

**Resumen**

La provincia de Cádiz usa las aguas de la cuenca hidrográfica del río Guadalete principalmente para riego, mientras que su afluente principal, el río Majaceite, las destina para el abastecimiento. Cada una de estas cuencas tiene un entorno geológico distinto y con embalses cuya calidad de aguas también es diferente. Ambas cuencas forman parte de la red hidrográfica de la provincia de Cádiz y su gestión la realiza el organismo de cuenca Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

La caracterización de diferentes parámetros físico-químicos, junto con el estudio de las variaciones climatológicas y de la evolución del volumen de agua embalsada, ha permitido conocer la calidad de la misma, así como, predecir determinadas pautas de comportamiento en la gestión del agua en las estaciones de tratamiento de aguas potables (ETAP).

Los resultados obtenidos muestran la óptima calidad de las aguas de los embalses situados en el río Majaceite frente a los del Guadalete, además de observar una disminución progresiva de la misma durante el período de sequía (1992 - 1995) en todos ellos, años en que las cotas embalsadas llegaron a ser alarmantemente bajas.

**Palabras clave:**

Agua embalsada, provincia de Cádiz, abastecimiento, calidad del agua.

**Abstract****Comparative study of the quality waters dammed in the county of Cádiz (south of Spain)**

The county of Cádiz uses the waters of the Guadalete hydrography basin mainly for watering, while their main tributary, the Majaceite River, destines its waters for the supply. Both basins are part of the hydrography net of the county of Cádiz (south of Spain) and they belong to the Guadalquivir Hydrography Confederation.

The study of physical chemical parameters, together with the data of the climate variations and the data of the evolution of the volume of dammed water, have allowed to know its quality, as well as to predict certain behavior rules in the adaptation of the water, in the drinking waters treatment plant.

The results obtained shows that the water dammed in the reservoirs located in the Majaceite River are better than those of the Guadalete. Moreover, a progressive decrease of the water quality was observed during the period of drought (1992- 1995) because the level of water dammed was alarmingly low.

**Keywords:**

Dammed, country of Cádiz, supply, water quality.

# Estudio comparativo de la calidad de las aguas embalsadas en la provincia de Cádiz

Por: Rodríguez Barroso, M.R.<sup>(1)</sup>; Vidal Valderas, L.<sup>(2)</sup>; Sales Márquez, D.<sup>(1)</sup>; Quiroga Alonso, J.M.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</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. Profesora asociada. Tfno.: 956-016157. E-mail: rocio.rodriguez@uca.es

<sup>(2)</sup> Jefe de Sección Laboratorio y Control Sanitario Tratamientos de Aguas Potables. Confederación Hidrográfica 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.

En España los sistemas de abastecimiento utilizan preferentemente agua superficial (76%), siendo el resto fundamentalmente subterránea y sólo un 0,1 % de origen marino y usada básicamente en Canarias donde supone un 6% del agua utilizada. Se aprecian diferencias zonales significativas entre Castilla, Cataluña, Andalucía y Levante-Murcia, que superan el 86% de agua superficial, frente al escaso 8% de las zonas insulares abastecidas principalmente por agua subterránea. Las zonas Norte y Rioja-Navarra-Aragón se abastecen casi por igual con agua de ambos orígenes. (González y col., 1995).

La comunidad autónoma de Andalucía destaca por el número de embalses, siendo la segunda, tras Extremadura, en función del volumen de agua embalsada, entendiéndose como el volumen máximo potencial de almacenamiento; también ocupa el segundo lugar por superficie inundada. (García, 1995)

Los efectos de la sequía pluviométrica tienen que corregirse con los embalses y con una adecuada explotación de los acuíferos, de modo que se evite llegar a la situación de sequía hidráulica (períodos en que no se puede suministrar toda la demanda de agua), (Ferraro y col. 1999). Si el sistema de infraestructuras hidráulicas tiene capacidad suficiente no debe producirse sequía hidráulica aunque haya sequía pluviométrica.

En este trabajo, se estudia la evolución de la calidad de las aguas durante el último período de sequía (1992 - 1995) mediante el análisis de parámetros físico-químicos, que junto con los datos de las variaciones climatológicas y la evolución

del volumen de agua embalsada, desde el año 1991 hasta 1998 permiten predecir determinadas pautas de comportamiento en la gestión del agua desde los embalses, así como su adecuación en las estaciones de tratamiento de aguas potables (ETAP) para su destino final como agua de abastecimiento.

## 2. Red hidrográfica

La provincia de Cádiz se sitúa en la parte más meridional de Europa, al sur de la Península Ibérica y desde el punto de vista hidrológico, la red fluvial de la provincia de Cádiz presenta un régimen de tipo subtropical con máximos en los meses de invierno y mínimos en verano. Son tres los principales ríos que discurren por la provincia: Guadalquivir, Guadalete y Barbate, que desembocan en el Atlántico, a los que se puede añadir los Salados de Rota, Chiclana y Conil entre otros de menor importancia, y el Palmones, Guadarranque y Guadiaro que desembocan en el Mediterráneo. (Gutiérrez, 1982).

Esta provincia dispone de forma natural de más cantidad de agua procedente de lluvia que el resto de Andalucía Occidental (Rodríguez, 2001.a), explicándose esto gracias a la orografía; por una parte, la zona occidental es relativamente llana y de escasa altitud, mientras que la oriental presenta unos relieves muy accidentados e incluso altitudes que rebasan los 1.600 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 normal-

mente 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.

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 ubicar las grandes superficies de almacenamiento de agua, siendo así como se explican básicamente los emplazamientos de los embalses de Bornos, Guadalcaín y Los Hurones.

### 2.1. Río Guadalete

El río Guadalete es el más importante y característico de la provincia de Cádiz. En su cuenca se disponen tres embalses con un total de 437 hm<sup>3</sup> de capacidad repartidos entre los 223 hm<sup>3</sup> de Zahara-El Gastor, 200 hm<sup>3</sup> de Bornos y 14 hm<sup>3</sup> de Arcos. Con un recorrido de 144 km y una cuenca de 3.966 km<sup>2</sup> de extensión es la de mayores dimensiones de la provincia, abarcando casi la mitad de su superficie y drenando la principal zona de cultivos como es la Campiña del Guadalete para desembocar, finalmente, en la Bahía de Cádiz.

El río Guadalete se caracteriza en su curso alto por atravesar el área de la Serranía de Grazalema, donde se producen los niveles pluviométricos más altos de España. Su curso medio discurre por la cuenca de Arcos-Bornos que ocupa una zona alargada en dirección NE-SO representativa del Mioceno superior durante el cual el área estaba ocupada por un mar (Gutiérrez y col., 1991) cuya costa estaría situada según una línea entre San José del Valle y Puerto Serrano, y la profundidad aumentaría

hacia el NO, como indica el hecho de que las calcarenitas pasen lateralmente a arcillas azules. Dicho mar se extendería por toda la Depresión del Guadalquivir, hacia el N, hasta Sierra Morena. Esto hace que la composición mineralógica de las aguas de estos embalses sea diferente a las de los otros embalses de la provincia de Cádiz, como son los pertenecientes a la cuenca del río Majaceite (Rodríguez, 2000.b). Por este motivo, los embalses de esta cuenca dedican la mayor parte de su capacidad al suministro de aguas para riego en la agricultura.

El pantano de Zahara-El Gastor se dedica principalmente a regadío, así como embalse de regulación (**Figura 1**). Presenta una capacidad inicial de 223 hm<sup>3</sup> y su aportación natural media es de 72 hm<sup>3</sup>/año, terminando su construcción en el año 1992. Este embalse cuenta con una superficie de cuenca de 128 km<sup>2</sup>, su superficie de embalse es de 723 ha (El Abastecimiento de Agua a la Zona Gaditana 1957 - 1982). La presa se compone de materiales sueltos, zonificada con núcleo de arcilla y cuerpo central de acarreo y espaldones de escollera. La longitud de coronación es de 420 m y la cota de coronación 357,00 m, siendo la cota máxima de nivel de embalse de 351,00 m.

El embalse de Bornos es el más antiguo de los situados en la cuenca del río Guadalete pues el año de finalización de las obras fue en 1961. Este embalse se dedica tanto a regadío como a regulación, además de ser utilizado para producción de energía hidroeléctrica. Su capacidad inicial es de 215 hm<sup>3</sup>, cuenta con una superficie de cuenca de 1344 km<sup>2</sup> y su superficie de embalse es de 2.190 ha. La presa se caracteriza por ser de gravedad con vertedero de planta recta, de hormigón en masa y pilas de hormigón armado. La longitud de coronación es de 164,10 m y la cota de coronación de 108,45 m, siendo la cota máxima de nivel de embalse de 104,00 m sobre este nivel.

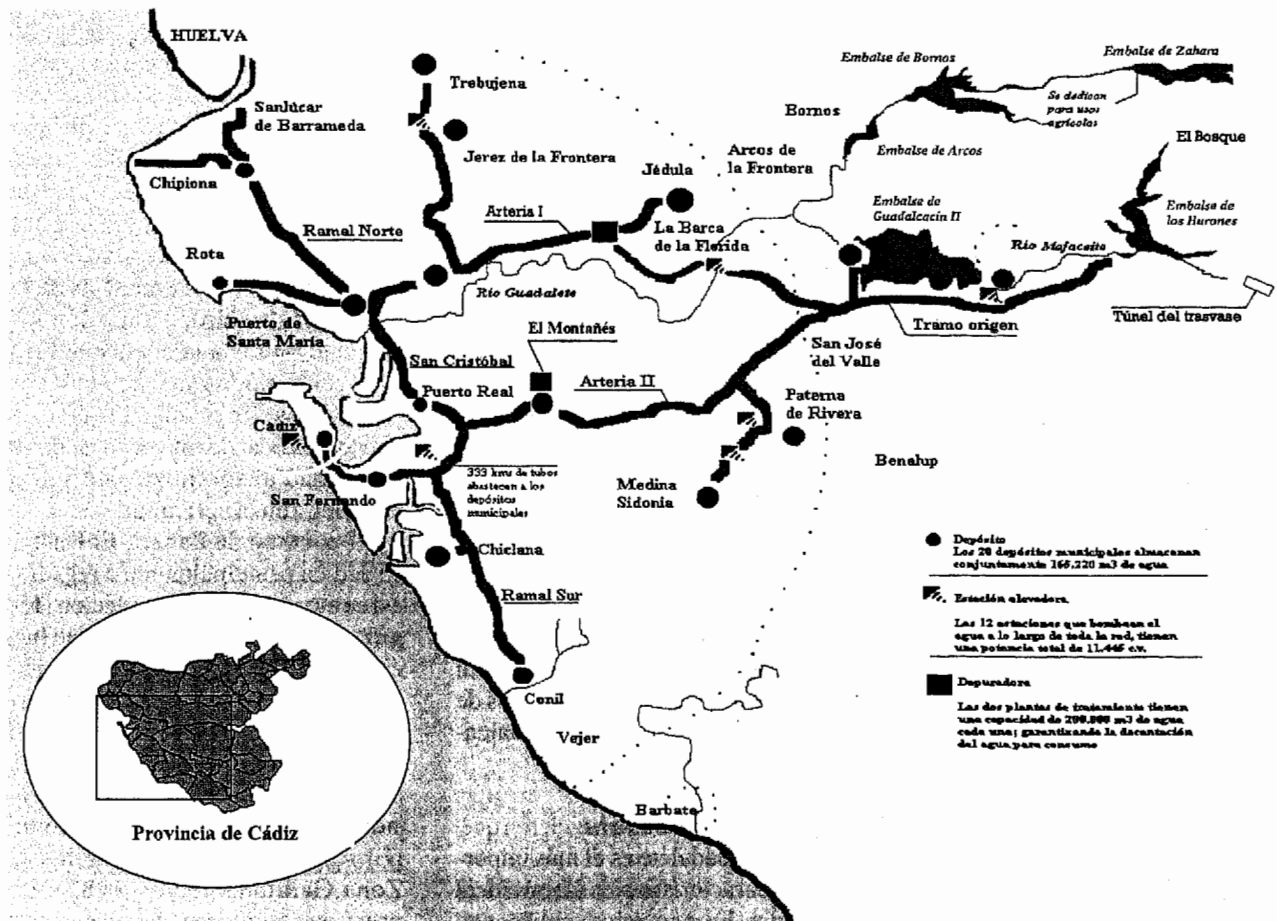


Figura 1. Embalses de la provincia de Cádiz. Cuenca del río Guadalete: Zahara-El Gastor, Bornos y Arcos. Cuenca del río Majaceite: Hurones y Guadalcaçin.

El pantano de Arcos es el más pequeño pues presenta una capacidad inicial de 14 hm<sup>3</sup>; data de 1964 y se dedica principalmente a regadío. Cuenta con una superficie de cuenca de 1375,5 km<sup>2</sup>, su superficie de embalse es de 28 ha. En este caso también se trata de una presa de gravedad con vertedero de planta recta fabricado de hormigón en masa y pilas de hormigón armado. La longitud de coronación es de 191,00 m y la cota de coronación es la 69,00 m, siendo la cota máxima de nivel de embalse de 67,00 m.

A pesar de la existencia de estos embalses, desde 1976 confluyen diversos factores que provocan la alarma en el Abastecimiento de Agua a la Zona Gaditana, debido principalmente a los períodos de sequía que se han sucedido desde entonces, a los nuevos hábitos de consumo de agua que se han triplicado

y a los cambios de población, sobre todo en las épocas estivales, en los que sufre aumentos demográficos desde aproximadamente 700.000 a 1.300.000 habitantes. La medida adoptada ante estos problemas por las Autoridades ha sido la de las restricciones, disminuyendo el consumo por habitante y día hasta un 38 % en el año 1995 en la localidad de Cádiz (Rodríguez, 2001.c), al igual que en otros muchos municipios de los alrededores como el caso de Sevilla donde la reducción fue del 30 % (Prats, 1994).

Tras la ampliación del embalse de Guadalcaçin (desde 77 a 800 hm<sup>3</sup> capacidad), la construcción de la presa de Zahara-El Gastor y las nuevas estaciones de bombeo, el Guadalete ha agotado sus posibilidades como fuente de abastecimiento, quedando un déficit anual de unos 100 hm<sup>3</sup>.

Así, el trasvase de la cuenca del río Guadiaro supone una solución definitiva a la falta de recursos puesto que ofrece una aportación media de 750 hm<sup>3</sup>, el doble que la del río Guadalete. Desde mediados del mes de diciembre de 2000 el trasvase de la cuenca del Guadiaro (provincia de Málaga) al río Majaceite se ha hecho realidad aportando agua cuando se supera un caudal de 6 m<sup>3</sup>/seg, asegurándose así el abastecimiento de agua a la Zona Gaditana.

## 2.2. Río Majaceite

El río Majaceite es el principal afluente del río Guadalete, que se une al mismo en su curso bajo, a pocos kilómetros al sur de la ciudad de Arcos de la Frontera, y drena las zonas de Ubrique, El Bosque, Algar, etc. En la cuenca del río Majaceite se sitúan dos embalses: Guadalcaçin y Los Hurones, con 800 hm<sup>3</sup> y

135 hm<sup>3</sup> de capacidad total respectivamente (**Figura 1**).

El embalse de Guadalcaçín se dedica principalmente a 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 77 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 paramento, 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 hormigón, 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 en 1953 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 algo 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 de 405 m; la cota de coronación está en 219,00 m. La torre de toma de agua es metálica y se encuentra adosada al paramento de la presa y dispone de tres compuertas de 2,00 m por 1,50 m, situadas a las cotas de 181,50 – 194,00 y 205,00 m.

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 disminuyera, como ocurrió en el municipio de Cádiz (Rodríguez, 2001.c).

### 3. Metodología

#### 3.1. Recogida de muestras en los embalses

En los embalses de la cuenca del río Majaceite se recogieron 12 muestras de agua anuales, y a lo largo del período comprendido entre enero de 1991 y diciembre de 1998 espaciadas mensualmente en cada uno de los embalses estudiados (Hurones y Guadalcaçín, **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, por debajo de la COTA-II de 194,00 m, mientras que en el embalse de Guadalcaçín se tomaron por encima de la cota de 66,40 m.

Para los embalses de la cuenca del río Guadalete se recogieron 12 muestras de agua anuales y a lo largo del período comprendido entre enero de 1992 y diciembre

de 1998 espaciadas mensualmente en cada uno de los embalses de estudio. En el embalse de Zahara-El Gastor, las muestras se tomaron en superficie entre 342 y 349 m, en el embalse de Bornos las muestras también fueron tomadas en superficie entre 80 y 90 m y por último entre la cota de 66 y 67 m se tomaron las muestras en el embalse de Arcos.

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

En cada muestreo se recogieron 2000 mL de agua para realizar los análisis fisicoquímicos: temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto (determinados "in situ"); nitratos, nitrógeno, amonio, fosfatos y sílice (como nutrientes). Parámetros indicativos de contenido alcalino: alcalinidad total, cloruros, sulfatos, calcio, sodio y magnesio, oxidabilidad al permanganato (como contenido en materia orgánica) y por último metales hierro y manganeso. Estos parámetros fueron analizados lo antes posible, siempre en el transcurso de las 24 horas siguientes a su recogida, transportadas en neveras portátiles hasta el laboratorio y conservadas en frío a 4°C (O. de 01-12-81). Los análisis se realizaron siguiendo los métodos analíticos de referencia recomendados por la Reglamentación Técnico-Sanitaria, así como el manual de métodos estandarizados (APHA, AWWA y WPCF, 1989).

#### 3.2. Estadístico de los datos del Majaceite

De los distintos parámetros determinados en cada análisis, se han utilizado 21 de ellos, lo que hace un total de 4.032 datos para la cuenca del río Majaceite y 5.292 datos para la del río Guadalete, que se han sometido a un tratamiento estadístico aplicando los programas informáticos DBASE IV y EXCEL 5.0 como

base de datos, y a su vez los programas estadísticos STATGRAPHICS-PLUS y STATISTICA 5.1. sobre el entorno CD/MSDOS y PC/WINDOWS. Se han representado los datos mediante líneas de tendencia evolutiva a lo largo de los años de estudio.

**4. Resultados**

Para establecer las relaciones del volumen de agua acumulada en los embalses con la meteorología de cada zona y poder predecir así los períodos de sequía hidráulica, se utilizaron los datos de pluviosidad en las estaciones meteorológicas cercanas a los embalses,

así como los datos facilitados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir relativos a las cotas de embalse.

**4.1. Pluviometría en las distintas cuencas**

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 presentan los datos correspondientes a las precipitaciones totales anuales durante los años 1981 – 1998, recogidas

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: Guadalcacín (estación número 950) y los Hurones (estación número 947) propios de la cuenca del Majaceite, Zahara-El Gastor (estación número 912), embalse de Bornos (estación número 932) y embalse de Arcos (estación número 932-I) de la cuenca del río Guadalete. En la última fila de esta tabla se presentan los valores medios de precipitación del período estudiado para cada embalse.

Tabla 1

AÑO Hidrológico	Embalses de la cuenca del río GUADALETE			Embalses de la cuenca del río MAJACEITE	
	ZAHARA-EL GASTOR Estación nº 912 (mm)	BORNOS Estación nº 932 (mm)	ARCOS Estación nº 932-I (mm)	HURONES Estación nº 947 (mm)	GUADALCACÍN Estación nº 950 (mm)
1981/82	907,5	498,2	461,7	609,7	542,9
1982/83	758,5	460,5	539,4	877,9	-
1983/84	870	652,4	654,4	700	-
1984/85	789	708,5	795,8	860,9	-
1985/86	827,5	599,5	474,4	940,3	-
1986/87	720,4	633,9	615,1	857,7	487,3
1987/88	705,5	719,2	-	1228,2	829,5
1988/89	591,5	399,8	-	715	449,6
1989/90	-	714,1	-	1224,3	760,3
1990/91	689	651,9	723	540,5	644
1991/92	560,5	398,5	493,4	754,8	312
1992/93	498,5	374,4	388,8	648,6	425,5
1993/94	566,6	500	433,5	675,7	597,7
1994/95	356,8	252,4	285,5	532,5	347,4
1995/96	1188	881,4	955,7	906,2	1131,5
1996/97	1180	1085,6	1069	1626,6	1048,9
1997/98	1074,5	823,2	751,4	1055,1	835
1998/99	378,5	283,7	248,5	612	315,3
<b>Valor medio</b>	<b>703,5</b>	<b>591,0</b>	<b>592,6</b>	<b>853,7</b>	<b>623,4</b>

(-) Datos no sumistrados

**Tabla 1.** Precipitaciones totales anuales recogidas en las estaciones meteorológicas de los embalses de la cuenca del río Guadalete (Zahara-El Gastor, Bornos y Arcos) y en los del río Mojaceite (Hurones y Guadalcacín) durante el período 1981 – 1998.

Tabla 2

AÑO	Cuenca del río GUADALETE						Cuenca del río MAJACEITE			
	ZAHARA-EL GASTOR		BORNOS		ARCOS		HURONES		GUADALCACÍN	
	(Hm <sup>3</sup> )	(%)	(Hm <sup>3</sup> )	(%)	(Hm <sup>3</sup> )	(%)	(Hm <sup>3</sup> )	(%)	(Hm <sup>3</sup> )	(%)
1991	—	—	—	—	—	—	90,49	67,0	24,93	3,1
1992	6,87	3,1	—	—	—	—	57,56	42,6	9,24	1,2
1993	1,28	0,6	25,77	12,9	9,68	69,1	37,39	27,7	15,53	1,9
1994	2,47	1,1	18,74	9,4	11,07	79,1	41,64	30,8	18,09	2,3
1995	1,49	0,7	15,54	7,8	—	—	17,12	12,7	9,04	1,1
1996	—	—	—	—	13,25	94,6	113,83	84,3	239,27	29,9
1997	—	—	—	—	11,01	78,6	93,65	69,4	506,99	63,4
1998	—	—	—	—	—	—	121,70	90,1	634,42	79,3

(—) datos no suministrados

Tabla 2. Volumen medio anual embalsado en los pantanos de la cuenca del río Guadalete (Zahara-El Gaster, Bornos y Arcos) y en los del río Majaceite (Huronos y Guadalcacín) durante el periodo 1991 - 1998.

Según el valor medio de precipitaciones registradas en cada embalse, los de la cuenca del río Majaceite se ubican en una zona de mayor pluviosidad que los del Guadalete, a excepción del embalse de Zahara-El Gaster; mientras que los embalses de Bornos y Arcos se localizan en zonas más secas. Así, la precipitación media para Los Hurones es de 853,7 mm/año frente a 703,5 mm/año para Zahara-El Gaster, seguido de Guadalcacín con 623,4 mm anuales. Presentando estos tres embalses altos niveles de pluviosidad en comparación con otros de la región andaluza, como los de la cuenca del Guadalquivir, donde se registró una precipitación media anual de 559 mm en el período comprendido entre los años 1996 a 1998, (Ferraro y col., 1999).

Atendiendo al período meteorológico (1981 - 1998), se aprecian distintas etapas según el nivel de lluvias. La primera etapa es la comprendida entre 1981/82 a 1989/90 que se caracterizó por ser años hidrológicos de precipitaciones relativamente constantes, en torno a los valores medios registrados para cada embalse.

Las sequías pluviométricas, entendidas como períodos de precipi-

tación más o menos escasa, son inherentes a la profunda irregularidad del clima mediterráneo, y en particular en la cuenca del Guadalete en la que entre los años 1991 y 1995 se registraron precipitaciones inferiores a 500 mm llegando a descender a 252 en 1994/95 como el caso de la estación nº 932 de Bornos. Esta misma sequía se registra en la cuenca del Majaceite aunque los niveles nunca disminuyeron por debajo de 312 mm (caso de la estación nº 950 de Guadalcacín). A pesar de la escasez de agua y que en el embalse de los Hurones se recogieron niveles inferiores a la media (853 mm) en estos años de sequía, siempre se superaron los 500 mm/año.

Los años hidrológicos comprendidos entre 1995 y 1998 han sido muy lluviosos, alcanzándose niveles de hasta 1626 mm (Los Hurones) a partir del último trimestre de 1995. En todos los embalses se registraron precipitaciones superiores a los valores medios reflejados en la **Tabla 1**. Volviendo a ser 1998/99 un año de acusada sequía en toda la región.

Así pues, el período objeto de estudio (años 1991 - 1998) se caracteriza como una época de acusada sequía entre los años 1991/92 y 1994/95, año en que se recrudece

bastante la escasez de agua, y una época de mayores precipitaciones a partir de 1995.

#### 4.2. Acumulación de agua embalsada

El volumen medio anual embalsado en los pantanos tanto de la cuenca del Guadalete como del Majaceite se muestran en la **Tabla 2**, junto con el porcentaje que supone respecto a la capacidad total de cada embalse: 223 hm<sup>3</sup> para Zahara-El Gaster, 215 hm<sup>3</sup> para Bornos y 14 hm<sup>3</sup> para Arcos; 800 hm<sup>3</sup> para Guadalcacín, 135 hm<sup>3</sup> para Los Hurones. Algunos años no presentan ningún dato debido a que no fueron suministrados como los años 1992, 1995, 1996 y 1997.

En los embalses de mayor capacidad volumétrica de la cuenca del Guadalete (Bornos y Zahara-El Gaster), los niveles que se presentan entre los años 1992 y 1995 son muy bajos debido a los sucesivos años de sequía, entre un 3,1 % en 1992 para el embalse de Zahara-El Gaster y un 0,7 % en 1995 (**Tabla 2**). Lo mismo ocurre para Bornos cuya cota oscilaba entre un 12,9 % en el año 1993 y bajó hasta un 7,8 % en 1995.

En cambio el embalse de Arcos, que es el de menor capacidad de con-

tención de agua (14 hm<sup>3</sup>) se mantuvo en niveles bastante altos llegando en el año 1996 a disponer de hasta un 94,65 %; esto es debido a que se trata de un contraembalse para mantener una determinada cota para riego, por lo que es común el procedimiento de vaciar aguas desde el pantano de Bornos hasta el de Arcos.

En la **Tabla 2** 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 hasta casi 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 %).

En cambio el embalse de Guadalcaçin durante los primeros cinco años contiene muy poca cantidad de agua (sobre un 2 % de capacidad) debido a la sequía de ese período, y es a partir de finales de 1995 con la venida de las lluvias cuando 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 ambos embalses se evidencia, de manera general, que el volumen acumulado en los embalses y las precipitaciones en este período (**Tabla 1**) siguen una tendencia similar, excepto el año 1995, que aparece como un año lluvioso y en cambio el nivel de agua embalsada 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.

#### 4.3. Resultados estadísticos

La **Tabla 3** recoge los valores medios de los parámetros analizados para los embalses de la cuenca

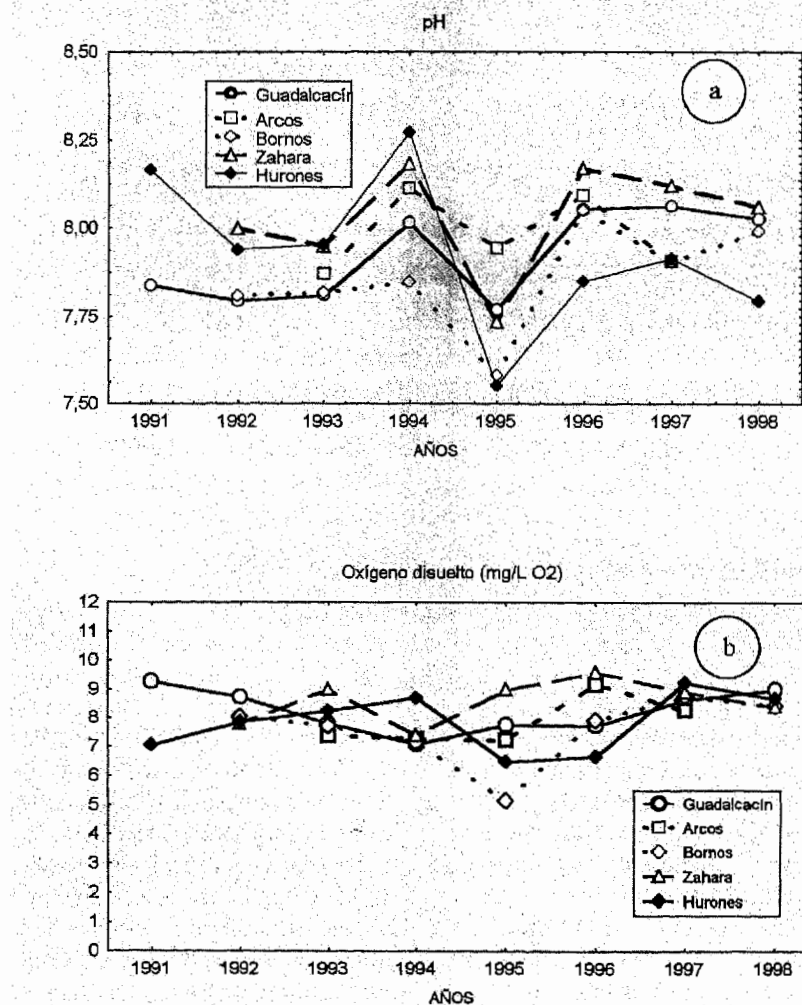


Figura 2. Evolución temporal de los valores medios de (a) pH y (b) oxígeno disuelto en los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite.

del río Guadalete (Zahara-El Gastor, Bornos y Arcos), así como los de la cuenca del río Majaceite (Hurones y Guadalcaçin) para el período de estudio comprendido entre los años 1991 y 1998. Así mismo se recogen los valores medios ( $V_m$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) por parámetro y para cada cuenca. 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.

#### 4.3.1. Parámetros analizados "in situ"

Los parámetros determinados "in situ" fueron: temperatura, conductividad, pH y oxígeno disuelto. La temperatura influye en la solubilidad de las sales y gases, en la conductividad eléctrica, en el origen del agua y de posibles mezclas, además de afectar a la mayoría de los procesos biológicos que tienen lugar en un ecosistema como los embalses. Los valores medios de temperatura más altos se registraron en los pantanos de la cuenca del Guadalete obteniéndose una media de 19,7 °C (**Tabla 3**) entre sus tres embalses frente a 18,7 °C de los de la cuenca del río Majaceite. Tras un estudio pormenorizado para cada embalse,

Tabla 3

	EMBALSES DE LA CUENCA DEL RÍO GUADALETE (Valores medios, período 1992 - 1998)			EMBALSES DE LA CUENCA DEL RÍO MAJACEITE (Valores medios, período 1991 - 1998)			Reglamentación Técnico-Sanitaria (R.D. 1138/1990)		
	Zahara- El Gastor	Bornos	Arcos	(Vm ± s)	Hurones	Guadalcaçin	(Vm ± s)	Nivel Guía	Concentración Máxima Admisible
<b>Caracteres organolépticos</b>									
Turbidez (U.N.F.)	2,56	3,17	4,15	3,29 ± 0,80	2,00	2,71	2,36 ± 0,502	1	6
<b>Caracteres fisico-químicos</b>									
Temperatura (°C)	21,1	20,0	18,1	19,7 ± 1,52	19,8	17,6	18,7 ± 1,556	12	25
pH (Unidad pH)	8,06	7,86	8,00	7,97 ± 0,10	7,94	7,94	7,94 ± 0,0	6,5 ≤ pH ≤ 8,5	9,5
Conductividad (µS.cm <sup>-1</sup> )	1852	1530	1516	1632 ± 190,07	545	947	746 ± 284,257	400	-
Cloruro (mg/L Cl <sup>-</sup> )	383	247	245	291 ± 79,103	49	138	93 ± 62,933	25	-
Sulfatos (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	224	311	326	287 ± 55,07	83	182	132 ± 70,0	25	250
Alcalinidad total (mg/L HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	147	135	114	132 ± 16,703	126	142	134 ± 11,314	-	-
Silice (mg/L SiO <sub>2</sub> )	5,24	5,44	7,38	6,02 ± 1,182	1,46	3,80	2,63 ± 1,655	-	-
Calcio (mg/L Ca <sup>2+</sup> )	118	132	141	130 ± 11,590	64	90	77 ± 18,385	100	-
Magnesio (mg/L Mg <sup>2+</sup> )	35	39	40	38 ± 2,646	15	24	19 ± 6,364	30	50
Sodio (mg/L Na <sup>+</sup> )	196	141	125	154 ± 37,242	31	93	62 ± 43,841	20	150
Dureza total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	429	488	519	478 ± 45,720	218	321	269 ± 72,832	-	-
Residuo seco (mg/L)	278	495	524	432 ± 134,441	166	256	211 ± 63,640	-	1500
<b>Caracteres relativos a sustancias no deseables</b>									
Oxígeno disuelto (mg/L O <sub>2</sub> saturación)	8,5	7,8	7,9	8,1 ± 0,379	7,9	8,4	8,1 ± 0,354	-	-
Nitratos (mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	3,22	5,26	4,32	4,27 ± 1,021	1,79	3,05	2,42 ± 0,891	25	50
Nitritos (mg/L NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0,11	0,13	0,07	0,10 ± 0,031	0,05	0,06	0,06 ± 0,007	-	0,1
Amonio (mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,26	0,33	0,33	0,31 ± 0,040	0,47	0,34	0,41 ± 0,092	0,05	0,5
Oxidabilidad (mg/L O <sub>2</sub> )	3,66	4,4	4,6	4,22 ± 0,495	2,9	4,6	3,75 ± 1,202	2	5
Hierro (mg/L Fe)	68,45	126,08	86,86	93,80 ± 29,435	56,32	128,31	92,32 ± 50,905	50	200
Manganeso (µg/L Mn)	119	143	130	131 ± 12,183	40	153	96 ± 79,585	20	50
Fósforo (µg/L P)	98	139	180	139 ± 41,0	132,53	134,99	133 ± 1,739	400	5000

(Vm ± s): Valor medio ± desviación estándar.

Tabla 3. Índices estadísticos de los parámetros de control de calidad de los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite, período 1991 - 1998.



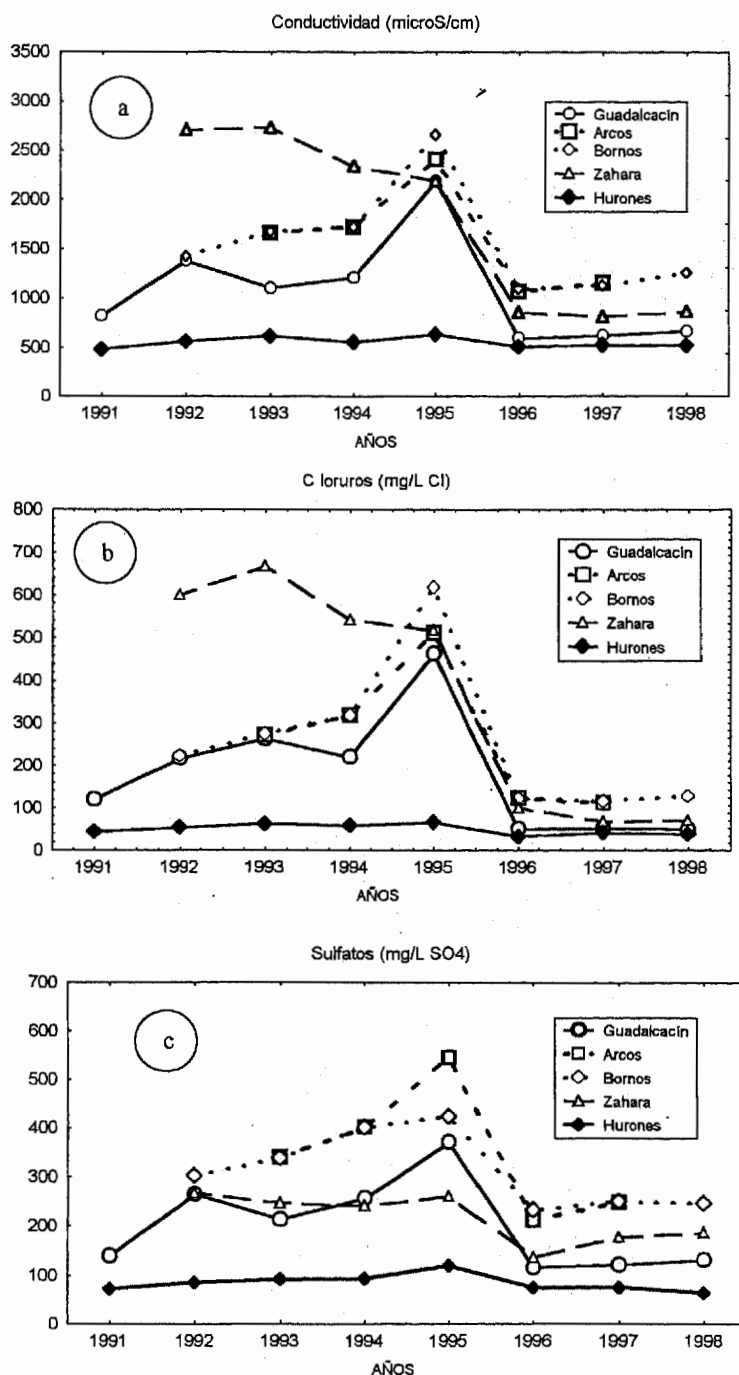


Figura 3. Evolución temporal de los valores medios de (a) conductividad y (b) cloruros y (c) sulfatos en los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite.

cabe destacar algunos valores máximos puntuales registrados en Zahara-El Gastor (39,6 °C) y Bornos (39,9 °C) en los meses de verano del año 1995 en que la sequía se había prolongado tanto que el nivel de agua embalsada era ínfimo; en Arcos, en ese mismo período la temperatura máxima fue de 26,8 °C, lo

cual es lógico al tratarse de un contraembalse que siempre ha tenido mayor porcentaje de agua que los anteriores. También se observaron temperaturas extremas alcanzadas en los embalses de Guadalcacín (32,6 °C) y Los Hurones (36,5 °C).

La conductividad es un parámetro relacionado con el conjunto de

iones (y por tanto de sales) del agua, por lo que no es específico de una especie concreta, sino globalizador del conjunto de iones. En la **Tabla 3** se observa una gran diferencia entre los embalses de ambas cuencas, presentando las aguas del Guadalete niveles medios de conductividad muy superiores a las de la cuenca del Majaceite. Estos datos varían entre 1500  $\mu\text{S/cm}$  en Bornos y Arcos hasta 1852  $\mu\text{S/cm}$  para Zahara-El Gastor, el cual presentó un valor máximo de 3690  $\mu\text{S/cm}$ , lo que superó el límite establecido por la DIRECTIVA 98/83/CE relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano (2500  $\mu\text{S/cm}$ ) (Rodríguez, 2001.d). En general, estos embalses presentan un grado de mineralización excesivo según el valor de la conductividad (Pérez, 1999). Datos bibliográficos indican que el curso medio del río Guadalete discurre por una zona representativa del Mioceno superior durante el cual el área estaba ocupada por un mar (Gutiérrez y col., 1991), lo cual puede justificar el alto contenido en sales de las aguas de sus embalses. Por el contrario los niveles medios de conductividad en Los Hurones (545  $\mu\text{S/cm}$ ) es el menor de todos, seguido de Guadalcacín (947  $\mu\text{S/cm}$ ). Según la evolución temporal (**Figura 3.a**), se observa un aumento gradual de los valores de conductividad según el siguiente orden: embalse de los Hurones, Guadalcacín, Arcos, Bornos y Zahara-El Gastor, que además aumentaron sustancialmente durante el año 1995 debido al escaso nivel de agua embalsada mostrado en la **Tabla 2**. Posteriormente, tras las lluvias torrenciales de 1996, los embalses recuperaron los niveles normales de conductividad.

La concentración del ion hidrógeno en las aguas naturales tiene una gran importancia en todas las reacciones químicas asociadas con la formación, alteración y disolución de minerales. La **Tabla 3** presenta valores de pH en torno a 8,00 para los embalses de Zahara-El Gastor y Arcos y un poco menores

para los tres restantes, siempre inferiores a las 9,5 unidades de pH reglamentadas como concentración máxima admisible. Sin embargo atendiendo a la evolución temporal de este parámetro (Figura 2.a.), se observa en todos los embalses el mismo comportamiento: un aumento considerable del valor medio durante el año 1994 para descender bruscamente en 1995. Este descenso ocurre en el año 1995, de mayor sequía, y menor contención de agua embalsada, pudiendo ser debido a los procesos de nitrificación (Poch, 1999) que tienen lugar durante la escasez de agua acumulada, así como a la emisión de CO<sub>2</sub> procedente de los procesos de biodegradación de la materia orgánica presente (Sánchez, 1994). Uno de los parámetros indicativos 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 9, aumenta en el año 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 a partir del año 1996 quedando el pH de Guadalcaçin por encima del de Los Hurones.

Uno de los indicadores de calidad de agua más utilizado es el oxígeno disuelto pues participa en muchos procesos que tienen lugar en el seno del medio acuático. Así, el funcionamiento de determinadas comunidades de peces por debajo de 5 mg/L O<sub>2</sub> puede resultar afectado y valores inferiores a 2 mg/L O<sub>2</sub> provocan la muerte de los mismos (Poch, 1999). Los datos ofrecidos por la Tabla 3 muestran concentraciones medias de oxígeno disuelto en torno a 8,1 mg/L O<sub>2</sub> para todos los pantanos indicativo de aguas de buena calidad. Según la Figura 2.b. se observa una evolución anual del contenido en oxígeno disuelto para todos los embalses comprendido entre 5 y 10 mg/L, siendo los años 1994, y particularmente 1995 para el pantano de

Bornos, los de menor concentración registrada, debido fundamentalmente al escaso nivel de agua acumulada.

La turbidez es un parámetro determinado en aguas naturales que procede de la materia coloidal (arcilla, fragmentos de roca, sustancias de desecho, etc.) erosionada y trans-

portada por los ríos en su recorrido; también puede proceder de las aportaciones de fibras vegetales que son arrastradas por el río, así como de los microorganismos que viven en su seno (Poch, 1999). Las aguas embalsadas en las cuencas de estudio presentan una turbidez muy parecida sin llegar a alcanzar la concentra-

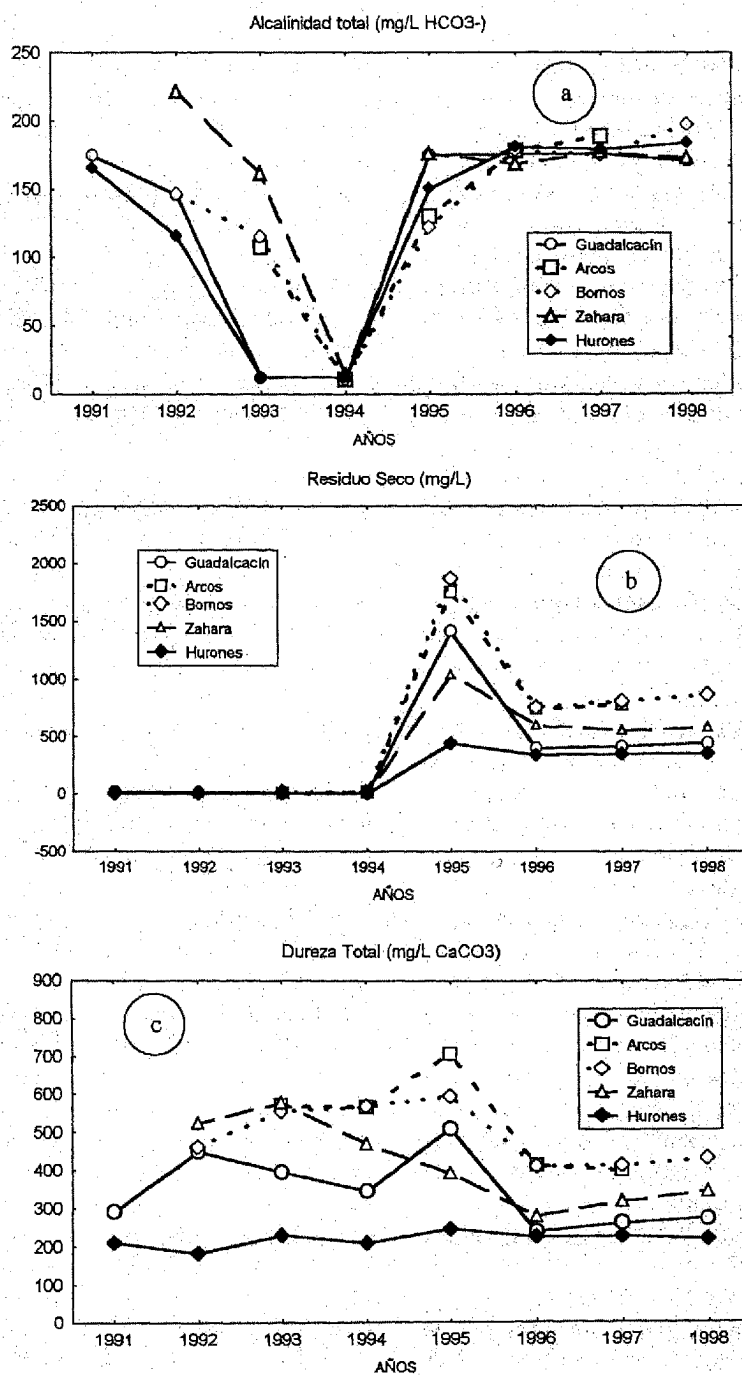


Figura 4. Evolución temporal de los valores medios de (a) alcalinidad total (b) residuo seco y (c) dureza total en los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite.

ción máxima admisible vigente según la Reglamentación Técnico-Sanitaria (6 U.N.F.), lo que significa que son aguas claras sin mucha presencia de sólidos en suspensión. No obstante los embalses de Los Hurones y Guadalcaçín presentan un valor medio menor que los de la cuenca del Guadalete, para el período estudiado, (2,36 U.N.F. frente a 3,29 U.N.F.) según la **Tabla 3**.

#### 4.3.2. Contenido salino

El contenido salino está caracterizado por los valores de parámetros tales como, cloruros, sulfatos, alcalinidad total, residuo seco, sodio, magnesio y calcio y que además se relacionan con la conductividad. La evolución de estos parámetros se muestra en las gráficas de la **Figura 3 y 4**, y a excepción de la alcalinidad total, todos muestran la similitud de presentar valores bastante altos en el año de mayor sequía.

Al igual que para la conductividad, los niveles de cloruros y sulfatos son superiores para las aguas de la cuenca del Guadalete, además de presentar la misma evolución temporal mostrando incrementos de concentración importantes en el año 1995.

Las aguas naturales tienen contenidos muy variables en cloruros dependiendo de las características de los terrenos que atraviesen. El nivel en cloruros no suele plantear problemas de potabilidad a las aguas de consumo pero en concentraciones superiores a 200 mg/l no resulta aconsejable en casos de hipertensión o de problemas renales. Se recomienda 50 mg/l para el consumo diario, por lo que se puede considerar que en función de los niveles de cloruros encontrados en estos embalses, el consumo no sería recomendable. Las concentraciones medias de cloruros para los embalses del Guadalete presentan valores medios en torno a 291 mg/L Cl, por el contrario los niveles en los embalses del Majaceite son inferiores, 138 mg/L Cl para Guadalcaçín y 49 mg/L para Los Hurones que es el de

menor contenido salino. Atendiendo al comportamiento temporal (**Figura 3.b.**), éste es análogo a la conductividad (**Figura 3.a.**). Así todos los pantanos incrementan la concentración de cloruros en el año 1995 y disminuyen a partir de las precipitaciones de 1996.

El contenido de sulfatos no suele presentar problemas de potabilidad en las aguas de consumo, pero contenidos superiores a 300 mg/l pueden ocasionar trastornos gastrointestinales en los niños. Se sabe que los sulfatos de sodio y magnesio pueden tener acción laxante, por lo que no es deseable un exceso de los mismos en las aguas de bebida. La cantidad máxima para el consumo habitual es de 50 mg/l, mientras que la concentración máxima admisible establecida por la Reglamentación Técnico-Sanitaria, es de 250 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$ , valor superado por los embalses de Bornos y Arcos (**Tabla 3**), mientras que para Zahara-El Gastor y ambos pantanos de la cuenca del Majaceite los niveles son inferiores. En cuanto a su evolución (**Figura 3.c.**), los valores más altos se registraron en Arcos seguido de Bornos y Guadalcaçín, alcanzándose un máximo en el año 1995 para todos los pantanos y descendiendo en los años posteriores.

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 ( $\text{HCO}_3$  mg/L). 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 paso de los carbonatos presentes en las rocas en forma insoluble a hidrogenocarbonatos que son solubilizados. Estos fenómenos tienen bastante importancia sobre todo en las aguas subterráneas, no así en aguas embalsadas. La evolución seguida por este parámetro (**Figura 4.a.**) es la misma para los

tres embalses de la cuenca del río Guadalete puesto que sufre una disminución drástica en el año 1994, mientras que dicha disminución ocurrió durante los años 1993 y 1994 en los pantanos del Majaceite, previsiblemente debida a la emisión de  $\text{CO}_2$  que ejerce la abundancia de plancton como consecuencia del bajo nivel de los embalses y las escasas precipitaciones. Este aumento de  $\text{CO}_2$  provoca el aumento de la unidad de pH al tratarse de aguas basificadas, como se observa en la **Figura 2.a.** 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.

El residuo seco puede afectar sensiblemente a la calidad de un agua y por lo tanto limitar sus usos. Las aguas altamente mineralizadas, con un elevado contenido en residuo seco, son peor aceptadas para la bebida (comunican sabor al agua y pueden producir irritación gastrointestinal), usos domésticos y algunos usos industriales específicos. Las aguas de débil o muy débil mineralización son las adecuadas para personas con problemas renales o para comidas infantiles. De igual forma se observa una enorme diferencia entre los bajos niveles que presenta el embalse de Los Hurones (166 mg/L) frente al resto de los pantanos, con niveles de residuo seco superiores a 250 mg/L y hasta de 524 mg/L en el caso del embalse de Arcos, que además presentó el mayor nivel de turbidez. Todos se pueden considerar como de débil mineralización, según la Directiva 80/777/CE, además de que ninguno alcanza la concentración máxima admisible reglamentada en 1500 mg/L. Según la **Figura 4.b.** se observa un aumento sustancial de la concentración de residuo seco en 1995 para todos los embalses y una estabilización posterior a niveles próximos a 600 mg/L. Esta evolución es la misma que siguen las variables conductividad, cloruros y sulfatos.

La dureza total de las aguas es un componente con bastante significación en su calidad fisicoquímica. Aunque no se conocen con claridad los efectos de las aguas duras y blandas sobre el organismo de los consumidores, ciertos estudios epidemiológicos parecen apuntar a que la incidencia de enfermedades cardiovasculares es mayor en las zonas de consumo de aguas blandas (Gimeno y col., 1990). Por otra parte, las aguas blandas son agresivas y facilitan la disolución de metales de las cañerías provocando, entre otras

enfermedades, saturnismos (intoxicación por plomo) en aquellos abastecimientos en que aún conservan tuberías antiguas de plomo. Las aguas con más de 600 mg  $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{L}$  (bicarbonatadas) convienen a personas con gastritis o acidez de estómago. Los valores medios de dureza total encontrados en los embalses del Guadalete rondan los 478 mg/L  $\text{CaCO}_3$  (Tabla 3) tratándose de aguas muy duras, mientras que para los del Majaceite 269 mg/L  $\text{CaCO}_3$  que corresponde a aguas duras. La dureza total es otro de los paráme-

tros que aumenta su concentración durante el año 1995, y disminuye con la avenida de las lluvias.

Los niveles de sodio, magnesio y calcio se representan en los gráficos de la Figura 5. 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. La diferencia entre ambas cuencas en cuanto a la concentración de sodio es grande, 154 mg/L Na para las aguas del Guadalete que supera la concentración máxima admisible de 150 mg/L Na, frente a 62 mg/L Na para el Majaceite, siendo de 31 mg/L Na el contenido sódico en el pantano de los Hurones (cercano al nivel guía reglamentado en 20 mg/L Na). En la Figura 5.a. se presenta la evolución de los niveles de sodio, observándose que sigue la misma tendencia de incrementarse en 1995 y disminuir 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 en la cuenca del Guadalete se aproximan a 38 mg/L Mg y para el Majaceite 19 mg/L Mg, en ningún caso se supera la concentración máxima admisible reglamentada (50 mg/L Mg). En la Figura 5.b. se observa la evolución temporal, de la misma forma los embalses de Arcos y Bornos mantienen los mayores contenidos magnésicos, presentando los valores más altos en el año 1995 en todos los embalses y disminuyendo con las lluvias.

El calcio es un catión similar al anterior pero más abundante en el agua, estando asociado a la forma de hidrogenocarbonatos cuando proviene de rocas calcáreas (calizas y calcitas) y al sulfato en zonas de yesos; es el principal responsa-

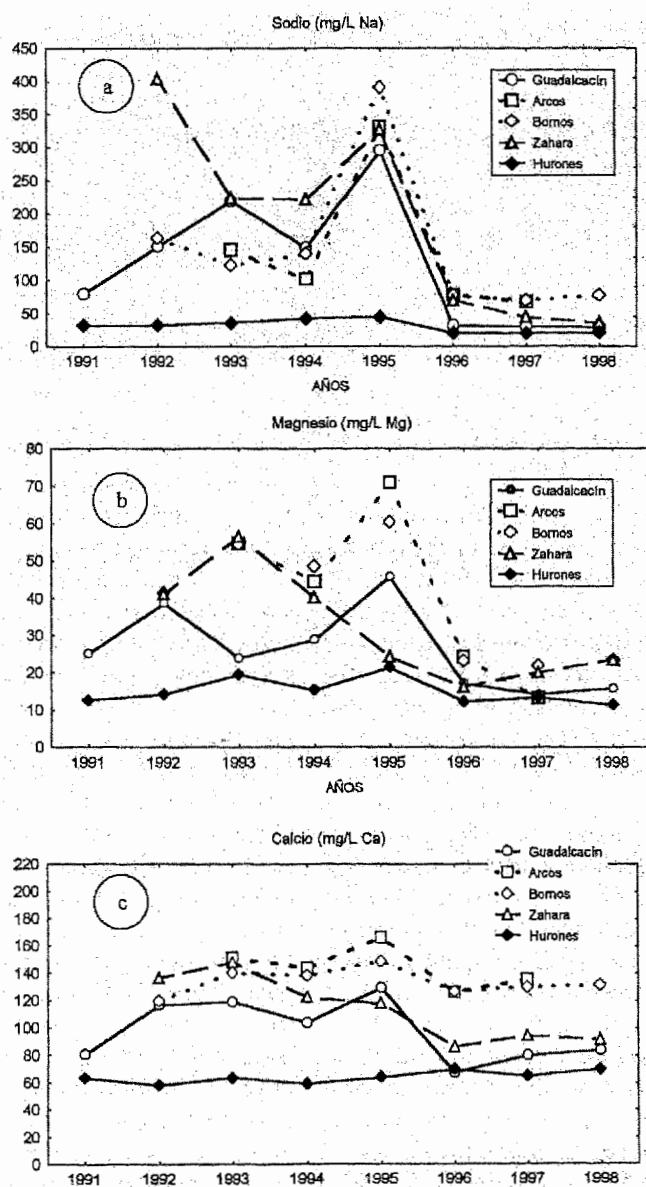


Figura 5. Evolución temporal de los valores medios de (a) sodio y (b) magnesio y (c) calcio en los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite.

ble de la denominada "dureza" del agua. Los niveles medios de calcio son bastante más altos para los embalses del Guadalete (130 mg/L Ca) superando el nivel guía (100 mg/L Ca). En este caso se sigue observando el aumento del contenido salino en el año 1995 y la mejora de la calidad con la llegada de las precipitaciones.

Otros elementos a considerar son los metales hierro y manganeso por los problemas que pueden ocasionar en los tratamientos posteriores de potabilización, además son considerados como caracteres relativos a sustancias no deseables. Los niveles reglamentados de manganeso (concentración máxima admisible de 50 µg/L Mn) se vieron superados por todos los embalses excepto el de Los Hurones (Tabla 3). En la Figura 6.a. se observa que los valores medios de manganeso recogidos entre 1992 y 1994 para todos los embalses son muy diferentes. A partir de 1995 se homogeneizan acercándose a valores próximos a cero. El embalse de Los Hurones es el que presenta las menores concentraciones de manganeso.

Para el caso del hierro, las mayores concentraciones medias anuales se presentan en el embalse de Guadalcacín, seguido del de Bornos y Arcos y por último los embalses de Zahara-El Gastor y Los Hurones, pero en ningún caso se superó la concentración máxima admisible establecida en 200 µg/L Fe. En la Figura 6.b. se observa un aumento sustancial en el año 1993 y una posterior disminución de la concentración hasta niveles cercanos a cero a partir del año 1995.

#### 4.3.3. Contenido en 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 fitoplanc-

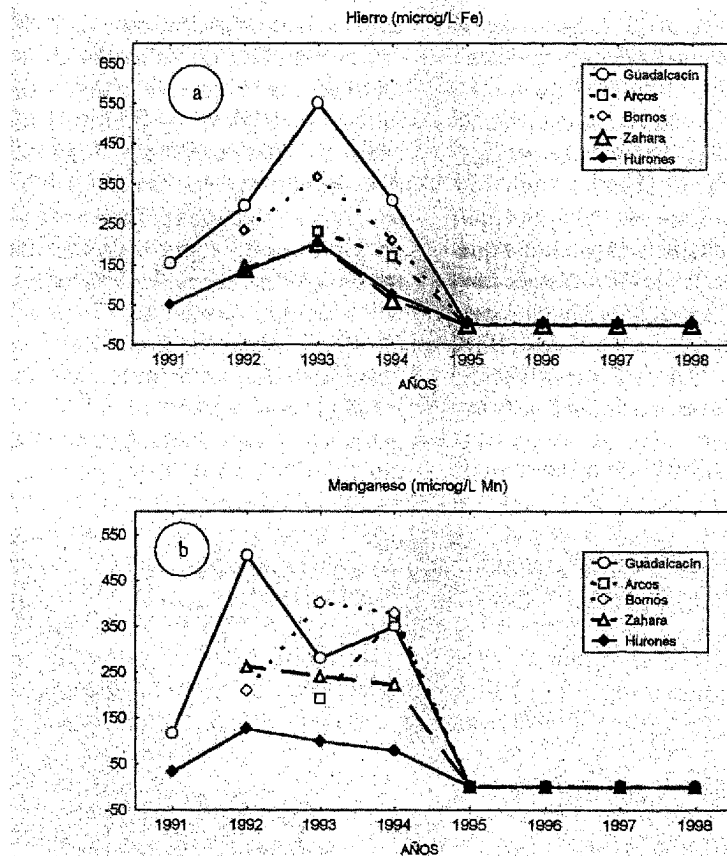


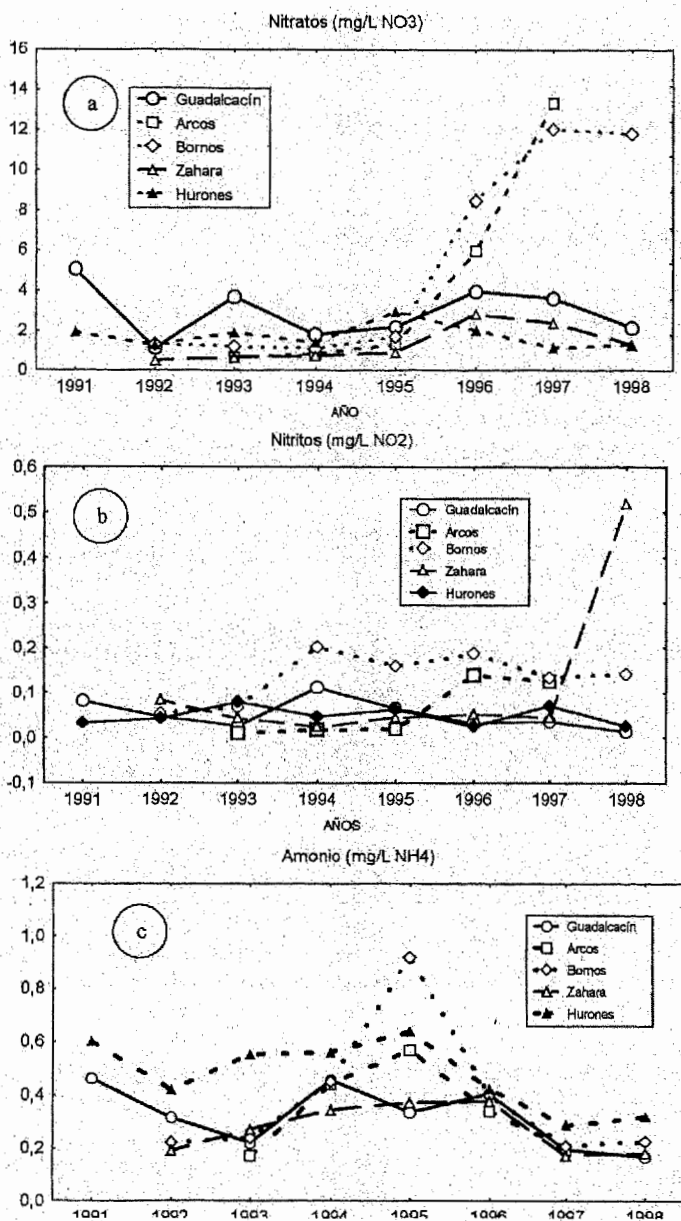
Figura 6. Evolución temporal de los valores medios de (a) hierro y (b) manganeso en los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite.

ton. El lixiviado de las tierras de labor y las aguas residuales vertidas a este tipo de ecosistemas son las desencadenantes de este proceso.

En los embalses destinados al abastecimiento de agua potable, 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 problemas durante la explotación (Vidal, 1992). Estos problemas hacen necesario controlar la presencia de

los nutrientes principales (nitrógeno en sus diferentes formas y fósforo) en el agua embalsada.

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. En el caso de lagos o embalses, los niveles de nitrato deben ser especialmente controlados para evitar el crecimiento excesivo de algas, con el correspondiente problema de eutrofia. Los niveles de nitrato encontrados en estos embalses no alcanzan el nivel guía (25 mg/L NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). El embalse de Bornos presenta la mayor concentración y a partir de las lluvias de 1996, incrementa los niveles de nitratos hasta alcanzar valores medios entre 12 y 14 mg/L al igual que le ocurre al pantano de Arcos, tal y como se observa en la Figura 7.a., lo cual se puede explicar por el arrastre



reglamentada (0,5 mg/L NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), aunque cabe destacar que el embalse de los Hurones es, en este caso, el que presenta la mayor concentración media (0,47 mg/L NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). 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 disminuyeron.

Cuando en un ecosistema de aguas poco mineralizadas se introducen aguas ricas en fósforo, se desencadena una rápida proliferación de algas en el sistema, por el contrario, en los casos en que las aguas están mineralizadas se favorece la precipitación del fósforo (Medina, 1999). Por este motivo se podría concluir que en estos embalses los niveles mineralógicos son bastante altos por lo que los procesos de eutrofización se ven poco favorecidos. Los niveles de fósforo son muy parecidos para los embalses de ambas cuencas (Tabla 3), excepto Zahara-El Gastor cuyos niveles son menores, aunque en ningún caso se alcanza, ni siquiera, el nivel guía legislativo en 400 µg/l P. Atendiendo a la evolución temporal observada en la Figura 8.a el pantano de Guadalcaçin presentó un máximo en el año 1993 de casi 1500 µg/L P. El valor medio se encuentra sobre 135 µg/L P, quedando bastante lejos de la concentración máxima admisible (5000 µg/L P).

El último parámetro considerado como nutriente es la sílice, encontrándose los mayores valores en el pantano de Arcos (7,38 mg/L SiO<sub>2</sub>) mientras que los menores se obtuvieron en Los Hurones (1,46 mg/L SiO<sub>2</sub>). Esto mismo se comprueba en la Figura 8.b. referente a la evolución temporal.

**4.3.4. Contenido en materia orgánica**

Algunos compuestos orgánicos son la causa del color y del mal sabor del agua ya que favorecen el de-

de compuestos nitrogenados por las aguas de escorrentía.

Los valores medios de nitritos alcanzan la concentración máxima admisible (0,1 mg/L NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), en los embalses de Zahara-El Gastor y Bornos (Tabla 3). Los niveles de nitritos deben vigilarse en el suministro domiciliario pues niveles altos pueden provocar la enfermedad de la metahemoglobinemia o enfermedad de la sangre azul que afecta principalmente a la infancia. En la gráfica de la Figura 7.b. se observa

que el embalse de Bornos tiene las mayores cotas entre 1993 y 1998, a excepción de un valor máximo que presenta Zahara-El Gastor en 1997.

La presencia de grandes cantidades de nitrógeno amoniacal indica, generalmente, una contaminación reciente por materias orgánicas en descomposición. El amoníaco favorece el desarrollo de ciertas bacterias, las cuales, a su vez, producen sabores desagradables. Ninguno de los embalses estudiados supera la concentración máxima admisible

sarrollo de organismos, como las algas, hongos y bacterias, que se fijan en las paredes de las tuberías y secretan sustancias malolientes. Pueden producir compuestos de olor desagradable al combinarse con el cloro añadido al agua para la desinfección. Un agua rica en materias orgánicas es siempre sospechosa de contaminación bacteriológica o química. La concentración de materia orgánica en todos los embalses, expresada como oxidabilidad al permanganato potásico, no llega a alcanzar la concentración máxima admisible ( $5 \text{ mg/L O}_2$ ), lo cual significa que se trata de aguas de calidad. No obstante cabe destacar el embalse de Los Hurones como el de menor contenido en materia orgánica, con un contenido medio de  $1,79 \text{ mg/L O}_2$  durante el período estudiado, tal y como se observa en la Figura 9. En la misma se observa que todos los pantanos aumentan los niveles de oxidabilidad en el año 1995, lo que se traduce en un empeoramiento de la calidad de las aguas por la sequía pluviométrica. Siendo Bornos, seguido de Arcos y Guadalcacín en los que más aumentó este parámetro. Estos valores se restablecieron con la avenida de las lluvias de 1996.

**5. 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 de los embalse de Guadalcacín, Zahara-El Gastor, Bornos y Arcos presentan un grado de mineralización mayor.

2. En todos los embalses se observa un aumento brusco de la concentración de los parámetros relacionados con el contenido salino (conductividad, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio, dureza total y residuo seco) en el año 1995, lo que se traduce en un empeoramiento de la calidad de las aguas. El mayor contenido mineralógico se pre-

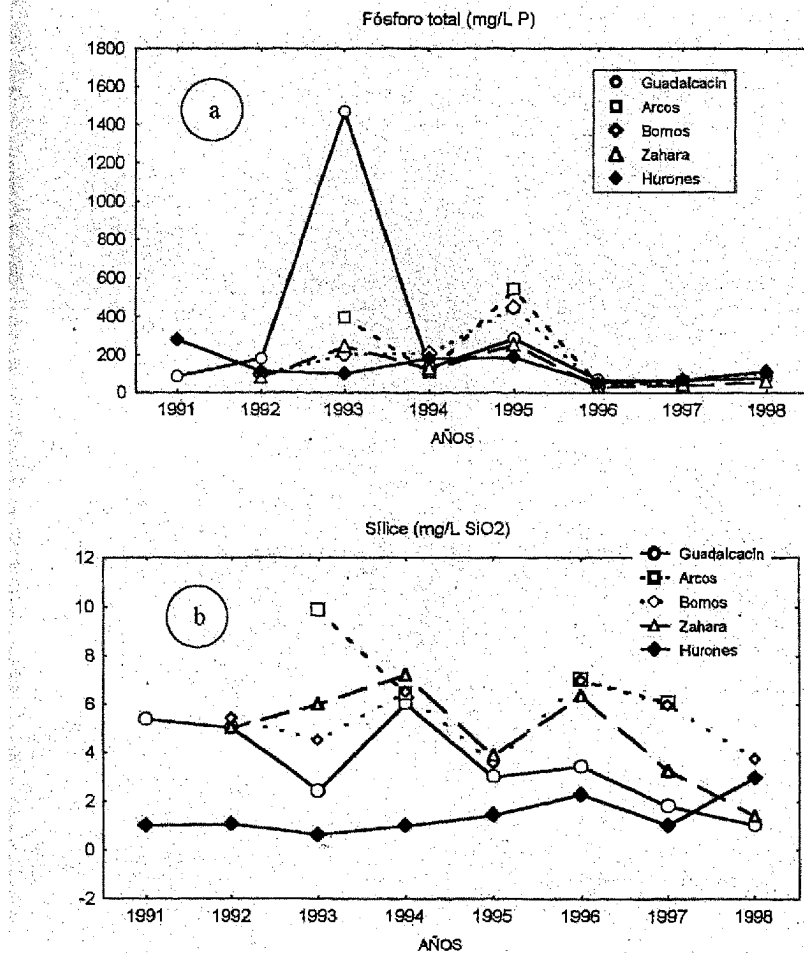


Figura 8. Evolución temporal de los valores medios de (a) fósforo total y (b) sílice en los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite.

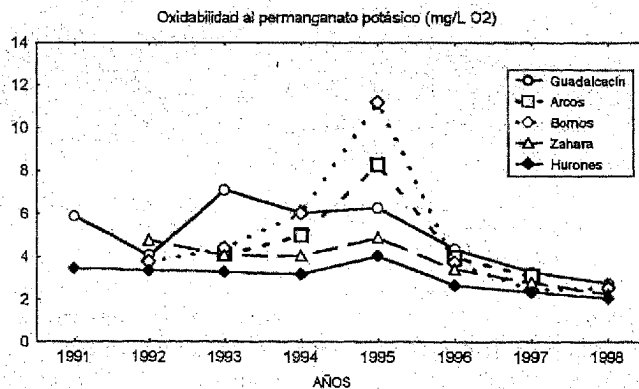


Figura 9. Evolución temporal de los valores medios de oxidabilidad al permanganato potásico en los embalses de la cuenca de los ríos Guadalete y Majaceite.

sentó en los embalses de la cuenca del río Guadalete frente a los del Majaceite; y en orden de amplitud fueron: Bornos y Arcos, Zahara-El Gastor, Guadalcacín y finalmente Los Hurones.

3. En el año 1995 acontecieron, en todos los embalses, diferentes procesos físicoquímicos que contribuyeron al empeoramiento de la calidad de las aguas. En primer lugar la bajada de la unidad de pH debido a la emisión de

CO<sub>2</sub> provocado tanto por la abundancia de plancton durante los procesos de eutrofización por la escasez de agua embalsada como por la presencia de altas cantidades de materia orgánica que por biodegradación consumieron oxígeno y desprendieron CO<sub>2</sub>. Además se corrobora con la presencia de grandes cantidades de nitrógeno amoniacal, indicativo de una contaminación reciente por materias orgánicas de las aguas al encontrarse más cerca del vaso del pantano, basificándose las aguas por todos estos fenómenos.

4. 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. A partir de este año las aguas restablecieron su calidad habitual con la llegada de las lluvias.

5. Los niveles mineralógicos en los embalses de las cuencas de los ríos Guadalete y Majaceite son bastante altos, por lo que los procesos de eutrofización se ven poco favorecidos, a excepción del embalse de Los Hurones en el que estos niveles son menores, por lo que sería el más propenso a la proliferación de fenómenos eutróficos.

6. La calidad de las aguas de los embalses de Bornos y Arcos es muy similar en cuanto al contenido salino (conductividad, cloruros, sulfatos, alcalinidad total, calcio, magnesio, sodio, dureza total y residuo seco), al presentar concentraciones muy parecidas, motivado por su proximidad geográfica y la naturaleza de los suelos.

## 6. 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 Zahara-El Gastor, Bornos, Arcos, Guadalcaçín y los Hurones desde 1991.

## 7. 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 80/778/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] FERRARO GARCIA, F.; GAMIZ LOPEZ, A.; LUCENA RODRIGUEZ, J.; VERDE CASANOVA, J.E. (1999). "Agua, empleo y riqueza en la cuenca del Guadalquivir". Plataforma del Guadalquivir. Consejería de Obra Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.
- [6] GARCIA GONZALEZ, L. (1995). "Guía de los embalses de Extremadura". Junta de Extremadura. Consejería de Cultura y Patrimonio. Cuadernos Populares nº 51. Editora Regional de Extremadura.
- [7] GIMENO ORTIZ, A.; JIMÉNEZ TOMANO, R.; BLANCO ARETIO, M.; CASTILLO MORENO, A. (1990). "Estudio de la relación entre algunos componentes fisicoquímicos en el agua de consumo, hipertensión y muerte por enfermedades cardiovasculares". San. Hig. Púb. 64, (7-8), 377-385.
- [8] GONZALEZ QUESADA, R.; GONZALEZ CARBALLO, J.A. (1995). "Aguas Potables", ponencia del libro "La calidad de las aguas continentales españolas. Estado actual e investigación". Geoforma-Ediciones.
- [9] GUTIÉRREZ MAS, J.M. (1982). "Itinerarios geológicos por la provincia de Cádiz". Servicio de publicaciones de la Universidad de Cádiz.
- [10] GUTIÉRREZ MAS, J.M.; MARTIN ALGARRA, A.; DOMINGUEZ BELLA, S.; MORAL CARDONA, J.P. (1991). "Introducción a la geología de la provincia de Cádiz". Servicio de publicaciones de la Universidad de Cádiz.
- [11] MEDINA VELA, M.; DIAZ BORREGO, M.D.; PUENTE GUIASO, M.L.; BURRACO BARRERA, C. (1999). "Limnología del embalse del Huesna". Tecnología del Agua, 194: 25 – 31.
- [12] O. de 01-12-1981, 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).
- [13] O. de 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.
- [14] O. de 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. (BOE nº 205, de 27/08/1999).
- [15] PÉREZ LOPEZ, J.A.; (1999). "Estudio sanitario del agua". Editorial Universidad de Granada. Motril.
- [16] POCH, M. (1999). "Las calidades del agua". Rubes Editorial, S.L. Barcelona.
- [17] PRATS VILA, J.L. (1994). "La gestión del abastecimiento de aguas en épocas de sequía". Jornadas Técnicas: biosólidos y aguas depuradas como recursos. San Feliu de Guixols, Costa Brava, Girona.
- [18] QUERALT, R. (2000). "Hidrograma para la representación de la calidad y contaminación de las aguas subterráneas". Tecnología del Agua, 197: 20 – 29.
- [19] R. D. 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. de 20/09/1990).
- [20] Real Decreto 1664/1998, de 24-7-1998, por el que se aprueba los Planes Hidrológicos de cuenca (BOE nº 191, de 11/08/1998).
- [21] RODRIGUEZ BARROSO, M.R.; VIDAL VALDERAS, L.; SALES MARQUEZ, D.; QUIROGA ALONSO, J.M. "Evolución de las aguas de los embalses de la provincia de Cádiz durante el último período de sequía". Tecnol. Ambiente, Nº 110, Año XI: 43 -50.
- [22] RODRIGUEZ BARROSO, M.R.; VIDAL VALDERAS, L.; SALES MARQUEZ, D.; QUIROGA ALONSO, J.M. "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". Tecnología del Agua, 217: 36-49.
- [23] RODRIGUEZ BARROSO, M.R.; VIDAL VALDERAS, L.; SALES MARQUEZ, D.; QUIROGA ALONSO, J.M. "Calidad del agua de la red de suministro de la localidad de Cádiz: Influencia de la sequía en el periodo 1992-1998". Ingeniería del Agua. Vol. 8, Nº 2, junio 2001.
- [24] RODRIGUEZ BARROSO, M.R.; VIDAL VALDERAS, L.; SALES MARQUEZ, D.; QUIROGA ALONSO, J.M. "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.
- [25] SANCHEZ, M. D. (1994). "Estudio de calidad de las aguas del río Turia en el entorno de Teruel: II.- Salinidad del agua y clasificación según la composición de iones mayoritarios". Tecnología del Agua, nº 127, pp. 9 – 15.
- [26] 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.