	166	0,80	460	5,70	183,02	-	1500
Oxígeno disuelto (mg/L O <sub>2</sub> )	7,9	2,7	11,9	7,7	1,85	-	-
<i>Caracteres relativos a sustancias no deseables</i>							
Nitratos (mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1,79	0,04	85,70	1,60	9,84	25	50
Nitritos (mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,05	0,00	0,40	0,03	0,06	-	0,1
Amonio (mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,47	0,00	65,00	0,45	10,66	0,05	0,5
Oxidabilidad (mg/L O <sub>2</sub> )	2,9	1,4	4,9	2,8	0,79	2	5
Hierro (µg/L Fe)	56,32	0,00	400,00	0,21	87,87	50	200
Manganeso (µg/L Mn)	40,61	0,00	400,00	0,00	89,04	20	50
Fósforo (µg/L P)	132,53	0,32	1100,00	80,50	172,31	400	5000

Tabla 4. Índices estadísticos de los parámetros de control de calidad del embalse de los Hurones, período 1991 - 1998.

nes disueltos y sustancias en suspensión, lo que se puede traducir en un empeoramiento de la calidad del agua como consecuencia de la sequía que se venía sufriendo, intensificada además en 1995, año en que los niveles de agua embalsada bajaron considerablemente. Posteriormente, tras las lluvias torrenciales de 1996, el embalse recupera los niveles normales de conductividad, cloruros y sulfatos

El mismo comportamiento presentan los cloruros y sulfatos.

Atendiendo a los valores medios de las **Tablas 3 y 4**, los cloruros se mantienen en 138 mg/L Cl<sup>-</sup> y 49 mg/L Cl<sup>-</sup> y los sulfatos en 182 mg/L SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y 83 mg/L SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> para el mayor y el menor de los embalses, respectivamente. Como en el caso de la conductividad, Los Hurones presenta un comportamiento más homogéneo que Guadalcañín donde se registra un máximo muy elevado durante el año 1995 y un descenso a partir de ese mismo año (**Figuras 3.a. y 3.b.**). La causa hay que buscarla en la evo-

lución de las lluvias caídas durante este período.

Los fenómenos que tienen lugar al atravesar el agua los suelos provocan aumentos en la concentración de aniones carbonatos, hidróxidos e hidrogenocarbonatos, determinados como alcalinidad total (mg/L HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). La formación de estos compuestos se debe a que en la capa superior de los suelos, los microorganismos presentes incrementan la concentración de dióxido de carbono, que provoca un cambio del pH favoreciendo el

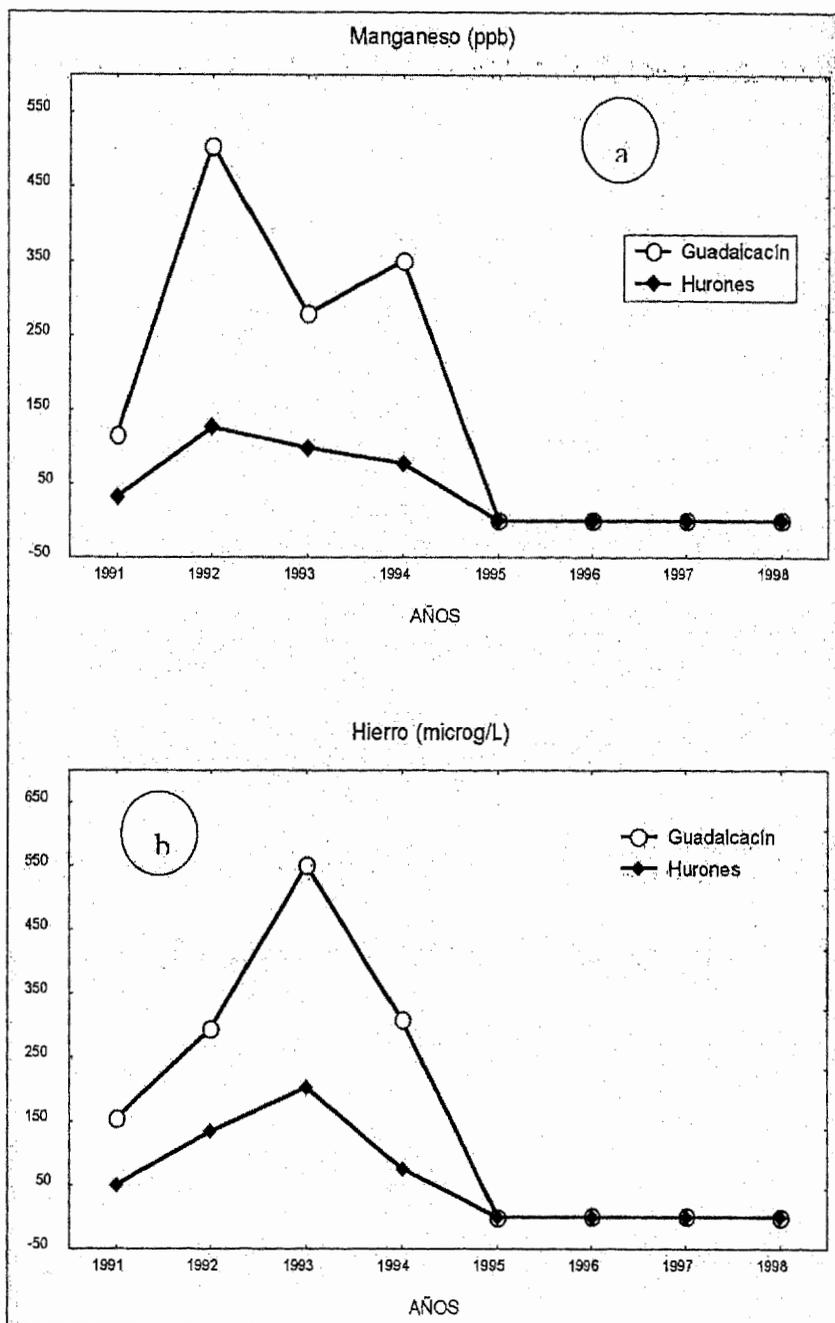


Figura 5. Evolución temporal de los valores medios de (a) manganeso, (b) hierro en los embalses de la cuenca del Majaceite.

paso de los carbonatos presentes en las rocas en forma insoluble a bicarbonatos que son solubilizados. Estos fenómenos tienen bastante importancia sobre todo en las aguas subterráneas, no teniendo tanta importancia en aguas embalsadas. La alcalinidad total presenta un valor medio de 126 mg/L para Los Hurones y 142 mg/L pa-

ra Guadalcacín (Tablas 3 y 4). Según la Figura 3.d. los valores medios anuales durante el período de estudio son muy similares, sufriendo una disminución drástica entre los años 1993 y 94 para recuperarse posteriormente. La evolución seguida por este parámetro es la misma en ambos embalses y diferente a las demás va-

riables relacionadas con el contenido salino, puesto que sufre una disminución drástica entre los años 1993 y 1994 previsiblemente debida a la emisión de CO<sub>2</sub> que ejerce la abundancia de plancton como consecuencia del bajo nivel de los embalses y las escasas precipitaciones. Este aumento de CO<sub>2</sub> provoca el aumento de la unidad de pH al tratarse de aguas basificadas, como se observa en la Figura 2.c. en que el año 1994 presenta altos niveles. Se puede considerar que este año es el de menor volumen medio anual de agua acumulada y el de peor calidad de la misma. En general se trata de aguas hidrogenocarbonatadas cálcicas, con un grado de mineralización medio según la conductividad (Pérez, 1999), y de débil mineralización atendiendo al residuo seco, (Directiva 80/777/ CE), por lo que se consideran como de buena calidad para el consumo humano.

El sodio es un catión que va unido normalmente al anión cloruro y presenta una gran solubilidad, siendo la sal más abundante en el agua de mar, por ello su presencia puede ser un indicativo, en zonas cercanas al litoral, de la intrusión de agua marina. En la Figura 4.a. se presenta la evolución de los niveles de sodio, observándose que sigue la misma tendencia que los parámetros anteriores y que al igual que ellos, los niveles son mayores en Guadalcacín. El nivel medio para el embalse de Guadalcacín es mayor que el de Los Hurones, 93 mg/L Na frente a 31 mg/L Na, superando el nivel guía (30 mg/L Na). Esta diferencia es mayor en 1995 y disminuye a partir de este año.

Los niveles de magnesio en las aguas también están relacionados con el contenido salino: es un catión que va unido al ion sulfato y que proviene de la corrosión de las dolomitas en forma de bicarbonato (Queralt, 2000). Los niveles de magnesio también son ma-

yores para el embalse de Guadalcaçín (Figura 4.b.). El valor medio para el período estudiado es de 24 mg/L Mg en el primero frente a 15 mg/L Mg que presenta el segundo, quedando por debajo de los 30 mg/L Mg recomendados como nivel guía (Tablas 3 y 4). Los valores más altos se presentan en el año 1995 en ambos embalses y disminuyen con las lluvias.

El calcio es un catión similar al anterior pero más abundante en el agua, estando asociado a la forma de bicarbonato cuando proviene de rocas calcáreas (calizas y calcitas) y al sulfato en zonas de yesos; es el principal responsable de la denominada "dureza" del agua. Los niveles medios de calcio son bastante más altos para el caso de Guadalcaçín, 90 mg/L Ca, que casi alcanza el nivel guía (100 mg/L Ca), que el de Los Hurones (64 mg/L Ca) (Tablas 3 y 4). En la Figura 4.c. se observa que los valores son mayores para el embalse de Guadalcaçín excepto en el año 1996, en que los valores coinciden al mejorar la calidad de las aguas con la avenida de las precipitaciones.

Otros elementos a tener en cuenta son los metales hierro y manganeso por los problemas que ocasionan en los posteriores tratamientos de potabilización. Atendiendo a las concentraciones de manganeso, se obtuvieron valores medios de 153,16 µg/L para el primer embalse, superando la concentración máxima admisible estimada por la Reglamentación Técnico Sanitaria en 50 µg/L, mientras que para Los Hurones es de 40,61 µg/L. En trabajos realizados sobre las aguas de suministro del municipio de Cádiz, el cual se abastece de estos dos embalses, (Rodríguez, 2001), se encuentran valores medios a lo largo de la red de abastecimiento de unos 8 µg/L Mn, superándose incluso el nivel guía (20 µg/L Mn) en el año de mayor sequía 1995. Esto fue debido,

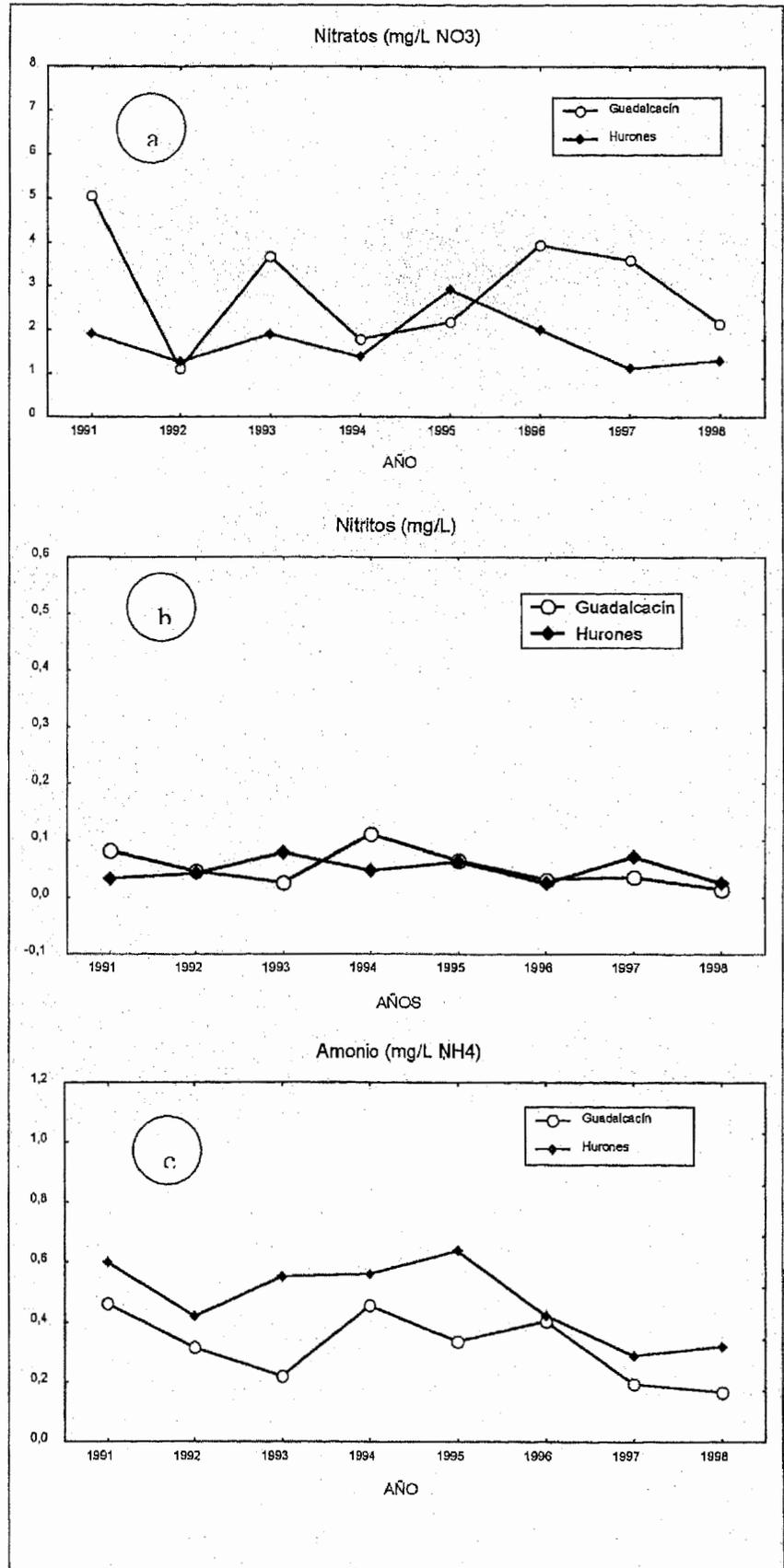


Figura 6. Evolución temporal de los valores medios de [a] nitratos, [b] nitritos y [c] amonio en los embalses de la cuenca del Majaceite.

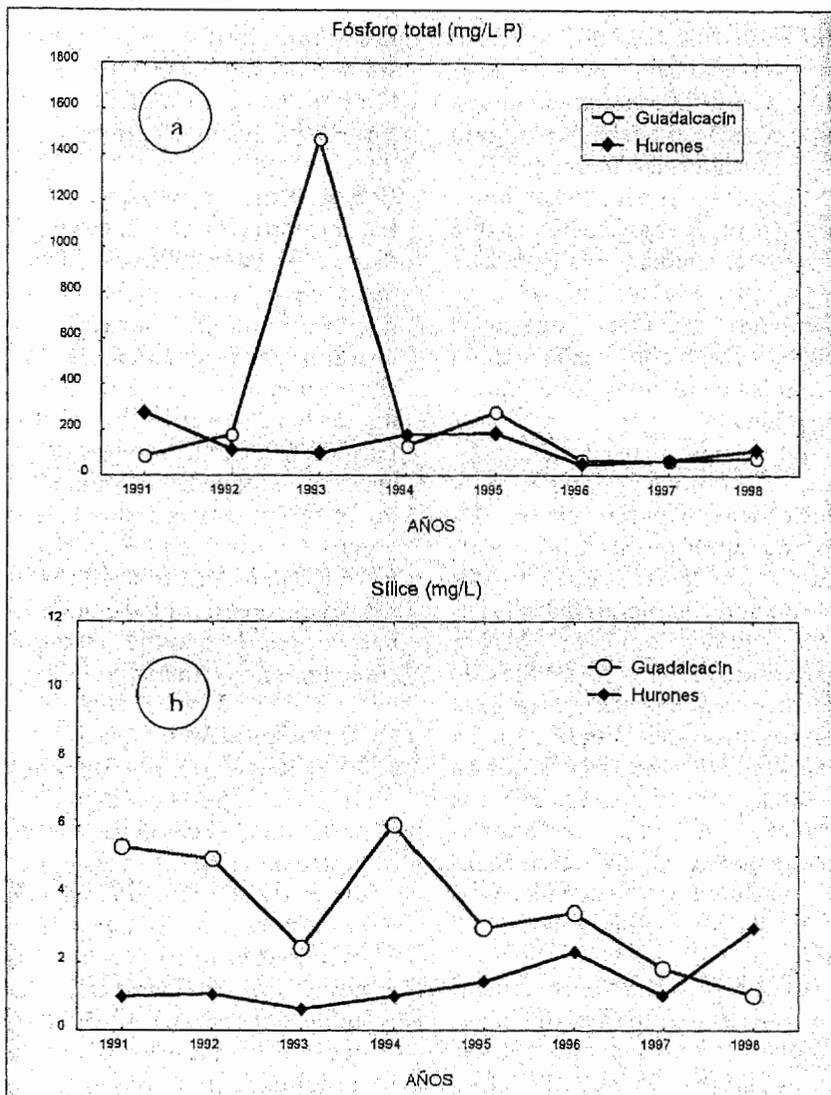


Figura 7. Evolución temporal de los valores medios de (a) fósforo, (b) sílice en los embalses de la cuenca del Majaceite.

probablemente, a la adición del agente oxidante permanganato potásico a la salida de los embalses para la eliminación tanto de la materia orgánica, como de las sales de manganeso presentes en los embalses con bajo nivel de agua y captaciones más profundas. El dióxido de manganeso originado como producto de tales oxidaciones es insoluble y puede eliminarse en el transcurso de la coagulación+floculación, por sedimentación o en la filtración (García, 1998) pudiendo quedar restos en exceso que provocan el aumento registrado en este año en la red de abastecimiento. Por otra parte, el bombeo y la cloración para el

abastecimiento provocan la precipitación de estos iones, dando lugar a problemas de turbidez y malos sabores en el agua suministrada.

De la misma forma los niveles medios de hierro son de 128,31 µg/L en el embalse de Guadalcacín frente a 56,32 µg/L de Los Hurones superando ambos el nivel guía (50 µg/L Fe), aunque en ningún caso alcanzan la concentración máxima admisible, (200 µg/L Fe), (Tablas 3 y 4). En las Figuras 5.a. y 5.b. se muestra la evolución de ambos metales y se observa un comportamiento análogo. Los valores en el embalse de Guadalcacín son siempre mayores

*Este trabajo permite conocer la calidad del agua embalsada y determinar los posteriores tratamientos de potabilización*

que en Los Hurones hasta 1995, año a partir del cual los valores de hierro y manganeso coinciden en ambos embalses.

### 3.3.3. Nutrientes

La principal amenaza a la que se encuentran sometidos los embalses cuando acontecen sucesos de aumento de la concentración de nutrientes (nitrógeno y especialmente fósforo) es la eutrofización que origina un gran desarrollo del fitoplancton. El lavado de las tierras de labor y las aguas residuales vertidas a este tipo de ecosistemas son las desencadenantes de este proceso. Estos problemas hacen necesario controlar la presencia de los nutrientes principales (nitrógeno en sus distintas formas y fósforo) en el agua embalsada.

La eutrofización puede favorecer el desarrollo de un tipo de algas conocidas como Cianofíceas (capaces de fijar nitrógeno atmosférico una vez agotado el nitrógeno combinado, creciendo mientras exista fósforo) que pueden originar olores y sabores desagradables en el agua tratada. Además, la descomposición de la materia orgánica como consecuencia de la masiva proliferación de algas, consume grandes cantidades de oxígeno que provocan la acumulación de compuestos de hierro y manganeso en el hipolimnion, ocasionando pro-

blemas durante la explotación (Vidal, 1992).

El anión nitrato es de origen antropogénico y su presencia en las aguas deriva mayoritariamente del abonado agrícola, por lo que es habitual en las zonas de agricultura y/o ganadería intensiva. Los niveles encontrados en el embalse de Guadalcacín son algo mayores que para Los Hurones, no obstante ambos valores quedan lejos de alcanzar ni siquiera el nivel guía (25 mg/L  $\text{NO}_3^-$ ) (Tablas 3 y 4). En cuanto a la evolución temporal representada en la Figura 6.a. no se observa ningún comportamiento determinado. Los niveles de nitritos se mantienen en ambos casos por debajo de la concentración máxima admisible (0,1 mg/L  $\text{NO}_2^-$ ) a excepción de un valor máximo puntual en torno a 0,4 mg/L para ambos embalses. En la Figura 6.b. se observa una evolución muy parecida entre los dos pantanos.

Para la forma amoniacal del nitrógeno, y al contrario que en los parámetros anteriores, los niveles encontrados en Los Hurones superan a los del embalse de Guadalcacín, como se observa en la Figura 6.c. El valor medio para Los Hurones es de 0,47 mg/L muy cercano a la concentración máxi-

ma admisible (0,5 mg/L  $\text{NH}_4^+$ ), mientras que para Guadalcacín es de 0,34 mg/L, aunque en ambos embalses se supera el nivel guía reglamentado en 0,05 mg/L  $\text{NH}_4^+$ . Estos valores son mayores durante la época de sequía debido a una mayor contaminación orgánica de las aguas al encontrarse más cerca del fondo del pantano. A partir de 1996, y como consecuencia de la avenida de las lluvias, los valores disminuyen.

La entrada en un ecosistema de aguas poco mineralizadas y de aguas ricas en fósforo, desencadena una rápida proliferación de algas en el sistema, ya que un sistema de aguas mineralizadas favorece la precipitación del fósforo (Medina, 1999). Los niveles de fósforo son muy parecidos para ambos embalses (Figura 7.a.) a excepción del año 1993 en que en Guadalcacín se alcanza casi los 1500  $\mu\text{g/L P}$ . El valor medio se encuentra sobre 135  $\mu\text{g/L P}$ , quedando bastante lejos de la concentración máxima admisible (5000  $\mu\text{g/L P}$ ).

El último parámetro considerado como nutriente es la sílice, encontrándose los mayores valores en el pantano de Guadalcacín a excepción del año 1998 en que ocurre lo contrario (Figura 7.b.)

Los valores medios se encuentran sobre 3,80 mg/L  $\text{SiO}_2$  en Guadalcacín frente a 1,46 mg/L  $\text{SiO}_2$  para Los Hurones (Tablas 3 y 4).

### 3.3.4. Materia orgánica

La concentración de materia orgánica, expresada como oxidabilidad al permanganato potásico, es mayor en el de Guadalcacín, con un valor medio cercano a la concentración máxima admisible (5 mg/L  $\text{O}_2$ ). Los valores más altos para dicho pantano se producen en 1993 (Figura 8), disminuyendo progresivamente con el aumento del nivel de pluviosidad y hasta igualarse prácticamente con los niveles registrados en el embalse de los Hurones que no experimentan casi variación.

## 4. Conclusiones

1. El embalse de los Hurones dispone de aguas hidrogenocarbonatadas cálcicas, con un grado de mineralización media, estando regulado el pH de sus aguas por el equilibrio carbonato / hidrogenocarbonato. Por el contrario las aguas del embalse de Guadalcacín presentan un grado de mineralización importante, sobre 700  $\mu\text{S/cm}$  de conductividad.
2. Durante el período muestreado (1991 - 1998) el efecto de la sequía fue mayor en 1995, puesto que aunque fue un año lluvioso, las mayores precipitaciones transcurrieron durante el último trimestre. En dicho año, se detectó el menor volumen de agua embalsada en los pantanos de Guadalcacín y los Hurones, y el aumento sustancial de la concentración de determinados parámetros tales como conductividad, cloruros, sulfatos, iones calcio, sodio y magnesio. A partir de este año las aguas restablecieron su calidad habitual con la llegada de las lluvias.

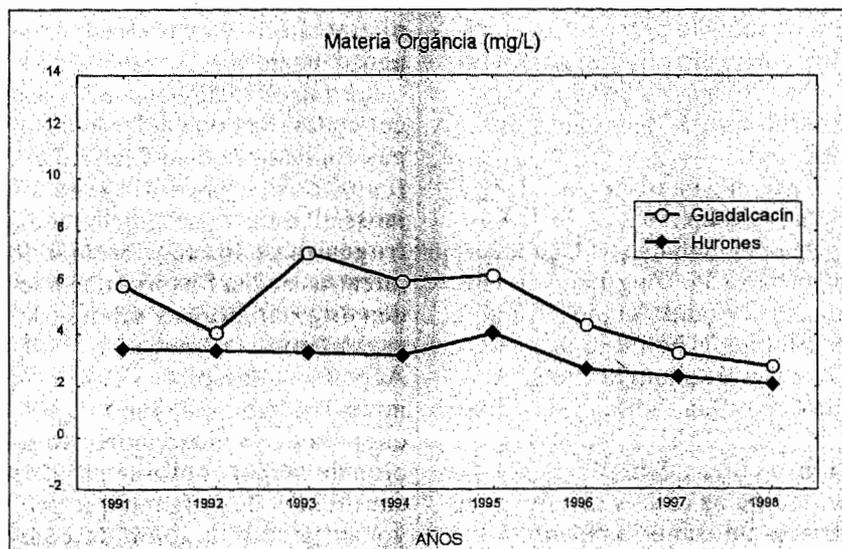


Figura 8. Evolución temporal de los valores medios de oxidabilidad en los embalses de la cuenca del Majaceite.

3. Se ha encontrado una menor variabilidad de los valores de los parámetros estudiados en el embalse de los Hurones, que en el de Guadalquivir. Dado que estos valores medios de los parámetros durante los años de estudio son aproximados a los niveles guía y las concentraciones máximas admisibles reglamentadas, se puede afirmar que Los Hurones dispone de un agua que necesita menor grado de tratamiento en las ETAPs que las procedentes del embalse de Guadalquivir.
4. El año en que las aguas embalsadas fueron de peor calidad fue 1994 debido al bajo nivel de agua acumulado como consecuencia de las escasas precipitaciones. A partir de último trimestre de 1995 las aguas restablecieron su calidad habitual con la llegada de las lluvias.

### 5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento a Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Abastecimiento de Agua a la Zona Gaditana, por la cesión de los datos de análisis de las aguas de los embalses de Guadalquivir y los Hurones desde el año 1991.

### 6. Bibliografía

- [1] APHA, AWWA, WPCF (1989). Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Editorial Díaz de Santos, S.A. Edición en español (1992). Madrid.
- [2] DIRECTIVA 80/777/CEE de 15 de julio de 1980 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo público.
- [3] DIRECTIVA 98/83/CE DEL CONSEJO de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- [4] El Abastecimiento de Agua a la zona Gaditana 1957 - 1982. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección general de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Sevilla, 1983.
- [5] GARCIA MARTINEZ DE SIMON, I. (1998). "Eliminación de los sólidos incrustados en las conducciones de agua potable de Cantillana (Sevilla). Tecnología del Agua, 178:35 - 40.
- [6] MEDINA VELA, M.; DIAZ BORRERO, M.D.; PUENTE GUIASADO, M.L.; BURRACO BARRERA, C. (1999). "Limnología del embalse del Huesna". Tecnología del Agua, 194: 25 - 31.
- [7] ORDEN 11-5-1988, sobre características básicas de calidad que deben ser mantenidas en las corrientes de aguas superficiales cuando sean destinadas a la producción de agua potable. (B.O.E. nº 124, de 24-5-1988, pp. 15823)
- [8] Orden 13-8-1999, publica las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de Cuenca del Guadalquivir, aprobado por Real Decreto 1664/1998, de 24-7-1998. (B.O.E. nº 205, de 27-8-1999, pp. 31813)
- [9] Orden de 1 de diciembre de 1981, por la que se establecen métodos oficiales de análisis de aguas y otros productos y alimentos (B.O.E. de 20 de enero de 1982).
- [10] PÉREZ LOPEZ, J.A.; (1999). "Estudio sanitario del agua". Editorial Universidad de Granada. Motril.
- [11] QUERALT, R. (2000). "Hidrograma para la representación de la calidad y contaminación de las aguas subterráneas". Tecnología del Agua, 197: 20 - 29.
- [12] 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, (B.O.E. del 20 de Septiembre de 1990).
- [13] REAL DECRETO 1664/1998, de 24-7-1998, por el que se aprueba los Planes Hidrológicos de cuenca, BOE 11-8-1998, núm. 191, [pág. 27296]
- [14] RODRIGUEZ BARROSO, M.R. (1998). Tesis de Licenciatura. "Caracterización del agua potable de la ciudad de Cádiz y su relación con las aguas residuales". Universidad de Cádiz.
- [15] RODRIGUEZ BARROSO, M.R. (2000). "Embalses de la cuenca del río Guadalete (Zahara-El Gastor, Bornos y Arcos) de la provincia de Cádiz: Calidad de las aguas y su influencia con la sequía". Documento Interno. Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de los Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Cádiz.
- [16] RODRIGUEZ BARROSO, M.R. (2001). "Calidad del agua de la red de suministro de la localidad de Cádiz: influencia de la sequía en el período 1992 - 1998". Ingeniería del Agua, aceptada, pendiente de publicación.
- [17] RODRIGUEZ BARROSO, M.R.; VIDAL VALDERA, L.; SALES MARQUEZ, D.; QUIROGA ALONSO, J.M. (2001). "Embalses de la cuenca del río Guadalete (Zahara-El Gastor, Bornos y Arcos) de la provincia de Cádiz: calidad de las aguas y su influencia con la sequía". Tecnología del Agua, 212: 41-56.
- [18] VIDAL VALDERAS, L. (1992). Tesis de Doctorado. "Estudio limnológico del embalse de los Hurones (Cádiz). Especiación de fosfatos y su relación con la eutrofización". Universidad de Cádiz.