

**ENCOMIENDA DE GESTIÓN PARA DESARROLLAR DIVERSOS
TRABAJOS RELACIONADOS CON EL INVENTARIO DE
RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS Y CON LA
CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS COMPARTIDOS ENTRE
DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS**



**DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA
COMPARTIDAS ENTRE DEMARCACIONES HIDROGRÁFICAS**

Guadiana-Tinto, Odiel y Piedras–Guadalquivir

Informe nº 18 (SIERRA DE ARACENA)

22. Sierra de Aracena

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA

Pág.

PRESENTACIÓN

1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO	1
2. ANTECEDENTES	3
3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	7
3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	7
3.2. GEOMETRÍA, ESTRUCTURA Y LÍMITES.....	10
3.3. GEOMORFOLOGÍA. FORMAS DE INFILTRACIÓN PREFERENCIAL	11
3.4. FORMACIONES HIDROGEOLÓGICAS.....	12
3.5. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL. RELACIÓN RÍO-ACUÍFERO.....	15
3.6. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA. HIDRODINÁMICA.....	16
3.7. PIEZOMETRÍA EN RÉGIMEN NATURAL E INFLUENCIADO	26
3.8. PARÁMETROS HIDRÁULICOS E HIDROGEOLÓGICOS	28
3.9. TRANSFERENCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DESDE O HACIA OTRAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA	29
3.10. INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS	29
3.11. USOS DEL AGUA	29
4. CLIMATOLOGÍA	31
4.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	31
4.2. ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL	32
5. RECARGA DE ACUÍFEROS	39
5.1. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA AUTÓCTONA MEDIANTE EL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO.....	40
5.2. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE APLIS	44
5.3. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE EL CÓDIGO RENATA.....	44
5.3.1. Generación de la malla y periodo de cálculo	46
5.3.2. Módulo de Balance hídrico	47
5.3.3. Módulo de calibración. Modelo de flujo.....	49
5.3.4. Calibración	52
6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS	56
7. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN NATURAL	57
8. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN ALTERADO	59
9. DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	63
10. RESUMEN Y CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS	69

ANEXOS

Anexo I. Balances hídricos mensuales generados por RENATA

El presente documento técnico-científico se integra dentro de los estudios que la Dirección General del Agua ha encargado al CN-Instituto Geológico y Minero de España, a través de una Encomienda de Gestión para desarrollar diversos trabajos relacionados con el Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos y con la Caracterización de Acuíferos Compartidos entre Demarcaciones Hidrográficas.

.

PRESENTACIÓN

Los Planes Hidrológicos del segundo ciclo de planificación, actualmente vigentes, definen las masas de agua subterránea (MASb) dentro de los límites de su propia demarcación, por lo que formal y administrativamente no existen masas de agua subterránea compartidas. Sin embargo, la realidad física de los acuíferos no se ajusta a lo expuesto, ya que masas de agua subterránea contiguas, pero pertenecientes a demarcaciones diferentes, tienen acuíferos conectados hidráulicamente entre sí. En consecuencia, una de las medidas necesarias de coordinación de los Planes Hidrológicos de Cuenca es la determinación de los límites de las masas de agua subterránea compartidas o con continuidad hidrogeológica (MASCH) entre ámbitos territoriales de dos o más planes, así como la distribución de sus recursos hídricos en cada una de las demarcaciones afectadas.

En cumplimiento del Artículo 9.2 del Reglamento de la Planificación Hidrológica, los planes hidrológicos realizaron una propuesta de masas de agua subterránea compartidas con otras demarcaciones. Para la definición de dichas masas de agua y la asignación de sus recursos, se tomó como referencia lo previsto en la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (PHN), que establecía en su Anexo 1 un listado de unidades hidrogeológicas compartidas y su correspondiente asignación de recursos a los distintos ámbitos de planificación. Adicionalmente, algunos planes de cuenca identificaron y propusieron la consideración y evaluación de otras masas de agua subterránea compartidas.

La caracterización y definición de MASCH entre diferentes ámbitos de planificación, posterior a la aprobación del mencionado listado, obligan a una revisión de sus límites y recursos, tanto de las incluidas en dicho documento, como de las identificadas adicionalmente en algunos planes de cuenca.

A juicio de la Dirección General del Agua (DGA) se presenta un panorama global de identificación y caracterización de MASCH bastante heterogéneo, lo que requiere de una coordinación y caracterización que trasciende el ámbito de cada demarcación hidrográfica, y que tiene que ajustarse a los criterios y conocimientos actuales en cuanto a la definición de masas de agua subterránea, planificación y distribución de recursos hídricos. Esta es la razón por la que la DGA, a través de una Encomienda de Gestión, ha encargado al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) la revisión y actualización de las MASCH, así como la distribución de sus recursos en los diferentes ámbitos de planificación.

Para dicho cometido, la DGA indica que los trabajos a realizar deben de partir de la información recogida en los planes hidrológicos del segundo ciclo. A este respecto, el IGME ha analizado las propuestas incluidas en dichos planes y elaborado una metodología común que permite su aplicación a todas las MASCH. Esta metodología se ha justificado técnicamente, al igual que el empleo de otras sistemáticas necesarias para analizar situaciones o escenarios que precisen de un tratamiento excepcional o diferenciado.

Dentro de las recomendaciones que realiza la DGA, está la de prestar especial atención a los casos en los que existan discrepancias con los planteamientos establecidos en los planes hidrológicos de cuenca. También propone que se estudie y se valore la posibilidad de incluir otras MASCH que no se encuentren entre las que se propusieron.

En concordancia con los objetivos perseguidos, esta memoria contempla la definición, caracterización y distribución de los recursos hídricos de la **MASCH Sierra de Arcena**, cuyos límites están definidos por los del acuífero compartidos o con continuidad hidrológica entre

demarcaciones hidrográficas del mismo nombre, integrada por la MASb Aracena (440.001) de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras y con parte de las MASb Aroche-Jabugo (040.019) de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana y Sierra Morena (05.45) de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir, que, por tanto, se encuentran conectadas hidrogeológicamente entre sí, de manera que los resultados que se obtengan se puedan incluir en los diferentes planes hidrológicos afectados de forma coherente y justificada.

1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO

Delimitación de la MASCH

La masa de agua subterránea compartida o con continuidad hidrogeológica (MASCH) denominada en este documento como Sierra de Aracena se encuentra situada en el sector septentrional de la provincia de Huelva y engloba la casi totalidad de la MASb 440.001 Aracena, de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras (DHTOP), el sector oriental de la MASb 040.019 Aroche-Jabugo, de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (DHGu), y una franja del extremo sur occidental de la MASb 05.45 Sierra Morena perteneciente a la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG) (Figura 1.1). Los límites de la MASCH se han establecido sobre la base del funcionamiento hidrogeológico de la MASb del acuífero homónimo, Sierra de Aracena, constituido por materiales carbonatados que tienen continuidad hidrológica entre las tres demarcaciones hidrográficas (IGME, 2006).

La MASb Sierra Morena con más de 4500 km² de superficie es, con diferencia, la más extensa de las tres, seguida por la MASb de Aroche-Jabugo con 272 km². La MASb de Aracena, con una superficie de 64 km², comparte los afloramientos carbonatados permeables, que definen la MASCH Sierra de Aracena, con las otras dos. Dicho de otra forma, el límite entre estas masas de agua subterránea, coincidente con la divisoria hidrográfica, divide en dos varios de estos afloramientos carbonatados, por lo que sus recursos hídricos deben considerarse compartidos entre las tres masas de agua (Junta de Andalucía, 2015).

Es importante señalar que otra formación acuífera próxima, como puede ser considerado el complejo intrusivo de Aroche no debe ser incluido en la MASCH ya que no comparte recursos con otras demarcaciones, forma parte exclusivamente de la DHGu. La formación volcanosedimentaria que separa los afloramientos carbonatados de Sierra de Aracena de los granitos de Aroche son un acuitardo que puede recargar agua pero la transmite mal por lo que no es explotable, es decir no constituye recurso.



Figura 1.1. La MASCH en el esquema de los sistemas de explotación de las Demarcaciones hidrográficas del Tinto, Odiel y Piedras, Guadiana y Guadalquivir (PHTOP, PHGA y PHG, 2015).

La MASCH Sierra de Aracena queda enmarcada, en los respectivos planes hidrológicos de las MASb que lo componen, dentro del denominado Sistema único de explotación de la DHTOP, de los sistemas de explotación Sur y Ardila de la DHGu y del Sistema de Abastecimiento de Sevilla de la DHG (Figura 1.1).

La poligonal envolvente de la MASCH, así definida, se extiende sobre un total de 167 km², de los que 61 km² corresponden a la MASb Sierra Morena, 61 km² a la MASb Aroche-Jabugo y 45 km² a la MASb Aracena. Está íntegramente en la provincia de Huelva y ocupa parte de 17 términos municipales: Alájar, Aracena, Castaño de Robledo, Corteconcepción, Cortelazor, Fuenteheridos, Galaroza, Higuera de la Sierra, Jabugo, La Nava, Linares de la Sierra, Los Marines, Puerto Moral, Santa Ana la Real, Valdelarco y Zufre.

Los relieves que definen la sierra de Aracena están situados en el cuadrante septentrional de la provincia de Huelva, cerca de la Comunidad Autónoma de Extremadura. Conforman una alineación de modestas elevaciones, de dirección aproximada NO-SE, que se extiende 40 km desde las localidades de Cortegana y La Nava hasta las de Higuera de la Sierra y Zufre, en el borde nororiental de la provincia de Huelva. La altitud máxima se localiza en el pico Castaño, a 961 m s.n.m., cerca de Alájar y Fuenteheridos, mientras que la mínima correspondería a los 250 m s.n.m. del valle de la rivera del Huelva, en el extremo oriental.

Estas elevaciones constituyen la divisoria hidrográfica natural entre las 3 demarcaciones hidrográficas mencionadas, todas ellas vertientes al océano Atlántico. Los ejes de drenaje principales son los ríos Caliente y Múrtigas en la zona Norte, la rivera de Huelva en la parte nororiental, y, al Sur, la rivera de Santa Ana y la rivera de Linares, entre otras, que vierten sus aguas al río Odiel.

La Sierra de Aracena se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera “Dehesas de Sierra Morena”, que se extiende a lo largo de 424.000 hectáreas en la parte noroccidental de Andalucía. El área logró este reconocimiento internacional por la UNESCO en 2002. Está considerado lugar representativo de una significativa riqueza natural y cultural del ecosistema Mediterráneo. Además, el espacio ocupado por estos relieves fue declarado Parque Natural en el año 1989 y con 186.687 hectáreas es una de las zonas protegidas más grande de España. El clima es de tipo Mediterráneo templado. Durante los inviernos se produce gran parte de la precipitación. La temperatura media anual es 14,7 °C y la precipitación media es del orden de 800 mm/año. Conforme aumenta la altura y la precipitación, el alcornocal es desplazado por un denso bosque caducifolio de quejigos y melojos, en buena parte suplantado por castaños.

2. ANTECEDENTES

La Sierra de Aracena y Picos de Aroche es una región que se caracteriza por presentar un bajo potencial desde el punto de vista de la abundancia de aguas subterráneas. Los principales materiales con interés acuífero (mármoles y calizas) disponen de poca extensión y continuidad superficial, espesores reducidos o están fuertemente intercalados entre rocas de baja permeabilidad. Ello llevó a que la zona fuera excluida en un primer momento del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS). Sin embargo, por su posición en cabecera de cuenca, las poblaciones de la sierra de Huelva no tienen otra fuente de abastecimiento que las aguas subterráneas. Esta circunstancia motivó, a partir de la década de 1970, el inicio de investigaciones hidrogeológicas en la zona orientadas a resolver problemas locales de abastecimiento. En los fondos documentales del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) hay disponibles más de una treintena de proyectos y estudios técnicos, entre los que destacan los referentes a informes finales de obra de sondeos de investigación y de explotación.

No fue hasta mediados de la década de 1980 cuando el IGME, con la colaboración de la Compañía General de Sondeos S.A. (CGS), efectuó el primer estudio de carácter regional (IGME-CGS, 1986). En el informe titulado “Investigación y evolución de los recursos hidráulicos subterráneos de los sectores norte de las provincias de Huelva, Sevilla y Córdoba”, se indicaban las principales características hidrogeológicas de una serie de pequeños acuíferos aislados, formados por carbonatos y tobas volcánicas, sin comunicación hidrogeológica entre ellos, repartidos por el tercio occidental de Sierra Morena. Además, se evaluaron los recursos hídricos subterráneos asociados a los afloramientos permeables, de cara a su potencialidad desde el punto de vista de explotación. Uno de los sectores considerados fue el denominado “Galaroza - Zufre (Sierra de Aracena)” (Tabla 2.1, columna A), al que se le asignó una superficie de 127 km² de los que 90 km² corresponderían a tobas volcánicas y 37 km² a materiales carbonáticos. En el documento se atribuyó a esta zona unos recursos medios de 15 hm³/año por infiltración directa sobre las formaciones permeables (equivalente al 16,5 % de la lluvia útil; 8,5 % de la precipitación total) y unas salidas totales de 12 hm³/año: 10 hm³/año por manantiales y hacia cursos fluviales y 2 hm³/año como extracciones mediante sondeos y pozos. Dos años más tarde, los acuíferos identificados en el informe previo fueron agrupados bajo la categoría de Unidad Hidrogeológica en el trabajo “Delimitaciones de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e islas baleares y síntesis de sus características”, realizado por el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (SGOP) y el IGME (MOPU-IGME, 1988). La Unidad Hidrogeológica individualizada se denominó “Sierra Morena” (nombre que se ha perpetuado hasta la actual masa de agua subterránea), asignándole el código 05.45 dentro del ámbito de la Cuenca del Guadalquivir (Tabla 2.1, columna B).

La información procedente de los trabajos mencionados fue sintetizada en el apartado correspondiente del Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Huelva, publicado por la Diputación Provincial de Huelva y el ITGE en 1993. En él se describieron los rasgos generales del acuífero carbonático de la sierra de Aracena, de forma conjunta con el de Cañaverol-Santa Olalla (situado al E), en el capítulo dedicado a las “Calizas de Sierra Morena”. Los valores de recursos mostrados en el documento estuvieron basados en los resultados aportados por (IGME-CGS, 1986). Cabe resaltar las distintas propuestas de Normas de Explotación realizadas con objeto de establecer una ordenación de los recursos hídricos del sector del acuífero que vierte a la cuenca hidrográfica del Guadalquivir (DGOH-ITGE, 1993; DGOH, 1995). En estos trabajos se realizó una nueva estimación de recursos de la Unidad Hidrogeológica Sierra Morena (05.45).

Posteriormente, en 1997, el IGME aporta los primeros datos hidrogeológicos detallados de la sierra de Aracena (IGME, 1997). El documento incluye una cartografía hidrogeológica a escala 1/50.000,

define el contorno del acuífero asociado a calizas y a volcanitas fracturadas (58 km²) y establece una primera aproximación de su balance hidrogeológico. Los recursos hídricos evaluados en 15 km² de afloramientos carbonáticos y en 43 km² de rocas volcánicas, repartidos entre las cuencas hidrográficas de los ríos Guadiana y Guadalquivir, sumaron 12,2 hm³/año: 3,7 asociados a las calizas y 8,5 hm³/año a la secuencia vulcanosedimentaria. Las salidas controladas (3,48 hm³/año) fueron desglosadas en: drenaje por manantiales y descargas ocultas (2,87 hm³/año) y bombeos (0,61 hm³/año). El escaso número de medidas de control hidrométrico hizo que en ese mismo trabajo (IGME, 1997) se propusiera un seguimiento de la descarga del acuífero durante un mínimo de dos años hidrológicos con el fin de acotar los términos del balance. Este hecho, unido a la ausencia de datos piezométricos, dejó sin aclarar las posibles conexiones hidráulicas entre los distintos afloramientos calcáreos. El estudio incluyó también un detallado inventario de puntos de agua que se completó con una campaña con sondeos mecánicos de investigación geológica. Gracias a las perforaciones se pudo plantear una estimación de las reservas hídricas específicas de las diversas formaciones que constituyen el acuífero, con mayor significación para aquellas de naturaleza carbonática. El resultado alcanzado (29 hm³) derivó de considerar un coeficiente de almacenamiento de 0,5 % en los 100 primeros metros de espesor saturado.

Tabla 2.1. Cambios en la denominación administrativa de las masas de agua subterránea incluidas en la MASCH

	A	B	C	D	E	
	IGME-CGS (1986)	MOPU-IGME (1988)	CHG-IGME (2001)	Ciclo de planificación 2009 - 2015	Planes Hidrológicos del 2º ciclo	
Demarcación Hidrográfica	Unidad acuifera	Unidad Hidrogeológica nº	Unidad Hidrogeológica Redefinida [nº]	Masa de Agua Subterránea (M.A.S.) [nº]	Masa de Agua Subterránea (MASb) [código]	En este informe
Guadalquivir		Sierra Morena	Sierra Morena [U.H. 05.45]	Sierra Morena [051.045]	Sierra Morena [ES050MSBT000054500]	
Guadiana	Galaroza - Zufre (Sª de Aracena)			Aroche - Jabugo [040.019]	Aroche - Jabugo [ES040MSBT000030604]	Sierra de Aracena
Tinto - Odiel - Piedras				Aracena [440.001]	Aracena [ES064MSBT004400010]	

A partir de los trabajos previos efectuados en la región, especialmente del informe IGME-CGS (1986), el IGME y la Junta de Andalucía publicaron el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (ITGE-Junta de Andalucía, 1998), uno de cuyos apartados está dedicado a los acuíferos de la sierra de Huelva. Este documento cifraba los valores de recursos medios nuevamente en 15 hm³/año de recarga autóctona para el acuífero de "Aroche-Galaroza-Zufre", con una superficie de 157 km² (90 km² de tobas volcánicas y 67 km² de afloramientos carbonáticos cámbricos). Las salidas totales ascendían a 12 hm³/año, sin entrar en más precisiones.

Desde el punto de vista administrativo, la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el IGME (CHG-IGME, 2001) procedieron a la redefinición de la poligonal envolvente de la unidad hidrogeológica U.H. 05.45 "Sierra Morena" (Tabla 2.1, columna C), en el marco del plan de revisión y actualización de las normas de explotación de las unidades hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete-Barbate. El balance hídrico mostrado en este documento para la subunidad Galaroza-Zufre se basó en los cálculos realizados por el IGME-CGS (1986), DGOH-ITGE (1993) y la DGOH (1995) para una superficie total de 110 km² (40 km² de calizas y en torno a 70 km² de tobas volcánicas), lo que llevó a asignar 70 hm³/año de recursos propios, de los cuales 66 hm³/año se drenarían por manantiales y otras descargas naturales y 3 hm³/año por bombeos. La

superficie fijada en CHG-IGME (2001) fue posteriormente alterada durante la adaptación a la nueva figura administrativa de Masa de Agua Subterránea (MASb), en virtud de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (Tabla 2.1, columna D). Las modificaciones más relevantes ocurrieron en los límites occidental y septentrional de la MASb “Sierra Morena”, que se adaptaron a las divisorias hidrográficas entre cuencas, y en el borde meridional, cuyo trazado fue retocado debido a la definición de nuevas masas de agua subterránea en la margen derecha del río Guadalquivir. Fruto de estas modificaciones fue la creación de las masas de agua subterránea “Aroche-Jabugo” (040.019) y “Aracena” (440.001), como nuevas unidades de gestión. Estos últimos límites son los que conservan las actuales masas de agua subterránea incluidas en el 2º Ciclo de Planificación Hidrológica (Tabla 2.1, columna E), salvo la MASb “Sierra Morena” (ES050MSBT000000545), que amplió su superficie para ajustarla al límite con los afloramientos del Mioceno basal y/o terrazas del Guadalquivir en la provincia de Córdoba (CHG-IGME, 2015).

En 2006 los acuíferos carbonáticos de la sierra de Aracena fueron estudiados desde el punto de vista hidrogeológico en el marco de una propuesta de aplicación de las aguas subterráneas al sistema de abastecimiento mancomunado de los pueblos de la sierra de Aracena (Huelva) (IGME, 2006), que ha permitido sectorizar y conocer el funcionamiento hidrogeológico del acuífero Sierra de Aracena cuyos límites han permitido definir los de la MASCH objeto del presente informe. En dicho trabajo se realizó una labor de inventario y control de puntos de agua, así como medidas foronómicas y piezométricas, muestreo de aguas, balances hidrogeológicos y estimación de recursos hídricos para el periodo 2003 - 2005. El área contemplada en este estudio se dividió en tres sectores: occidental, con 120 km² de superficie de los que 7 km² son afloramientos carbonáticos y 6 km² depósitos aluviales del río Múrtigas; central con 23,8 km², 6 km² de los cuales corresponden a materiales acuíferos carbonáticos y 0,6 km² a formaciones detríticas cuaternarias; y oriental, con 3 km² de materiales acuíferos carbonáticos y 0,6 km² de depósitos detríticos, para un total 22,8 km² de superficie. Las entradas por infiltración a cada sector fueron evaluadas mediante los métodos del balance de cloruros disueltos en el agua (Custodio y Llamas, 1983) y el balance de agua en el suelo (Thornton, 1948), obteniéndose resultados más satisfactorios con este último (Tabla 2.2). Los porcentajes de infiltración calculados fueron del 41 % de la precipitación sobre los materiales carbonáticos y un 34 % de la que se produce en detríticos. Al sector occidental le asignaron unos recursos de 5,0 hm³/año de los cuales 3,3 hm³/año son drenados de manera difusa hacia cauces, 1,4 hm³/año como extracciones por bombes y los restantes por manantiales (IGME, 2006). En el caso del sector central, el valor de infiltración por precipitación ascendió a 2,5 hm³/año: 1,3 hm³/año drenados por manantiales y 1,2 hm³/año en bombes. Por último, el balance hidrogeológico del sector oriental cifraba los recursos hídricos medios en 1,3 hm³/año. Alrededor de la mitad de las salidas (0,7 hm³/año) tendría lugar de forma difusa hacia los ríos que drenan el acuífero, 0,3 hm³/año como descarga natural a través de manantiales, y 0,3 hm³/año serían extraídos mediante bombeo o por captaciones (Tabla 2.2).

Los documentos técnicos conocidos más recientes corresponden a sendos informes de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir y de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana referentes a la Actividad nº 4 de la “Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas”, realizados por el IGME para la Dirección General del Agua (IGME-DGA, 2010a y b). En la actividad mencionada se procedió a la identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas subterráneas y las aguas subterráneas en las masas de agua subterránea Sierra Morena (ES050MSBT000000545) y Aroche-Jabugo (ES040MSBT000030604).

Tabla 2.2 Balance de los acuíferos carbonáticos de la sierra de Aracena (IGME, 2006).

Sector	Recarga (hm ³ /año)	Descarga (hm ³ /año)		
		Difusa a ríos	Manantiales	Bombeos
Occidental	5,0	3,3	1,4	0,3
Central	2,5		1,2	1,3
Oriental	1,3	0,7	0,3	0,3
Suma Parcial		4,0	2,9	1,9
Total	8,8	8,8		

Otras obras de contenido hidrogeológico, en las que se hace referencia al ámbito de estudio o a algún sector concreto del mismo, son los trabajos de Ocaña (2005), Martos-Rosillo et al. (2006; 2008a y b) y Galván y Olías (2010), los cuales se centraron básicamente en la evaluación de los recursos hídricos de los materiales carbonáticos y su aportación a la cabecera de los ríos, así como algunas consideraciones sobre la hidroquímica y compartimentación de acuíferos. Martos-Rosillo et al. (2006), por ejemplo, efectuaron una cuantificación de los recursos hídricos en la cabecera del río Múrtigas (27,5 km²) para el año hidrológico 2002/03. La descomposición del hidrograma efectuada en dicho trabajo indica que la descarga subterránea media hacia ese cauce es próxima a 13 hm³/año, lo que supone un 69 % de la escorrentía total y un 32% de la precipitación media. Entre las últimas publicaciones relativas a la hidrogeología del ámbito de estudio se podría mencionar la de IGME-AAA (2010) sobre el agua en el Parque Natural Sierra de Aracena y Picos de Aroche. Se trata de una obra de carácter divulgativo en la que se aporta una visión general del papel de la geología y del agua en el mantenimiento de la biodiversidad de este espacio natural protegido.

3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

3.1. Contexto geológico e hidrogeológico

En la Sierra de Aracena y en los relieves circundantes afloran rocas metamórficas y plutónicas de edad Precámbrico a Paleozoico Inferior pertenecientes, desde el punto de vista geológico, a la Zona de Ossa-Morena, aunque próxima al contacto tectónico con la Zona Sudportuguesa, en el cuadrante suroccidental del Macizo Ibérico. El límite entre ambos dominios está marcado por una banda de anfibolitas de afinidad oceánica (anfibolitas de Beja-Acebuches). Al N de estos materiales aparece otra banda formada por rocas afectadas por un metamorfismo de alta temperatura y baja presión que llegan a presentar facies de granulitas, con migmatización asociada (Dominio de Alto Grado) y que constituye, junto con la unidad anfibolítica, la denominada Banda Metamórfica de Aracena (BMA) (Bard, 1969). La anchura total en cartografía de este conjunto litológico es de una decena de kilómetros y más de 100 km de longitud. Más al N se diferencia otro sector afectado por un metamorfismo de bajo grado, que no llegó a superar las facies de esquistos verdes (Dominio de Bajo Grado), el cual está separado del anterior por una zona de cizalla de 2 km de anchura. El cizallamiento afectó a la parte septentrional de la banda de rocas metamórficas de grado medio y alto, poniéndolas en contacto directo con las rocas de bajo grado (Crespo-Blanc, 1989). Los materiales de carácter plutónico se distribuyen principalmente en los límites meridional y occidental del ámbito de estudio, siguiendo el trazado del contacto con la Zona Sudportuguesa, aunque los cuerpos ígneos (batolitos) de mayor extensión se encuentran en el tercio occidental del ámbito de estudio, cerca de Aroche (Figura 3.1). El magmatismo reconocible se atribuye al Carbonífero y su composición mineralógica es muy variable, desde términos graníticos (ácido) hasta gabros (básico). Debido a la meteorización química y al consiguiente desarrollo de una capa de lehm (de 15-20 m de espesor), la zona superficial de los granitoides puede presentar propiedades acuíferas. A continuación, se describen los principales rasgos estratigráficos de cada conjunto litológico.

Dominio de Alto Grado

El sector meridional, conocido como el Dominio de Alto Grado (Díaz-Azpíroz, 2001), está constituido a grandes rasgos por materiales metamórficos de grado medio y alto, tales como gneises cuarzo-feldespáticos, gneises migmatíticos, ortogneises, mármoles, calcoesquistos y ortoanfibilas; pero también metavolcanitas ácidas, filitas y metabasitas con bajo grado. La edad de todos estos materiales se considera Precámbrico Superior (Apalategui et al., 1984). En cartografía aparece según una banda estrecha que se prolonga desde Zufre (al E) hasta el límite con el batolito granítico-diorítico del N y O de Aroche, dentro del cual hay enclaves de materiales metamórficos del Dominio de Alto Grado. Los afloramientos de este dominio están cortados y desplazados por fallas de desgarre, lo que da lugar a varios sectores, siendo el más continuo y el de mayor superficie el comprendido entre Santa Ana la Real y Aroche (Figura 3.1).

Las rocas que pueden presentar a priori mayor interés hidrogeológico dentro del Dominio de Alto Grado son los mármoles, los cuales afloran, bien en forma de bandas adaptadas a las direcciones estructurales o en lentejones de diverso tamaño, que a grandes rasgos adoptan también una disposición bandeada. El más relevante se extiende desde unos 3 km al O de Aroche hasta 5 km al SE, con una anchura media de 1 km. En las proximidades de Zufre, estas rocas y las calizas de la formación Aracena se disponen en continuidad cartográfica, según contactos mecánicos. Los mármoles aparecen intercalados entre los gneises, ortogneises, y localmente entre anfibolitas. Con bastante frecuencia se distinguen transformaciones hacia calcoesquistos, sobre todo en el contacto con otros materiales y cuando son lentejones finos. La potencia máxima de los mármoles es 500 metros y suelen dar formas positivas en la topografía.

ACUÍFERO DE LA SIERRA DE ARACENA

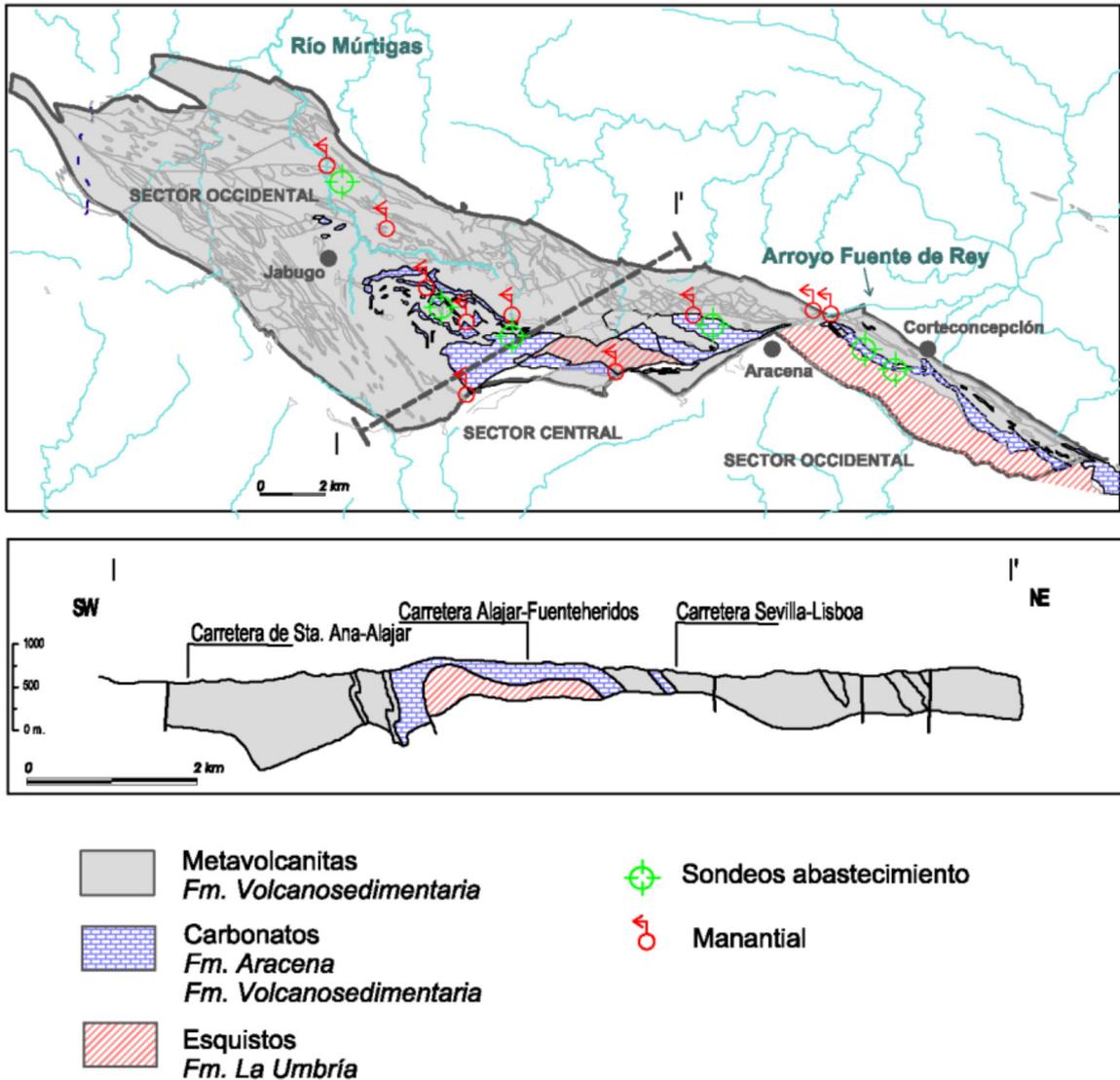


Figura 3.1. Mapa y corte hidrogeológicos de la MASCH Sierra de Aracena (Martos-Rosillo et al., 2006).

Dominio de Bajo Grado

Al N del conjunto litológico anterior afloran rocas con menor incidencia del metamorfismo, las cuales han sido agrupadas en el denominado Dominio de Bajo Grado (Díaz-Azpíroz, 2001). En la columna litoestratigráfica de este sector se distinguen cuatro formaciones que, de muro a techo, son (Apalategui et al., 1984; Crespo-Blanc, 1991): La Umbría, Aracena, Volcanosedimentaria y El Cubito. Alguna de estas formaciones alberga materiales con características hidrogeológicas favorables para constituir acuíferos (IGME, 2006).

La formación La Umbría está compuesta por filitas grafitosas con cuarcitas negras interestratificadas de edad Precámbrico Terminal, cuyos afloramientos se encuentran entre Linares de la Sierra y el N de Higuera de la Sierra. Se desconoce la posición del muro por lo que no se citan cifras de espesor en la bibliografía consultada.

La formación Aracena comienza con unos conglomerados que pasan rápidamente a mármoles dolomíticos y, en menor proporción, calizas de edad Cámbrico. Los principales afloramientos se extienden desde Jabugo hasta Zufre y pueden llegar a ser bastante continuos, salvo por los desplazamientos provocados por fallas de desgarre. En esta zona destacan dos enclaves en los que estas rocas alcanzan mayor representación espacial (Figura 3.1): uno situado al O de Aracena y otro al N de Alájar. Las rocas de la formación Aracena condicionan el relieve en los lugares donde afloran, puesto que son responsables de las principales alineaciones montañosas. Su potencia está comprendida entre 250 y los 500 m, aunque hay que destacar que el espesor es mucho más reducido en el sector de Corteconcepción.

A techo de la anterior se sitúa la formación Volcanosedimentaria que aflora desde Rosal de La Frontera hasta Zufre, si bien la mayor extensión superficial se da entre Jabugo y Fuenteheridos. Comienza con una alternancia de tobas volcánicas, de carácter ácido, y micaesquistos entre las que se intercalan niveles carbonáticos. Estos niveles son prácticamente análogos a los mármoles dolomíticos de la formación Aracena mientras que hacia techo son calizas marmóreas, dolomitizadas en algunos sectores. La suma de todos los niveles carbonáticos intercalados entre las metavolcanitas, de carácter acuitardo, puede llegar a superar los 300 m de espesor (Martos-Rosillo et al., 2008a). En la parte alta de la formación, de carácter básico, se observan tufitas y doleritas metamorizadas con intercalaciones de filitas y calcoesquistos. El contacto con la formación de El Cubito está tectonizado lo que impide determinar la potencia de la secuencia volcanosedimentaria. No obstante, algunos autores citan espesores superiores al millar de metros, aunque otros (Crespo-Blanc, 1991) señalan la posibilidad de repeticiones estructurales que pudieran llevar a engaño.

Por último, sobre la formación anterior se sitúa la serie de El Cubito, compuesta fundamentalmente por filitas y cuarzofilitas. Los afloramientos se extienden de E a O por todo el borde septentrional del ámbito de estudio.

De manera discordante a todas las unidades geológicas descritas afloran materiales cuaternarios, esencialmente depósitos aluviales, asociados a los cauces de los ríos, y pequeños afloramientos travertínicos. Uno de los más significativos está ligado al manantial de la Peña de Arias Montano, en Alájar, con decenas de metros de espesor. Los depósitos aluviales están formados por arcillas con cantos redondeados y se extienden fundamentalmente por el valle del río Múrtigas y en los arroyos vertientes a la rivera de Huelva.

La caracterización hidrogeológica resumida de los materiales aflorantes en la MASCH sería:

- rocas metamórficas precámbricas (filitas y cuarcitas), que actuarían como sustrato de baja permeabilidad para los carbonatos de la formación Aracena,
- una formación acuífera principal de naturaleza carbonática (mármoles y calizas), de edad Cámbrico, fisurada y localmente karstificada, con espesores medios que pueden alcanzar puntualmente 500 m, aunque disminuyen hacia el NO y SE. Suele estar separada en distintos bloques debido a fallas de desgarre,
- bancos de mármoles y calizas, permeables por fisuración y karstificación, interestratificados entre tobas, micaesquistos y doleritas de la formación Volcanosedimentaria; todos ellos con carácter acuitardo,
- gneises, migmatitas, anfibolitas y otras rocas metamórficas de grado medio y bajo que ofrecen pocas posibilidades como acuíferos,

- otros mármoles precámbricos dispuestos en lentejones e intercalados entre rocas metamórficas de alto grado, cuya importancia hidrogeológica dependerá de su espesor, superficie aflorante y de su disposición geométrica con respecto a otras formaciones acuíferas,
- depósitos aluviales cuaternarios, que pueden constituir acuíferos con distinto interés hidrogeológico, según su eventual relación hidrogeológica con las formaciones permeables precámbricas y paleozoicas.

3.2. Geometría, estructura y límites

La Sierra de Aracena y, en su conjunto, toda la sierra de Huelva, presenta una estructura geológica muy compleja, fruto de la intensa deformación sufrida por las rocas durante la Orogenia Hercínica. En general, la estructura del macizo de Aracena y Picos de Aroche corresponde con grandes pliegues tumbados de orientación NO-SE, cuyas trazas axiales describen complejas trayectorias en cartografía debido a la alternancia de varias fases de plegamiento ocurrida en el Carbonífero - Devónico. El tren de pliegues apretados y vergentes hacia el SO, con longitud de onda y amplitud de varios kilómetros, se caracterizan por adelgazamiento de los flancos y engrosamiento de las charnelas. En el ámbito de estudio, el mejor ejemplo de este tipo de pliegues es el antiformal de Fuenteheridos - La Umbría, cuyo plano axial tiene una dirección N120E y está inclinado unos 50° hacia el NE, por lo que el flanco meridional está invertido con el núcleo en las rocas precámbricas puestas encima de las calizas del Cámbrico (Figura 3.1). Durante esta fase de deformación se produjeron las dos zonas de cizalla principales que se reconocen en el ámbito de estudio: en el límite septentrional, la zona que enfrenta el dominio de Bajo Grado con la formación El Cubito, y en la zona meridional, la que hace lo propio con el dominio de Alto Grado. Las estructuras anteriores, junto con los cuerpos ígneos intrusivos, fueron desplazados por al menos cuatro familias de fallas de desgarre desarrolladas durante la última fase tectónica transpresiva, ocurrida al final del ciclo Hercínico (Crespo-Blanc, 1991). Las más relevantes son las que presentan direcciones NO-SE a E-O (componente sinistrorsa) y N60E (dextrorsa); esta última corta a las estructuras anteriores. Todas ellas son fallas longitudinales de traza rectilínea y buzamiento elevado. El desplazamiento horizontal, que puede medirse tomando como indicador el contacto de las distintas formaciones, es del orden de 5 km. Otro lote de fracturas, menos numeroso, tiene dirección N-S y, por último, se pueden apreciar otras de dirección N130E con movimiento dextrorso.

En la zona septentrional, afectada por metamorfismo de bajo grado, los pliegues acostados, cerrados a isoclinales y de escala hecto- a kilométrica, muestran una foliación sin-metamórfica de plano axial. En los flancos inversos de estos pliegues aparecen pequeñas zonas de cizalla dúctiles. Se ha reconocido también una foliación subparalela a la estratificación de las rocas que atendería a una etapa inicial de deformación durante la orogenia Hercínica. Por su parte, la segunda fase de plegamiento produjo pliegues de tipo "chevron", de plano axial subvertical o buzando fuertemente hacia el NNE. Cuando se observan a escala de afloramiento, los pliegues chevron muestran una foliación desarrollada en condiciones de grado muy bajo de metamorfismo.

En cambio, en el sector meridional, la secuencia de alto grado fue afectada durante la segunda etapa de deformación por una tectónica dúctil que produjo las principales zonas de cizalla. El cizallamiento, que se inició poco después del metamorfismo, generó una foliación milonítica asociada a una alineación de estiramiento y un intenso retrometamorfismo creciente hacia el NE. La foliación milonítica tiene una orientación NO-SE relativamente constante y buzamiento fuerte hacia el NE, mientras que la lineación de estiramiento es muy variable sobre el plano de foliación.

3.3. Geomorfología. Formas de infiltración preferencial

Los principales rasgos geomorfológicos de la Sierra de Aracena vienen definidos por la variedad de litologías existentes en la región, por la orientación de las principales estructuras geológicas, incluidas las fallas de salto en dirección, así como por la presencia de una densa red fluvial, consecuencia de las abundantes precipitaciones y de la existencia de un sustrato de baja permeabilidad en muchas zonas, que favorece la generación de escorrentía. El resultado es una sucesión de valles y cerros alargados en la dirección NO-SE, escalonados, y rebajados además por la intensa erosión fluvial a la que se ha visto sometida la región desde el fin de la Orogenia Hercínica.

Sobre los materiales volcánicos y los metasedimentos (esquistos, filitas, gneises, cuarcitas, etc.) se ha desarrollado un relieve resultado de la acción de dos procesos de modelado diferentes (IGME-AAA, 2010). Por un lado, la acción erosiva de los cursos de agua que han segmentado el relieve mediante valles encajados, con topografías agrestes y pendientes pronunciadas y, por otro, la erosión diferencial que ha actuado suavizando los materiales más blandos y resaltando los de mayor dureza. Los materiales resistentes constituyen, en la actualidad, los relieves más destacados del ámbito de estudio, como la sierra del Castaño donde destaca el Paraje Riscos Altos, formado por rocas plutónicas de composición granítica, o la cumbre que domina Alájar donde afloran mármoles cámbricos.

Por otro lado, el incipiente encajamiento de la red fluvial principal que se observa en la periferia del ámbito de estudio ha originado cauces estrechos y sinuosos, cuyos fondos presentan acumulaciones aluviales residuales sin un sistema de terrazas visible debido a la estabilidad tectónica. A lo sumo queda preservada la terraza baja y/o el lecho de inundación actual.

Finalmente, la existencia de litologías solubles, como es el caso de las calizas y los mármoles, conlleva la formación de modelados típicamente kársticos. En la Sierra de Aracena abundan las formas exokársticas, que pueden observarse a simple vista en la superficie de los afloramientos carbonáticos, los cuales tienen aspectos muy variados y obedecen a escalas espaciales muy diversas, desde pequeñas microformas de disolución como campos de lapiaz, pasando por depresiones simples (dolinás) y simas de tamaño mediano. Es muy frecuente encontrar, sobre los mármoles dolomíticos de la formación Aracena, suelos con un color marrón oscuro, en los que su desarrollo en profundidad permite el cultivo del olivar. La especial alteración superficial que presentan las rocas carbonáticas favorece la disminución de la escorrentía superficial sobre los afloramientos y permite que buena parte del agua de precipitación que los alcanza, y que no es evapotranspirada, pase a recargar el acuífero. También hay que destacar las plataformas travertínicas y tobas, como las que se pueden reconocer en la Peña de Arias Montano, en Alájar, en Zufre y en Higuera de la Sierra. El desarrollo del endokarst supone una expresión más de la morfología kárstica. Es importante señalar la existencia de importantes cuevas con estalactitas y estalagmitas como es, por ejemplo, la Gruta de las Maravillas de Aracena, con diferentes niveles de karstificación.

3.4. Formaciones hidrogeológicas

Los materiales que por sus propiedades hidrogeológicas y por su extensión ofrecen mayores posibilidades de constituir acuíferos dentro del ámbito de estudio son los carbonatos de la formación Aracena, están compuestos por mármoles dolomíticos y, en menor proporción, calizas de edad Cámbrico, permeables por fisuración-fracturación y/o karstificación, y cuyo espesor medio está

comprendido entre 250 y 400 metros, aunque en algunos puntos pueden superar los 550 metros de potencia (DPH-ITGE, 1993; IGME, 2006). Estas rocas descansan sobre las metapelitas de la formación La Umbría que actuarían como sustrato de baja permeabilidad, mientras que hacia techo se sitúa una alternancia de tobas, porfiroides y micaesquistos de la formación Volcanosedimentaria, con comportamiento acuitardo, entre la que se intercalan mármoles y calizas. La suma de todos los niveles carbonáticos intercalados entre las metavolcanitas puede llegar a superar los 300 m de espesor (Martos-Rosillo et al., 2008a) por lo que, en conjunto, estos mármoles podrían considerarse como un segundo acuífero carbonático de tipo multicapa. Los carbonatos de la serie de Bajo Grado (inferiores y superiores) ocupan una superficie total de 19,3 km² y están delimitados, en cartografía, por contactos estratigráficos con las mismas metapelitas basales, con las tobas volcánicas situadas a techo de la formación Aracena y que también rodean los niveles carbonáticos interestratificados y, sobre todo, por contactos mecánicos ligados a las fallas de desgarre de dirección NO-SE a E-O y N60E (Figura 3.1). Además de los anteriores, 20,7 km² de mármoles precámbricos dispuestos en lentejones e intercalados entre rocas metamórficas del Domino de Alto Grado, que afloran al S y O de los anteriores, pueden conformar igualmente pequeños acuíferos aislados o de tipo multicapa, aunque con menor interés hidrogeológico.

El acuífero de la Sierra de Aracena, que define la MASCH de la que toma el nombre, no recibe ni da aportes laterales a otros acuíferos (IGME-JA, 2006). Debido a la tectonización, que condiciona claramente la distribución de sus afloramientos, es un sistema aislado que solo cuenta con recursos propios.

A escala regional, la estructura geológica es la responsable de la geometría interna de los distintos acuíferos y de las direcciones generales del flujo subterráneo. El pliegue antiformal tumbado con vergencia hacia el SO de Fuenteheridos-La Umbría, junto con las cuatro familias de fracturas tardihercínicas que afectan a las estructuras previas, constituyen los elementos tectónicos más relevantes para compartimentar acuíferos. Dos fallas de desgarre (una al N con dirección E-O y otra al SO con dirección NO-SE) limitan y acúan hacia poniente el cuerpo intrusivo de Aroche y lo ponen en contacto con formaciones y milonitas de menor permeabilidad. En Aracena y alrededores, los desplazamientos sinistorsos provocados por las fracturas de dirección N60E rompen la continuidad geométrica del pliegue antiformal de Fuenteheridos-La Umbría. Tres fallas de esta familia dificultan la conexión de los materiales permeables del acuífero carbonático principal, de forma que este queda dividido en varios sectores con funcionamientos hidrogeológicos más o menos independientes. Los rasgos estructurales mencionados, junto con la posición de los manantiales, además de las cotas de la superficie piezométrica, llevó al IGME (2006) y a Martos-Rosillo et al. (2008a) a diferenciar tres sectores en esta zona: sector occidental, central y oriental. En el presente informe se comentan y analizan los rasgos hidrogeológicos de un cuarto sector definido en el extremo SE del ámbito de estudio, denominado aquí sector suroriental o de Zufre, y separado del localizado inmediatamente al NO (sector oriental del IGME) por una de esas fallas de dirección N60E que cortan la estructura previa a la altura de la localidad de La Umbría. A continuación, se detallan las principales características geométricas de los distintos sectores reconocidos, mientras que en el mapa de la figura 3.2 se muestra la situación orientativa de las divisorias hidrogeológicas.

El **sector occidental** tiene una superficie total de 120 km², de los que 7,1 km² corresponden a afloramientos carbonáticos permeables y 1,65 km² a materiales detríticos con distinto grado de permeabilidad, conectados hidráulicamente entre con los carbonatos. La geometría está condicionada por la estructura del anticlinal de Fuenteheridos-La Umbría, en especial por su charnela ancha y por la inmersión de la traza axial hacia el NO, lo que provoca que en el cierre periclinal del techo de la formación Aracena, en contacto con las metavolcanitas, se encuentren los

principales puntos de descarga natural. El flujo subterráneo tiene componente NO y el río Múrtigas actúa como colector de las descargas. Sin embargo, el flanco SO, invertido y en parte laminado por la fracturación tardihercínica, drena hacia el S, hacia el manantial de la Peña de Arias Montano.

En el **sector central** del acuífero de Aracena (23,8 km²) afloran 6 km² de materiales carbonáticos, fundamentalmente de la formación Aracena, que se reparten en dos afloramientos desconectados geométrica y estructuralmente. El septentrional consiste en el flanco norte del anticlinal de Fuenteheridos-La Umbría, repetido por efecto de un pliegue menor de segunda fase. El meridional lo forman los afloramientos del flanco sur del anticlinal. El flujo subterráneo en el sector septentrional se dirige hacia el N, hacia el manantial de la Fuente del Castaño, mientras que es hacia el S en la zona meridional, hacia el manantial de La Herrería, también llamado del Tío Cano.

El **sector oriental** del acuífero (22,8 km²) cuenta con 3 km² de materiales carbonáticos permeables. Todas las rocas buzando hacia el NE y pertenecen al flanco nororiental del anticlinal de Fuenteheridos-La Umbría, en el que la formación Aracena presenta un menor espesor por causas mecánicas. El flujo subterráneo se dirige hacia el N y hacia el O, hacia el arroyo de Fuente del Rey, donde hay varias surgencias (Figura 3.2).

Las formaciones permeables que constituyen el sector suroriental o de Zufre se disponen de manera similar al anterior, con los mármoles del flanco nororiental del anticlinal de Fuenteheridos-La Umbría buzando en sentido NE a lo largo de una estrecha banda que recorre 8 km desde las inmediaciones de La Umbría hasta Zufre. No obstante, los esfuerzos tectónicos han laminado fuertemente las rocas, hasta el punto de que la formación La Umbría apenas aflora en superficie, pues queda cubierta por los materiales del Dominio de Alto Grado, según una fractura de dirección similar a la del eje del pliegue anticlinal. Esa misma fractura pone en contacto mecánico los carbonatos de la formación Aracena con alguno de los lentejones de mármoles del Dominio de Alto Grado que afloran en este sector, lo que podría implicar, al menos de forma local, continuidad hidráulica para el agua subterránea. El límite SE coincide con una de las fracturas de dirección N60E más relevantes de la región (falla de Zufre; Apalategui et al., 1990). La superficie total de este sector es 5 km² y en él afloran 3,21 km² de mármoles pertenecientes a las formaciones Aracena y Volcanosedimentaria. El resto son afloramientos de metavolcanitas y gneises, así como parches aislados de travertinos. Las direcciones de flujo subterráneo dominantes son hacia el SE, hacia Zufre, donde hay varias surgencias y asociadas a ellas una plataforma travertínica. No obstante, la existencia de parches aislados de travertinos en puntos concretos del borde NE de este sector indicaría una componente local del flujo subterráneo dirigida en ese sentido. Otras descargas menores se reconocen en Higuera de la Sierra y podrían estar relacionadas con lentejones aislados de mármoles del Dominio de Alto Grado.

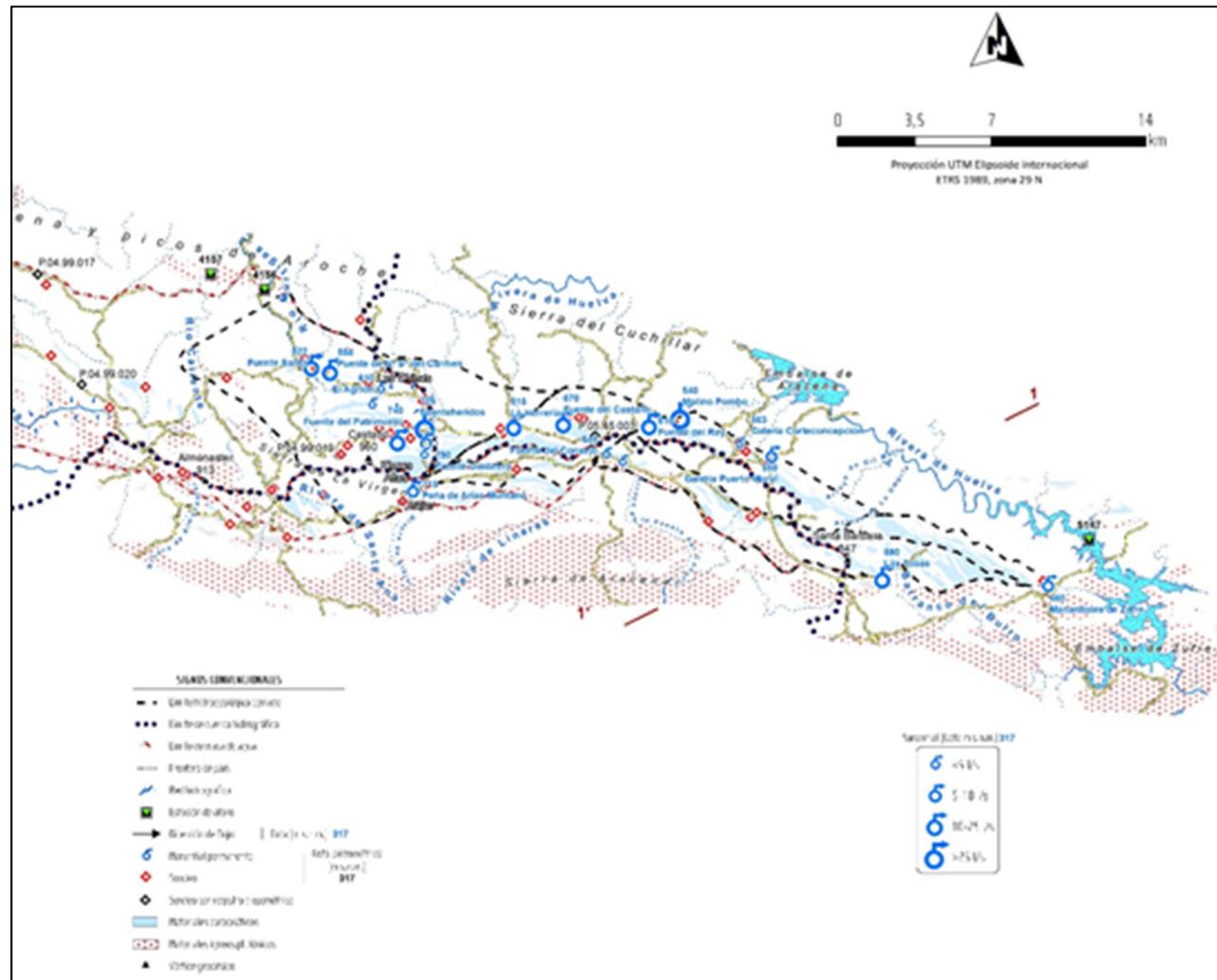


Figura 3.2. Esquema hidrogeológico de la sierra de Aracena.

3.5. Hidrología superficial. Relación río-acuífero

El ámbito territorial ocupado por las masas de agua subterráneas objeto de este informe está surcado por una marcada red hidrográfica (Figura 3.1). Los ejes principales de la red fluvial están dispuestos en dirección preferente NO-SE a E-O, en concordancia con la orientación de las grandes estructuras geológicas, mientras que cursos secundarios cortan la estructura en algunos casos y, en otros, se encaja en las fracturas de dirección N60E. Además, existe un control litológico sobre la red de drenaje superficial. En los cuerpos ígneos y en los materiales metamórficos de alto grado es de tipo subdentítico y densidad baja y se acomoda a zonas de mayor debilidad ligadas a las principales fallas. Cuando la red se encaja en la formación Volcanosedimentaria aumenta la densidad de drenaje y pasa a ser de tipo dendrítico, como en el caso del río Caliente (IGME-DGA, 2010a y b). Sobre los materiales carbonáticos, la red de drenaje tiene una densidad manifiestamente inferior, de tipo subdendrítico, y los cauces se acomodan a las directrices estructurales, como le ocurre al río Múrtigas, cuyo trazado en cabecera se adapta al pliegue antiformal de Fuenteheridos-La Umbría. En la periferia del ámbito de estudio, tanto al N como al S, existe una red de drenaje muy densa y de tipo enrejado subparalelo, desarrollada sobre metapelitas de bajo grado metamórfico.

Los cauces superficiales más relevantes que se pueden reconocer en la zona pertenecen a tres cuencas hidrográficas (Figura 3.2):

Demarcación Hidrográfica del Guadiana (DHGu), que recoge las aguas del extremo noroccidental de la Sierra de Aracena a través del río Múrtigas.

- En la vertiente NW de la MASCH se encuentran el río Múrtigas y su afluente el río Caliente, tributario el primero del río Ardila, que a su vez lo es del Guadiana por su margen izquierda. Hacia ellos vierten sus aguas buena parte de los manantiales y rezumes que drenan los afloramientos de naturaleza carbonática y las tobas volcánicas del sector occidental del acuífero de Aracena. El río Múrtigas tiene un recorrido cercano a 6 km de longitud dentro de los límites administrativos de la MASb “Aroche-Jabugo” y su menor cota se localiza en la localidad de Las Navas, a 400 m s.n.m. Su nacimiento se puede suponer en la Fuente de los Doce Caños (Fuenteheridos), situada a 705 m s.n.m. Las aguas de la Fuente de Nuestra señora del Carmen (situada a 558 m s.n.m.), del manantial de Fuente Santa (522 m s.n.m.) y del nacimiento del río Múrtigas (507 m s.n.m.) son otros de los principales aportes de agua subterránea a este cauce. Entre los dos últimos puntos mencionados, en un tramo relativamente corto, se puede apreciar un sensible aumento de caudal en el lecho del río. Este tramo de carácter ganador se conoce como paraje de “Las Chinas”, pedanía cercana de la localidad de Galaroza (IGME, 2006; IGME-DGA, 2010a). Por su parte, el río Caliente recoge la escorrentía superficial y las aguas subterráneas procedentes de los materiales carbonáticos y vulcanosedimentarios situados al E del Múrtigas (Figura 3.3). Discurre entre las cotas 515 m s.n.m., en Los Romeros, y 375 m s.n.m. en el límite NE de la MASb “Aroche-Jabugo”.

Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG), hacia dónde vierte sus aguas el tercio nororiental de la MASCH, recogidas por la rivera de Huelva y sus afluentes.

- La rivera de Huelva comienza en la ladera septentrional de la sierra de la Virgen, al SE de Fuenteheridos. En cabecera presenta una dirección general N-S y gira en sentido E al pasar la sierra del Cuchillar. A partir de aquí su trazado adopta una trayectoria arqueada, vista en planta, y orientada hacia el SE, condicionada en buena medida por la orientación de las

estructuras hercínicas. La riera de Huelva abandona el espacio de la MASb “Sierra Morena” en el embalse de Zufre. Los únicos cauces que le aportan agua de forma permanente son los del arroyo del Castañuelo, aguas abajo de la Fuente del Castaño (669 m s.n.m.) y el arroyo de la Fuente del Rey, aguas abajo del Molino Pombo (540 m s.n.m.). En época de aguas altas de años con pluviometría media se activa el manantial de la Fuente del Rey (600 m s.n.m.) que vierte sus aguas hacia el arroyo del mismo nombre. Existen otros arroyos tributarios de la riera de Huelva que presentan caudal en cabecera como el barranco del Burro, que recibe aportes del manantial de Las Tobas (590 m s.n.m.), situado al E de Higuera de la Sierra, o los arroyos de Gil Martín y de La Umbría, que recogen las descargas de otras pequeñas surgencias.

Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras (DHTOP). A esta demarcación pertenecen la riera de Linares, la riera de Santa Ana y la riera de Almonaster, o el arroyo de la Fuente del Concejo, entre otros, que vierten sus aguas al río Odiel. Son cauces de corta longitud que discurren en sentido S - SO. La mayoría de ellos reciben aportes en cabecera de los numerosos manantiales vinculados a las calizas y mármoles de la formación Aracena. El más relevante de todos es sin duda el manantial de la Peña de Arias Montano, situado a 715 m s.n.m., y cuyo caudal medio histórico (8,5 l/s) alimenta a la riera de Alájar, que aguas abajo recibe el nombre de riera de Santa Ana.

- La riera de Linares es el eje principal de descarga de la MASb “Aracena”. En ella confluyen los cauces que bajan por la ladera meridional de la sierra de La Virgen con el agua recibida de los numerosos manantiales que drenan los carbonatos del sector central del acuífero. Las aguas subterráneas drenadas por la surgencia de La Herrería (510 m s.n.m.) y otros pequeños manantiales de Aracena son los principales aportes que recibe en su cabecera. Se trata, por tanto, de un cauce ganador por las numerosas contribuciones hídricas que recibe. La cota inferior dentro de la MASb se encuentra en el extremo S a 455 m s.n.m.

3.6. Inventario de puntos de agua. Hidrodinámica

3.6.1. Manantiales

El drenaje natural visible de los materiales acuíferos existentes en la MASCH Sierra de Aracena tiene lugar de tres maneras diferentes: mediante pequeñas surgencias y rezumes asociadas a contactos estratigráficos o mecánicos que implican un contraste de permeabilidad; de manera puntual a través de salidas de agua subterránea localizadas, las cuales están igualmente relacionadas con cambios litológicos bruscos; y de modo difuso en los tramos de cauce donde el nivel piezométrico ha sido interceptado por la erosión. El resultado es un elevado número de manantiales, aunque sólo 21 pueden considerarse como los más relevantes a efectos de caracterizar el comportamiento hidrodinámico de los acuíferos del ámbito de estudio o por la magnitud de sus caudales, con valores medios históricos comprendidos entre 0,62 l/s y 45 l/s. La ubicación de los principales puntos de descarga aparece en la figura 3.2 y sus características básicas están recogidas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características de los principales manantiales de las MASb.

MASb	Denominación	nº de medidas	Caudal (l/s)			Periodo de control	Cota m s.n.m.	Coordenadas UTM	
			Máx	Mín	Medio			X	Y
	Pocito					220	655119	4203561	
	Manantiales de Aroche	7	17,5	10,8	14,6	1995/96 - 1998/99	400	679474	4201218
	Fuente Santa	15	30,8	5,80	24,0	1995/96 - 2003/04	522	700505	4200429
	Fuente de N ^ª S ^ª del Carmen	64	58,4	0,00	13,7	1986/87 - 2007/08	558	701347	4200226
ES040MSBTO 00030604	Fuente de la Duquesa	36	248,5	0,00	4,94	1993/94 - 2005/06	625	703243	4198707
	El Agrión	11	21,1	0,00	4,70	2002/03 - 2005/06	610	703648	4199421
	Fuenteheridos	55	94,3	10,1	32,2	1984/85 - 2007/08	705	705674	4197726
	Fuente del Patrimonio	36	64,7	0,00	10,5	1996/97 - 2005/06	740	704417	4197051
	Fuente La Iruela	33	23,1	0,00	5,97	1995/96 - 2005/06	737	705710	4197012
	Fuente Cimbrera	29	11,7	0,00	0,96	2002/03 - 2005/06	790	705614	4196458
	Peña de Arias Montano	59	95,0	0,00	8,54	1995/96 - 2007/08	715	705121	4194825
ES064MSBTO 04400010	La Herrería o Tío Cano	53	76,4	0,00	11,8	1996/97 - 2007/08	515	709707	4197734
	Fuente del Consejo	142	6,20	0,30	2,32	1997/98 - 2019/20	648	713907	4196473
	Fuente Zulema	33	1,50	0,00	0,62	1981/82 - 2005/06	773	714647	4196119
	Fuente del Castaño	173	95,8	0,00	17,1	1995/96 - 2019/20	670	711959	4197861
	Molino Pombo	49	178,5	5,10	45,2	1995/96 - 2005/06	540	717290	4198181
ES050MSBTO 00000545	Fuente del Rey	47	72,3	0,00	20,0	1981/82 - 2005/06	610	715860	4197772
	Galería Corteconcepción	33	23,2	0,00	3,37	2002/03 - 2005/06	563	719960	4196922
	Galería Puerto Moral	39	54,9	0,00	5,11	2002/03 - 2005/06	550	721418	4196400
	Manantiales de Zufre	1			5,55	1985	460	733990	4190563
	Las Tobas	1			10,1	1975	590	726472	4190861

Las cotas de surgencia son distintas con independencia del sector acuífero considerado, dada la elevada compartimentación y restricción espacial de los afloramientos permeables en las masas de agua subterránea (ITGE, 1997; 2006). Los manantiales que se localizan a mayor cota son aquellos situados en el contacto (estratigráfico o mecánico) entre los principales afloramientos carbonáticos de la formación Aracena y las metavolcanitas. Estos aparecen dentro de un rango altitudinal de 75 metros (entre 670 y 745 m s.n.m.), con la excepción del manantial de La Herrería, ubicado a 515 m s.n.m. Desde la zona central del macizo de Aracena hacia el NO y hacia el SE, hacia aguas abajo en la cabecera del río Múrtigas y hacia el valle de la riera de Huelva, respectivamente, las cotas de surgencia van disminuyendo de manera escalonada, tal y como lo hacen los afloramientos carbonáticos. Las cotas más bajas de drenaje subterráneo se encontrarían en el río Múrtigas, en el paraje de Las Chinas (505 m s.n.m.), y en el arroyo del Rey, en la zona conocida como Molino Pombo (540 m s.n.m.). Otros puntos de descarga natural asociados a las calizas cámbricas de la formación Aracena, pero menos relevantes, se hayan en las inmediaciones de Zufre, en torno a 460 m s.n.m.

Los manantiales más caudalosos se encuentran en su mayoría vinculados a los dos ejes de drenaje preferentes mencionados. En la cuenca del río Guadiana se hallan los manantiales de Fuente Santa (522 m s.n.m., 24 l/s de caudal medio), Fuente de Nuestra Señora del Carmen (558 m s.n.m., 13,7 l/s), Fuente de la Duquesa (625 m s.n.m., 4,94 l/s), Fuenteheridos (705 m s.n.m., 32,2 l/s) y Fuente del Patrimonio (740 m s.n.m., 10,5 l/s). Como puede observarse, no hay correspondencia entre el caudal de las surgencias y la altitud a la que estas se sitúan, es decir, los manantiales más caudalosos no son los situados a las cotas más bajas, por las razones esgrimidas en el párrafo anterior. Por la posición del punto de aforo, en un cauce, la serie de caudales recopilados de la Fuente de La Duquesa puede incluir contribución superficial procedente de la cabecera del arroyo de La Duquesa, en el que se haya la Fuente del Patrimonio. Todos estos puntos, más el manantial de las Peña de Arias Montano (715 m s.n.m., 8,5 l/s) serían los principales responsables del drenaje natural puntual del sector occidental del acuífero carbonático de la Sierra de Aracena. El caudal conjunto de descargas por este sector puede situarse en torno a 123 l/s de media anual.

La descarga del acuífero hacia la cuenca del Guadalquivir se produce de una forma parecida a la descrita para el caso anterior: varios manantiales de pequeño caudal que representan las principales aportaciones hídricas a un cauce con un claro carácter ganador en su recorrido sobre mármoles. Los manantiales que más contribuyen al caudal del arroyo del Rey son Fuente del Rey (a 610 m s.n.m., 20 l/s de caudal medio histórico) y las descargas difusas que ocurren en la zona de Molino Pombo (a 540 m s.n.m., 45,2 l/s). Es importante indicar que el agua aportada por la Fuente del Rey, cuando estaba activa, puesto que es una surgencia de tipo trop plein, se sumó al caudal medido en Molino Pombo. La ubicación de ambos manantiales y, en general, la traza que sigue el propio arroyo está condicionada por una falla de desgarre de la familia N60E. Las descargas subterráneas hacia la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir se completan con las que tienen lugar a través de la Fuente del Castaño (17,1 l/s), que aparece a 670 m s.n.m. en el contacto estratigráfico entre los afloramientos carbonáticos de la formación Aracena y las metavulcanitas.

El manantial de La Herrería constituye, junto con el de la Peña de Arias Montano, la principal descarga natural del acuífero de sierra de Aracena por su borde sur, hacia la cuenca de la rivera de Linares. Se encuentra a cota 515 m s.n.m. y tiene un caudal medio cercano a 12 l/s (Tabla 3.1), procedente del bloque carbonático de la formación Aracena que define el flanco meridional del antiformal de Fuenteheridos-La Umbria.

Otras surgencias de escasa entidad se asocian a los afloramientos de mármoles precámbricos que aparecen inmersos entre otras rocas metamórficas del Dominio de Alto Grado. Las más destacadas son la Fuente del Consejo (648 m s.n.m.) y Fuente Zulema (773 m s.n.m.), en el casco urbano de Aracena y el manantial de Las Tobas (590 m s.n.m.) en Higuera de la Sierra. Su significancia radica, más que por la cuantía de los caudales medios, en el valor patrimonial y uso de sus aguas en el abastecimiento público.

La red hidrométrica oficial actual está formada por tres estaciones de aforo que miden el caudal que fluye por los ríos Múrtigas y rivera de Chanza, en la D.H del Guadiana. La estación de aforos del río Múrtigas (código 4156) se localiza en la aldea de La Nava, en el límite NE de la MASb "Aroche-Jabugo". Abarca una superficie de 38 km² de cuenca y en ella se mide desde 1958 los caudales de los manantiales que drenan buena parte del sector occidental del acuífero de la Sierra de Aracena, donde se sitúan la mayoría de los afloramientos carbonáticos permeables. Además, por su posición, recoge un importante volumen de escorrentía superficial, lo que dificulta la interpretación de la componente subterránea en las series de datos. La rivera del Chanza cuenta con dos estaciones de aforo activas en las inmediaciones de la MASCH. La estación nº 4158 se halla situada en el tercio oriental del complejo ígneo de Aroche, cerca de dicha localidad, por donde fluye parte de la escorrentía superficial generada en la cabecera de la cuenca, formada en su mayoría por rocas ígneas y metamórficas del Dominio de Alto Grado, y la descarga subterránea procedente de manantiales menores. El registro hidrométrico comenzó en 1927. La segunda estación que registra desde 1969 los caudales de la rivera de Chanza (nº 4176) se ubica a la altura de Rosal de la Frontera, a la salida de la MASb "Aroche-Jabugo". Por su posición geográfica, recoge todas las aportaciones (superficiales y subterráneas) generadas en la mencionada masa de agua subterránea, salvo las que son drenadas a favor de los ríos Múrtigas y Caliente. La estación se localiza a escasos metros aguas abajo de la confluencia con un arroyo que recoge las descargas subterráneas de la sierra de Ficalho por medio del manantial del Pocito. En el pasado existieron otras tres estaciones de aforos en la MASb "Aroche-Jabugo", hoy fuera de servicio. Una de ellas (nº 4157) registró hasta 1987 las aportaciones del río Caliente, cerca de La Nava. Otra en el arroyo de Arochete (nº 4160), antes de su confluencia con la Rivera de Chanza, tomó medidas entre enero de 1929 y marzo de 2000. Aguas abajo de la anterior, en la Rivera de Chanza, se situó la estación nº 4159, que registró caudales entre enero de 1927 y septiembre de 1960.

A las anteriores estaciones de la red foronómica de la zona habría que sumar una construida en la ribera de Huelva, en la D.H. del Guadalquivir, y que debería medir el caudal del arroyo del Rey y de otros con aportaciones subterráneas procedentes de los mármoles cámbricos incluidos en la MASb "Sierra Morena". Sin embargo, la estación de aforos está situada entre el embalse de Aracena y el de Zufre, por lo que no es válida para evaluar aportaciones en régimen natural. Por último, el manantial de la Fuente del Castaño es el único que dispone de un vertedero construido para medir su caudal.

Se dispone de series históricas de caudal de los principales manantiales que drenan el acuífero de la sierra de Aracena, proporcionadas por el IGME y por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. La longitud temporal de las series difiere en cada caso, aunque la mayoría de ellas comienzan a mediados de la década de 1990 y llegan a 2006 ó 2008 (Tabla 3.1). Las series de datos corresponden a medidas puntuales y los registros son discontinuos, con lagunas y numerosos años hidrológicos en los que sólo se realizaron 2 ó 3 medidas, aunque desde comienzos de 2003 los aforos fueron más frecuentes (mensuales). La serie con el mayor número de medidas y prolongada en el tiempo es, con diferencia, la del manantial de la Fuente del Castaño, con 24 años de registro y 173 medidas. Le sigue en longitud de serie la Fuente del Consejo, con 142 medidas puntuales efectuadas entre los años hidrológicos 1997/98 - 2019/20. Las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 recogen, a modo de ejemplo, los hidrogramas de las principales surgencias de la sierra de Aracena, como ilustrativas del comportamiento hidrodinámico de los diferentes sectores del acuífero carbonático, junto con las precipitaciones medias diarias registradas en la zona.

A partir de la serie de datos diarios de caudal del manantial de La Herrería se puede deducir un régimen de funcionamiento kárstico para el sector de acuífero drenado por dicha surgencia, con rápidas crecidas durante los periodos de recarga (Figura 3.3). El manantial alcanza caudales próximos a 80 l/s en épocas de crecida e inferiores a 5 l/s durante un estiaje prolongado, e incluso se agota durante varios meses como consecuencia de bombeos en sondeos cercanos. Se llega a registrar una crecida principal y otra secundaria al año. Las decrecidas y los agotamientos son igualmente rápidos, con valores de coeficiente de agotamiento del orden de $2,2 \times 10^{-2} \text{ días}^{-1}$ (IGME, 2006).

El análisis general del hidrograma del manantial de la Peña de Arias Montano, a partir de los datos disponibles (Figura 3.3), permite distinguir también un comportamiento de tipo kárstico, con una repuesta muy rápida a las precipitaciones y descensos de igual magnitud en ausencia de estas. Los caudales máximos aforados en manantiales de la sierra de Aracena en épocas recientes se han medido en este punto (95 l/s). En ausencia de recargas significativas, la surgencia presenta caudales casi nulos. El valor medio estimado para el coeficiente de agotamiento es de $2,4 \times 10^{-2} \text{ días}^{-1}$ (IGME, 2006).

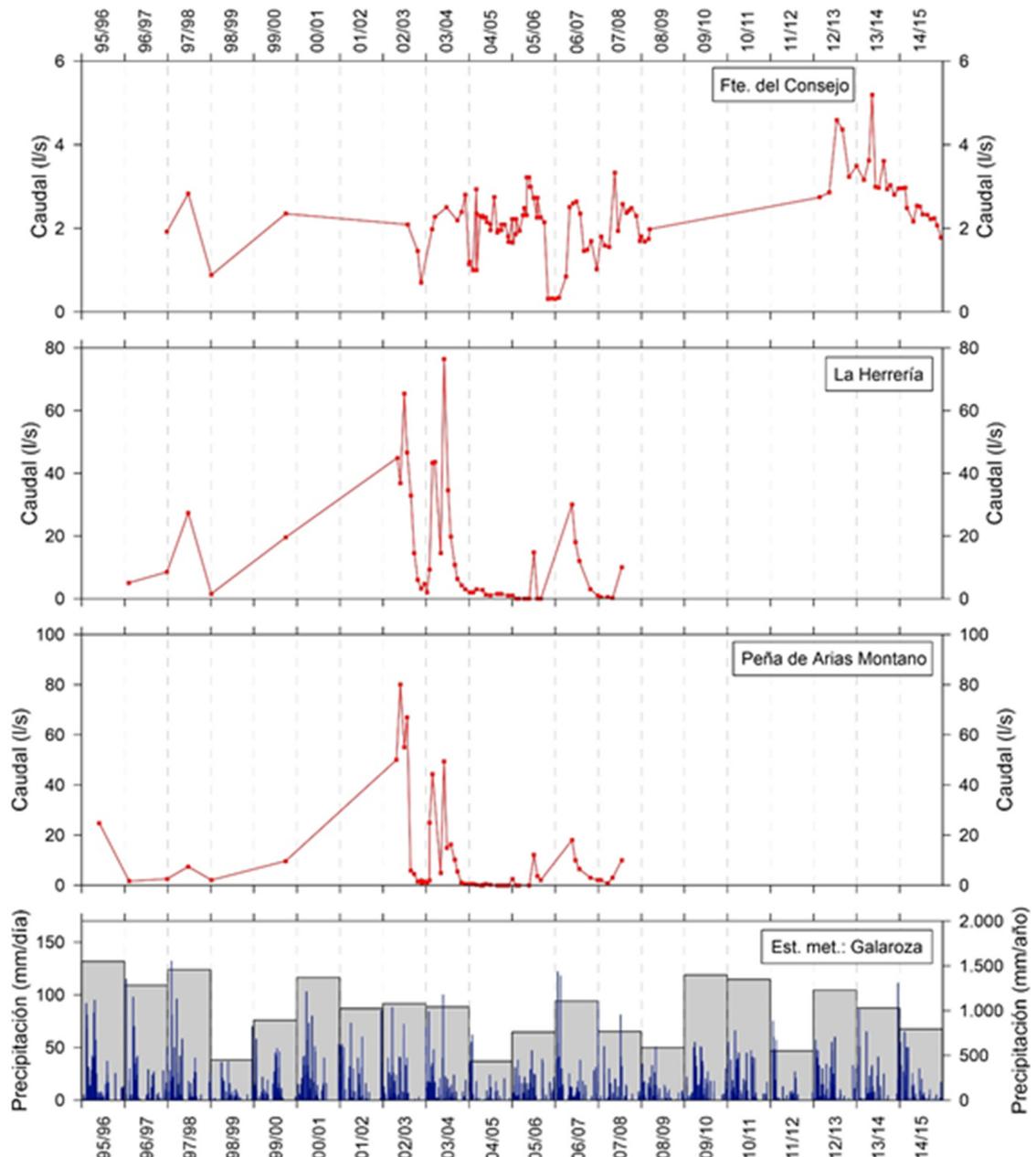


Figura 3.3. Hidrogramas de los manantiales La Herrería, Peña de Arias Montano y Fuente del Consejo y precipitación durante el periodo 1996 – 2015.

El hidrograma de la Fuente del Castaño se ha representado en la figura 3.4, junto a la precipitación diaria de la estación de Aracena Segunda. Su análisis permite distinguir claramente la alternancia entre periodos húmedos, con caudales más elevados (hasta 55 l/s), y otros más secos durante los cuales la surgencia sufre un descenso paulatino pero evidente en su caudal de descarga hasta incluso el agotamiento completo, que es interrumpido tras nuevas y abundantes lluvias. En detalle, se observa que, como máximo, se registra una crecida relevante por cada año hidrológico, cuya magnitud depende de la cantidad de precipitación acumulada durante los meses previos. Se puede intuir, por tanto, un filtrado de la señal de entrada (pluviometría) por parte de este sector del macizo de la sierra de Aracena. El valor medio estimado para el coeficiente de agotamiento es de $2,5 \times 10^{-3} \text{ días}^{-1}$ (IGME, 2006). Este comportamiento hidrodinámico denota una respuesta relativamente amortiguada frente a las precipitaciones. No obstante, la interpretación tiene las limitaciones propias

de la frecuencia de medida (mensual en el mejor de los casos) y de los efectos de bombeos en sondeos situados en las inmediaciones de la surgencia. Desde mayo de 2005, el manantial está regulado por un sondeo de abastecimiento situado a escasos metros de distancia. El caudal punta, antes de ser regulado, alcanzaba 96 l/s y el manantial no llegaba a agotarse nunca.

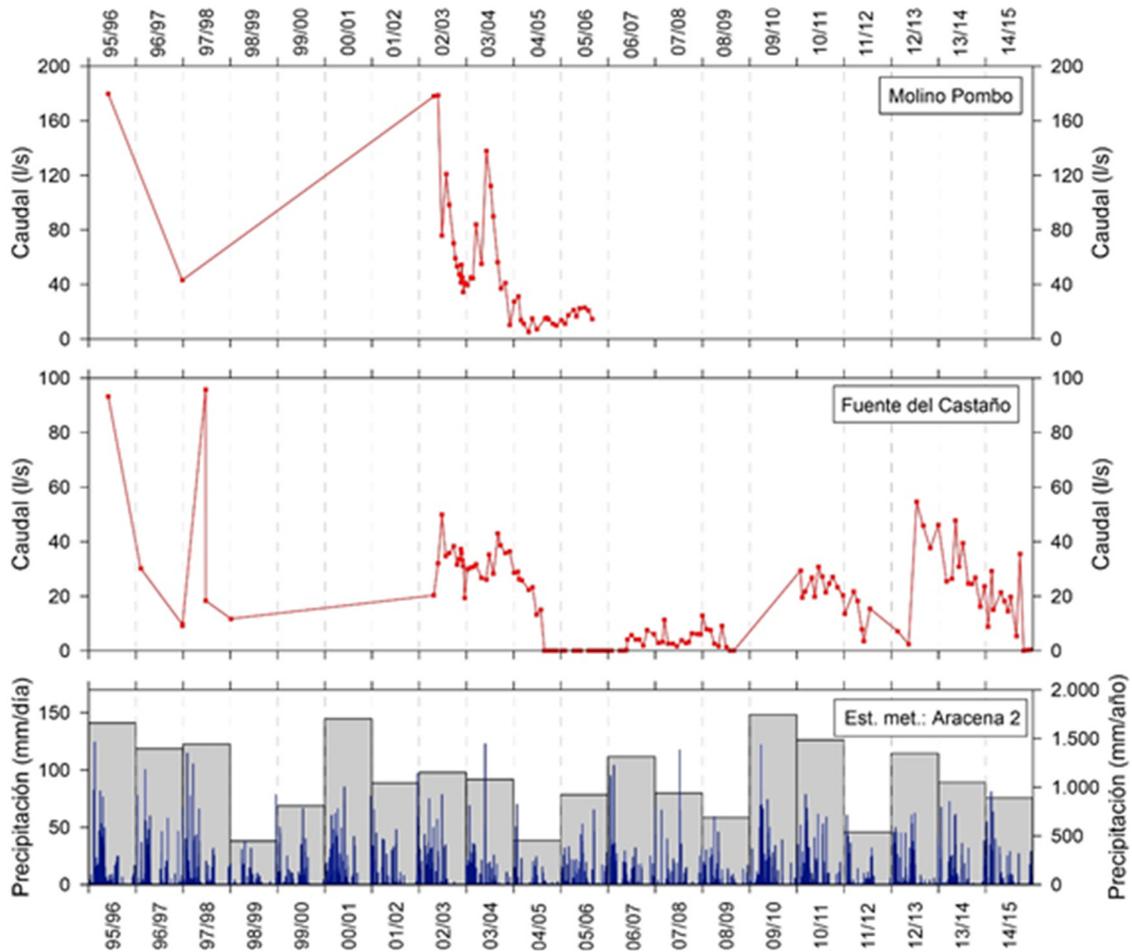


Figura 3.4. Hidrogramas de los manantiales de la Fuente del Castaño y Molino Pombo y precipitación durante el periodo 1996 – 2015.

El manantial más inercial del sector occidental del acuífero es el de Fuenteheridos, también llamado de Doce Caños (Figura 3.5). En su hidrograma se observan picos de caudal casi todos los años, con valores por encima de 40 l/s, en respuesta a los periodos más húmedos. No se aprecian tendencias en la serie de datos. Sin embargo, un análisis más preciso para los datos posteriores a 2002, en el que se efectuaron aforos con mayor frecuencia, permite observar un régimen de descarga más irregular (bruscas variaciones de caudal) que puede tener una causa antrópica.

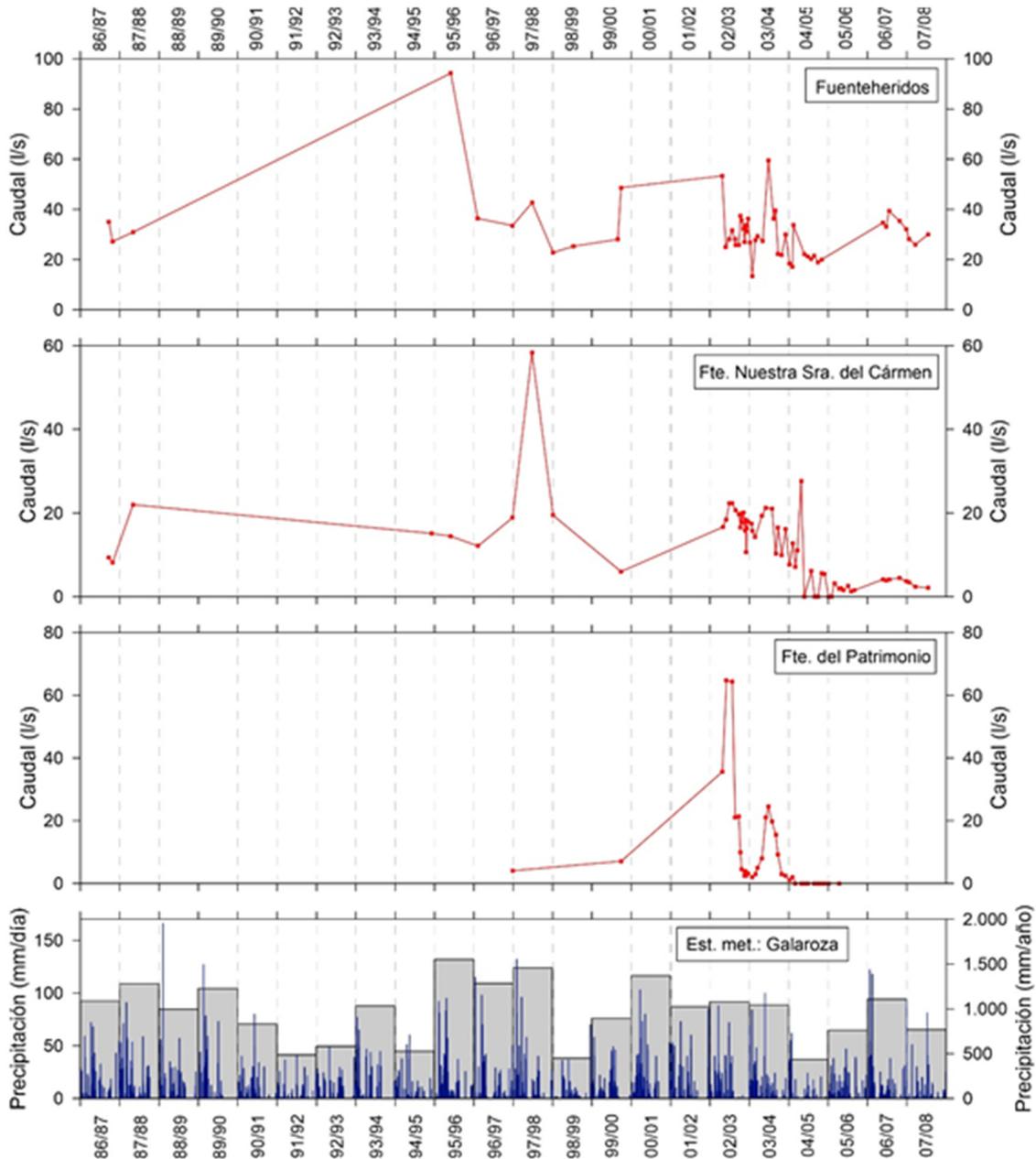


Figura 3.5. Hidrogramas de los manantiales de Fuenteheridos, Fuente del Carmen y Fuente del Patrimonio y precipitación durante el periodo 1996 – 2015.

Según información recogida en IGME (2006), el seguimiento hidrodinámico de la surgencia es problemático ya que tiene varias derivaciones de difícil control y además está captado para el abastecimiento de Fuenteheridos. El manantial recoge además las aguas de una serie de canales situados bajo la plaza del pueblo que captan, a su vez, aguas de materiales aluviales de dos arroyos que confluyen en el entorno de la surgencia. En cualquier caso, para una serie de registro de 10 años de registros y 55 medidas se obtiene un caudal medio de 32,2 l/s, con valores máximos de 94 l/s en épocas de lluvias y mínimos cercanos a 10 l/s en estiaje. El coeficiente de agotamiento de la surgencia es de $2,5 \times 10^{-3}$ (IGME, 2006).

Por último, el hidrograma de la Fuente de Nuestra Señora del Carmen, con un caudal medio de 13,7 l/s, está influenciado por la captación para el abastecimiento de Galaroza, de ahí su forma dentada y la clara tendencia descendente en la serie de datos. Destacan las crecidas asociadas a las

precipitaciones de primavera de 1998 e invierno de 2004. El coeficiente de agotamiento calculado por el IGME (2006) es de 4×10^{-3} .

3.6.2. Sondeos. Evoluciones piezométricas

El inventario más reciente publicado de captaciones existentes en las masas de agua subterráneas objeto de este informe proviene del IGME (2006). En este documento se recogía un total de 164 sondeos y pozos relacionados con el acuífero carbonático de la sierra de Aracena. Menciona también la existencia de 19 sondeos de exploración que luego fueron integrados en el sistema de suministro de las localidades de la zona. No obstante, el inventario fue realizado hace casi quince años, por lo que el número actual de puntos en el ámbito de estudio debe ser diferente. De hecho, en la base de datos del IGME hay 326 registros para todo el ámbito de estudio. La mayoría de los sondeos se concentran entre Cortegana y Aracena, debido a las mejores propiedades hidrogeológicas de los materiales y a que allí se concentran un mayor número de núcleos de población. Lógicamente, la explotación de las aguas subterráneas en este sector resulta intensa. Las captaciones inventariadas están dedicadas al abastecimiento urbano y, los menos, al regadío, usos domésticos o particulares y ganaderos de pequeña entidad. También existen algunos que fueron perforados para investigaciones mineras o hidrogeológicas. La tabla 3.2 muestra los sondeos más relevantes, ya sea por el uso del agua o por disponer de información piezométrica, de cuantos están recogidos en los inventarios previos.

La demanda urbana se ha cubierto históricamente en la región con las aguas de los manantiales, aunque esta situación ha derivado poco a poco hacia una mayor explotación mediante bombeos para completar o satisfacer totalmente las necesidades hídricas. Las extracciones se intensifican, además, en épocas estivales o de sequía, cuando los caudales drenados de manera natural por los manantiales son insuficientes para garantizar las demandas. Algunas de las captaciones están ubicadas en las proximidades de las surgencias naturales, lo que provoca el agotamiento completo de estas durante los periodos de escasas precipitaciones, como se ha descrito en el apartado anterior. Cabe destacar los sondeos de los que se abastecen los municipios de Galaroza, Aracena o Los Marines, entre otros.

En cuanto a la Red Oficial de control piezométrica, en la MASb Aroche-Jabugo existen 4 piezómetros pertenecientes a la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (códigos P-04.99.017, P-04.99.018, P-04.99.019 y P-04.99.020 en la tabla 3.2), que penetran en materiales ígneos o metamórficos (salvo P-04.99.019 que fue construido sobre la formación Volcanosedimentaria), con profundidades comprendidas entre 53 y 110 metros. Por su parte, una perforación de 180 metros con el código P.05.45.003-P, situada al O de Aracena, es la única en este sector de la MASb Sierra Morena incluida en la Red Oficial de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Las medidas en este último punto se pueden considerar representativas del acuífero carbonático. En el pasado existió otro piezómetro más al E (P.05.45.001-P), en Corteconcepción, con registros desde 2001 a 2005, fecha en el que fue acondicionado para obtener agua de él. La MASb Aracena no dispone de puntos de control oficial.

Tabla 3.2. Características de los principales sondeos de las MASb.

MASb	Nº Inventario IGME	Demoninación	Uso del agua	Cota	Profundidad	Cota	Fecha cota piezométrica	Coordenadas UTM	
				m s.n.m.	del sondeo metros	Piezométrica m s.n.m.		X	Y
A10 Moura - Ficalho		RF1 V.V. Ficalho 524/85	Investigación	265	125	238,5	2000-2004	650099	4202196
		SH Palhais 2 524/49	Investigación	282	99	250	2002-2020	650967	4205042
	837-4-0014	Pocito	Abastecimiento	230	240	217	2012-2016	127759	4210643
	837-4-0001	Rosal de la Frontera	Abastecimiento	217	11	213	1996-2002	128787	4210884
		04.99.017	Investigación	568	108	559	2011-2017	160900	4209397
		04.99.018	Investigación	289	93	285	2011-2017	152465	4209093
	937-3-0038	Aroche-1	Abastecimiento	285	82	279	2012-2016	152092	4209839
	937-3-0039	Aroche-2	Abastecimiento	299	82	292	2012-2016	151868	4208944
	937-3-0025	Aroche-3	Abastecimiento	289	45	280	1996-2001	151516	4209386
	937-3-0035	Aroche-4	Investigación	475	300	464	2012-2017	151433	4206369
	937-3-0036	Aroche-5	Investigación	390	216	387	2015	152205	4206777
	937-4-0005	Las Cefiñas	Abastecimiento	500	70	486	2002	161264	4208887
		04.99.020	Investigación	602	53	586	2011-2017	162585	4204296
	1037-1-0038	Gargallones	Abastecimiento	547	100	531	2012-2017	161272	4205689
	1037-5-0012	Cortegana-1	Abastecimiento	635	52	628	2000-2002	163783	4203157
	1037-5-0014	Cortegana-2	Abastecimiento	565	80	645	1999-2002	165476	4203991
	1037-5-0007	Cortegana-3	Abastecimiento	545	51	526	2019		
ES040MSBTO 00030604	1037-2-0040	Jabugo-1	Abastecimiento	440	75	439	1996-2002	169189	4204163
	1037-2-0045	El Vado	Agricultura	540	135	510	2006-2007	172791	4204803
	1037-2-0044	Ballesteros	Abastecimiento	565	50	547	2003-2006	173627	4204171
	1037-2-0046	Galaroza-1	Investigación	532	403	522	2008-2012	173265	4204312
	1037-6-0056	La Duquesa	Investigación	650	90	642	2008-2010		4198855
	1037-2-0022	Galaroza-3	Abastecimiento	605	45	597	2003	175618	4203547
		04.99.019	Investigación	738	110	721	2011-2017	174020	4200355
	1037-6-0057	Rafael Muñoz	Abastecimiento	721	42	715	2003-2007	174155	4200382
	1037-7-0088	La Mina-1	Abastecimiento	745	40	737	1996-2005	176104	4201059
	1037-7-0090	La Mina-2	Abastecimiento	740	80	718	1996-2005	176463	4201186
	1037-6-0011	Castaño de Robledo	Abastecimiento	760	50	752	1996-2002	174480	4200763
	1037-7-0025	Castaño-1	Abastecimiento	735	220	706	1996-1999	175968	4201439
	1037-7-0023	JM Blanch	Abastecimiento	802	90	768	2003	177352	4200898
	1037-7-0066	Fuenteheridos-1	Abastecimiento	650	102	647	2003	178012	4202536
	1037-7-0019	Fuenteheridos-2	Abastecimiento	760	80	727	2000	177182	4201502
	1037-5-0042	La Encrucijada-4	Investigación	760	72	741	2012-2019	167107	4199827
	1037-6-0061	Aguafría-3	Investigación	627	100	607	2012-2017	171020	4199027
	1037-6-0060	Aguafría-2	Investigación	620	100	601	2012-2016	170908	4198968
	1037-5-0035	La Fractura	Investigación	622	100	606	2012-2019	165790	4199851
	1037-5-0041	La Encrucijada-3	Investigación	782	120	755	2012-2019	166935	4199827
	1037-5-0040	La Encrucijada-2	Investigación	798	81	782	2012-2019	167106	4199947
	1037-5-0036	La Encrucijada-1	Investigación	786	84	767	2012-2016	166898	4200038
	1037-6-0058	Los Veneros	Investigación	538	102	534	2012-2019	168908	4197552
	1037-6-0059	Los Molares	Abastecimiento	558	138	556	2012-2019	169731	4198287
ES064MSBTO 04400010	1037-6-0035	Santa Ana-1	Abastecimiento	500	72	490	2000-2001	171472	4196794
	1037-6-0041	Santa Ana-2	Abastecimiento	591	42	589	1996-1999	173237	4198591
	1037-7-0038	Sondeo Cuesta	Abastecimiento	650	50	625	2001-2004	177943	4198784
	1037-7-0095	El Cabezuelo	Abastecimiento	571	200	560	2012-2019	176815	4198077
	1037-7-0049	Sondeo Linares	Abastecimiento	500	80	496	2003-2005	182090	4199184
	1137-5-0044	Valdezufre-1	Abastecimiento	600	70	577	2000-2002	192571	4196338
	1137-5-0023	Valdezufre-2	Abastecimiento	582	50	579	2000	192860	4196545
	1137-5-0041	Jabuguillo	Abastecimiento	620	70	609	1999-2001	190637	4196287
		05.45.003	Investigación	716	180	660	2007-2017	185741	4200477
	1037-8-0028	Sondeo Castaño	Abastecimiento	690	29	686	2003-2008	184512	4201289
	1037-8-0074	Sondeo Rafael-1	Abastecimiento	655	30	639	2003-2008	185286	4201278
	1037-8-0077	Sondeo Rafael-2	Abastecimiento	657	200	634	2012-2019	185064	4201346
	1037-8-0024	Molino Pombo-1	Abastecimiento	575	70	573	2003-2005	189379	4200774
	1037-8-0078	Molino Pombo-2	Abastecimiento	546	200	544	2012-2017	189381	4200861
	1037-7-0004	La Barraca	Abastecimiento	740	8	737	2003-2005	181573	4200851
ES050MSBTO 00054500	1037-7-0018	Los Marines-1	Abastecimiento	720	24	719	1994-2006	181523	4201111
	1037-7-0094	Los Marines-2	Investigación	731	400	728	2016	181475	4201079
	1037-2-0042	Valdelarco	Abastecimiento	700	55	689	1996-2002	175420	4206393
	1137-5-0009	05.45.001	Investigación	579	50	572	2002-2005	192244	4199758
	1137-5-0020	Corteconcepción	Abastecimiento	560	58,5	551	1984-2007	192407	4199387
	1137-5-0049	PuertoGil	Investigación	578	200	564	2012-2017	192563	4199323
	1137-5-0008	Puerto Moral-1	Abastecimiento	570	50	562	1999-2007	193680	4198721
	1137-5-0048	La Madrona	Investigación	582	75	558	2005		4196266
	1137-5-0050	Puerto Moral-2	Abastecimiento	580	150	564	2012-2019	193594	4198773
	1137-7-0015	Zufre-2	Abastecimiento	490	175	480	2012	205680	4192619

La figura 3.6 muestra la evolución temporal del nivel piezométrico en los puntos indicados en el párrafo anterior, desde enero de 2011 hasta diciembre de 2017; entre los años hidrológicos 2007/08 a 2017/18 en el caso del punto P.05.45.003-P y desde 2001 en el caso de los puntos portugueses. Se dispone de 12 medidas anuales durante los periodos de control, por término general. En cada

sondeo se observa una evolución de la cota piezométrica acorde con el tipo de material que predomina en su emplazamiento. Así, en el punto P.05.45.003-P se aprecia una evolución típica de sondeos situados en acuíferos carbonáticos (formación Aracena en este caso), claramente marcada por el régimen de precipitaciones, con ascensos rápidos de los niveles piezométricos durante los principales eventos pluviométricos y descensos de igual magnitud tras el cese del periodo de lluvias. Los ascensos son proporcionales a la cantidad de lluvia registrada durante el año hidrológico, con valores máximos del orden de 40 metros en un mes según los datos disponibles (año 2012/13). En épocas estivales o en periodos secos los niveles tienden al descenso, pero a un ritmo menor que en situaciones de decrecida. En un primer momento se podría pensar en un funcionamiento hidrodinámico propio de acuíferos kársticos. Sin embargo, el reducido tamaño de este sector y, sobre todo, el régimen influenciado al que se ve sometido por la concentración de bombes (entre los que destacan los sondeos de abastecimiento a Aracena, 1037-8-0074 y 1037-8-0077), deben condicionar la magnitud y el tiempo de la respuesta, en detrimento del poder de regulación natural del acuífero, deducido a partir del hidrograma de la Fuente del Castaño (Figura 3.6). Este supuesto estaría apoyado por el valor medio de la cota piezométrica en el sondeo P.05.45.003-P (660 m s.n.m., Tabla 3.2), 9 metros inferior a la que surge el manantial de la Fuente del Castaño.

En Castaño de Robledo se encuentra el piezómetro P-04.99.019, que corresponde a un sondeo de investigación construido 2010, con 110 metros de profundidad, situado cerca del límite entre las masas de agua subterráneas "Aroche-Jabugo" y "Aracena". El nivel piezométrico estático medio para el periodo 2010/11 a 2017/18 se situó a cota 721 m s.n.m. La evolución histórica de los niveles en este punto dibuja ciclos anuales de ascensos y descensos piezométricos, cuya amplitud es más o menos similar todos los años (Figura 3.7). Los ascensos durante los periodos lluviosos, de hasta 12 metros, presentan cierta inercia, sobre todo a principios del año hidrológico, debido a la capacidad de retención de agua del suelo y a las características hidrogeológicas (acuitardo) de los materiales de la formación Volcanosedimentaria sobre los que fue construido.

Al NO de Cortegana se halla el punto P-04.99.020, con un nivel piezométrico situado a 586 m s.n.m. (Figura 3.2). Más hacia el NO, en el límite septentrional de la MASb "Aroche-Jabugo", en la aldea de Las Cefiñas, se localizan el sondeo P-04.99.017 que se utiliza para el control piezométrico de este sector del ámbito de estudio. El nivel estático medio de su serie histórica se sitúa a 559 m s.n.m. Los casi 7 años de registro (2011-2017) en ambos puntos permiten observar escasas variaciones en los niveles ante las precipitaciones (Figura 3.7). Destaca los aumentos de más de 6 metros en un mes en el punto P-04.99.017, como consecuencia de las lluvias invernales que se registraron en el año 2013/14. Las variaciones del nivel piezométrico que se observan en ambos sondeos son coherentes con la ubicación de estos sobre formaciones rocosas de baja permeabilidad: P-04.99.017 sobre metabasitas y P-04.99.020 ubicado sobre gneises del Dominio de Alto Grado, aunque en la inmediata proximidad de un lentejón de mármoles.

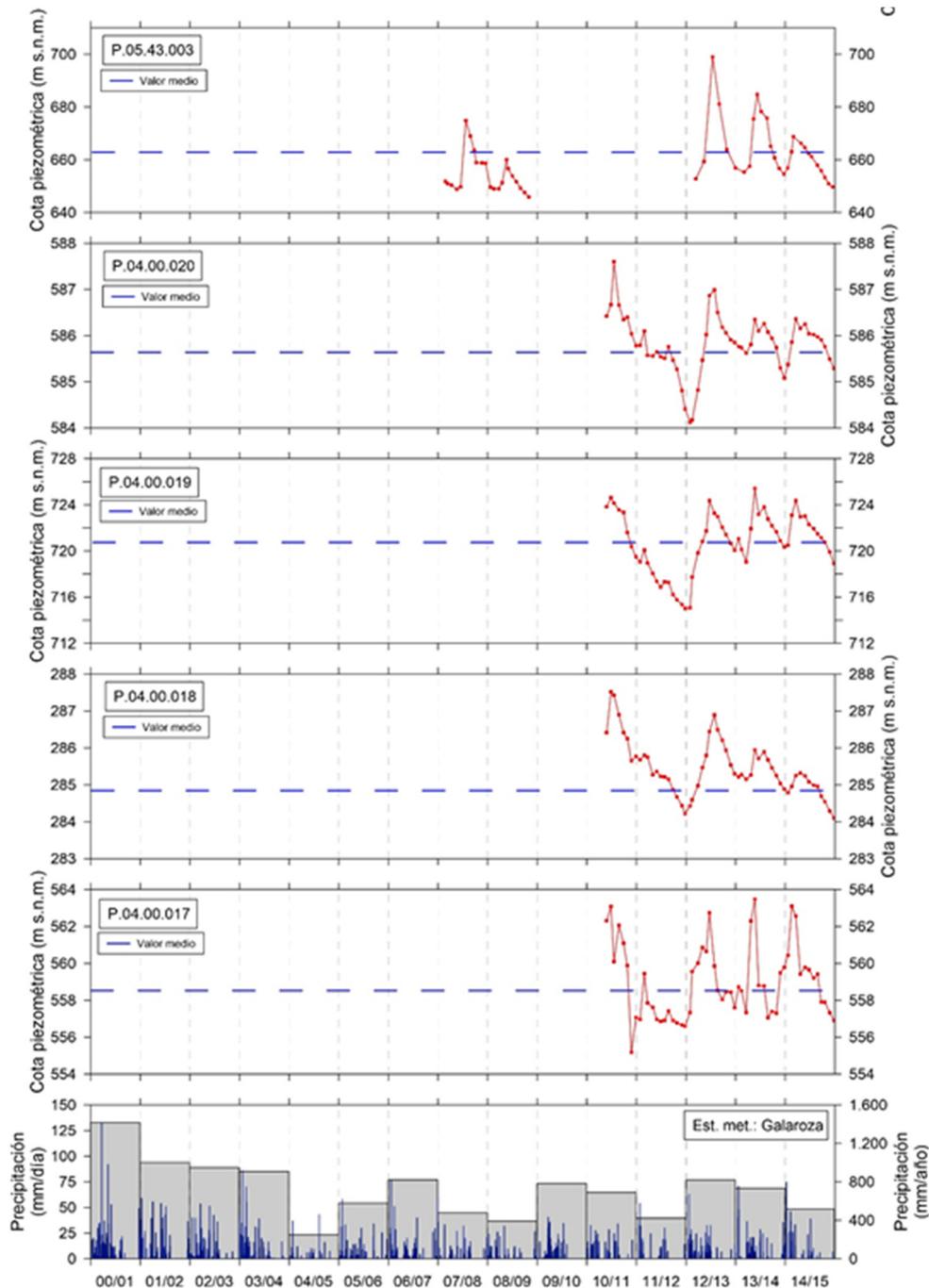


Figura 3.6. Evolución piezométrica registrada en los sondeos P.05.45.003-P, P-04.99.017, P-04.99.018, P-04.99.019 y P-04.99.020 durante diferentes periodos temporales.

3.7. Piezometría en régimen natural e influenciado

La compartimentación geológica de los materiales permeables, el carácter multicapa de los niveles carbonáticos que se intercalan en la formación Volcanosedimentaria y el reducido número de puntos de control piezométrico (tanto en los carbonatos como en las rocas ígneas) dificultan el trazado de isopiezas. Aun así, es posible abordar una descripción aproximada de la geometría de la superficie piezométrica de los distintos sectores si se considera la información disponible, procedente en su mayor parte del trabajo del IGME (2006), y la correspondiente a la localización de las surgencias y los tramos de cauces ganadores que drenan los materiales acuíferos del ámbito de estudio.

Igualmente, se pueden establecer los gradientes hidráulicos y determinar con cierta precisión los sentidos preferentes del flujo subterráneo si se tiene en cuenta la información que aporta el conocimiento de la estructura geológica. El mapa de la figura 3.2 recoge las cotas piezométricas de los puntos contenidos en la tabla 3.2, así como las principales direcciones de flujo subterráneo. Se trata de acuíferos fundamentalmente libres, aunque algunas zonas del borde septentrional y oriental de los carbonatos de la formación Aracena podrían encontrarse parcialmente confinados bajo las metavolcanitas. Cabe destacar la existencia de variaciones piezométricas significativas entre puntos de agua relativamente próximos, aspecto que evidencia el elevado grado de compartimentación hidrogeológica de los distintos afloramientos permeables. También la relevancia del sentido NO del flujo subterráneo en buena parte del acuífero de la sierra de Aracena, a favor de la inclinación del eje del pliegue anticlinal de Fuenteheridos-La Umbría.

En el macizo de la sierra de Aracena se distinguen varios compartimentos hidrogeológicos, según se deduce de la estructura del macizo y de las cotas piezométricas medidas en los puntos disponibles. En los sectores oriental y suroriental del acuífero carbonático los niveles piezométricos están comprendidos entre 572 m s.n.m. del sondeo de abastecimiento a Corteconcepción y 480 m s.n.m. en las cercanías de Zufre. No obstante, el destino final de parte de los flujos subterráneos es el arroyo de la Fuente del Rey, donde la cota piezométrica de uno de los sondeos realizados junto al arroyo (544 m s.n.m.; 1037-8-0078) prácticamente coincide con la de la zona de surgencia de Molino Pombo (540 m s.n.m.). Ello implica necesariamente la existencia de una divisoria hidrogeológica entre ambos extremos de este sector, con sentidos de flujo dominantes opuestos (hacia el NO y hacia el SE). La posición de esta divisoria debe hallarse en las proximidades de la localidad de La Umbría (Figura 3.1), puesto que ahí los carbonatos pierden continuidad cartográfica, y posiblemente en profundidad, debido a las fallas de dirección N60E. Por otra parte, la piezometría deducida de los puntos de agua, tanto sondeos como manantiales, asociados a los lentejones de mármoles del Dominio de Alto Grado que afloran entre Valdezufre e Higuera de la Sierra permiten observar cotas piezométricas comprendidas entre 609 m s.n.m. (1137-5-0041) y 574 m s.n.m. (1137-5-0044).

La situación piezométrica en el sector central del acuífero carbonático de la sierra de Aracena guarda cierto parecido con el anterior, puesto que existen dos compartimentos, uno septentrional y otro meridional, separados por las filitas del núcleo del pliegue antiformal de Fuenteheridos-La Umbría. La piezometría deducida de los puntos de agua existentes en el flanco septentrional, tanto sondeos como manantiales, indica que los sentidos principales de flujo subterráneo son aproximadamente S-N y SO-NE, coherentes con la descarga hacia la Fuente del Castaño (Figura 3.2). Las cotas máximas (737 – 719 m s.n.m.) se observan en el extremo O de este compartimento, al S de Los Marines, y descienden progresivamente hasta 634 - 639 m s.n.m., medidos en los sondeos de abastecimiento a Aracena (1037-8-0077 y 1037-8-0074), y los 669 m s.n.m. de la Fuente del Castaño, actualmente regulada por un sondeo existente junto a la misma. La explotación a la que se ve sometida la zona provoca que las cotas piezométricas en algunos sondeos se encuentren por debajo del nivel de drenaje natural establecido por el mencionado manantial, como ha quedado demostrado por la evolución piezométrica del punto de control P.05.45.003-P (Figura 3.6). Por su parte, la zona meridional del sector central incluiría las rocas carbonáticas que afloran al N de Linares de la Sierra. Aquí los niveles piezométricos deben quedar por encima de 515 m s.n.m., cota de drenaje del manantial de La Herrería, y el flujo subterráneo tiene sentido hacia el E.

El sector occidental del acuífero carbonático tiene también dos zonas claramente diferenciadas respecto a lo que la piezometría se refiere. Por un lado, los propios afloramientos carbonáticos de la formación Aracena, que quedan limitados al O y N por la formación Volcanosedimentaria y al SE

por la falla dirección N60E que discurre entre Alájar y Los Marines (Figuras 3.1 y 3.3). Por otro, los afloramientos de calizas interestratificadas en la formación Volcanosedimentaria y que siguen la traza del río Múrtigas de Fuenteheridos a Galaroza y luego dibujan el cierre periclinal del pliegue anticlinal y afloran de nuevo al SE de Jabugo. En la primera de las zonas mencionadas se aprecian niveles piezométricos comprendidos entre 770 y 700 m s.n.m. Los valores inferiores coinciden con las cotas de surgencia del manantial de la Peña de Arias Montano (715 m s.n.m.) y del manantial de Fuenteheridos (705 m s.n.m.). Las calizas de la formación Volcanosedimentaria que afloran en la segunda de las zonas indicadas, entre Castaño de Robledo y Galaroza, presentan cotas piezométricas comprendidas entre 600 y los 505 m s.n.m. de la cota del río Múrtigas en el paraje de Las Chinas. En ambas zonas, el flujo subterráneo tiene un sentido general NO y el río Múrtigas actúa como colector de las descargas. No obstante, parte del flujo subterráneo que tiene lugar en las calizas de la formación Aracena se dirige hacia el S, hacia el manantial de la Peña de Arias Montano.

3.8. Parámetros hidráulicos e hidrogeológicos

Los únicos datos recopilados sobre las características hidráulicas de los materiales que constituyen los acuíferos asociados a las tres masas de agua subterráneas contempladas en este informe corresponden a los ensayos de bombeos realizados en sondeos de investigación, que posteriormente pasaron a ser de abastecimiento a Corteconcepción, Aracena, Fuenteheridos y Aroche. Los valores de transmisividad para los carbonatos del acuífero de la sierra de Aracena se estimaron comprendidos entre 4 y 251 m²/día (IGME, 2006), con 31 m²/día de valor promedio. La variabilidad de este parámetro corresponde con la de medios hidráulicamente heterogéneos, mientras que la distribución espacial permitió comprobar que la transmisividad es mayor en zonas de fractura. Por su parte, el coeficiente de almacenamiento medio deducido en el sondeo de Corteconcepción fue de 1×10^{-4} .

No existe información respecto a valores de velocidad real de flujo, puesto que no se tiene constancia de que se hayan realizado ensayos con trazadores artificiales en la región.

En lo que respecta a los parámetros hidrodinámicos de los manantiales, los coeficientes de agotamiento calculados en los manantiales de La Herrería, Peña de Arias Montano y Fuente del Rey, en régimen no influenciado, corresponden con el drenaje de un sistema típicamente kárstico ($2,2 - 2,4 \times 10^{-2}$ días⁻¹). Los valores de los coeficientes de agotamiento calculados en las galerías de Puerto Moral y Corteconcepción indicarían incluso un mayor grado de karstificación ($5,7$ y $3,1 \times 10^{-2}$ día⁻¹, respectivamente). En el resto de surgencias relevantes de la sierra de Aracena (Fuenteheridos, Fuente de Nuestra Señora del Carmen, Fuente del Castaño), los coeficientes de recesión están comprendidos entre $2,5$ y $4,6 \times 10^{-3}$ día⁻¹ (IGME, 2006). Estos datos indican un moderado bajo desarrollo de la karstificación funcional en los sectores de acuífero drenados por esas surgencias, por lo que presentarían cierta capacidad de regulación natural. Llama la atención que las surgencias más inerciales del sector occidental estén situadas a menor cota. Es el caso de los manantiales de Fuenteheridos o Fuente de Nuestra Señora del Carmen. En ambos casos, la repuesta más inercial puede estar condicionada por la alimentación que proviene de los materiales cuaternarios asociados a ambos compartimentos.

3.9. Transferencias de recursos hídricos desde o hacia otras masas de agua subterránea

El predominio en la región de formaciones geológicas de baja permeabilidad y la elevada compartimentación tectónica que afecta a los materiales con propiedades acuíferas hace muy difícil, sino imposible, la existencia de transferencias laterales subterráneas hacia otras formaciones permeables. No obstante, sí son posibles movimientos de agua subterránea entre zonas situadas dentro de un mismo compartimento o acuífero pero ubicadas administrativamente en dos ámbitos de planificación hidrológica. Esta circunstancia se produce de manera preferente en dos sectores concretos del ámbito de estudio: en la Peña de Arias Montano, en la terminación occidental de la sierra de la Virgen (Figura 3.2), donde parte de la recarga ocurrida sobre los mármoles situados en la DHTOP es descarga por manantiales situados en la DHGu. La posición de los carbonatos cámbricos como elementos articuladores del relieve y la existencia de flujos subterráneos dirigidos hacia el S y hacia el E en los acuíferos harían posible estos movimientos. Los valores estimados de recursos hídricos transferidos en ambas zonas se indican en apartados posteriores del informe.

3.10. Infraestructuras hidráulicas

No existen infraestructuras hidráulicas de relevancia en el ámbito espacial del presente informe, que afecten a las masas de agua subterránea, más allá de las conducciones que abastecen a los municipios desde las captaciones o sondeos descritos con anterioridad. En ausencia de régimen de explotación, los recursos hídricos procedentes del ámbito de estudio incluido en la MASb Sierra Morena serían regulados por el embalse de Aracena, en la demarcación del Guadalquivir. Aproximadamente 15 km aguas abajo de este, el agua de la riera del Huelva es retenida nuevamente por la presa de Zufre, junto con el resto de la descarga del sector oriental del acuífero de la sierra de Aracena, que se produce, entre otros, por el manantial de La Toba y las surgencias de Zufre.

3.11. Usos del agua

La comarca de la Sierra de Huelva y áreas limítrofes se abastece casi en su totalidad con aguas subterráneas, pese a la escasa entidad de los acuíferos existentes. La población total abastecida ronda los 42.000 habitantes, que supera los 62.000 usuarios en épocas estivales (COPTJA, 2001). Es, por tanto, uno de los usos más destacados que se hace del agua subterránea. El abastecimiento se realiza mediante captación directa del agua en manantiales (Fuenteheridos, Fuente de Nuestra Señora del Carmen, Fuente del Castaño, etc.) y, sobre todo, a partir de sondeos repartidos por todo el macizo, en especial, en el sector central del acuífero de la Sierra de Aracena. En ocasiones, las captaciones proporcionan caudales muy reducidos al explotar rocas metamórficas de escasa permeabilidad.

Otro de los usos consuntivos preferentes que se hace de los recursos hídricos de los acuíferos es el destinado a ganadería y al regadío de las parcelas agrícolas situadas en los valles de los ríos; huertos tradicionales de iniciativa privada en la mayoría de los casos, dedicados al autoabastecimiento. El riego de este tipo de cultivos procede del agua subterránea drenada por los manantiales o de derivaciones mediante acequias desde los cauces. Según datos recogidos en IGME (2006), la demanda agrícola satisfecha con aguas del acuífero de la Sierra de Aracena es del orden de 1 hm³/año.

Con respecto a la actividad industrial, la mayoría de las instalaciones industriales existentes en las localidades de la Sierra de Aracena se abastecen de las redes municipales. Son las canteras de extracción de áridos y piedra ornamental el único sector cuyas necesidades hídricas son cubiertas

por sondeos. La citada actividad minera consume de forma directa del acuífero carbonático un total de 0,1 hm³/año (IGME, 2006).

Cabe añadir el valor ambiental de las masas de agua subterránea, dado que los recursos drenados de manera natural por los manantiales y los aportados a los cauces ganadores constituyen los caudales que sustentan la biodiversidad del Parque Natural de la Sierra de Aracena y Picos de Aroche, así como de los terrenos circundantes. Los valores naturales y el patrimonio cultural y etnográfico de la región atraen cada año a miles de visitantes, lo que convierte al turismo en una de las principales actividades económicas de la comarca.

De forma indirecta, los caudales que descargan el sector nororiental del acuífero hacia la rivera del Huelva son regulados por los embalses mencionados en el apartado anterior, y utilizados para abastecimiento urbano (entre otros a la ciudad de Sevilla), agrícola, industrial y generación de energía hidroeléctrica. Son, por tanto, unos recursos de agua subterránea estratégicos por el número de municipios y actividades económicas que dependen de estos acuíferos.

4. CLIMATOLOGÍA

La climatología en la Sierra Norte de Huelva está condicionada por la influencia que ejercen los frentes lluviosos dominantes procedentes del océano Atlántico y por la orografía de la zona. Dada su ubicación en el interior de la provincia de Huelva, la MASCH Sierra de Aracena se caracteriza por presentar un clima Mediterráneo con influencia continental. Las precipitaciones se registran sobre todo durante los meses invernales y, en menor medida durante el otoño y la primavera. Las elevaciones montañosas suponen un condicionante significativo en la distribución de la precipitación, pues ejercen de barrera a la circulación de las masas de aire húmedo (efecto Föhn o de precipitación orográfica) y ocasionan una mayor pluviometría en las zonas elevadas y en las laderas situadas a barlovento de los frentes lluviosos preponderantes. La temperatura media en la región está comprendida entre 15,5 y 16,6 °C.

4.1. Información meteorológica

Para la caracterización pluviométrica de la zona de estudio se ha considerado la información procedente de 16 estaciones pluviométricas y 5 termométricas (Figura 4.1; Tabla 4.1). Todas las estaciones contempladas pertenecen a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La relación de estaciones cubre un rango altitudinal comprendido entre 266 (Aroche, Maserá) y 718 m s.n.m. (Aracena Segunda). Todas las estaciones poseen una cadencia de registro diaria y sus principales características están recogidas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Estaciones climáticas utilizadas con sus principales características (Datum ETRS89).

Estación	Código	Coordenadas UTM		Altitud (m s.n.m.)	Parámetro de medida	E. termo. asignada	P. media (mm)	T. media (°C)
		X	Y					
Alajar	4560	177518	4198023	558	P,T	---	1149	16,0
Almonaster la Real	4563	166793	4198205	592	P,T	---	1113	16,6
Aracena Segunda	4558A	186674	4199523	718	P,T	---	1027	15,5
Cortegana	4523	163507	4202262	699	P	4563	1039	---
Galaroza	4515	173766	4203608	559	P,T	---	969	15,8
Aroche, Las Cefiñas	4523E	161021	4209006	536	P	4527E	765	---
Aroche, Maserá	4527E	150589	4210991	266	P,T	---	755	16,4
Jabugo, El Repilado	4517	168155	4204018	439	P	4515	750	---
Aroche, El Vínculo	4528	154026	4202040	385	P	4527E	768	---
Aroche, Los Cirios	4528I	148259	4200586	328	P	4527E	699	---
Aracena, Valdezufre	4556	192579	4196487	565	P	4558A	849	---
Aracena, Cañada Negra	4559	185189	4193371	569	P	4558A	819	---
Almonaster la Real, Veredas	4562	163037	4199748	520	P	4563	906	---
Pantano Aracena	5758	194701	4200885	420	P	4558A	724	---
Puerto Moral	5759	194033	4199366	523	P	4558A	881	---
Higuera de la Sierra	5763	196388	4193566	627	P	4558A	846	---

El tratamiento de las series diarias de precipitación y temperatura ha consistido en la identificación y completado de las lagunas en las series originales y en la identificación y subsanación de errores en el registro. El completado de series se ha realizado mediante regresión lineal entre pares de estaciones según su coeficiente de correlación (R2). Para la identificación de errores puntuales y sistemáticos se ha aplicado el método de dobles masas. En ninguno de los registros analizados se han detectado errores de este tipo.

4.2. Análisis espacio-temporal

Análisis temporal

La precipitación media anual (aritmética) se ha calculado a partir de la información suministrada por las 16 estaciones seleccionadas. Se han escogido dichas estaciones por la extensión temporal y continuidad del registro, así como por su distribución espacial. La precipitación media aritmética calculada ha sido 856 mm (Tabla 4.2). Este valor se ha tenido en cuenta para la designación de los años de tipo húmedo, medio y seco, pero no para la evaluación de la recarga. La cuantificación de las entradas por precipitación se ha realizado a partir de la distribución espacial de la lluvia (planimetría de isoyetas), por representar de forma más fidedigna la variabilidad de las precipitaciones en la región.

Durante el periodo 1985/86 - 2014/15 se han contabilizado 10 años de tipo húmedo, 11 de tipo medio y 9 considerados como secos. Se han contemplado como años húmedos aquellos en los que la precipitación sobrepasa a la precipitación media aritmética en un 15% y como años secos, aquellos cuya precipitación es un 15% inferior a esta. Los años de tipo medio son aquellos en los que la precipitación anual está situada entre ambos umbrales. El año más húmedo registrado en el periodo 1985/86 - 2014/15 fue 1995/96 con una precipitación media total de 1.414 mm, mientras que el más seco fue 2004/05 con 375 mm (Tabla 4.2, Figura 4.2). Existe una cierta alternancia entre periodos húmedos y secos, cuya extensión temporal es variable. El periodo comprendido entre los años hidrológicos 1995/96 – 1997/98 fue el más largo con precipitaciones por encima del umbral del año húmedo (984 mm).

Análisis espacial

La influencia del relieve en la magnitud de la precipitación registrada en la región queda reflejada en la figura 4.3. La precipitación media anual aumenta en función de la altitud de la estación considerada. Para la realización del gradiente pluviométrico se han considerado las 16 estaciones pluviométricas incluidas en la tabla 4.1. Se ha relacionado la altitud en m s.n.m. de cada estación con su precipitación media anual para el periodo 1985/86 - 2014/15. El gradiente calculado es de 79 mm/100 metros de altitud. Este gradiente ha servido de apoyo para el trazado de las isoyetas en aquellos lugares de cumbres carentes de estación meteorológica.

Las figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran la distribución espacial de las precipitaciones en el ámbito de estudio, mediante los mapas de isoyetas característicos de las condiciones hidroclimáticas húmedas, medias y secas, respectivamente. Se ha considerado el año hidrológico 1995/96 (el más húmedo del periodo 1985/86 - 2014/15) como representativo de las condiciones húmedas (Figura 4.4) y el 2004/05 (el más seco del periodo de control) como característico de los años con escasas precipitaciones (Figura 4.6). Las condiciones hidrometeorológicas medias (Figura 4.5) se han representado a partir de los valores medios aritméticos obtenidos para las distintas estaciones pluviométricas (Tabla. 4.2).

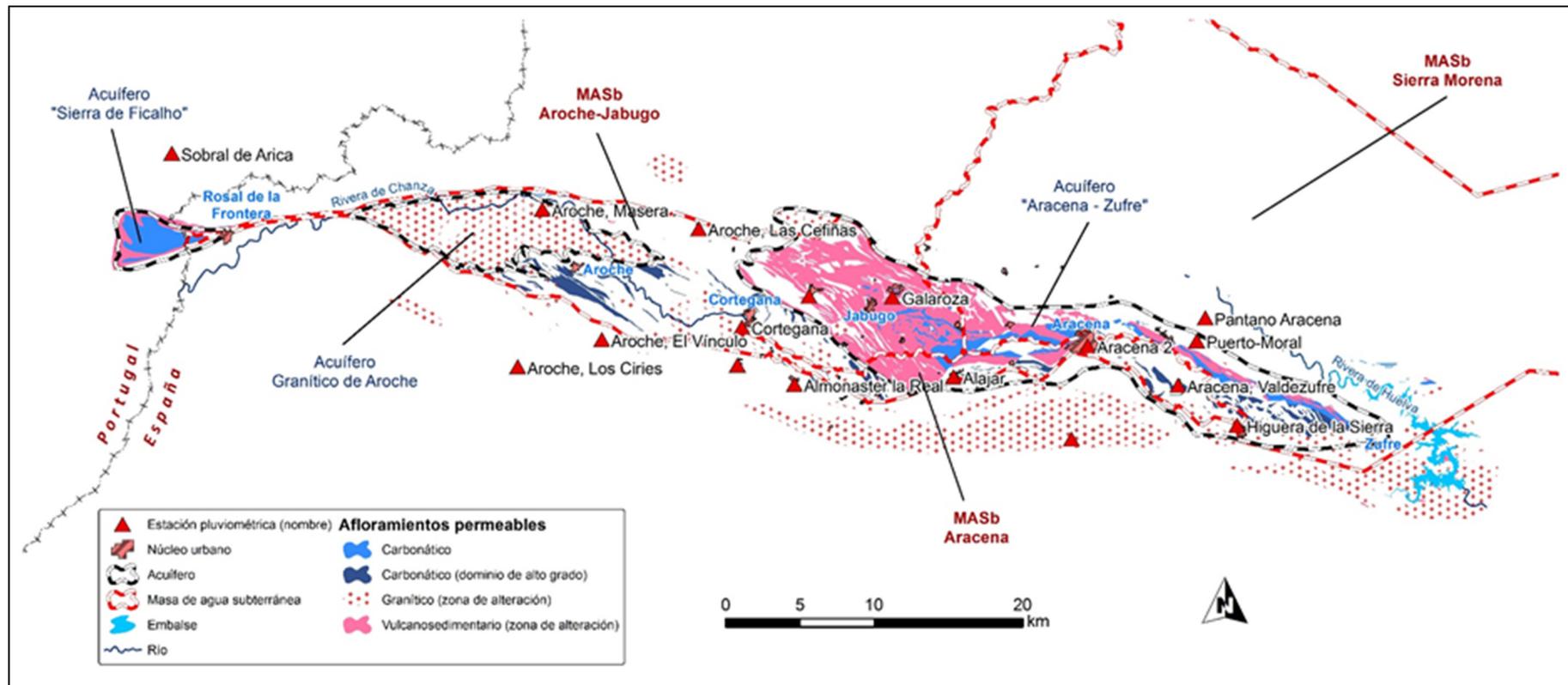


Figura 4.1. Esquema cartográfico con los afloramientos de los materiales permeables asociados a cada MASb y las estaciones meteorológicas utilizadas.

Año hidrológico	Alajajar (4560)	Almonaster la Real (4563)	Aracena Segunda (4558A)	Cortegana (4523)	Galaroza (4515)	Las Cefiñas (4523E)	Sobral de arica (Pt)	Masera (4527E)	Jabugo El Repilado (4517)	Aroche El Vínculo 4528	Aroche Los Círcos (4528I)	Arcena Valdezufre (4556)	Aracena Cañada Negra (4559)	Almonaster La Real Veredas (4562)	Pantano Aracena (5758)	Puerto Moral (5759)	Higuera de la Sierra (5763)	Media
1985/86	1087	1150	839	825	859	761	460	694	779	714	652	983	809	566	583	760	704	778
1986/87	1135	1240	860	1089	1087	795	577	909	835	846	862	887	688	827	602	785	790	871
1987/88	1466	1582	1343	1396	1279	1007	591	1064	1067	1078	1052	997	825	993	877	1054	980	1097
1988/89	1016	985	892	932	996	832	557	851	731	898	801	885	740	588	650	731	620	806
1989/90	1601	1512	1209	1495	1226	1152	858	1019	1221	1228	1257	1206	1127	1167	1136	1269	1076	1221
1990/91	1076	964	771	872	830	772	449	663	717	711	715	665	715	647	649	710	624	738
1991/92	675	545	628	549	485	407	318	396	358	463	421	462	623	415	537	560	419	486
1992/93	634	614	580	598	582	521	344	451	415	464	463	548	588	444	467	480	407	506
1993/94	1117	1020	964	1144	1032	716	535	854	851	693	633	786	833	996	658	797	544	834
1994/95	712	630	628	518	526	418	242	375	387	312	371	501	542	492	398	450	325	460
1995/96	1964	1912	1658	1778	1550	1194	860	1262	1132	1053	1051	1541	1415	1845	1224	1529	1070	1414
1996/97	1649	1447	1395	1411	1283	911	647	964	976	859	800	1247	1322	1350	1018	1211	883	1140
1997/98	1826	1473	1441	1472	1458	1062	858	1129	1041	874	937	1159	1136	1414	1065	1311	870	1207
1998/99	551	543	447	531	450	421	326	465	393	239	374	358	353	535	323	336	273	407
1999/00	1096	964	809	937	893	750	459	791	793	524	664	731	706	941	598	752	531	761
2000/01	2092	1647	1701	1645	1370	1049	748	1417	1188	993	924	1307	1237	1549	992	1398	854	1301
2001/02	1319	1178	1042	1047	1024	656	572	1000	797	625	586	772	743	1049	662	872	1008	880
2002/03	1368	1216	1152	857	1078	799	543	950	775	766	702	837	932	1134	730	780	1276	935
2003/04	1082	1095	1080	1037	1043	907	566	907	757	935	797	774	893	851	771	1341	1296	949
2004/05	398	455	469	465	435	258	231	250	322	408	221	453	361	366	330	401	560	375
2005/06	904	938	921	877	760	608	544	577	558	528	535	775	687	752	557	717	958	717
2006/07	1310	1336	1314	1326	1107	906	606	821	804	1169	813	1045	957	1070	905	1075	1426	1058
2007/08	918	905	939	893	768	553	460	477	558	870	484	885	681	725	645	768	1062	741
2008/09	685	735	688	706	587	627	222	391	459	556	560	524	531	591	478	571	635	562
2009/10	1633	1641	1745	1610	1399	1020	855	783	1006	1367	899	1414	1249	1313	1199	1420	1676	1308
2010/11	1312	1416	1484	1285	1349	833	321	690	971	1312	757	1044	1072	1133	1021	1212	1592	1106
2011/12	567	699	538	648	551	510	168	422	406	432	450	481	406	561	372	444	428	475
2012/13	1342	1421	1345	1242	1228	990	330	820	889	838	871	898	981	1138	926	1102	1064	1025
2013/14	1060	1208	1051	1147	1030	888	294	734	747	751	780	702	768	967	724	860	811	854
2014/15	870	931	890	841	795	630	265	519	578	532	547	593	647	746	612	729	633	668
Max	2092	1912	1745	1778	1550	1194	860	1417	1221	1367	1257	1541	1415	1845	1224	1529	1676	1507
Med	1149	1113	1027	1039	969	765	494	755	750	768	699	849	819	906	724	881	847	856
Mn	398	455	447	465	435	258	168	250	322	239	221	358	353	366	323	336	273	333
Media * 1.15	1321	1280	1182	1195	1114	880	568	868	863	883	804	976	942	1041	832	1013	973	984
Media * 0.85	977	946	873	883	823	650	420	642	638	653	594	721	696	770	615	749	720	728
Años húmedos	9	10	10	10	9	11	10	10	9	9	9	10	9	11	10	11	11	10
Años medios	11	10	9	8	11	9	9	10	11	10	10	10	10	6	8	8	6	11
Años Secos	10	10	11	12	10	10	11	10	10	11	11	10	11	13	12	11	13	9

Tabla 4.2. Precipitación anual (mm) durante el periodo 1985/86 – 2014/15 en la sierra de Aracena y áreas adyacentes. Años tipo: azul (húmedo), amarillo (seco) y blanco (año de tipo medio).

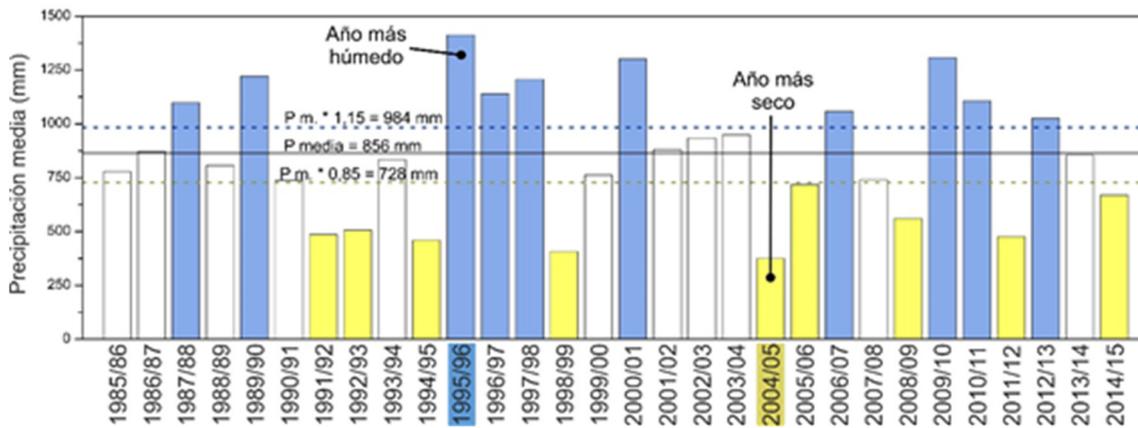


Figura 4.2. Distribución temporal de la precipitación media anual durante el periodo 1985/86 – 2014/15. En azul, años de tipo húmedo; en blanco, años de tipo medio; y en amarillo, años de tipo seco.

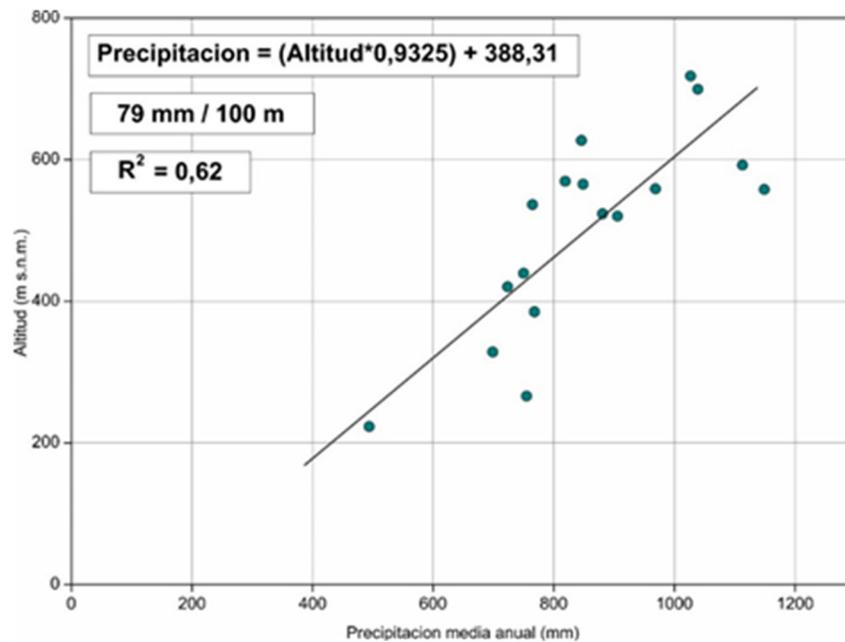


Figura 4.3. Gradiente pluviométrico en función de la altitud correspondiente al periodo 1985/86 – 2014/15.

Con el objetivo de adaptar la representación gráfica de la precipitación a las diferentes condiciones hidroclimáticas, la equidistancia de las isoyetas ha sido de 100 mm para los años húmedo y medio y de 50 mm para las condiciones secas. La distribución espacial de la lluvia se caracteriza por ser más elevada en las zonas con mayor altitud (zona central) y disminuir paulatinamente hacia la periferia del ámbito de estudio. Esta distribución es tanto más acusada cuanto más húmedo es el año considerado. Las precipitaciones más elevadas en un año medio se registran en las estaciones de Alájar, Almonaster la Real, Aracena Segunda y Cortegana (precipitación media anual superior a 1.000 mm) y se reducen rápidamente hacia la zona septentrional y meridional. Los valores más bajos de precipitación se registran hacia occidente con independencia del tipo de año hidrológico. Debido a la ausencia de estaciones de medida en las zonas más elevadas del área de estudio, la cuantificación de la lluvia en estas áreas para las distintas condiciones meteorológicas se ha efectuado mediante extrapolación de los valores calculados con el gradiente altitudinal (Figura 4.3).

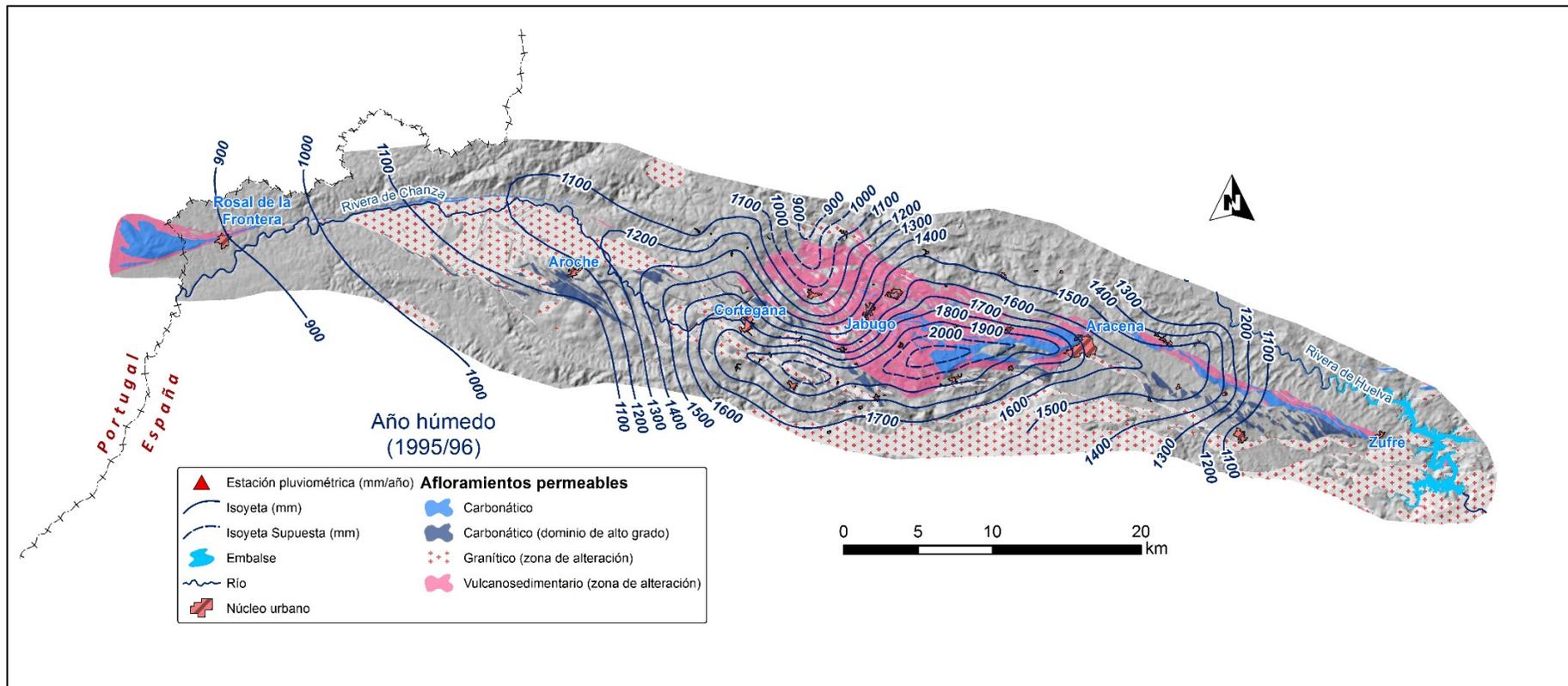


Figura 4.4. Mapa de isoyetas correspondiente al año más húmedo (1995/96) del periodo histórico.

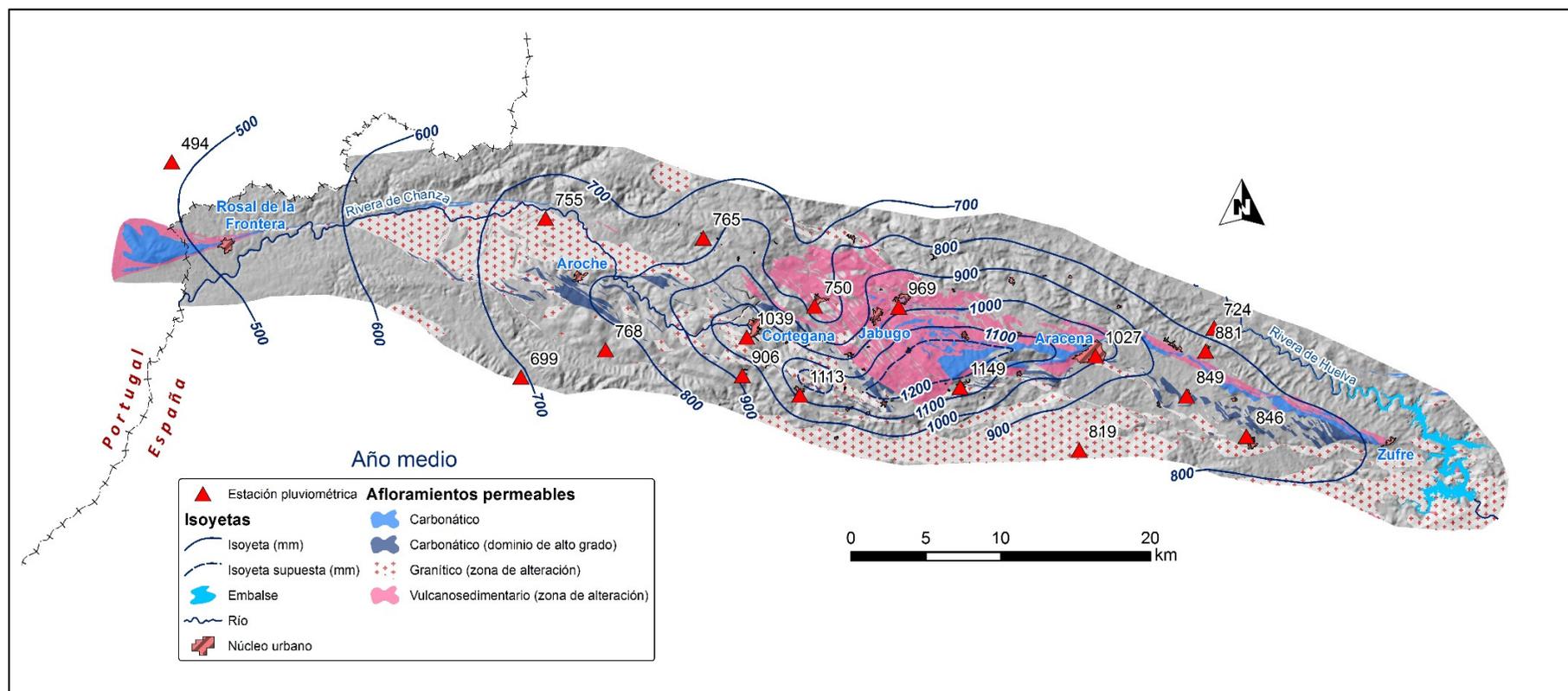


Figura 4.5. Mapa de isoyetas correspondiente al año medio del periodo histórico.

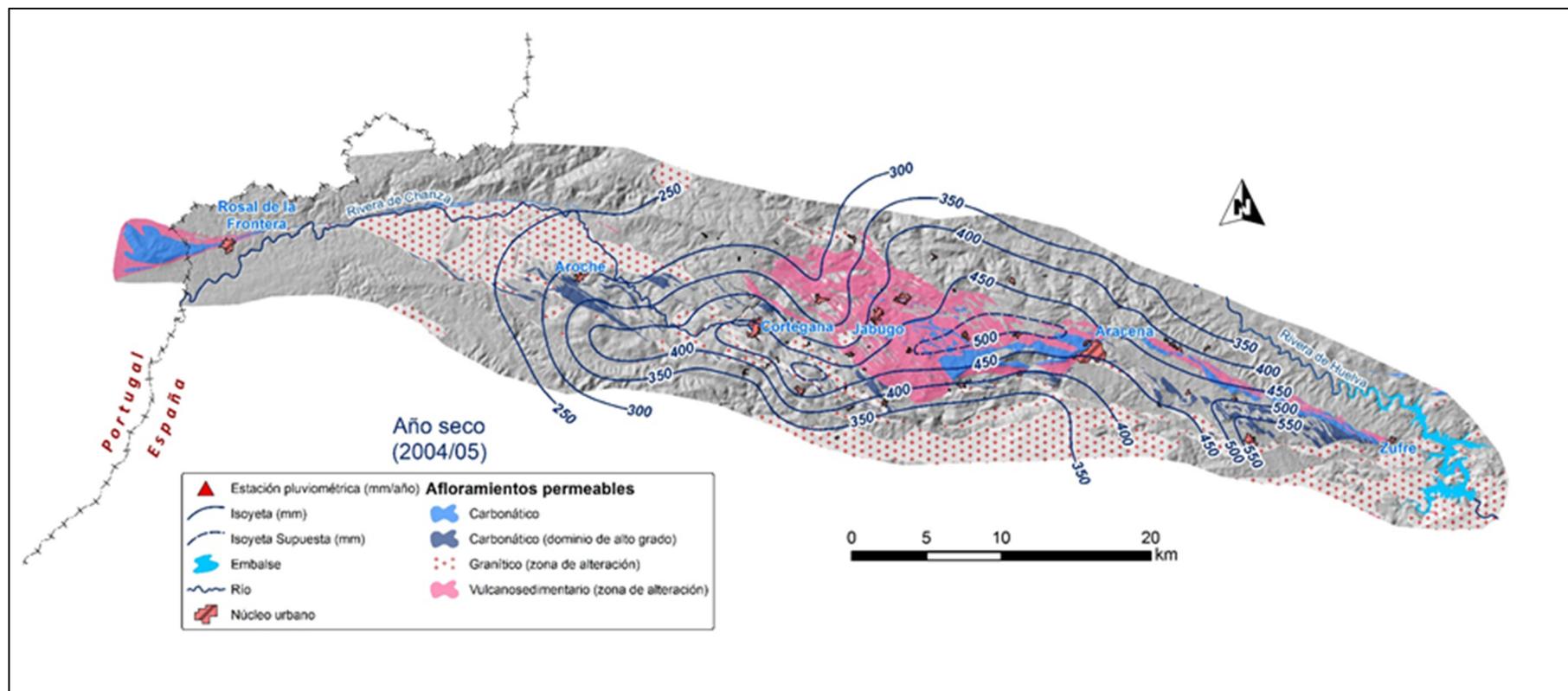


Figura 4.6. Mapa de isoyetas correspondiente al año más seco (2004/05) del periodo histórico.

5. RECARGA A LOS ACUÍFEROS

En el presente trabajo se aplican tres metodologías diferentes para el cálculo de la recarga: la aplicación del balance hídrico del suelo (Thornthwaite, 1948) con la ecuación de Hargreaves y Samani (1985), el método APLIS (IGME-GHUMA, 2003; Andreo et al., 2008; Marín, 2009) y el software RENATA (DPA-IGME, 2012), ya que numerosos autores (Lerner et al., 1990; Custodio, 1998) recomiendan utilizar varios métodos de cálculo y contrastar sus resultados dado que cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes.

Estos métodos, utilizan como base el balance de agua en el suelo, el cual calcula la recarga de los acuíferos por la infiltración del agua de lluvia que cae sobre los afloramientos permeables, una vez descontada la fracción de agua sometida a evapotranspiración, retención por el suelo y escorrentía superficial fundamentalmente. Por ello, para realizar una correcta evaluación de recursos hídricos, es necesario cuantificar el volumen de cada uno de estos términos y restarlos de la cantidad total de precipitación, con el fin de obtener la cantidad de recurso que se incorpora al flujo subterráneo.

Para el cálculo del balance de agua en el suelo, en la primera metodología de cálculo citada, se han utilizado las series de datos diarias de precipitación y temperatura del aire, disponibles en la zona (Tabla 4.1). Todos los cálculos han sido realizados mediante el *software* TRASERO (Padilla y Delgado, 2005 y 2013). Como primer paso, se han calculado las series de evapotranspiración potencial (*ETP*) a partir de las series de temperatura máxima y mínima diaria, según la ecuación de Hargreaves y Samani (1985). Con la conjunción de los datos de *ETP* y precipitación, se han calculado las series de evapotranspiración real (*ETR*) y lluvia útil, que representa la fracción del agua de lluvia que está disponible para infiltrarse y recargar los acuíferos. Para efectuar dicho cálculo es necesario establecer los valores de las diferentes variables que intervienen en el proceso, como la reserva útil del suelo (*RU*) o el umbral de generación de escorrentía (*P_o*). Ambos factores están relacionados con el desarrollo de la cobertura edáfica sobre las superficies de recarga, la litología, la pendiente o los usos del suelo.

El método APLIS, utilizado para acuíferos carbonáticos, se basa en la estimación de la tasa de infiltración de las precipitaciones medias anuales en función de las características intrínsecas del acuífero.

El software RENATA es una herramienta matemática desarrollada específicamente para estimar la recarga natural a los acuíferos de forma distribuida en el espacio y, a diferencia que los anteriores, también en el tiempo. Es una herramienta de modelización matemática desarrollada específicamente para la estimación de la recarga natural de acuíferos a partir del balance de agua del suelo utilizando las series diarias de precipitación y temperatura distribuidos por polígonos de Thiessen. Dado que el paquete de cálculo cuenta con un modelo de flujo en diferencias finitas, integrado en el mismo, se pueden caracterizar, entre otros parámetros, la dirección y sentido del flujo subterráneo, por lo que resulta una herramienta útil para la identificación y delimitación de divisorias hidrogeológicas, que es uno de los objetivos del presente trabajo.

Los cálculos se han llevado a cabo para el periodo 1985/86 - 2014/15 (30 años hidrológicos). Para el cálculo de la recarga se ha considerado, por un lado, la superficie individual de afloramientos carbonáticos y, por otro, la superficie total de afloramientos de distinta naturaleza que muestran cierto interés hidrogeológico dentro del espacio de la MASCH Sierra de Aracena. Las rocas carbonáticas se han agrupado en dos clases a tenor de las diferencias en sus propiedades hidráulicas puestas de manifiesto en estudios previos (IGME, 2006): afloramientos carbonáticos de grado metamórfico medio-bajo (B) y afloramientos carbonáticos de grado metamórfico alto (A). Finalmente, la recarga asociada a los materiales de la formación Volcanosedimentaria ha sido

evaluada de manera independiente en este informe y solo por el método del balance de agua en el suelo, dado el funcionamiento de acuífero pobre o acuitado de estas rocas.

5.1. Estimación de la recarga autóctona mediante el balance de agua en el suelo

Para la estimación de la recarga por el método de balance de agua en el suelo se ha calculado, en primer lugar, la evapotranspiración potencial (ETP) en cada una de las estaciones meteorológicas consideradas en el apartado 4 (Climatología), por la ecuación de Hargreaves y Samani (1985) y para el periodo 1985/86 - 2014/15. A continuación se han calculado las series de evapotranspiración real (ETR) para las mismas estaciones mediante un balance hídrico del suelo. A aquellas que solo disponen de registro pluviométrico se les ha asignado la serie de ETP de la estación más cercana por el método de los polígonos de Thiessen. Se han aplicado valores diferentes de reserva útil del suelo (RU) y de umbral de escorrentía (Po) en función del tipo de afloramiento permeable considerado y del desarrollo forestal y de la pendiente media sobre dichas superficies. Para los afloramientos carbonáticos paleozoicos y cámbricos de los dominios de alto y bajo grado se ha aplicado un valor de RU de 65 mm. En los afloramientos ocupados por rocas de la secuencia volcanosedimentaria, cuya alteración produce un regolito que favorece el desarrollo del suelo, se ha aplicado un valor de RU de 300 mm.

En cuanto a la fracción de escorrentía superficial que se pueda producir, el cálculo se ha realizado de manera simultánea al de la evaluación de la ETR mediante la ecuación de Témez (1978), integrada en el código TRASERO 2.1 (Padilla y Delgado, 2013), y según los umbrales de escorrentía fijados para cada tipo de afloramiento (Po). En las rocas carbonáticas se ha escogido un valor de Po igual a 20 mm, mientras que en el resto de los afloramientos (rocas graníticas, detríticas y vulcanosedimentarias) ha sido de 40 mm. La asignación de uno u otro valor de Po conlleva una mayor o menor generación de escorrentía superficial e infiltración de agua y la consecuente influencia en la recarga a los acuíferos.

Una vez descontada la ETR a las series de precipitación de cada una de las estaciones se obtiene la lluvia útil (PU), que representa el agua que estaría disponible. A continuación, se han estimado las respectivas tasas de recarga y los recursos medios asociados ($\text{hm}^3/\text{año}$), tras sustraer a los valores de lluvia útil los correspondientes valores de escorrentía estimados según las características de los afloramientos considerados.

Los valores escogidos como representativos de la reserva útil del suelo y de umbral de escorrentía en mármoles y calizas cámbricas del ámbito de estudio han sido de 65 y 20 mm, respectivamente. En un primer momento se consideró 40 mm de RU y 42 mm de Po según la experiencia previa del IGME (2006) en los macizos carbonáticos de Sierra Morena y el ajuste conseguido en el proceso de calibración entre salidas y entradas en la cabecera del río Múrtigas con la aplicación del balance de agua en el suelo (Martos Rosillo et al., 2008b). Sin embargo, a diferencia de los trabajos mencionados, en el presente informe no se ha adaptado un proceso de calibración en el que infiltración y escorrentía superficial hayan sido evaluadas de forma conjunta y global para la superficie de una cuenca hidrográfica dada; los recursos hídricos han sido estimados de manera independiente, mediante agrupación de litologías con características hidrogeológicas parecidas. Además, la ecuación de Thornthwaite para el cálculo de la ETP fue la aplicada en el trabajo de 2006, mientras que aquí se ha optado por Hargreaves y Samani (1985). En cualquier caso, el notable desarrollo edáfico y de la cobertera vegetal sobre los afloramientos carbonáticos promueve que los valores escogidos se consideren verosímiles para las superficies de recarga consideradas. En cambio, sí se ha optado por los valores utilizados por el IGME (2006) para los afloramientos ocupados por rocas de la formación Volcanosedimentaria: 300 mm de RU y 40 mm de Po, que se justifica por el significativo desarrollo edáfico.

Una vez obtenidos los valores de infiltración para cada una de las estaciones disponibles, se ha procedido a representar su distribución espacial para valores de RU de 65, 150 y 300 mm (isolíneas de infiltración) y para el año más seco, más húmedo y medio del periodo temporal considerado. En la figura 5.1 se muestra, a modo de ejemplo, la distribución espacial de las isolíneas en condiciones hidroclimáticas medias para los afloramientos de rocas vulcanosedimentarias. En el trazado de las isolíneas de infiltración se deberían tener en cuenta las variaciones de la temperatura, y por tanto de la evapotranspiración, con la altitud. Sin embargo, la escasez de estaciones meteorológicas en el interior de los macizos que constituyen el ámbito de estudio no permite calcular un gradiente termométrico y, por tanto, evaluar su influencia en la evapotranspiración, como apoyo en el trazado espacial de las isolíneas.

Los resultados de la evaluación de la recarga, mediante el método del balance de agua en el suelo, para valores de RU de 65, 150 y 300 mm, dan unos recursos medios de origen autóctono obtenidos con la ecuación de Hargreaves y Samani (1985) para los afloramientos carbonáticos asociados a la MASCH Sierra de Aracena que suman 9,29 hm³/año. Este valor corresponde a una tasa de recarga del 46,5 %, para una precipitación media estimada por planimetría de isoyetas de 869 mm (19,98 hm³/año). Si se consideran conjuntamente los afloramientos carbonáticos y detríticos permeables el valor de la recarga asciende hasta 9,96 hm³/año (Tabla 5.1), ya que 0,67 hm³/año sería la recarga producida en condiciones hidrometeorológicas medias sobre las formaciones cuaternarias detríticas que aparecen en el valle del río Múrtigas.

De los 9,96 hm³/año que suma la recarga de origen autóctono producida en el acuífero de la sierra de Aracena, 4,71 hm³/año corresponderían a los recursos medios evaluados en el sector occidental o del río Múrtigas, 2,52 hm³/año en el sector Central (Fuente del Castaño), 0,65 hm³/año los asociados al de la Fuente de La Herrería, 1,12 hm³/año en el sector Oriental (Fuente del Rey), y finalmente 0,96 hm³/año a la recarga generada sobre los afloramientos carbonáticos agrupados en torno al sector Suroriental (Zufre). Como se puede observar en la tabla 5.1, la mayor parte de los recursos del acuífero de la sierra de Aracena están asociados a la recarga que se produce sobre los mármoles cámbricos del Dominio de Bajo Grado (formación Aracena).

Durante el año hidrológico más húmedo (1996/97), tanto la precipitación total sobre el conjunto de afloramientos carbonáticos (1.430 mm; 40,11 hm³) como la tasa de recarga (56,7 %) son relativamente elevadas, lo que supone unos recursos próximos a 19,10 hm³. A este último valor habría que añadir 1,60 hm³ si se tiene en cuenta la recarga producida sobre los afloramientos detríticos aluviales presentes en la cabecera del río Múrtigas. En el año más seco (2004/05) la precipitación registrada fue significativamente más baja (396 mm; 11,09 hm³), así como la tasa de recarga calculada (19,7 % de la precipitación), por lo que los recursos ascendieron a 1,97 hm³, con una aportación nula procedente de formaciones detríticas del valle del río Múrtigas.

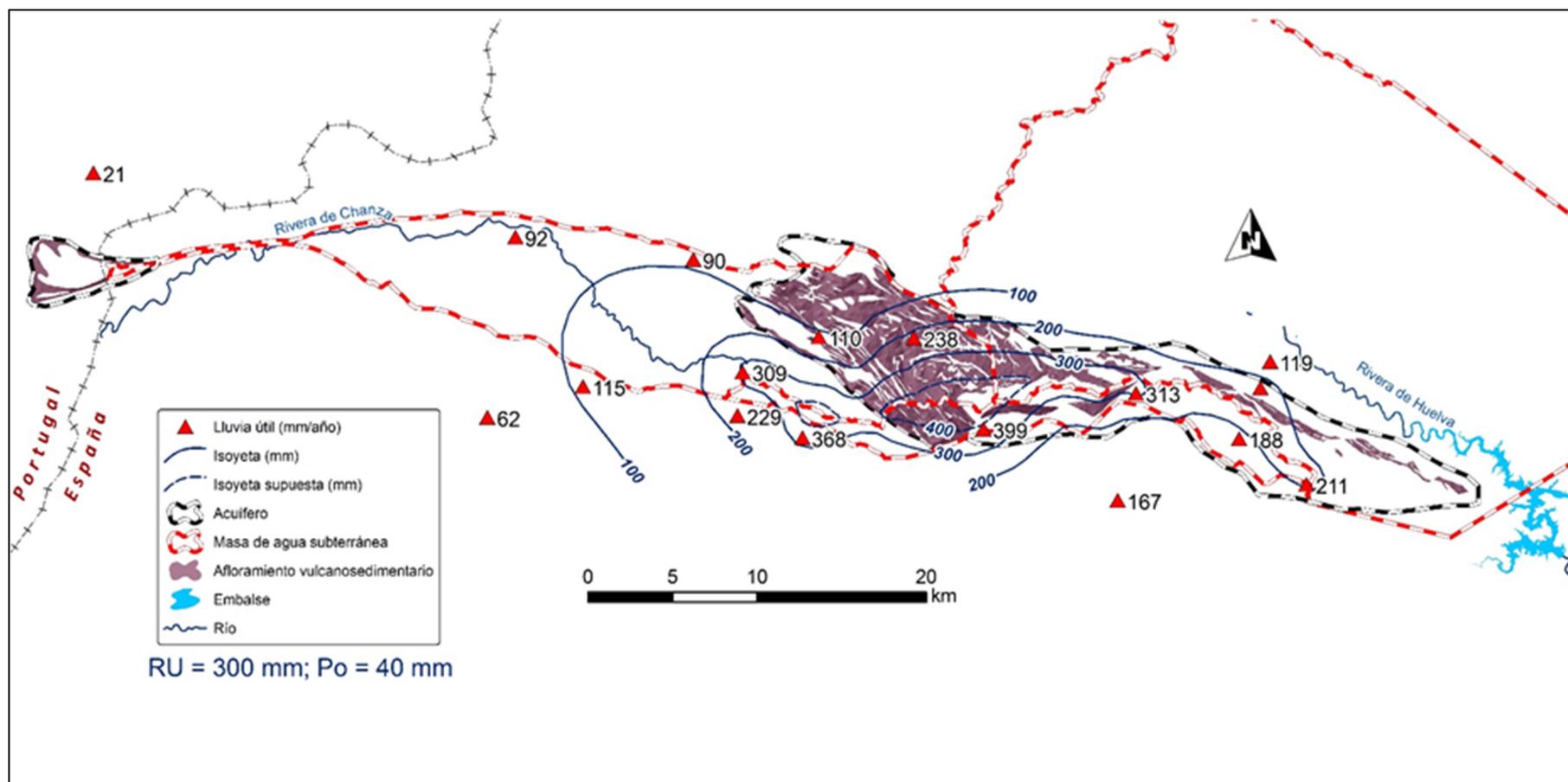


Figura 5.1. Mapa de isótopos de valores de lluvia útil (RU = 300 mm) sobre los afloramientos de rocas vulcanosedimentarias del área de estudio, para el cálculo de la recarga media del periodo 1985/86 – 2014/15.

Tabla 5.1. Valores de recarga estimados mediante el balance de agua en el suelo con la ecuación de Hargreaves y Samani (1985) para el cálculo de la ETP, con RU de 65 mm –carbonatos- y 150 mm –depósitos cuaternarios aluviales-. y el método APLIS en la MASb Sierra de Aracena.

Acuífero	Sup. (km ²)	Superficie de recarga (km ²)				Afloramientos carbonáticos del Dominio de Bajo Grado (B)						Depósitos detríticos aluviales cuaternarios									
		Carb.(B)	Carb.(A)	Gran.	Cuat.	Año tipo	Precipitación		Recarga		Tasa rec.	Método APLIS			Año tipo	Precipitación		Recarga		Tasa rec.	
							hm ³ /año	mm/año	hm ³ /año	mm/año	(%)	hm ³ /año	m ³ /m ²	(%)		hm ³ /año	mm/año	(%)			
Acuífero de sierra de Aracena	Sector Occidental (Río Múrbigat)	8,7	7,09	--	--	1,65	Húmedo	14,07	1985	7,83	1104	55,6	7,42	1,05		Húmedo	2,79	1688	1,60	969	57,4
							Medio	8,34	1176	4,04	570	48,5	4,39	0,62	52,7	Medio	1,66	1008	0,67	408	40,5
							Seco	3,34	471	0,68	96	20,4	1,76	0,25		Seco	--	--	--	--	--
	Sector Central (Fte. Castaño)	4,9	4,87	--	--	--	Húmedo	8,97	1842	5,02	1031	56,0	4,67	0,96		Húmedo	--	--	--	--	--
							Medio	5,27	1083	2,52	518	47,8	2,75	0,56	52,1	Medio	--	--	--	--	--
							Seco	2,28	468	0,47	96	20,5	1,19	0,24		Seco	--	--	--	--	--
	Sector Central-Sur (Fte. Herrería)	1,1	1,11	--	--	--	Húmedo	2,19	1969	1,26	1132	57,5	1,09	0,98		Húmedo	--	--	--	--	--
							Medio	1,28	1151	0,65	582	50,6	0,64	0,57	49,9	Medio	--	--	--	--	--
							Seco	0,49	437	0,10	92	21,1	0,24	0,22		Seco	--	--	--	--	--
	Sector Oriental (Fte. del Rey)	3,0	2,99	--	--	--	Húmedo	4,34	1450	2,66	891	61,4	2,23	0,75		Húmedo	--	--	--	--	--
							Medio	2,52	842	1,12	374	44,4	1,30	0,43	51,5	Medio	--	--	--	--	--
							Seco	1,33	446	0,30	100	22,4	0,69	0,23		Seco	--	--	--	--	--
Sector Suroriental Zúñe	3,2	3,21	--	--	--	Húmedo	3,22	1004	2,33	727	72,4	1,66	0,52		Húmedo	--	--	--	--	--	
						Medio	2,57	800	0,96	300	37,5	1,32	0,41	51,5	Medio	--	--	--	--	--	
						Seco	1,66	518	0,42	130	25,1	0,86	0,27		Seco	--	--	--	--	--	

5.2. Estimación de la recarga mediante el método APLIS

Para el cálculo de la recarga mediante el método APLIS (IGME-GHUMA, 2003; Andreo et al., 2008; Marín, 2009) se ha considerado, en primer lugar y al igual que en apartado anterior, la superficie ocupada por los afloramientos de mármoles y calizas de las diferentes masas de agua subterránea en las que se divide administrativamente la zona de estudio. Se ha seguido con el agrupamiento de las rocas carbonáticas en función del grado de metamorfismo que han experimentado: Dominio de Bajo Grado (B) y de Alto Grado (A). El valor promedio para el conjunto de afloramientos se ha cifrado en el 51,9 % de la precipitación. Los valores obtenidos son muy homogéneos y la mayoría se sitúa en el intervalo del 40 al 50 %. La tasa de recarga mínima obtenida mediante este método ha sido del 44,4 % (Dominio de Bajo Grado) y la más elevada del 60,1 % (carbonatos del Dominio de Alto Grado).

A partir de los resultados anteriores se ha calculado el volumen medio anual infiltrado por unidad de superficie, lo que puede denominarse recarga específica (expresada en m^3/m^2), mediante la multiplicación de las tasas de recarga obtenidas con el método APLIS por los valores de precipitación determinados a partir de la planimetría de isoyetas. En la figura 5.2 se representa la distribución espacial de los valores de recarga específica del ámbito de estudio para los años hidrológicos 1996/97 (húmedo), 2004/05 (seco) y para el año medio correspondiente al periodo 1985/86-2014/15. Los recursos estimados en condiciones hidrometeorológicas medias por el método APLIS para los afloramientos carbonáticos existentes en las distintas masas de agua subterránea suman $10,92 \text{ hm}^3/\text{año}$ (Tabla 5.1). Para el año hidrológico más húmedo (1996/97) se han cifrado en $17,07 \text{ hm}^3$, y en $4,73 \text{ hm}^3$ para el año más seco (1994/95).

5.3. Estimación de la recarga mediante el código RENATA

RENATA (REcarga NATural a los Acuíferos) es un código de evaluación de la recarga a los acuíferos que combina dos metodologías tradicionales de estimación de este parámetro a través de un único proceso de cálculo iterativo (Figura 5.2). Dichos métodos son: el balance de agua en el suelo y la estimación de la recarga a los acuíferos mediante un modelo numérico de flujo en diferencias finitas. El enfoque conjunto y coordinado del empleo de ambas metodologías al unísono pretende garantizar una mejor coherencia entre los resultados que ofrece el balance de agua en el suelo -que proporciona la magnitud de la recarga potencial- y las fluctuaciones del nivel freático - que refleja los efectos de la recarga real- en el acuífero.

Los resultados que proporciona un balance de humedad en el suelo se vienen utilizando, desde hace algún tiempo, como datos de entrada a un modelo numérico de flujo, para que este valide la bondad de la estimación realizada, pero sin que ambos procesos de cálculo se interrelacionen automáticamente entre sí mediante una única sistemática de procesamiento de datos. Esta era la forma en que operaba la primera versión de RENATA (DPA-IGME, 2012; Padilla y Delgado, 2012).

La nueva versión de RENATA (Padilla et al., 2019), que es la que se emplea en el presente documento, se caracteriza por presentar un procedimiento de cálculo y calibración continuo que lo hacen novedoso, versátil y sencillo de manejar, aunque su utilización exige disponer de un modelo conceptual del acuífero robusto y plausible.

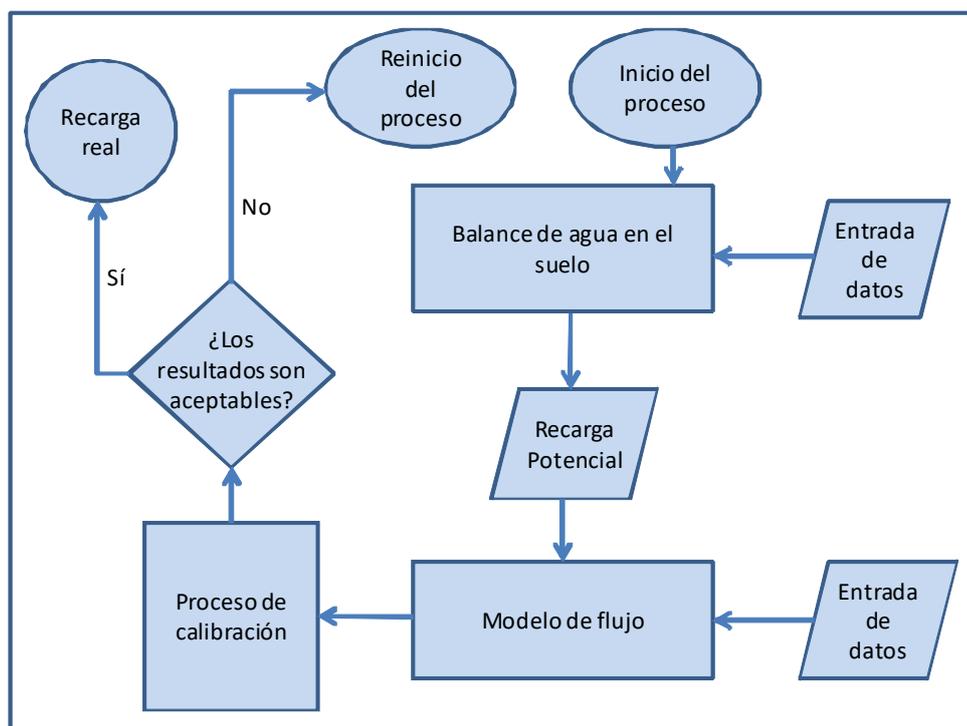


Figura 5.2. Diagrama de flujo del código RENATA

El código opera el balance de agua en el suelo de manera distribuida a partir de dividir la superficie permeable del terreno sobre la que se puede infiltrar agua en tres tipos de sectores: climáticos, suelo y riego. El proceso de cálculo permite definir y calibrar de forma distribuida un parámetro tan incierto y difícil de determinar como la reserva de agua en el suelo. RENATA, una vez calibrado, también se puede utilizar como una herramienta complementaria de apoyo a la predicción y a la simulación de hipótesis de gestión, siempre que no sea recomendable o preciso realizar una modelación de flujo más específico o de mayor detalle.

La aplicación de este código ofrece una serie de ventajas frente a otras metodologías de estimación de la recarga a los acuíferos como son:

- Utiliza parámetros distribuidos y tiene en cuenta el valor de la precipitación y de la temperatura en el tiempo y en el espacio.
- Calcula la recarga a nivel diario y proporciona series temporales de la misma en toda la superficie del acuífero para cada una de las celdas de la malla en las que se subdivide su superficie.
- Permite la simulación del flujo subterráneo, por lo que los valores de recarga son ajustados y calibrados con series de niveles piezométricos e hidrogramas de las descargas.
- En el ajuste y calibración también se pueden incluir las series de extracciones históricas.

La estimación de la recarga mediante la aplicación del código RENATA contempla los pasos que se sintetizan en la figura 5.3.

En el documento elaborado por IGME-DPA (2012) titulado “RENATA (Recarga Natural de Acuíferos). Manual del Usuario” se detallan con precisión todos los métodos de los que dispone el programa para calcular la evapotranspiración potencial, evapotranspiración real, lluvia útil, infiltración y escorrentía superficial.

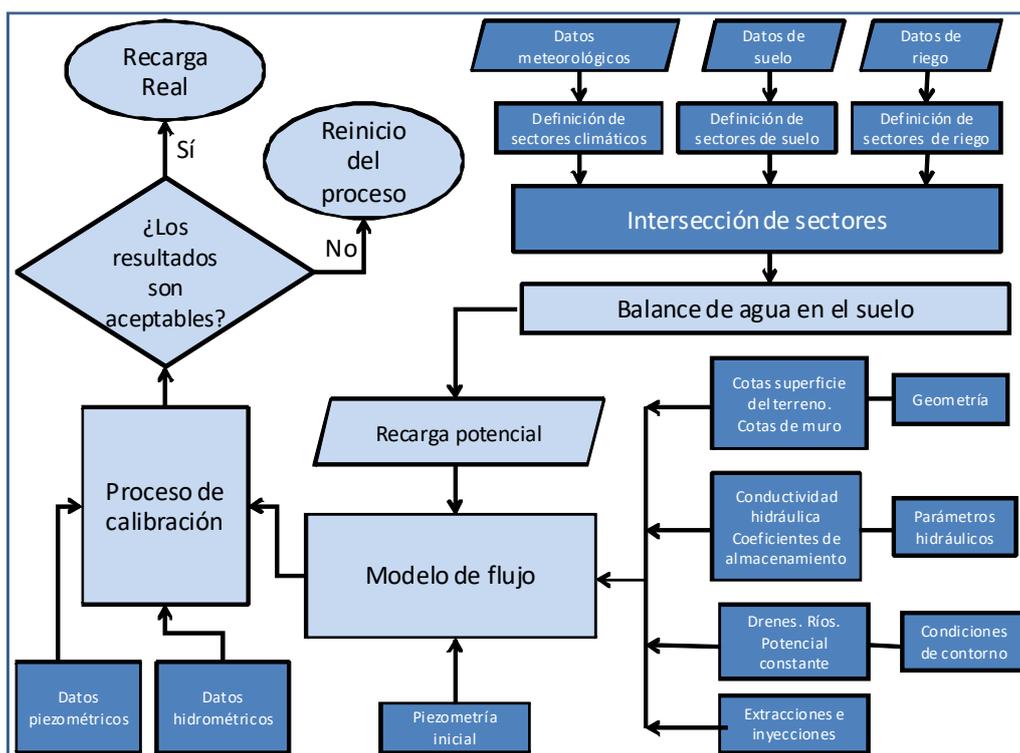


Figura 5.3. Diagrama de flujo del código RENATA detallando los datos que se tienen que aportar al programa.

El balance de agua en el suelo se ha obtenido aplicando la siguiente metodología:

- Cálculo de la Evapotranspiración potencial (ETP) con 4 posibles métodos: Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Criddle para calcular la evapotranspiración de referencia y Blaney-Criddle para calcular la evapotranspiración de cultivo.
- Determinación de la lluvia útil (LL_U) mediante el método del balance de agua en el suelo de Thornthwaite modificado por G. Girard (1981)
- Descomposición de la lluvia útil (LL_U) en escorrentía (ESC) e infiltración (INF) mediante el método del Soil Conservation Service de los EEUU del número de curva.

5.3.1. Generación de la malla y establecimiento del periodo de cálculo

Para la aplicación del código RENATA se ha definido un mallado rectangular de coordenadas UTM X: 160087-213701 e Y: 4186258-4213140 en la que queda enmarcada la superficie sujeta al proceso de cálculo y estimación de la recarga. La malla definida consta de 54 filas y 108 columnas con celdas de 0,25 km² de tamaño aproximado. Las de tipo activo (superficie permeable) ocupan una extensión de 74,4 km².

El cálculo de la recarga se ha realizado a nivel diario en cada una de las celdas activas del mallado para un periodo de 30 años hidrológicos, comprendidos entre 1985/86 y 2014/15. En el cálculo de la recarga se ha tenido únicamente en cuenta la extensión de material acuífero en superficie de la MASCH, la localización y cota de los puntos de agua (piezómetros y manantiales) y el volumen de agua bombeada. Los parámetros restantes se han calculado a partir de la calibración del código RENATA.

5.3.2. Módulo de Balance hídrico

Sectores climáticos

La discretización permite calcular la lluvia útil (*LLU*) a partir de las estaciones meteorológicas de la región, según la malla de celdas diseñada. Para obtener la recarga por agua de lluvia se ha utilizado el método de los polígonos de Thiessen, a partir de algunas de las estaciones pluviométricas consideradas en la caracterización climática (Tabla 4.1). En el ámbito de estudio se han generado 6 polígonos de Thiessen (Figura 5.4), a los que se han asignado series de datos de evapotranspiración potencial (*ETP*) procedentes de la estación termométrica más cercana. En la tabla 5.2 se muestran las características de cada uno de los sectores climáticos. Los datos de precipitación, temperatura y de *ETP* utilizados son diarios. La *ETP* se ha calculado a partir de la ecuación de Hargreaves y Samani (1985), al igual que en el apartado 5.1. (*Estimación de la recarga autóctona mediante el balance de agua en el suelo*), aunque en dicho apartado se consideró la planimetría de isoyetas para el cálculo de la precipitación media y evaluación de la recarga de origen autóctono.

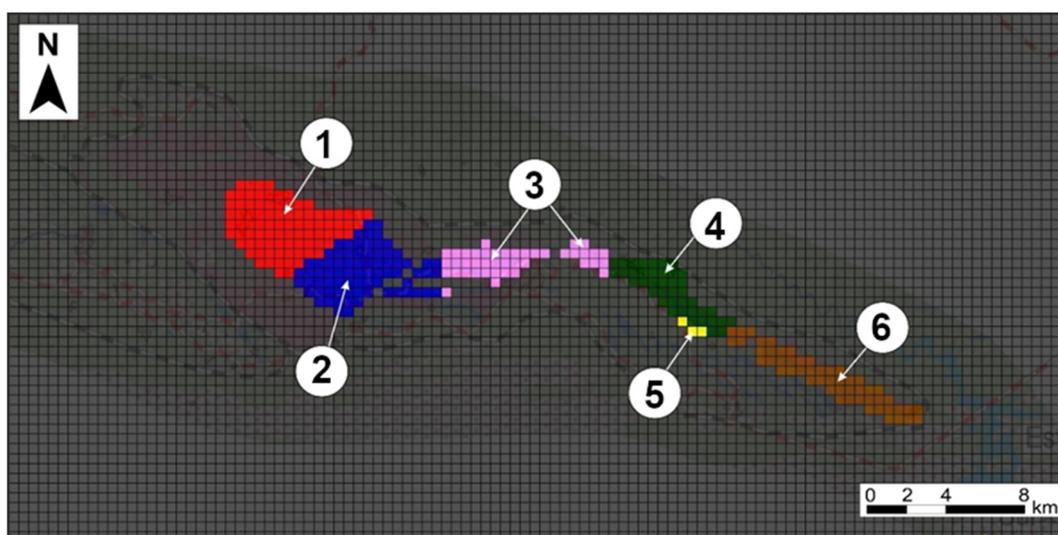


Figura 5.4. Sectores climáticos por polígonos de Thiessen ajustados al mallado

Tabla 5.2. Características de los sectores climáticos (1985/86-2014/15).

Nº de sector	Estación pluviométrica	Estación termométrica
1	Galaroza - 4515	Galaroza - 4515
2	Alájar - 4560	Alájar - 4560
3	Aracena Segunda - 4558A	Aracena Segunda - 4558A
4	Puerto Moral - 5759	Aracena Segunda - 4558A
5	Aracena, Valdezufre - 4556	Aracena Segunda - 4558A
6	Higuera de la Sierra - 5763	Aracena Segunda - 4558A

Sectores de suelo

A cada celda del modelo se le ha asignado la litología mayoritaria que aflora en el área que engloba (Figura 5.5). Para ello se ha utilizado la información geológica mostrada en la figura 3.1. A continuación se han fijado los valores de reserva útil (RU) del suelo que recubre los distintos materiales (Tabla 5.3). No obstante, solo se han considerado los afloramientos permeables que intervienen en la recarga que, en este caso, son los carbonatos. Se han utilizado los valores de reserva útil (RU) y de umbral de escorrentía que se han tenido en cuenta en el apartado 5.1 de esta

memoria (*Estimación de la recarga autóctona mediante el balance de agua en el suelo*) y se han recalculado por calibración con RENATA en cada sector del acuífero Sierra de Aracena.

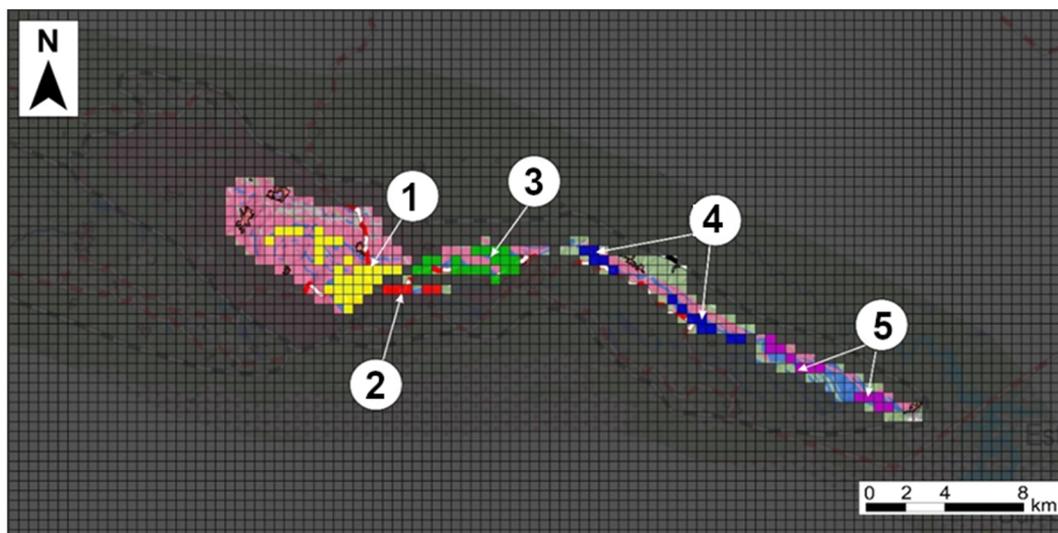


Figura 5.5.- Sectores de suelo aplicados en el código RENATA

Tabla 5.3. Sectores de suelo: parámetros utilizados

Sector de suelo	Superficie (km ²)	Parámetros Calibrados
Occidental (Múrtigas)	7,66	RU _{min} =65 mm; RU _{max} =65 mmP ₀ =20 mm; NC=72
Central Norte	4,70	RU _{min} =70 mm; RU _{max} =70 mmP ₀ =10 mm; NC=84
Central Sur	1,24	RU _{min} =70 mm; RU _{max} =70 mmP ₀ =10 mm; NC=84
Oriental	3,21	RU _{min} =70 mm; RU _{max} =70 mmP ₀ =10 mm; NC=84
Suroriental (Zufre)	2,97	RU _{min} =65 mm; RU _{max} =65 mmP ₀ =20 mm; NC=72
TOTAL	19,78	

Sectores de riego

Las entradas procedentes de los retornos de riego no han sido contempladas a efectos del balance, puesto que la superficie regable sobre los afloramientos permeables es escasa.

Intersección de sectores y definición de áreas de recarga

Como resultado de la intersección de los sectores diferenciados para clima, suelo y riego, se han identificado 10 áreas con distinta tasa de recarga (Tabla 5.4), cuya distribución espacial se muestra en la figura 5.6. Estos sectores de recarga representan las entradas de agua al módulo de calibración.

Tabla 5.4. Áreas establecidas con diferente recarga

Área	Superficie (km ²)	Infiltración media (hm ³ /a)	Sector climático	Sector suelo
1	1,98	0,81	Galaroza	Occidental (Múrtigas)
2	5,68	3,19	Alájar	Occidental (Múrtigas)
3	3,71	1,50	Aracena	Central Norte
4	0,99	0,40	Aracena	Oriental
5	0,99	0,45	Alájar	Central Norte
6	1,48	0,49	Puerto Moral	Oriental
7	1,24	0,57	Alájar	Central Sur
8	0,25	0,08	Valdezufre	Oriental
9	0,49	0,15	Higuera de la Sierra	Oriental
10	2,97	1,10	Higuera de la Sierra	Suroriental (Zufre)
Total	19,78	8,74		

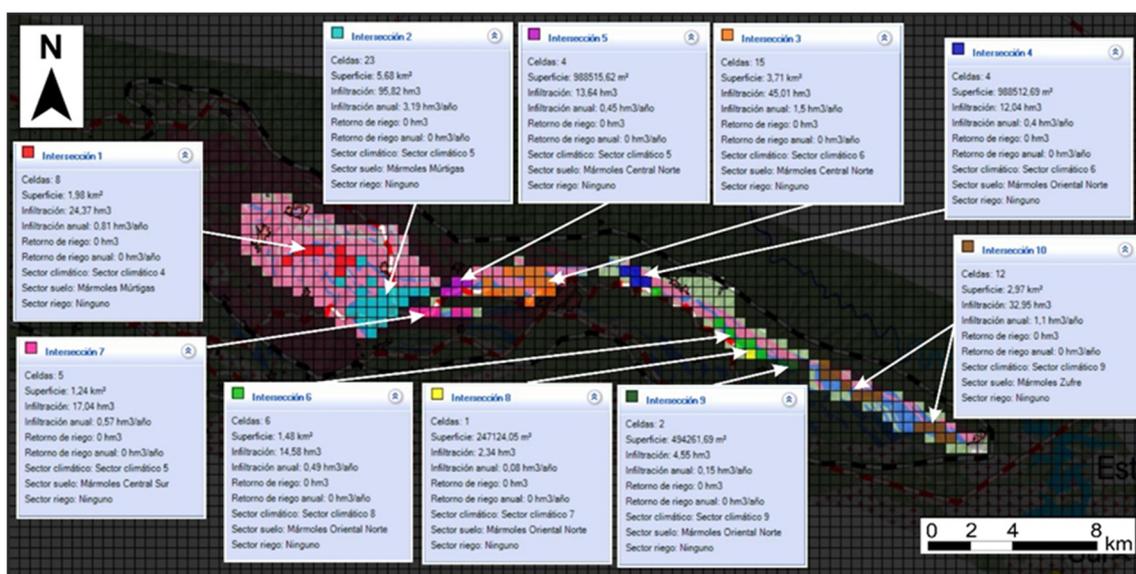


Figura 5.6. Distribución de la recarga una vez ejecutado el balance hídrico.

5.3.3. Módulo de calibración. Modelo de flujo

Condiciones de contorno

Se han definido como celdas inactivas, de flujo nulo, (de color gris oscuro en la figura 5.7) todas aquellas que se encuentran fuera de los límites del ámbito de estudio, así como las que permiten individualizar los diferentes acuíferos según el modelo conceptual descrito en apartados anteriores.

Las salidas naturales se producen por manantiales y cauces ganadores en los ríos que atraviesan las formaciones carbonáticas. Las salidas se completan por los bombeos que se realizan en el acuífero de la Sierra de Aracena. Las celdas donde se localizan los manantiales son de tipo dren. Para este tipo de celdas son necesarios los valores de cota de surgencia (en m s.n.m.) y de conductancia (m²/día). En el modelo generado se han asignado 11 celdas de tipo dren (Figura 5.7) que representan 13 manantiales. En la tabla 5.5A se muestran los valores de conductancia impuestos para cada una de las celdas de esta tipología, según los valores de RU, mientras que en la tabla 5.5B se indican los ríos que han sido considerados en la modelización de la recarga y los valores de los parámetros de los que depende la modelización de los diferentes cauces ganadores.

Para incluir los ríos en el código RENATA se necesita la cota máxima y mínima del río, así como un factor de recarga ($m^2/día$). Dicho factor se ha calculado por calibración.

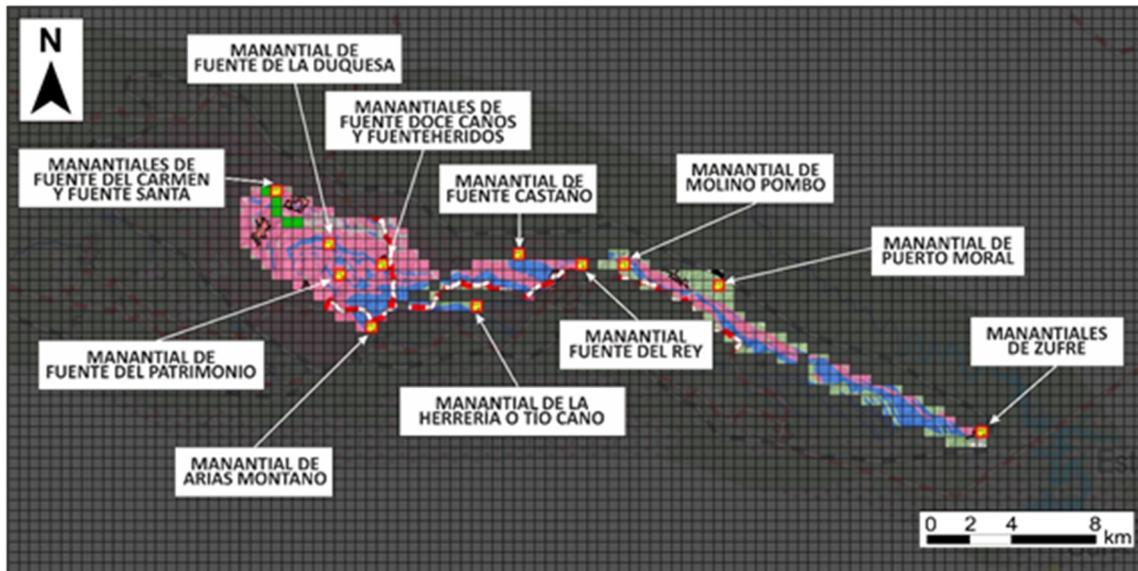


Figura 5.7. Condiciones en los límites del modelo de flujo. Las celdas grises son inactivas.

Tabla 5.5. (A) Drenes y (B) ríos.

TABLA A - DRENES

Acuífero	Manantial	Cota	Conductancia
		(m s.n.m.)	($m^2/día$)
Sierra de Aracena	Fuente del Carmen y Fuente Santa	522	400
	Fuente de la Duquesa	625	540
	Fuente del Patrimonio	740	500
	Doce Caños y Fuenteheridos	705	900
	Arias Montano	750	12
	Fuente Castaño	670	1000
	Fuente del Rey	610	10
	Herrería o Tío Cano	515	3
	Molino Pombo	540	100
	Puerto Moral	550	20
Sector Suroriental	Manantiales de Zufre	460	50

TABLA B - RÍOS

Acuífero	Manantial	Cota máxima - Cota mínima	Factor de Recarga
		(m s.n.m.)	($m^2/día$)
Sierra de Aracena - Sector Occidental	Río Múrtigas	560 - 500	25

Geometría

El código RENATA contempla una única capa acuífero. En el caso de la MASCH Sierra de Aracena esta se ha limitado por la superficie topográfica y un muro del acuífero genérico a cota 0 m s.n.m. Esta profundidad se ha establecido en el modelo para evitar el secado de las celdas que haría imposible el funcionamiento de este. El ajuste de la permeabilidad y coeficiente de almacenamiento se ha utilizado para compensar las diferencias entre el espesor del acuífero real y el impuesto en el

modelo. La topografía se ha importado del modelo digital del terreno de paso 200 m referido a ETRS89 tomado del IGN.

Parámetros hidráulicos

Los parámetros necesarios para operar el módulo de calibración son la conductividad hidráulica (m/día), el coeficiente de almacenamiento confinado (1/m) y el coeficiente de almacenamiento libre. Para su distribución espacial se han establecido 7 sectores hidrogeológicos (Figura 5.8). Se han calibrado los sectores Occidental, Central y Central-Sur del acuífero Sierra de Aracena, mientras que en el sector Oriental se ha procedido a igualar los datos de salidas estimados con los calculados por RENATA. En el sector Suroriental no hay datos suficientes de caudal para poder establecer una modelización aceptable. En la tabla 5.6 se muestran los valores de los parámetros hidráulicos resultado de la calibración en los sectores que cuentan con al menos un manantial con datos medidos.



Figura 5.8. Sectores de parámetros hidráulicos.

Tabla 5.6. Sectores de parámetros hidráulicos.

Acuífero	Número del sector	Nombre del sector	Conductividad hidráulica	Coefficiente de almacenamiento confinado	Coefficiente de almacenamiento libre	Nº de celdas	Superficie <i>km</i> ²	
			(<i>m/día</i>)	(<i>1/m</i>)				
Sierra de Aracena	1	Occidental Alto	0,5	1×10^{-5}	1×10^{-5}	17	4,20	
	Sector Occidental	2	Occidental Medio	0,06	1×10^{-5}	1×10^{-5}	23	5,68
		3	Occidental Bajo	0,04	0,0001	1×10^{-5}	115	28,42
		4	Único	3	7×10^{-5}	0,001	68	16,8
	Sector Central - Sur	5	Único	0,05	1×10^{-7}	1×10^{-5}	8	1,98
	Sector Oriental	6	Único	3	$1,5 \times 10^{-5}$	1×10^{-5}	85	21,0
	Sector Suroriental	7	Único	1	1×10^{-5}	0,001	47	11,6

Extracciones

Los datos de bombeo utilizados en el software RENATA se han obtenido de la bibliografía descrita en el capítulo 3 (*Caracterización Hidrogeológica*). El volumen de agua bombeada en la Sierra de Aracena se ha considerado el mismo a lo largo de todo el periodo de modelización. El volumen medio bombeado se muestra en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Caudales medios de bombeo que se han considerado para la modelización.

Acuífero		Caudal medio ($\text{hm}^3/\text{año}$)
Sierra de Aracena	Sector Occidental	1,35
	Sector Central	1,20
	Sector Central - Sur	0,11
	Sector Oriental	0,05
	Sector Suroriental	0,10
TOTAL		2,81

5.3.4.- Calibración

La calibración se ha realizado en régimen transitorio influenciado, partiendo de los niveles iniciales obtenidos en régimen permanente no influenciado, considerando como entradas la media de la recarga obtenida en el periodo entre 1985/86-2014/15.

A lo largo del proceso de calibración en régimen transitorio se han modificado los valores de la reserva de agua en el suelo y el umbral de escorrentía. Así mismo, se han modificado los parámetros hidráulicos hasta alcanzar un funcionamiento aceptable. Para ello, se ha utilizado como criterio subjetivo la coherencia del funcionamiento hidrológico con el conocimiento del acuífero y, como criterio objetivo, el ajuste de los datos de caudal con las medidas del manantial de Herrería (sector Central-Sur) y piezométrico con las medidas de nivel en 3 piezómetros: P.1037-2-0044, P.05.45.003-P, P.05.45.001-P (Figuras 5.9 y 5.10).

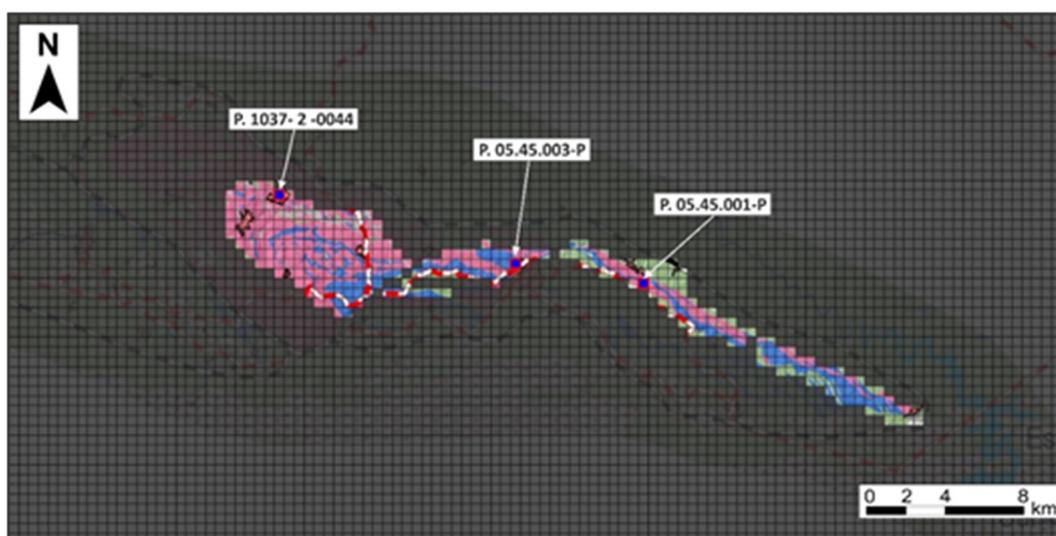


Figura 5.9. Localización, en color azul oscuro, de los piezómetros utilizados para la calibración.

Los niveles piezométricos observados y modelizados en los diferentes puntos escogidos se muestran en la figura 5.10, mientras que los caudales medios observados y simulados (calculados) de cada manantial o río se recogen en la tabla 5.8.

Los resultados de la calibración de la piezometría son buenos en la mayor parte de los puntos que se han tenido en cuenta (Figura 5.10).

Para evaluar la bondad de los resultados obtenidos en la simulación en régimen transitorio se han calculado los coeficientes de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RSME). Los resultados se exponen en la tabla 5.9.

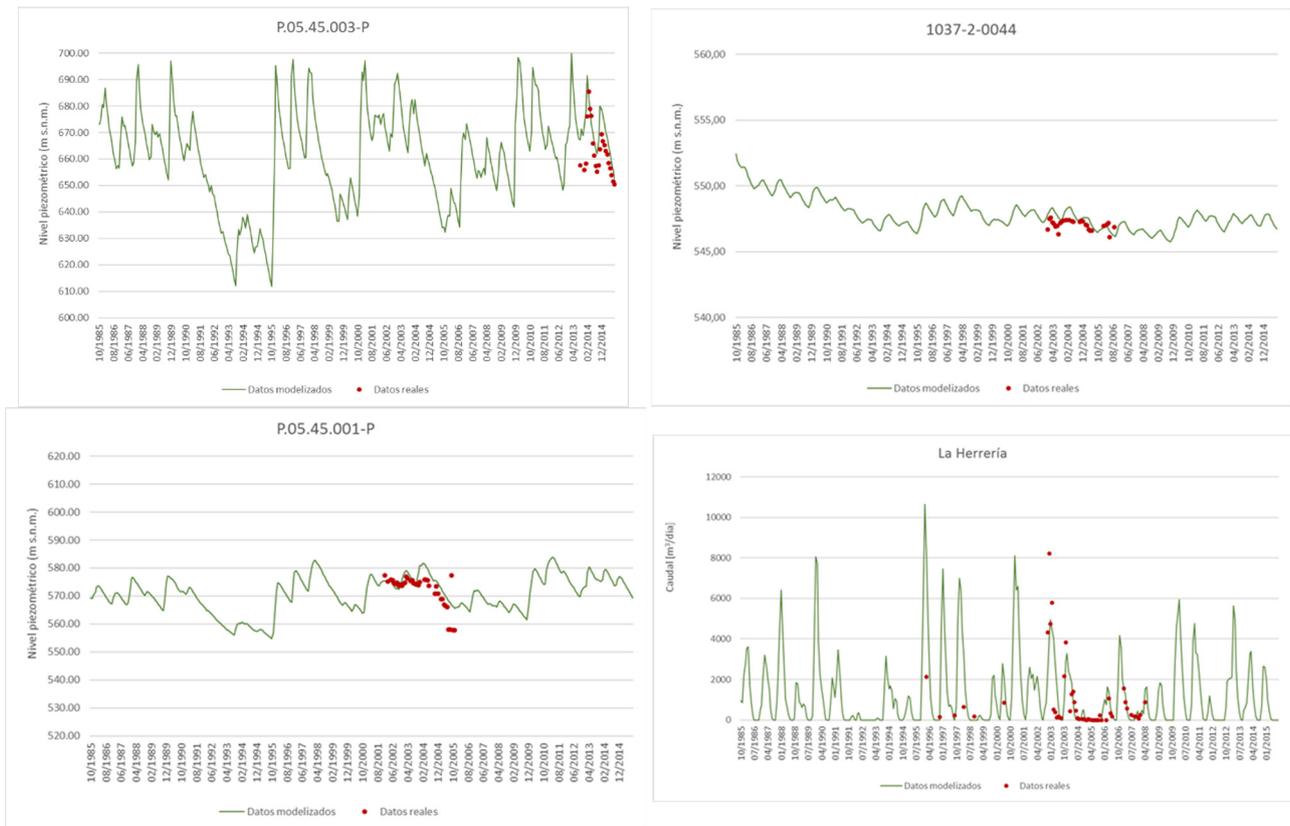


Figura 5.10. Resultados gráficos de la calibración con el código RENATA.

En general, los resultados de la piezometría son buenos. El ajuste entre los datos piezométricos observados y modelizados, determinado por el coeficiente RSME, es bueno (con dos puntos en los que el error es menor a 1 metro) excepto en el piezómetro P.05.45.003-P, donde no se han podido modelizar los ascensos y descensos tan acusados del nivel de las aguas subterráneas (Tabla 5.9).

Los resultados para el régimen transitorio se sintetizan en las tablas 5.10 y 5.11. La primera muestra la precipitación media, la recarga media por precipitación y la tasa de recarga en los sectores de suelo. En la segunda se proporcionan los valores de la recarga por precipitación y por retornos de riego en la MASCH Sierra de Arcena y distribuida por demarcaciones hidrográficas.

Tabla 5.8. Valores promedios observados y modelizados de las salidas que se han tenido en cuenta en la calibración del código RENATA.

Acuífero		Manantial o río	Caudal medio real (hm ³ /año)	Caudal medio modelizado (hm ³ /año)
Sierra de Aracena	Sector Occidental	Fuente del Carmen y Fuente Santa	1,19	1,12
		Fuente de la Duquesa	0,30	0,31
		Fuenteheridos y Fuente de Doce Caños	1,02	1,05
		Fuente del Patrimonio	0,55	0,00
	Sector Central	Peña Arias Montano	0,27	0,29
		Río Múrtigas	0,55	0,56
		Fuente Castaño	0,63	0,63
	Sector Central - Sur	Fuente del Rey	0,16	0,18
		Herrería o Tío Cano	0,37	0,45
	Sector Oriental	Molino Pombo	1,29	0,97
Puerto Moral		0,27	0,16	
Sector Suroriental		Manantiales de Zufre	--	2,29

Tabla 5.9. Coeficiente de determinación (R²) y raíz del error cuadrático medio (RSME) calculados para evaluar la bondad del modelo elaborado en los sectores de acuífero de la MASCH Sierra de Aracena, en régimen transitorio.

Acuífero		Piezómetro	Coeficiente de determinación (R ²)	Raíz del error cuadrático medio (RMSE) <i>m</i>
Sierra de Aracena	Sector Occidental	P.1037-2-0044	0,27	0,70
	Sector Central	P.05.45.003-P	0,64	9,20
	Sector Oriental	P.05.45.001-P	0,54	4,46

Acuífero	Manantial	Coeficiente de determinación (R ²)	Raíz del error cuadrático medio (RMSE) <i>m³/día</i>	Raíz del error cuadrático medio (RMSE) <i>l/s</i>
Central - Sur	Herrería o Tío Cano	0,44	1381	15,98

Para el análisis de los resultados obtenidos por el modelo matemático en los acuíferos sin puntos para la calibración (series piezométricas reales o hidrogramas de manantiales), se utilizan los caudales medios de las salidas por manantiales y ríos (Tabla 5.8). Los caudales medios modelizados de los manantiales son similares a los reales en todos los sectores de acuífero de la MASCH Sierra de Aracena, excepto en el manantial de Fuente del Patrimonio, en el que no se ha modelizado caudal alguno; las cotas de los tres manantiales que hay en la zona (Fuente del Patrimonio, Fuente Cimbrera y Fuente de La Iruela) son las más altas del sector y el caudal drenado por estas surgencias podría no proceder del acuífero modelizado. No obstante, habría que realizar estudios de mayor detalle con el fin de corroborar esta hipótesis.

Aunque el objetivo del modelo de flujo es contrastar y validar los resultados suministrados por el módulo de balance hídrico, aquel, una vez calibrado, permite reproducir las tendencias piezométricas e hidrodinámicas en cada sector acuífero, de hecho, los caudales simulados son coherentes con los caudales observados en los manantiales y ríos que se han tenido en cuenta para la calibración del modelo matemático. Sin embargo, la ausencia de datos de explotación actualizados y de un esquema conceptual más preciso, recomiendan que los resultados obtenidos sean tomados con cautela.

Tabla 5.10. Precipitación media, recarga media por precipitación y tasa de recarga en los sectores de suelo (periodo 1960/61-2016/17)

Sector de suelo	Superficie (km ²)	Parámetros	Precipitación (P) media (hm ³ /a)	Recarga media (R) (hm ³ /a)	Tasa de recarga (%)
Occidental (Múrtigas)	7,66	RU _{min} =65 mm RU _{max} =65 mm P ₀ =20 mm NC=72	8,44	4,00	47,4
Central Norte	4,70	RU _{min} =70 mm RU _{max} =70 mm P ₀ =10 mm NC=84	4,95	1,95	40,0
Central Sur	1,24	RU _{min} =70 mm RU _{max} =70 mm P ₀ =10 mm NC=84	1,42	0,57	40,1
Oriental	3,21	RU _{min} =70 mm RU _{max} =70 mm P ₀ =10 mm NC=84	2,96	1,12	37,8
Suroriental (Zufre)	2,97	RU _{min} =65 mm RU _{max} =65 mm P ₀ =20 mm NC=72	2,51	1,10	43,8
Total afloramientos permeables	19,78		20,28	8,74	43,1

Tabla 5.11. Recarga de la MASCH por demarcaciones hidrográficas (periodo 1985/86-2014/15)

Demarcación hidrográfica	Superficie permeable (km ²)	Precipitación (hm ³ /a)	Infiltración lluvia (hm ³ /a)	Tasa de Recarga (%)
Guadalquivir	13,35	13,28	5,57	41,9
Guadiana	3,95	4,36	2,06	47,4
Tinto, Odiel y Piedras	2,48	2,64	1,11	41,9
Total MASCH	19,78	20,28	8,74	43,1

La superficie indicada en las tablas 5.17 y 5.18, es la superficie ocupada por celdas permeables en el modelo RENATA.

6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos por los tres métodos (Balance del agua en el suelo, APLIS Y RENATA) empleados para evaluar la recarga (Tabla 6.1) oscilan entre los 10,40 hm³/a (APLIS) y los 8,74 hm³/a (RENATA).

Tabla 6.1. Valor de la recarga de la MASCH Sierra de Aracena (1985/86-2014/15)

Método	Recarga (hm ³ /a)			Total	Tasa de recarga por precipitación
	DHG	DHGu	DHTOP		
Balance agua	5,89	2,75	1,32	9,96	49,8 %
APLIS	6,70	2,27	1,44	10,40	52,0 %
RENATA	5,57	2,06	1,11	8,74	43,1 %

Cada método está aplicado a una superficie más o menos equivalente de materiales carbonatados permeables, algo inferior en RENATA, 19,8 km², frente a los 20,9 km² de los otros dos. Los resultados que se han obtenido en el cálculo de la recarga son también inferiores en RENATA, 8,74 hm³/a comparados con los cerca de 10 hm³/a de los otros métodos. Sin embargo, aquella cifra es más parecida a la obtenida en el informe del IGME (2006), que se está tomando como referencia para definir la MASCH Sierra de Aracena, en el que se valoró en 8,8 hm³/a la infiltración procedente del agua de lluvia.

El método APLIS no tiene en cuenta la variabilidad temporal de la recarga, ya que no considera la temperatura ambiental, de la que depende directamente la ETP y afecta a la infiltración eficaz. Asimismo, el método atiende a experiencias empíricas sobre acuíferos kársticos, en general, pero no puede ser validado para casos particulares. El cálculo de la recarga mediante el balance hídrico del suelo, que se realiza con la aplicación TRASERO y la planimetría de la lluvia útil, tiene en cuenta estas variables y obtiene resultados para el balance hidrogeológico en tres hitos concretos, los tres años considerados tipo en el estudio climático previo: el año tipo húmedo, el tipo seco y el medio. RENATA, por su parte, considera una distribución de precipitaciones a partir de polígonos de Thiessen según la posición de cada una de las estaciones climáticas, la infiltración sobre la posición geográfica de los afloramientos permeables, obteniéndose, además de la recarga mensual por zonas, la distribución de isopiezas para el régimen natural e influenciado y la evolución temporal mensual a lo largo del periodo de modelización del resto de variables que intervienen en el balance hídrico de la MASCH.

En los apartados que prosiguen se utilizan los resultados proporcionados por el código RENATA. Las razones que justifican esta decisión son las siguientes:

- Esta metodología utiliza parámetros distribuidos, y tiene en cuenta el valor de la precipitación y de la temperatura en el tiempo y en el espacio.
- Permite la simulación del flujo subterráneo, por lo que los valores de la infiltración son ajustados y calibrados con series de niveles piezométricos teniendo en cuenta los parámetros hidráulicos intrínsecos de los acuíferos y las series de explotación por bombeo.
- Las salidas numéricas no solo arrojan valores de recarga, sino también de descarga y variaciones en las reservas dentro de la MASCH, así como la transferencia entre cuencas hidrográficas.

7. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN NATURAL

En régimen natural las entradas de agua al acuífero corresponden sólo a la infiltración de la precipitación atmosférica, por lo que no se contemplan los retornos de riego ni las salidas por bombeos. Al establecer que el régimen es permanente no hay variación del almacenamiento y las entradas y las salidas de agua del acuífero son equivalentes.

La recarga en régimen natural proporcionados por RENATA para la MASCH Sierra de Aracena (periodo 1985/86-2014/15) es de 8,74 hm³/a. De este volumen total, 3,96 hm³/a (45,3%) se generan en territorio adscrito a la DHG, 2,06 hm³/a (23,6%) a la DHGu y 2,72 hm³/a (31,1%) en el administrado por la DHTOP. Por lo que respecta a las salidas, parte del flujo subterráneo (55%) sale por drenes/manantiales y el resto hacia cursos fluviales (Tabla 7.1). En las DHGu y DHG se producen cerca del 93% de las salidas; la DHTOP les transfiere la mayor parte de sus recursos (2,10 hm³/a, el 77%), especialmente a la DHGu (Figura 7.1) que se traducen en salidas por el río Múrtigas.

Tabla 7.1. Balance hídrico en régimen natural estacionario de la MASCH por demarcaciones hidrográficas

Demarcación hidrográfica	Recarga total (hm ³ /a)	%	Salidas ríos (hm ³ /a)	Salidas manantiales (hm ³ /a)	Total salidas (hm ³ /a)	%	Transfer. (hm ³ /a) ⁽¹⁾
Guadalquivir	3,96	45,3		4,13	4,13	47,3	0,17
Guadiana	2,06	23,6	3,96	0,03	3,99	45,6	2,03
Tinto, Odiel y Piedras	2,72	31,1		0,62	0,62	7,1	-2,10
Total MASCH	8,74	100	3,96	4,78	8,74	100	0

(1) Valores positivos corresponden a entradas y negativos a salidas

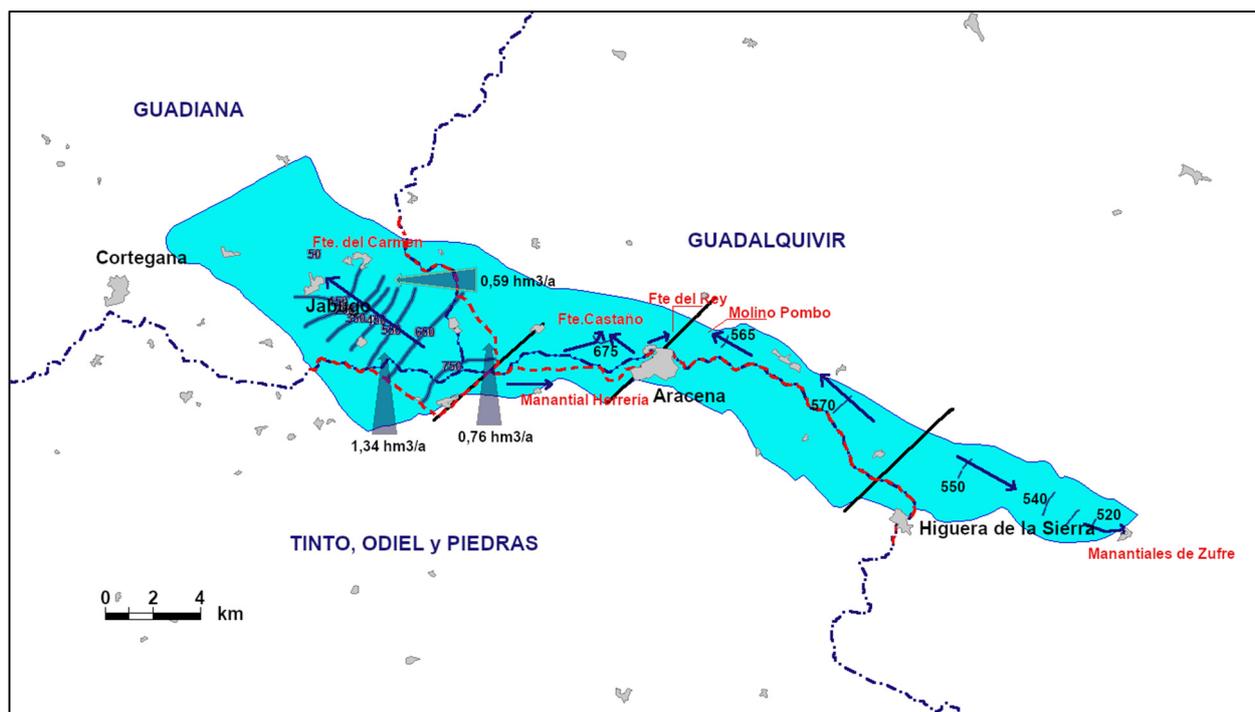


Figura 7.1. Funcionamiento hidrodinámico de la MASCH en régimen natural. La línea azul de trazos y puntos indica la divisoria hidrológica, la roja de trazos la divisoria hidrogeológica y las flechas el sentido del flujo subterráneo. Las flechas rellenas indican las transferencias subterráneas medias entre las 3 MASb.

Las divisorias hidrológica e hidrogeológica son coincidentes en gran parte de su trazado, salvo en el sector Central y el vértice en el que confluyen las tres demarcaciones, donde la divisoria hidrogeológica se desplaza hacia el sur en detrimento de la DHTOP y hacia el este, para que el sector occidental (cabecera del río Múrtigas) (Figura 5.5 y Tabla 5.3) quede englobado dentro de la DHGu. Este nuevo trazado compensaría las transferencias entre demarcaciones (Figura 7.1). El sector occidental (Múrtigas) vierte solo hacia la DHGu, la DHTOP tendría como único vertido el del compartimento sur del sector central, mientras que hacia la DHG verterían el resto del sector central y los sectores oriental y sur (Figura 5.5 y Tabla 5.3).

8. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN ALTERADO

El funcionamiento hidrogeológico en régimen alterado de la MASCH Sierra de Arcena (periodo 1985/86-2014/15), así como la evolución histórica de sus variables de estado, se ha simulado con la inclusión de las presiones soportadas por el sistema debidas a los bombeos.

En la tabla 8.1 se muestra el balance hídrico de la MASCH en régimen influenciado para el periodo 1985/86-2014/15 por demarcaciones hidrográficas. Dicho balance es diferente al del régimen natural debido a las explotaciones (2,62 hm³/a), que suponen el 33,33 % de su recarga, lo que ha provocado que las descargas disminuyan de 8,74 a 6,97 hm³/a. En estos 30 años se ha producido una variación decreciente del almacenamiento de 25,5 hm³.

Tabla 8.1. Balance hídrico por demarcaciones hidrográficas de la MASCH en régimen influenciado. Periodo 1985/86-2014/15

Demar. hidrográfica	Recarga precip. (hm ³ /a)	Variación del almacenamiento (hm ³ /a)	Aportes totales (hm ³ /a)	Salidas ríos (hm ³ /a)	Salidas manantiales (hm ³ /a)	Explotación (hm ³ /a)	Total salidas (hm ³ /a)	Transf. Subt. ⁽¹⁾ (hm ³ /a)
Guadalquivir	3,96	0,18	4,14		3,01	1,32	4,33	0,19
Guadiana	2,06	0,54	2,60	3,47		1,17	4,64	2,04
Tinto, Odiel y Piedras	2,72	0,13	2,85		0,49	0,13	0,62	-2,23
Total MASCH	8,74	0,85	9,59	3,47	3,50	2,62	9,59	0

(1) Valores positivos corresponden a entradas y negativos a salidas

La contribución de las principales magnitudes del balance hídrico (periodo 1985/86-2014/15) en cada demarcación hidrográfica en términos porcentuales se recoge en la tabla 8.2.

Tabla 8.2. Porcentajes de recarga, tasa de explotación y variación del almacenamiento por demarcaciones hidrográficas en régimen influenciado (1985/86-2014/15) para la MASCH

Demarcación hidrográfica	Total recarga (%)	Tasa de explotación ⁽¹⁾ (%)	Variación del almacenamiento ⁽²⁾ (%)
Guadalquivir	45,3	33,3	21,2
Guadiana	23,6	56,8	63,5
Tinto, Odiel y Piedras	31,1	4,8	31,12
Total MASCH	100	30,0	100

(1) % de las extracciones respecto a la recarga generada en cada demarcación hidrográfica

(2) % variación del almacenamiento por demarcación hidrográfica respecto a la variación total que acontece en la MASCH

Como se puede ver en la figura 8.1, el trazado de las isopiezas en régimen influenciado al final del periodo (septiembre del 2015) es muy parecido al de régimen natural, pero con descensos del nivel piezométrico cercanos a los 20 m en las zonas donde se concentra la explotación: sector del Múrtigas en la DHGu y sector Central en la DHG. En algunos compartimentos del sector Central, concretamente los de Fuente Castaño (DHG) y Manantial Herrería (DHTOP), no ha sido posible

dibujar las isopiezas debido a que, por causa del bombeo, apenas hay gradiente que permita su trazado.

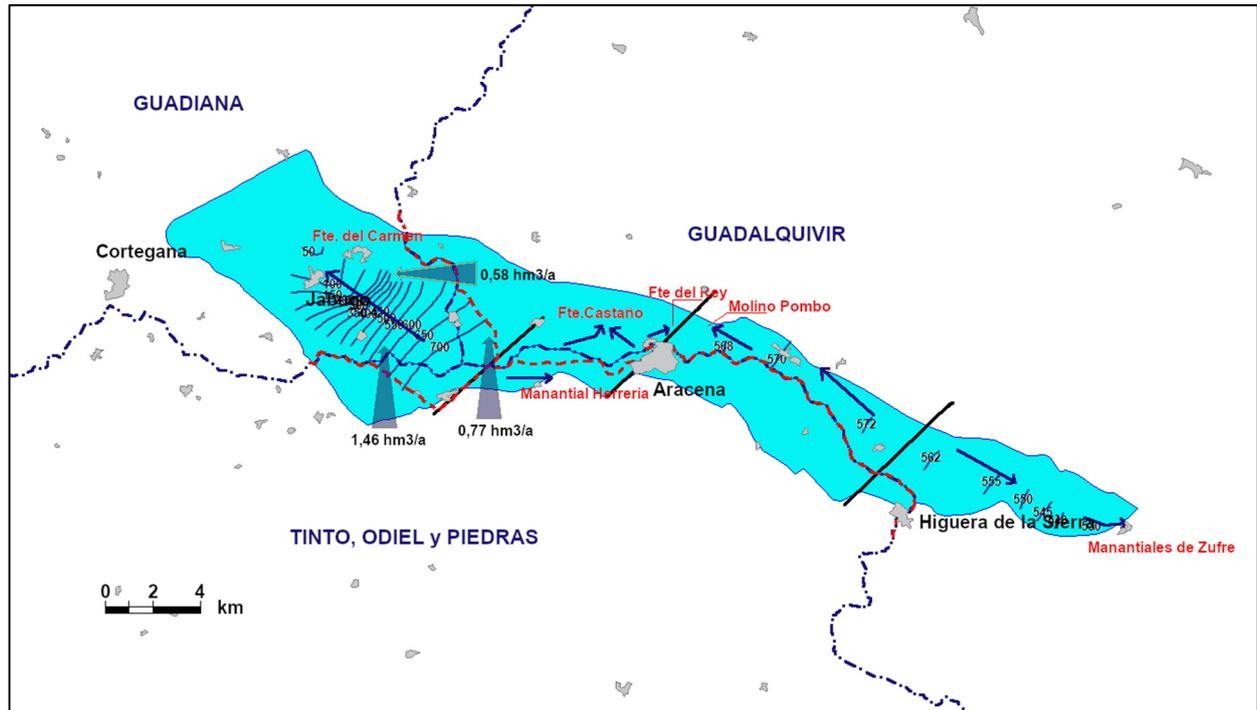


Figura 8.1. Funcionamiento hidrodinámico de la MASCH en régimen influenciado. La línea azul de trazos y puntos indica la divisoria hidrológica, la roja de trazos la divisoria hidrogeológica y las flechas el sentido del flujo subterráneo. Las flechas rellenas indican las transferencias subterráneas medias entre las 3 MASb.

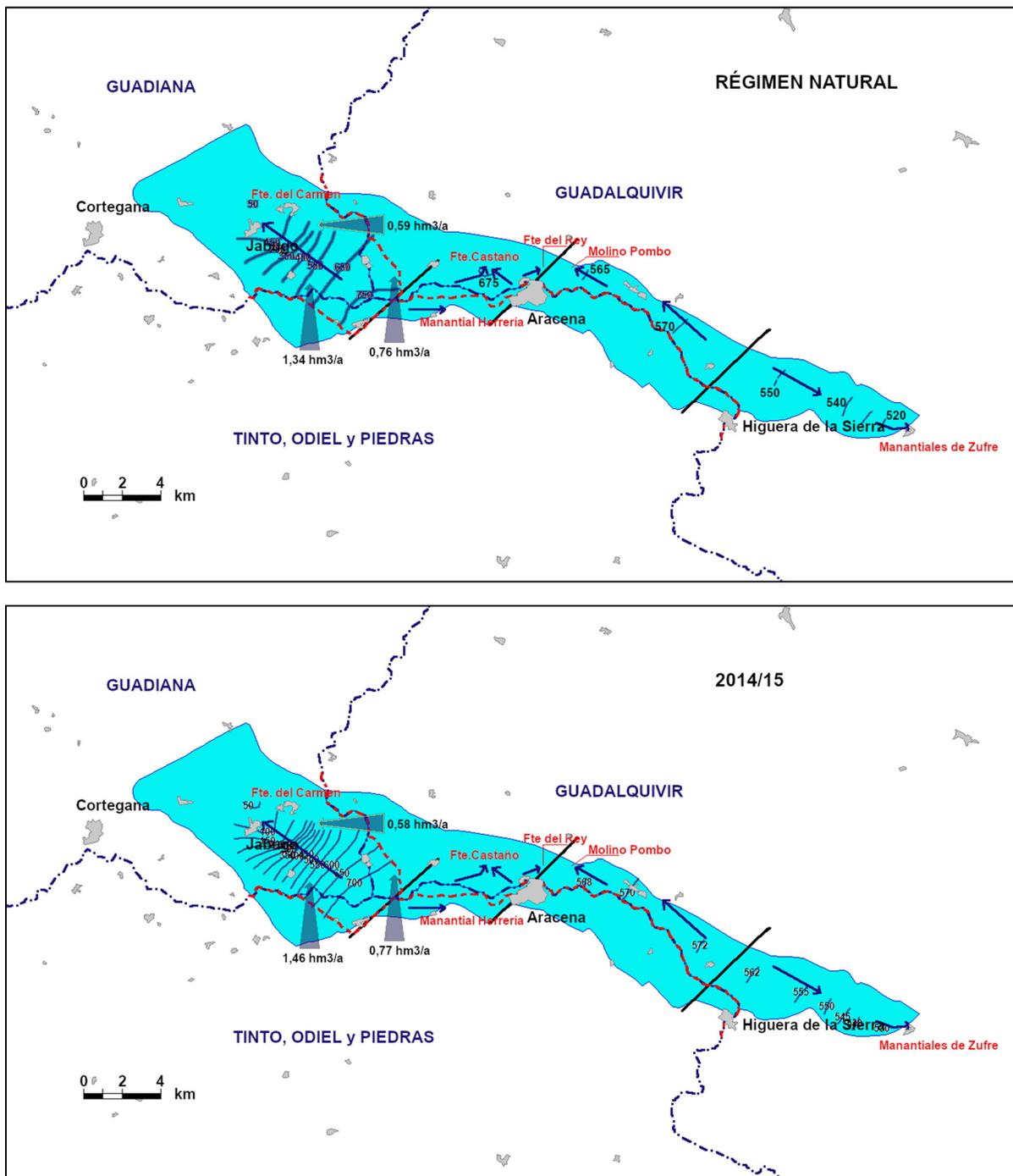


Figura 9.1. Situación de la superficie piezométrica de la MASCH en régimen natural permanente y en el 2014/15, último año del periodo de simulación.

9. BALANCE HÍDRICO SEGÚN LA DIVISORIA HIDROGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA

Desde un punto de vista estrictamente normativo la evaluación de los recursos hídricos subterráneos disponibles de una masa de agua subterránea, independientemente de que aquella presente continuidad hidrogeológica o no con otra localizada en un ámbito de planificación diferente, responde a la directriz aportada en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2008) -apartado 1.2-55- donde se establece que los recursos disponibles de una masa de agua subterránea se determinarán a partir del *valor medio interanual de la tasa de recarga total de la masa de agua subterránea, menos el flujo interanual medio requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica para el agua superficial asociada, para evitar cualquier disminución significativa en el estado ecológico de tales aguas, y cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados.*

Estimar la tasa de recarga de un acuífero -especialmente la que procede de la precipitación- es una operación incierta e imprecisa, que depende de multitud de factores, como se viene exponiendo en diversos documentos técnico-científicos desde hace muchos años (Lerner *et al.*, 1990; Custodio *et al.*, 1997; Healy, 2010). Prueba de ello son los diferentes resultados que han proporcionado las distintas metodologías que se han aplicado en el presente estudio, aunque, evidentemente, siempre ofrecerán una mayor confianza y certidumbre aquellas estimaciones que pueden someterse a una calibración mediante contraste con los datos reales tomados y medidos en campo o laboratorio. Este es el caso de metodologías como los códigos BALAN y RENATA.

Por otro lado, en el apartado 1.2-55 de la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2008), también se hace alusión a las restricciones ambientales asociadas a las aguas subterráneas. A este respecto, en el texto refundido de la Ley de Aguas, en su apartado 5.2.4.1 "Estado cuantitativo", se dispone que *las restricciones ambientales, asociadas a las aguas subterráneas, corresponden a los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos y para prevenir los efectos negativos causados por la intrusión marina. En el régimen de caudales ecológicos se incluye tanto los caudales necesarios para mantener el caudal base en las masas superficiales categoría ríos como los requerimientos hídricos necesarios para la conservación de los lagos y zonas húmedas. En lo que se refiere a la intrusión marina considera los volúmenes mínimos necesarios para evitar el avance de la cuña salina.*

La situación que presenta la MASCH de Sierra de Aracena puede considerarse excedentaria, ya que los bombeos existentes son inferiores a las entradas medias estimadas (30%), pero esta observación ha de ser matizada, ya que la alta compartimentación de las formaciones acuíferas hace que existan sectores individualizados que reciben una recarga limitada y la explotación en ellos está muy próxima a superar el umbral de explotación recomendado (IGME-AAA, 2010).

En la tabla 9.1 se muestra una comparativa de la distribución de la recarga en régimen natural (sin bombeos) y en régimen alterado (con bombeos) para la MASCH de Sierra de Aracena, según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a las demarcaciones del Tinto, Odiel y Piedras, Guadiana y Guadalquivir. De la observación de dicha tabla se desprende que la recarga, tanto en régimen natural como influenciado, se distribuye de diferente manera según se considere la cuenca hidrológica o hidrogeológica.

Tabla 9.1. Comparativa de la distribución de la recarga en régimen natural e influenciado en la MASCH Sierra de Arcena según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a las cuencas del Guadalquivir, Guadiana y Tinto, Odiel y Piedras. Variaciones absolutas y porcentuales.

Régimen de funcionamiento hídrico	Distribución de recursos (a) según	Cuenca Guadalquivir (hm ³ /a)	Cuenca Guadiana (hm ³ /a)	Cuenca Tinto, Odiel y Piedras (hm ³ /a)	MASCH (hm ³ /a)
Natural	Divisoria hidrográfica	3,96 (45,3%)	2,06 (23,6%)	2,72 (31,1%)	8,74
	Divisoria hidrogeológica	4,13 (47,73%)	3,99 (45,65%)	0,62 (6,62%)	
Influenciado	Divisoria hidrográfica	3,96 (45,3%)	2,06 (23,6%)	2,72 (31,1%)	8,74
	Divisoria hidrogeológica	4,15 (47,48%)	4,10 (46,91%)	0,49 (5,61%)	

(a) De acuerdo con la IPH (2008) recurso hídrico renovable es equivalente a recarga.

Dado que no se han considerado retornos de riego los porcentajes de recarga en régimen natural e influenciado son los mismos. Atendiendo a la divisoria hidrográfica el 45,3 % de los recursos se genera en el ámbito de la DHG, el 23,6 % en la DHGu y el 31,1 % en la DHTOP. Si se atiende a la divisoria hidrogeológica las cifras cambian bastante, no tanto en la DHG donde se genera el 47,7 %, pero sí en la DHGu donde asciende al 45,8 % y en la DHTOP donde desciende al 6,5 %. La diferencia entre considerar una divisoria u otra no afecta prácticamente a la DHG, pero se incrementa en unos 2 hm³/a en las DHGu y disminuye, más o menos en la misma cantidad, en la DHTOP, como consecuencia de que la divisoria hidrogeológica hace que el sector occidental (Múrtigas) quede englobado completamente en la DHGu, a expensas fundamentalmente de la DHTOP, esta, a su vez, pierde también parte del sector central que pasa a la DHG.

10. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los principales resultados y conclusiones obtenidas de los trabajos llevados a cabo se exponen en los siguientes puntos.

- Existen masas de agua subterránea, colindantes entre dos o más demarcaciones hidrográficas, cuya realidad física respecto de su conexión hídrica y funcionamiento hidrogeológico escapa a sus límites administrativos, por lo que resulta necesario afrontar su estudio y su gestión desde la óptica de su realidad hidrogeológica. Este es el caso de las masas de agua subterránea que se contemplan en el presente informe, donde no tiene sentido estimar los recursos de agua subterránea de manera independiente, unilateral y separadamente. A dichas masas se las ha agrupado bajo la denominación de “masas de agua subterránea que presentan continuidad hidrogeológica” (MASCH).
- La masa de agua subterránea compartida o con continuidad hidrogeológica denominada como **Sierra de Arcena** engloba la MASb Arcena (440.001) de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras (DHTOP), el sector oriental de la MASb Aroche-Jabugo (040.019) de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (DHGu) y un pequeño sector del extremo occidental de la MASb Sierra Morena (05.45) de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (DHG). Las tres demarcaciones comparten los afloramientos carbonatados permeables del acuífero, con continuidad hidrológica entre demarcaciones hidrográficas”, denominado Sierra de Arcena, que es el que define la MASCH.
- La formación acuífera de la MASCH Sierra de Arcena está constituida principalmente por los carbonatos de la formación Arcena, compuestos por mármoles dolomíticos y, en menor proporción, calizas de edad Cámbrico, permeables por fisuración y/o karstificación. La estructura geológica es la responsable de la geometría interna de los afloramientos permeables y de las direcciones generales del flujo subterráneo. La fuerte influencia tectónica en la distribución de estos materiales hace que el acuífero esté aislado (cerrado al flujo subterráneo) respecto a otros acuíferos y también es la razón de que el acuífero se encuentre compartimentado en, al menos, tres sectores de funcionamiento hidrogeológico independiente: el occidental (120 km²), el central (23,8 km²) y el oriental (22,8 km²).
- El complejo intrusivo de Aroche no está incluido en la definición actual de la MASCH ya que forma parte exclusivamente de la DHGu, no comparte recursos con otras demarcaciones. La formación volcanosedimentaria que separa los afloramientos carbonatados de Sierra de Arcena de los granitos de Aroche son un acuitardo que recarga agua, pero la transmite mal por lo que no es explotable, es decir su recarga no constituye recurso subterráneo.
- La precipitación media estimada para la MASCH en el periodo 1985/86-2014/15 es de 856 mm y varía entre 375 y 1414 mm.
- La recarga de los acuíferos se produce por infiltración directa del agua de lluvia sobre los materiales permeables. Buena parte de la descarga ocurre de manera puntual por varios manantiales permanentes en los bordes de los afloramientos carbonáticos cámbricos y de forma difusa hacia el río Múrtigas y hacia el arroyo de la Fuente del Rey, que intersectan las rocas carbonáticas permeables y que actúan como ejes preferenciales de drenaje en su recorrido hacia el río Ardila (DHGu) y hacia la rivera de Huelva (DHG). Las salidas se completan con las extracciones por bombeo que representan el 33,33 % de la recarga media.

- La recarga de la MASCH Sierra de Aracena (1985/86-2014/15) se ha determinado por tres métodos: Balance de agua en el suelo, APLIS y RENATA. Con dichos métodos se han obtenido valores de 9,96, 10,40 y 8,74 hm³/a, respectivamente. De los tres métodos utilizados, se considera que el código RENATA es el más apropiado por las siguientes razones:
 - Utiliza parámetros distribuidos y tiene en cuenta el valor de la precipitación y de la temperatura en el tiempo y en el espacio.
 - Permite la simulación del flujo subterráneo, por lo que los valores de la infiltración son ajustados y calibrados con series de niveles piezométricos teniendo en cuenta los parámetros hidráulicos intrínsecos de los acuíferos y las series de explotación por bombeo.
 - Las salidas numéricas no solo arrojan valores de recarga, sino también de descarga y variaciones del almacenamiento dentro de la MASCH, así como la transferencia entre cuencas hidrográficas y acuíferos, que son importantes componentes del balance hídrico que se tienen que tener en cuenta en cualquier decisión que se adopte.
- Los recursos renovables de la MASCH en régimen natural de acuerdo con lo apuntado en la IPH (2008) se estiman en 8,74 hm³/a (periodo 1985/86 a 2014/15), de ellos 3,96 hm³/a (45,3 %) se generan en territorio adscrito a la DHG, 2,06 hm³/a (23,6 %) en la DHGu y 2,72 hm³/a (31,1 %) en el administrado por la DHTOP.
- Las extracciones medias, aunque de difícil cuantificación por la escasez de datos, se han estimado a partir de datos bibliográficos en 2,62 hm³/a de media para el periodo 1985/86-2016/17, de las que, 1,32 hm³/a (50,4 %) se producen en la DHG, 1,17 hm³/a (44,6 %) en la DHGu y 0,13 hm³/a (5,0 %) en la DHTOP. La tasa de explotación global en estos 30 años es del 30%.
- En régimen influenciado (alterado por las extracciones) el diseño de las isopiezas y direcciones de flujo es similar al de régimen natural, aunque, al ser un acuífero muy compartimentado, en algunos sectores individualizados la explotación se acerca al umbral de una explotación sostenible. No obstante, a escala global de toda la MASCH, esta es claramente excedentaria.
- La transferencia de agua subterránea entre demarcaciones, según el criterio de la divisoria hidrológica se produce principalmente desde la DHTOP, ya que se transfieren un 82 % de sus recursos, siendo la DHGu la que más recibe (duplica sus recursos). Con la divisoria hidrogeológica se compensan estas transferencias al reasignarse partes de algunos sectores del acuífero a una única demarcación: el sector occidental (Múrtigas) se asigna a la DHGu y, salvo un pequeño compartimento del sector central que se localiza en la DHTOP, el resto pertenecería a la DHG.

REFERENCIAS

- Andreo, B., Vías J.M., Durán, J.J., Jiménez, P., López-Geta, J.A. y Carrasco, F. (2008): Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16: 911-925.
- Apalategui, O.; Barranco, E.; Contreras, F.; Delgado, M.; Roldán, F.J. (1984): Mapa Geológico de España. E. 1:50000 – MAGNA. Hoja nº 917: Aracena. IGME, Madrid.
- Apalategui, O.; Contreras, F. y Eguiluz, L. (1990): Mapa Geológico de España. E. 1:50000 – MAGNA. Hoja nº 918: Santa Olalla del Cala. IGME, Madrid.
- Bard, J.P. (1969): Le métamorphisme régional progressif de Sierra de Aracena en Andalousie occidentale (Espagne). Thèse d'Etat, U. Montpellier, 397 pp.
- CHG-IGME (2001): Norma de Explotación de la U.H. 05.45 Sierra Morena. Revisión y actualización de las normas de explotación de las Unidades Hidrogeológicas de las cuencas del Guadalquivir y Guadalete - Barbate. Propuesta de normativa y definición de nuevas Unidades Hidrogeológicas. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir-Instituto Geológico y Minero de España. 41 pp.
- CHG-IGME (2015): Caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales MASb ES050MSBT000054500. Sierra Morena. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir – Instituto Geológico y Minero de España. 28 pp.
- COPTJA (2001): Programa andaluz de lucha contra la sequía: Mejora del abastecimiento a núcleos urbanos e interconexión de sistemas de abastecimiento. Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía. Sevilla. COPTJA.
- Costa, A.M. (2008). Modelação matemática dos recursos hídricos subterrâneos da região de Moura. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências da Engenharia. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. Lisboa. 206 pp.
- Crespo-Blanc, A. (1987): El macizo de Aracena (Macizo Ibérico meridional): Propuesta de división sobre la base de nuevos datos estructurales y petrográficas. *Bol. Geol. Min.*, 98: 507-515.
- Crespo-Blanc, A. (1991): Evolución geotectónica del contacto entre la zona de Ossa-Morena y la zona Surportuguesa en las sierras de Aracena y Aroche (Macizo Ibérico Meridional): un contacto mayor en la cadena Hercínica Europea. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 327 pp.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983): Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, 2, 1-2.350 pp.
- DGOH (1995). Normas de explotación de las unidades hidrogeológicas con afección directa a los embalses de regulación y fuentes de abastecimiento a poblaciones de la Cuenca del Guadalquivir. Unidad hidrogeológica 05.45. Sierra Morena.
- DGOH-ITGE (1993): Propuesta de normas de explotación de las unidades hidrogeológicas con afección a embalses de regulación y fuentes de abastecimiento a poblaciones de la cuenca del Guadalquivir. Unidad Hidrogeológica nº 05.45. Sierra Morena.

- Díaz-Azpiroz, M. (2001): Evolución tectono-metamórfica del dominio de alto grado de la banda metamórfica de Aracena. Tesis Doctoral, Universidad de Huelva. 556 pp.
- Diputación Provincial de Huelva - ITGE (1993): Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Huelva. Diputación Provincial de Huelva - ITGE, Huelva, 107 pp. ISBN 84-86842-72-7.
- Galván, L. y Olías, M. (2010): Modelización hidrológica de las cuencas de los ríos Múrtigas y Caliente (Huelva, España). Calidad de los datos de aforos. Geogaceta, 48: 123-126.
- Hargreaves, G.H y Samani, Z.A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1, 96–99.
- IGME (1997): Estudio Hidrogeológico de la Sierra de Aracena. IGME. Madrid. 67 pp.
- IGME (2006): Aplicación de las aguas subterráneas al sistema de abastecimiento mancomunado de los pueblos de la sierra de Aracena (Huelva). Informe inédito. 168 pp.
- IGME-AAA (2010): El agua en el Parque Natural Sierra de Aracena y Picos de Aroche. Ed: M. Martín Machuca, López-Geta, J. A., Fernández-Palacios, J.M. Martos-Rosillo, S. Instituto Geológico y Minero de España y Agencia Andaluza del Agua. Madrid. 176 pp.
- IGME-CGS (1986): Investigación y evolución de los recursos hidráulicos subterráneos de los sectores norte de las provincias de Huelva, Sevilla y Córdoba. Tomo 1. Memoria y mapas. Informe inédito. 123 pp.
- IGME-DGA (2010a). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica. Masa de agua subterránea 051.045 Sierra Morena. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Asistencia técnica para el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 103 pp.
- IGME-DGA (2010b). Identificación y caracterización de la interrelación que se presenta entre aguas subterráneas, cursos fluviales, descarga por manantiales, zonas húmedas y otros ecosistemas naturales de especial relevancia hídrica. Masa de agua subterránea 040.019 Aroche-Jabugo. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Asistencia técnica para el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 44 pp.
- IGME-DPA (2012): RENATA: Recarga Natural a los acuíferos. Instituto Geológico y Minero de España, Diputación provincial de Alicante.
- IGME-GHUMA (2003): Estudios metodológicos para la estimación de la recarga en diferentes tipos de acuíferos carbonatados: aplicación a la Cordillera Bética. Instituto Geológico y Minero de España. Informe inédito. 3 tomos.
- IGME-JA (2006): Proyecto para la aplicación de las aguas subterráneas al abastecimiento mancomunado de los pueblos de la Sierra de Aracena (Huelva). Memoria y Anexos. Convenio específico entre la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, y el Instituto Geológico y Minero de España, para el desarrollo del programa de asistencia técnica en materia de aguas subterráneas. 149 pp.

- INSERSA (2008): Campaña de prospección geofísica mediante tomografía eléctrica para los sondeos de investigación y preexplotación de Sierra Morena, Sierra de Huelva (Aroche, Huelva). Informe inédito. 42 pp.
- ITGE-Junta de Andalucía (1998): Atlas Hidrogeológico de Andalucía. Instituto Tecnológico Geominero de España; Junta de Andalucía. 216 pp.
- Junta de Andalucía (2015). Documentos complementarios al Plan Hidrológico del Tinto, Odiel y Piedras (2015-2021). Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía. 240 páginas.
- Ley de Aguas (2001). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. BOE núm. 176 de 24 de Julio de 2001.
- Marín, A.I. (2009): Los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la evaluación de recursos hídricos y a la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos carbonatados. Caso de la Alta Cadena (provincia de Málaga). Tesis de licenciatura, Universidad de Málaga (España). 131 páginas.
- Martos-Rosillo, S.; Moral, F.; Rodríguez-Rodríguez, M. y Ocaña A. (2006): Evaluación de los recursos hídricos de la cabecera del río Múrtigas. Sierra de Aracena (Huelva). Karst, cambio climático y aguas subterráneas. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Aguas Subterráneas (18): 91-99. Madrid. ISBN: 84-7840-628-X.
- Martos-Rosillo, S.; Bros-Miranda, T.; Rodríguez-Rodríguez, M. y Moral, F. (2008a): Caracterización hidrogeoquímica preliminar de las aguas subterráneas del acuífero carbonático de la Sierra de Aracena (Huelva). Geogaceta, 44: 147-150.
- Martos-Rosillo, S.; Rodríguez-Rodríguez, M.; Moral, F. y Martín Machuca, M. (2008b): Evaluación y contraste de la recarga en materiales carbonáticos mediante el uso de métodos de cálculo independientes. Aplicación a un caso del SW español (sierra de Aracena).
- MOPU-IGME (1988): Estudio 07/88. Delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características. Cuenca del Guadalquivir. Informe inédito.
- Ocaña, A. (2005): Modelización de los hidrogamas del río Múrtigas y del río Caliente (Sierra de Aracena) a partir de datos de precipitación. Tesis de Licenciatura. Universidad Pablo de Olavide, Sevilla. 103 pp.
- Padilla, A. y Delgado, J. (2005). Tratamiento y gestión de series de datos hidrológicos. Manual de Usuario. TRASERO: Diputación Provincial de Alicante. 49 pp.
- Padilla, A. y Delgado, J. (2013): Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Programa TRASERO 2.0. Departamento de ciclo hídrico, Diputación Provincial de Alicante, 87 pp.
- Padilla, A., Delgado, J. (2012). RENATA: Programa para el cálculo de la recarga a los acuíferos a partir de los procesos que tienen lugar en el suelo. Calibración mediante modelos de flujo. DPA-IGME
- Padilla, A., Delgado, J. y Rodríguez, A. (2019). RENATA V. 3.0.0. Programa para el cálculo de la recarga a los acuíferos a partir de los procesos que tienen lugar en el suelo. Diputación Provincial de Alicante e IGME.

Témez, J. (1978): Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España.

Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.

ANEXOS

ANEXO I
BALANCES HÍDRICOS GENERADOS POR RENATA

Total MASCH Sierra de Aracena						
Fecha	Precipitación hm ³	Dren/Manantial hm ³	Ríos hm ³	Extracciones hm ³	Infiltración hm ³	Reservas hm ³
85-86	18,04	-4,11	-3,75	-2,62	7,75	2,73
86-87	19,28	-2,92	-3,65	-2,63	7,60	1,60
87-88	25,62	-4,55	-3,66	-2,63	12,55	-1,71
88-89	17,64	-2,58	-3,60	-2,62	4,79	4,01
89-90	26,66	-4,69	-3,61	-2,63	14,59	-3,66
90-91	17,15	-3,12	-3,57	-2,63	7,31	2,01
91-92	11,64	-1,99	-3,51	-2,61	1,62	6,50
92-93	11,14	-1,49	-3,44	-2,57	0,85	6,64
93-94	18,66	-1,92	-3,44	-2,64	7,94	0,06
94-95	11,54	-1,34	-3,41	-2,59	2,55	4,78
95-96	32,74	-3,90	-3,48	-2,62	18,24	-8,24
96-97	27,28	-4,31	-3,51	-2,63	12,54	-2,09
97-98	29,33	-5,27	-3,54	-2,63	14,65	-3,22
98-99	8,88	-2,08	-3,48	-2,59	1,49	6,66
99-00	17,37	-2,23	-3,44	-2,64	6,80	1,51
00-01	32,59	-4,98	-3,47	-2,64	17,68	-6,59
01-02	22,32	-3,63	-3,47	-2,64	10,10	-0,37
02-03	24,14	-5,26	-3,47	-2,63	12,85	-1,49
03-04	22,35	-4,32	-3,48	-2,62	10,24	0,18
04-05	8,85	-2,56	-3,42	-2,55	1,83	6,69
05-06	17,55	-2,42	-3,36	-2,63	5,43	2,99
06-07	25,50	-3,09	-3,37	-2,61	10,04	-0,96
07-08	18,22	-2,61	-3,35	-2,64	5,91	2,69
08-09	12,98	-2,49	-3,31	-2,61	4,59	3,82
09-10	32,13	-5,46	-3,36	-2,61	17,33	-5,90
10-11	27,58	-5,83	-3,42	-2,62	13,77	-1,90
11-12	10,36	-3,14	-3,41	-2,57	2,74	6,38
12-13	24,90	-4,92	-3,40	-2,64	13,85	-2,89
13-14	19,61	-4,37	-3,40	-2,63	8,68	1,73
14-15	16,05	-3,55	-3,40	-2,59	6,02	3,53
TOTAL	608,06	-105,16	-104,18	-78,50	262,36	25,49
MEDIA	20,27	-3,51	-3,47	-2,62	8,75	0,85

Demarcación Hidrográfica Guadalquivir (MASb Sierra Morena)						
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	8,26	-3,53	0,00	-1,32	3,31	1,21
86-87	8,71	-2,48	0,00	-1,32	3,07	0,62
87-88	11,99	-3,79	0,00	-1,32	5,57	-0,92
88-89	8,01	-2,33	0,00	-1,32	1,84	1,78
89-90	12,36	-3,73	0,00	-1,32	6,29	-1,72
90-91	7,57	-2,61	0,00	-1,32	2,93	0,86
91-92	5,56	-1,96	0,00	-1,32	0,59	2,77
92-93	5,19	-1,49	0,00	-1,32	0,27	2,69
93-94	8,21	-1,48	0,00	-1,32	3,00	-0,17
94-95	5,12	-1,23	0,00	-1,32	0,92	1,79
95-96	14,93	-2,74	0,00	-1,32	7,95	-4,26
96-97	12,37	-3,54	0,00	-1,32	5,37	-0,91
97-98	12,84	-4,28	0,00	-1,32	6,08	-1,08
98-99	3,87	-2,06	0,00	-1,32	0,38	3,07
99-00	7,49	-1,78	0,00	-1,32	2,44	0,65
00-01	14,24	-3,78	0,00	-1,32	7,22	-2,77
01-02	10,46	-3,02	0,00	-1,32	4,56	-0,52
02-03	11,74	-4,35	0,00	-1,32	6,07	-1,01
03-04	12,00	-3,81	0,00	-1,32	5,50	-0,71
04-05	4,88	-2,53	0,00	-1,32	0,99	2,91
05-06	9,10	-2,24	0,00	-1,32	2,91	0,68
06-07	13,27	-2,62	0,00	-1,32	5,24	-1,36
07-08	9,65	-2,44	0,00	-1,32	3,26	0,57
08-09	6,57	-2,31	0,00	-1,32	2,24	1,48
09-10	16,74	-4,60	0,00	-1,32	8,93	-3,54
10-11	14,69	-5,17	0,00	-1,32	7,22	-1,24
11-12	4,95	-3,07	0,00	-1,32	1,32	3,17
12-13	12,18	-4,19	0,00	-1,32	6,57	-1,45
13-14	9,46	-3,94	0,00	-1,32	3,97	1,06
14-15	7,79	-3,27	0,00	-1,32	2,78	1,72
TOTAL	290,18	-90,38	0,00	-39,57	118,78	5,37
MEDIA	9,67	-3,01	0,00	-1,32	3,96	0,18

Demarcación Hidrográfica Guadiana (MASb Aroche-Jabugo)						
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	4,12	0,00	-3,75	-1,17	1,90	1,07
86-87	4,67	0,00	-3,65	-1,17	2,09	0,77
87-88	5,79	0,00	-3,66	-1,17	3,07	-0,25
88-89	4,23	0,00	-3,60	-1,17	1,29	1,51
89-90	5,99	0,00	-3,61	-1,17	3,65	-0,90
90-91	4,04	0,00	-3,57	-1,17	1,78	0,94
91-92	2,46	0,00	-3,51	-1,17	0,35	2,36
92-93	2,56	0,00	-3,44	-1,17	0,19	2,48
93-94	4,52	0,00	-3,44	-1,17	2,21	0,42
94-95	2,62	0,00	-3,41	-1,17	0,61	1,98
95-96	7,43	0,00	-3,48	-1,17	4,50	-1,95
96-97	6,20	0,00	-3,51	-1,17	3,12	-0,55
97-98	6,94	0,00	-3,54	-1,17	3,77	-1,20
98-99	2,11	0,00	-3,48	-1,17	0,43	2,19
99-00	4,20	0,00	-3,44	-1,17	1,89	0,69
00-01	7,36	0,00	-3,47	-1,17	4,33	-1,81
01-02	4,96	0,00	-3,47	-1,17	2,31	0,22
02-03	5,17	0,00	-3,47	-1,17	2,78	-0,26
03-04	4,47	0,00	-3,48	-1,17	2,11	0,45
04-05	1,74	0,00	-3,42	-1,17	0,41	2,16
05-06	3,51	0,00	-3,36	-1,17	0,96	1,58
06-07	5,10	0,00	-3,37	-1,17	2,03	0,46
07-08	3,56	0,00	-3,35	-1,17	1,10	1,40
08-09	2,68	0,00	-3,31	-1,17	0,95	1,52
09-10	6,40	0,00	-3,36	-1,17	3,71	-1,26
10-11	5,59	0,00	-3,42	-1,17	2,94	-0,46
11-12	2,35	0,00	-3,41	-1,17	0,68	1,85
12-13	5,41	0,00	-3,40	-1,17	3,18	-0,66
13-14	4,39	0,00	-3,40	-1,17	2,10	0,41
14-15	3,51	0,00	-3,40	-1,17	1,44	1,10
TOTAL	134,10	0,00	-104,18	-35,17	61,87	16,26
MEDIA	4,47	0,00	-3,47	-1,17	2,06	0,54

Demarcación Hidrográfica Tinto, Odiel y Piedras (MASb Arcena)						
Fecha	Precipitación hm³	Dren/Manantial hm³	Ríos hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Reservas hm³
85-86	5,66	-0,58	0,00	-0,13	2,55	0,44
86-87	5,90	-0,44	0,00	-0,14	2,44	0,21
87-88	7,85	-0,76	0,00	-0,13	3,91	-0,55
88-89	5,40	-0,25	0,00	-0,13	1,67	0,72
89-90	8,32	-0,97	0,00	-0,14	4,66	-1,04
90-91	5,55	-0,51	0,00	-0,14	2,60	0,20
91-92	3,63	-0,03	0,00	-0,11	0,68	1,37
92-93	3,39	0,00	0,00	-0,08	0,39	1,47
93-94	5,92	-0,44	0,00	-0,15	2,73	-0,19
94-95	3,79	-0,11	0,00	-0,10	1,01	1,01
95-96	10,38	-1,17	0,00	-0,13	5,79	-2,03
96-97	8,71	-0,76	0,00	-0,14	4,05	-0,63
97-98	9,55	-0,99	0,00	-0,14	4,81	-0,93
98-99	2,89	-0,02	0,00	-0,10	0,68	1,40
99-00	5,68	-0,45	0,00	-0,15	2,47	0,17
00-01	10,99	-1,20	0,00	-0,15	6,13	-2,01
01-02	6,90	-0,60	0,00	-0,15	3,24	-0,06
02-03	7,22	-0,91	0,00	-0,14	4,00	-0,21
03-04	5,88	-0,51	0,00	-0,12	2,64	0,44
04-05	2,23	-0,03	0,00	-0,06	0,43	1,62
05-06	4,93	-0,19	0,00	-0,14	1,56	0,73
06-07	7,13	-0,47	0,00	-0,12	2,76	-0,06
07-08	5,01	-0,17	0,00	-0,14	1,56	0,72
08-09	3,73	-0,18	0,00	-0,12	1,40	0,83
09-10	8,99	-0,86	0,00	-0,12	4,70	-1,10
10-11	7,30	-0,66	0,00	-0,13	3,62	-0,21
11-12	3,05	-0,07	0,00	-0,07	0,73	1,37
12-13	7,30	-0,73	0,00	-0,15	4,10	-0,78
13-14	5,76	-0,43	0,00	-0,14	2,61	0,26
14-15	4,75	-0,29	0,00	-0,10	1,80	0,71
TOTAL	183,78	-14,78	0,00	-3,75	81,71	3,86
MEDIA	6,13	-0,49	0,00	-0,13	2,72	0,13