

**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**

**Demarcaciones hidrográficas: Guadiana-Tinto, Odiel y Piedras**

**Informe nº 17 (AYAMONTE-LEPE-CARTAYA)**

**21. Ayamonte-Lepe-Cartaya**



## ÍNDICE GENERAL

### MEMORIA

Pág.

#### PRESENTACIÓN

<b>1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
<b>3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA</b>	<b>7</b>
3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	7
3.2. GEOMETRÍA, ESTRUCTURA Y LÍMITES	11
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	15
3.7. PIEZOMETRÍA EN RÉGIMEN NATURAL E INFLUENCIADO	18
3.8. PARÁMETROS HIDRÁULICOS E HIDROGEOLÓGICOS	19
3.9. TRANSFERENCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DESDE O HACIA OTRAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA	19
3.10. INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS	20
3.11. USOS DEL AGUA	20
<b>4. CLIMATOLOGÍA</b>	<b>22</b>
4.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA	22
4.2. ANÁLISIS ESPACIAL Y TEMPORAL	22
<b>5. RECARGA DE ACUÍFEROS</b>	<b>29</b>
5.1. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA AUTÓCTONA MEDIANTE EL BALANCE DE AGUA EN EL SUELO	30
5.2. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE BALAN	34
5.2.1. Evapotranspiración de los cultivos y necesidades hídricas brutas	35
5.2.2. Aplicación del código BALAN	42
5.2.3. Resultados del Balance	49
5.3. ESTIMACIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE EL CÓDIGO RENATA	54
5.3.1. Generación de la malla y periodo de cálculo	56
5.3.2. Módulo de Balance hídrico	57
5.3.3. Módulo de calibración. Modelo de flujo	61
<b>6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS</b>	<b>67</b>
<b>7. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN NATURAL</b>	<b>68</b>
<b>8. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN ALTERADO</b>	<b>70</b>
<b>9. DISTRIBUCIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS</b>	<b>75</b>
<b>10. RESUMEN Y CONCLUSIONES</b>	<b>79</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>81</b>

#### ANEXOS

Anexo I. Anexos del código BALAN

Anexo II. 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 de cuenca 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 hidrográficas diferentes, tienen acuíferos conectados hidráulicamente entre sí. En consecuencia, una de las medidas necesarias de coordinación de los Planes Hidrológicos de cuenca es la definición y delimitación de dichos acuíferos compartidos, así como la asignación de recursos de cada acuífero compartido entre las cuencas afectadas.*

*En cumplimiento del Artículo 9.2 del Reglamento de la Planificación Hidrológica, los planes hidrológicos realizan 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 ha de tomar como referencia lo previsto en la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional (PHN), que establece en su Anexo 1 un listado de unidades hidrogeológicas compartidas y su correspondiente asignación de recursos a los distintos ámbitos de planificación.*

*Desde la aprobación del PHN se han aprobado los planes hidrológicos de cuenca de varios ciclos sucesivos de planificación. En estos planes se han delimitado y caracterizado masas de agua subterránea conforme a la Directiva Marco del Agua, hecho que progresivamente ha convertido al Anexo I del PHN antes mencionado en algo carente de utilidad por su evidente desactualización. El avance en el conocimiento de los acuíferos españoles que se pone en evidencia a través de los contenidos incorporados en los planes hidrológicos de cuenca ha sido notable, identificando casos de acuíferos compartidos no considerados en el vigente PHN y mejorando la definición y delimitación de los contemplados.*

*Con el objeto de disponer de un trabajo que sirva como referencia técnica a considerar para actualizar los contenidos coordinadores del Plan Hidrológico Nacional respecto a los acuíferos compartidos, la Dirección General del Agua encargó al Instituto Geológico y Minero de España un trabajo técnico armonizado y actualizado de caracterización, mejora del conocimiento y reducción de incertidumbres para estos acuíferos compartidos.*

*Este trabajo ha partido 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 masas de agua subterránea con continuidad hidrogeológica (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.*

*En concordancia con los objetivos perseguidos, esta memoria contempla la identificación, caracterización y mejora del conocimiento de los acuíferos compartidos en la MASCH de **MASCH Ayamonte-Lepe-Cartaya**, integrada por las MASb Ayamonte (040.020) de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana y Lepe-Cartaya (030.594) de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras. Los resultados obtenidos servirán como referencia técnica en la tarea de actualización de los contenidos que a este respecto debe incluir el Plan Hidrológico Nacional a partir de las propuestas de los planes hidrológicos de cuenca.*

## 1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y ENCUADRE ADMINISTRATIVO

La masa de agua subterránea compartida o con continuidad hidrogeológica (MASCH) denominada en este documento como Ayamonte-Lepe-Cartaya engloba las MASb 040.020 Ayamonte, de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (DHGu) y la MASb 030.594 Lepe-Cartaya, de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras (DHTOP). Estas MASb quedan enmarcadas en sus respectivos planes hidrológicos dentro del denominado Sistema único de explotación de la DHTOP y del Sistema de explotación Sur de la DHGu (Figura 1.1). El límite entre ambas masas se extiende a lo largo de una distancia próxima a 20 km, desde Islantilla, al S, hasta cerca de Villablanca, al NO.



**Figura 1.1.** La MASCH de Ayamonte-Lepe-Cartaya en el esquema de los sistemas de explotación de las Demarcaciones hidrográficas del Guadiana y del Tinto, Odiel y Piedras (PHG y PHTOP, 2015).

La poligonal envolvente definida por la MASCH se extiende sobre un total de 633,3 km<sup>2</sup>, de los que 472,0 km<sup>2</sup> corresponden a la MASb Lepe-Cartaya y 161,3 km<sup>2</sup> a la MASb Ayamonte. Está íntegramente en la provincia de Huelva y ocupa parte de 10 términos municipales: Ayamonte, Isla Cristina, Villablanca, Lepe, Cartaya, Aljaraque, Punta Umbría, Gibraleón, Villanueva de los Castillejos y San Bartolomé de la Torre.

La región se caracteriza por presentar una topografía muy suave; tan solo destaca la presencia de algunas elevaciones de poca entidad, como son la sierra de Moernos y la sierra de la Calvilla, localizadas en el tercio septentrional de la MASCH. El rango altitudinal está comprendido entre 0 m s.n.m. (litoral costero del océano Atlántico) y 384 m s.n.m., en la sierra de la Calvilla, al SE de San Bartolomé de la Torre. En la zona existen algunos enclaves de especial notoriedad desde el punto de vista medio natural, como son las marismas de Isla Cristina, del Rompido y del Odiel, de gran relevancia ecológica.

La región se encuentra surcada por varios ríos y arroyos de diverso tamaño y con un sentido de flujo superficial preferente N-S, como son los ríos Odiel y Piedras (DHTOP). En cambio, los cauces

---

incluidos en la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (río Carreras, el arroyo Pedraza, etc.) presentan una orientación preferente NE - SO a E - O.

## 2. ANTECEDENTES

El primer trabajo del que se tiene constancia sobre exploración y evaluación de los recursos hídricos subterráneos en el ámbito de estudio fue presentado por Gea et al. (1965), en el marco del Plan General de Exploración de Aguas Subterráneas en España. En este estudio se efectuaron prospecciones geológicas, geofísicas e hidrogeológicas que permitieron identificar la existencia de varios acuíferos dentro de la secuencia terciaria, cuya agua era potencialmente utilizable para regadío. Se dedujo que los materiales permeables se presentan en dos niveles acuíferos bien diferenciados: una formación acuífera de carácter confinado (Aljaraque-Cartaya), situada en la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras, y otra libre (La Redondela), repartida entre la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras y la del Guadiana. Finalmente, se realizó un balance hidrogeológico en el que se estableció que la recarga de los acuíferos detríticos se realiza mediante la infiltración directa del agua de lluvia, por escorrentía desde los relieves situados al norte de la zona de estudio, de muy baja permeabilidad, y por aportes laterales de los sedimentos de piedemonte. Por su parte, la descarga se produciría hacia el océano Atlántico. El trabajo concluye con el cálculo de 32 hm<sup>3</sup>/a de recursos para el acuífero de Aljaraque-Cartaya y de 19 hm<sup>3</sup>/a para el de La Redondela.

El IGME dirigió entre 1966 y 1969 el proyecto denominado “Investigaciones hidrogeológicas en la cuenca del río Guadalquivir”, cuyo objetivo era identificar recursos de aguas subterráneas para regadío en sectores deficitarios de aguas superficiales (IGME-FAO, 1974). Gracias a este estudio se consiguió un mejor conocimiento de los acuíferos del S de Huelva. A partir de 1970, el IGME, en el marco del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS), comenzó a estudiar los acuíferos libres del ámbito de estudio, aunque ignoró los confinados. Remarcó la necesidad de monitorizar la interfase salina para prevenir problemas de intrusión marina en los materiales acuíferos (IGME, 1975; 1976).

Años más tarde, Martín-Sosa (1981) mencionó la riqueza en aguas subterráneas de la región, pero indicó que debería llevarse a cabo una gestión adecuada, mediante el uso conjunto de recursos superficiales y subterráneos, así como otras medidas técnicas específicas. De este modo se evitaría un estado de sobreexplotación superior al que existía en esa época. La tentativa de balance hidrogeológico efectuada por este autor establece unas entradas de 18 hm<sup>3</sup>/a de infiltración de agua de lluvia y 2 hm<sup>3</sup>/a de retorno de regadíos, mientras que las salidas fueron evaluadas en 24 hm<sup>3</sup>/año de extracciones por bombeo, sin precisar el resto de los elementos del balance. Dos años después se concluyó el trabajo titulado “Proyecto de investigación hidrogeológica de los sistemas acuíferos situados en la región suroccidental de Huelva”, coordinado por el IGME, con la colaboración de la Compañía General de Sondeos (IGME-CGS, 1983). En este documento se presentaron los resultados de un modelo de simulación numérica, con los que se pudieron deducir unos recursos medios de 97 hm<sup>3</sup>/a, para una superficie permeable de 600 km<sup>2</sup>. De esta cifra, 7,7 hm<sup>3</sup>/a corresponderían al acuífero profundo. En cuanto a las salidas resultantes, estas fueron estimadas en 87,9 hm<sup>3</sup>/a de descarga por arroyos, ríos y marismas y 9,9 hm<sup>3</sup>/a irían directamente hacia el océano Atlántico.

González (1984), en el marco de su tesis doctoral, estableció que las entradas de agua al acuífero detrítico superficial asociadas a la infiltración directa del agua de lluvia serían del orden de 66 hm<sup>3</sup>/a. Los cálculos fueron efectuados mediante la ecuación de Thornthwaite (1948). Los retornos de riegos no fueron evaluados, así como los aportes procedentes del acuífero subyacente, cuyo caudal lo consideraba residual a efectos del balance hidrogeológico. Las salidas, por su parte, estarían constituidas por bombeos (24 hm<sup>3</sup>/a), por descargas naturales hacia la red hidrográfica (no se calculó debido a la inexistencia de estaciones de aforos), por evapotranspiración (22 hm<sup>3</sup>/a), por el

drenaje subterráneo al océano Atlántico (9 hm<sup>3</sup>/a, como mínimo) y por trasferencias hacia el acuífero profundo, que no fueron calculadas debido a la complejidad que ello supone. Además, puso de manifiesto la existencia de fenómenos de intrusión marina en el sector costero. Concluye que no es posible cerrar el balance hidrogeológico debido a la falta de información cuantitativa de las diferentes componentes. González (1984) diferenció, además, tres sectores hidrogeológicos en el acuífero: cuenca del Odiel, cuenca del Piedras y cuenca del Guadiana.

Desde el punto de vista administrativo, el IGME (1983), en el marco del PIAS, definió el Sistema Acuífero nº 25, denominado “Pliocuaternario Costero de Huelva” (Tabla 2.1, columna A), en el que se incluyó la práctica totalidad de la presente zona de estudio. No obstante, esta designación se refería exclusivamente al “manto freático pliocuaternario de la región de Huelva” en el mismo sentido que González (1984), de tal modo que se ignoraba que existieran otros acuíferos profundos. Posteriormente, en el trabajo “Delimitaciones de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e islas baleares y síntesis de sus características”, realizado por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) y el IGME (1988), se individualizó la “Unidad Hidrogeológica Ayamonte-Huelva” (Tabla 2.1, columna B), asignándole el código 04.12 dentro del ámbito de la cuenca del río Guadiana (MOPU-IGME, 1988). Se consideró una superficie acuífera aflorante de 600 km<sup>2</sup> y las entradas por infiltración se valoraron de manera global en 98 hm<sup>3</sup>/a. Las salidas por bombeo se estimaron en 33 hm<sup>3</sup>/a.

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

Demarcación Hidrográfica	A IGME (1983)		B MOPU-IGME (1988)		C Ciclo de planificación 2009 - 2015	D Planes Hidrológicos del 2º ciclo	En este informe
	Sistema Acuífero	nº	Unidad Hidrogeológica	nº	Masa de Agua Subterránea (M.A.S.) [nº]	Masa de Agua Subterránea (MASb) [código]	
Guadiana	Pliocuaternario Costero de Huelva	25	Ayamonte- Huelva	04.12	Ayamonte [041.020]	Ayamonte [ES040MSBT00030596]	Ayamonte
Tinto - Odiel - Piedras					Lepe - Cartaya [042.002]	Lepe - Cartaya [ES064MSBT000305940]	-Lepe- Cartaya

En 1989 se presentaron los resultados del trabajo titulado “Estudio de la viabilidad de recarga artificial en el acuífero de Ayamonte-Huelva (zona Ayamonte-Lepe-Cartaya). Cuenca del Guadiana”, realizado por el Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOP, 1989).

La información procedente de los trabajos previos 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 de los acuíferos superficial y profundo existentes en el acuífero detrítico de Ayamonte-Huelva. Los valores de recursos mostrados en el documento estuvieron basados en los resultados aportados por (IGME-CGS, 1983), actualizados con los resultados de trabajos posteriores. Se asignaron 105 hm<sup>3</sup>/a de recursos hídricos medios al conjunto del acuífero, para una superficie permeable de 610 km<sup>2</sup>. De estos recursos, 97 hm<sup>3</sup>/a corresponderían a la infiltración directa del agua de lluvia, 6 hm<sup>3</sup>/a por retorno de riegos y el resto, 2 hm<sup>3</sup>/a, como entradas debidas a intrusión marina. En cuanto a las salidas, menciona la existencia de 60 hm<sup>3</sup>/a que se drenarían por cauces (54 hm<sup>3</sup>/a) y marismas (6 hm<sup>3</sup>/a) y el resto como salidas ligadas a la explotación del acuífero para distintos usos: 40 hm<sup>3</sup>/a –regadío-, 4 hm<sup>3</sup>/a –abastecimiento- y 1 hm<sup>3</sup>/a –industria-. Estas cifras fueron revisadas posteriormente en el apartado dedicado al “Acuífero de Ayamonte-Huelva” del Atlas Hidrogeológico de Andalucía (ITGE-Junta de Andalucía, 1998). En ese documento se asignaron nuevamente 105 hm<sup>3</sup>/a de recursos hídricos medios a la citada unidad hidrogeológica: 31,5 hm<sup>3</sup>/a explotados por sondeos -abastecimiento y

regadío- y los restantes como salidas naturales hacia ríos y marismas (54 hm<sup>3</sup>/a) y descargas hacia el mar (19,5 hm<sup>3</sup>/a). El capítulo del Atlas Hidrogeológico de Andalucía también recogía la evolución temporal de las salidas por bombeo para los años 1978 (9 hm<sup>3</sup>/a), 1983 (20 hm<sup>3</sup>/a), 1986 (33 hm<sup>3</sup>/a), 1987 (44 hm<sup>3</sup>/a) y 1995 (31,5 hm<sup>3</sup>/a).

Tras la entrada en vigor de la Directiva 2000/60/CE -Directiva Marco del Agua-, la Dirección General del Agua efectuó la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias (DGA, 2005). Este estudio dividió la unidad hidrogeológica Ayamonte-Huelva en dos nuevas unidades de gestión: la masa de agua subterránea “Ayamonte”, con el código 041.020, perteneciente a la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (DHGu), y la MAS “Lepe-Cartaya” (042.002), adscrita a la Demarcación Hidrográfica del Tinto-Odiel-Piedras (DHTOP) (Tabla 2.1, columna C).

En 2007, los acuíferos detríticos del SO de la provincia de Huelva fueron estudiados desde el punto de vista hidrogeológico en el marco de los estudios de “Mejora del conocimiento hidrogeológico de las unidades de la zona Sur de la cuenca del Guadiana” (CHGA, 2007). En dicho trabajo se realizó una labor de inventario y control de puntos de agua, así como medidas piezométricas, muestreo de aguas, balances hidrogeológicos y estimación de recursos hídricos para el año 2006. El área contemplada en este estudio se dividió en dos sectores: occidental, correspondiente a la MAS “Ayamonte”, con 162,6 km<sup>2</sup> de superficie, y oriental, MAS “Lepe - Cartaya”, con 488,7 km<sup>2</sup> de superficie. Las entradas por infiltración a cada sector fueron evaluadas mediante el método del balance de agua en el suelo (Thorntwaite, 1948). A la MAS occidental le asignaron unos recursos de 12 - 13,5 hm<sup>3</sup>/a de los que 11 - 12 hm<sup>3</sup>/a sería recarga de la lluvia y 1 - 1,5 hm<sup>3</sup>/a como retornos de riego. Del total de entradas, 6 - 6,5 hm<sup>3</sup>/a serían drenados de manera difusa hacia cauces y marismas y 4,5 - 5 hm<sup>3</sup>/a como extracciones por bombeos (CHGA, 2007). En el caso del sector oriental (MAS “Lepe-Cartaya”), el valor de infiltración por precipitación ascendió a 50 hm<sup>3</sup>/a, mientras que 3 - 4 hm<sup>3</sup>/a serían las entradas debidas a retornos de riego. La mayoría de las salidas (45,5 - 42,5 hm<sup>3</sup>/a) tendría lugar de forma difusa hacia los ríos y marismas que drenan los acuíferos y 6 - 10 hm<sup>3</sup>/a serían extraídos mediante bombeo o por captaciones.

La superficie fijada en DGA (2005) fue posteriormente alterada con la entrada en vigor del 2º Ciclo de Planificación Hidrológica (Tabla 2.1, columna D). Las modificaciones más relevantes ocurrieron en el límite oriental de la MASb “Lepe-Cartaya” (030.594), cuyo trazado fue llevado hasta el río Odiel, para ajustarlo al límite de la vecina MASb “Niebla” (Junta de Andalucía, 2015). Además de las modificaciones administrativas indicadas, el documento referido (Junta de Andalucía, 2015) incluyó también una tentativa de balance hidrogeológico para los acuíferos que integran la MASb “Lepe-Cartaya”. Los recursos hídricos evaluados en 450,3 km<sup>2</sup> de afloramientos detríticos, repartidos entre las denominadas “zona libre” (247,1 km<sup>2</sup>, situada al NO), y la “zona mixta” (203,2 km<sup>2</sup>, al SE), sumaron entre 45,3-46,1 hm<sup>3</sup>/a: 43,1 hm<sup>3</sup>/a asociados a la infiltración del agua de lluvia y 2,2 - 3 hm<sup>3</sup>/a como retorno de riego. Las salidas estimadas (42-45 hm<sup>3</sup>/a) fueron desglosadas en: descargas a cauces y al mar (38,5-41,5 hm<sup>3</sup>/a) y bombeos (3,32 hm<sup>3</sup>/a). El cierre de balance dejó un residuo de 3 - 4 hm<sup>3</sup>/a como valor de transferencias netas desde la “zona libre” a la “zona mixta”. Por su parte a la MASb Ayamonte (040.020) se le asignan unos recursos disponibles (PHG, 2015) de 9,6 hm<sup>3</sup>/a y unos derechos del agua (CHG-ALBERCA, 2012) de 4,5 hm<sup>3</sup>/a.

Otro documento técnico conocido sobre el ámbito de estudio corresponde al informe de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana referente 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,

2010). En la actividad mencionada se procedió a la identificación y caracterización de la interrelación que presentan las aguas subterráneas y las aguas superficiales en la MASb “Ayamonte” (040.020).

En la tabla 2.2 se exponen datos de recarga y explotación estimados que se han tendido en cuenta en diferentes momentos para la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

**Tabla 2. 2. Estimación del volumen de la recarga y de las explotaciones.**

Fuente	Recarga (hm³/a)			Explotaciones (hm³/a)		
	TOP	Guadiana	Total	TOP	Guadiana	Total
<b>(SGOP-IGME, 1988)</b>			<b>98<sup>(1)</sup></b>			<b>33</b>
<b>Atlas Hidrogeológico (Diputación Huelva- IGME, 1993)</b>			<b>105<sup>(2)</sup></b>			<b>40</b>
<b>(CHGA, 2007)</b>	50	11-12	<b>61-62</b>	6-10	4,5-5	<b>10,5-15</b>
<b>2º Ciclo Planificación (2015-21)</b>	45,3-46,1	9,6	<b>54,9-55,7</b>	3,32	4,5	<b>7,82</b>

<sup>(1)</sup>Pliocuaternalio Costero de Huelva.

<sup>(2)</sup>Acuífero detrítico de Ayamonte-Huelva.

### 3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

#### 3.1. Contexto geológico e hidrogeológico

El sector suroccidental de la provincia de Huelva se caracteriza, en términos geológicos, por la presencia de materiales de edades comprendidas entre el Carbonífero Inferior y el Cuaternario (González, 1984), estructurados tectónicamente en un zócalo fragmentado en bloques y una cobertera formada por sedimentos de edad Terciario a Cuaternario (Figura 3.1). Los materiales que ocupan el norte del área y el sustrato Hercínico son pizarras y grauvacas de edad Paleozoico, pertenecientes a la denominada Zona Sud-Portuguesa del Macizo Ibérico (Donaire et al., 2008). Sobre ellos se disponen, de forma discordante, distintas formaciones de origen sedimentario con edades comprendidas entre el Triásico y el Cuaternario (Figura 3.2).

Los materiales más antiguos que se reconocen sobre el sustrato Hercínico son calizas y dolomías (facies *Muschelkalk*) de tonalidades rojizas y grisáceas y de potencia reducida con intercalaciones de rocas volcánicas (doleritas) de edad Triásico, cuyos afloramientos, de reducida extensión en el ámbito de estudio, pueden observarse únicamente en las inmediaciones de la localidad de Ayamonte, aunque se desconoce su continuidad en profundidad. Se dispone según secuencia monoclinal buzando hacia el SE, dirección hacia la cual el paquete carbonático se iría haciendo más potente (Junta de Andalucía, 2015).

La secuencia sedimentaria miocena comienza con un paquete de conglomerados y microconglomerados, sobre los que se disponen calcarenitas, areniscas y arenas (formación Mioceno de Base o formación Niebla). Su potencia es variable, dado que constituye el relleno de un paleo-relieve, con valores medios comprendidos entre 2 y 20 metros. Presenta frecuentes cambios de facies tanto en horizontal como la vertical. A través de los estudios realizados fundamentalmente por Viguier (1977) y Civis et al. (1987), se atribuye a esta formación basal una edad de Tortoniense superior. Encima de los materiales anteriores, de manera concordante, se sitúa una alternancia de margas grises con intercalaciones de arenas que, hacia techo, van pasando paulatinamente a margas azuladas (formación Gibrleón). Esta última constituye la mayor parte de la serie marina miocena que rellena la depresión del Guadalquivir. El tránsito litológico progresivo a medida que se asciende en la serie estratigráfica dificulta en campo su separación con la formación arenosa infrayacente. En la parte superior aparece un nivel constituido por margas, limos grises, arenas grises y niveles carbonáticos, con intercalaciones de areniscas. Es la formación que presenta los mayores espesores, pudiendo llegar a alcanzar más de 1.000 metros hacia el interior de cuenca. La edad de estos materiales se atribuye al Mioceno terminal y equivalen lateralmente a las típicas margas azules del valle del Guadalquivir. De forma discordante con la formación anterior, se depositó otra de naturaleza detrítica compuesta por margas, limos arenosos, arenas grises y lentejones carbonáticos, con una potencia media de 4 a 5 metros. Sobre esta formación detrítica, se depositó nuevamente un paquete de margas azules, cuyas características geológicas son similares a las definidas para la formación Gibrleón, si bien hay que considerar que la parte superior es más rica en materiales detríticos en detrimento de arcilla y margas.

Hacia techo aparecen limos arenosos y arenas gris-amarillentas, conocidas como “Arenas de Huelva” de edad Plioceno. Es una formación fundamentalmente terrígena, de potencia variable (máxima de 40 - 50 metros) y cambios laterales de facies. Aflora esencialmente en la margen derecha del río Odiel. En general se trata de una sucesión de bancos de 1 - 3,5 metros de espesor constituidos por lutitas arenosas y arenas limo-arcillosas. Más arriba en la serie, de manera discordante, se reconocen las denominadas “Arenas de Bonares”, compuestas por arenas finas a muy finas en la base, que progresivamente se hacen más groseras hacia el techo (intercalaciones de niveles conglomeráticos). Frecuentemente se observan niveles de turba y material carbonoso.



Su espesor es variable, entre 20 metros en la zona de Lepe-Cartaya hasta más de 100 metros hacia el S (manto eólico y marisma) de Doñana. Se le atribuye una edad Plioceno superior – Pleistoceno.

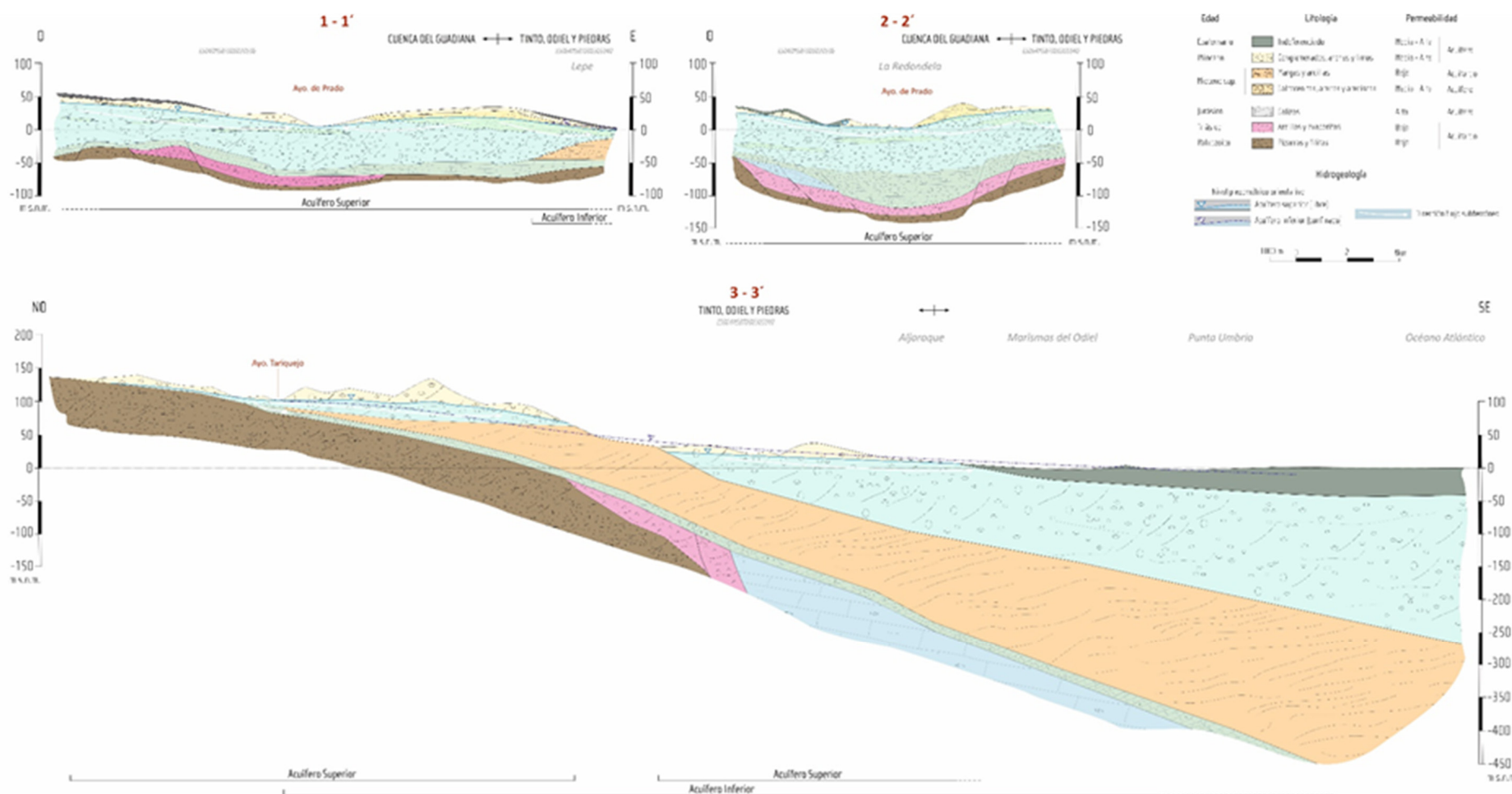
Los depósitos cuaternarios que se pueden reconocer en el entorno de las dos masas de agua subterránea son conglomerados, arenas con gravas, lutitas arenosas, limos y areniscas, que aparecen en diferentes posiciones geomorfológicas asociados a los procesos fluviales (abanicos aluviales, terrazas, llanuras de inundación), eólicos (manto eólico y dunas), costeros (playas) y de transición (marismas). Destacan las llanuras con influencia de mareas situadas en ambas márgenes de la desembocadura de los ríos Guadiana, Odiel y Piedras. Se componen principalmente de arcillas y limos, que incluyen niveles subordinados de gravas, arenas, bioclastos y turba.

Los materiales con mayor interés, desde el punto de vista hidrogeológico, que aparecen en el ámbito de estudio son el conjunto de areniscas (Figura 3.1), calcarenitas y gravas de edad Mioceno -basal- y Plioceno -en superficie en la mayor parte del área de estudio-. No obstante, también existe una superficie significativa de terreno ocupada por materiales cuaternarios, depositados por los ríos, así como los ubicados bajo las marismas del área de estudio, con diferentes valores de permeabilidad. A los sedimentos anteriores habría que añadir el pequeño afloramiento carbonático (calizas y dolomías), de edad Triásico, que aflora en las inmediaciones de Ayamonte. Algunos de los sondeos han atravesado, además, arcillas rojas, yesos y rocas volcánicas del Trías (facies germano-andaluzas), así como calizas y dolomías jurásicas, cuyas series se vuelven progresivamente más completas y potentes hacia el S (Junta de Andalucía, 2015).

Por tanto, las masas de agua subterránea en el entorno de la MASCH están constituidas por (ITGE-Junta de Andalucía):

- un sustrato paleozoico de baja permeabilidad, que puede variar según el grado de fracturación y alteración de las rocas, y cuyos afloramientos se distribuyen por el borde septentrional, donde dan lugar a una superficie extensa pero irregular,
- materiales acuíferos de naturaleza carbonática (dolomías) de edad Triásico con intercalaciones de rocas volcánicas, que afloran en el área cercana a la localidad de Ayamonte. Aparecen también en profundidad bajo los sedimentos neógenos,
- arenas amarillentas, gravas y areniscas (Mioceno basal), con espesor entre 2 y 20 metros, con comportamiento acuífero,
- margas azules del Mioceno terminal, cuyo espesor llega a ser de 200 metros en el sector meridional del ámbito de estudio, y que a techo pasa a arenas finas y arcillosas de hasta 10 metros de espesor,
- alternancias de arenas, bancos de gravas e intercalaciones arcillosas plio-cuaternarias, con espesores variables entre 10 y 25 metros, excepto en aquellos sectores en los que no existe la presencia de margas, donde alcanza potencias de hasta 70 metros,





**Figura 3.2. Cortes hidrogeológicos de la región de Ayamonte-Lepe-Cartaya y áreas próximas. La trayectoria de los cortes se puede ver en la figura 3.1. Corte 3 – 3' modificado de Junta de Andalucía (2015).**

- depósitos cuaternarios de diversa naturaleza y disposición geomorfológica, que pueden constituir acuíferos con distinto interés hidrogeológico asociados a la dinámica fluvial de los ríos Guadiana, Piedras y Odiel, y a la dinámica litoral, y
- limos y arcillas con abundante presencia de materia orgánica, asociados a las zonas de marismas, y cuyo comportamiento hidráulico global es poco permeable.

### 3.2. Geometría, estructura y límites

Desde el punto de vista estructural, el ámbito de estudio se puede dividir entre materiales preorogénicos (Paleozoico) y postorogénicos (Mesozoico, Terciario y Cuaternario); estos últimos depositados de forma discordante sobre las unidades infrayacentes (González, 1984). No obstante, los materiales mesozoicos se encuentran afectados por fallas normales, algunas posiblemente originadas durante la apertura del océano Atlántico durante el Triásico y Jurásico (véanse cortes hidrogeológicos de la figura 3.2).

Los sedimentos miocenos no muestran signos de haber sufrido deformaciones tectónicas significativas. Las fallas que intersectan estas rocas son locales y de poca extensión, con saltos relativamente pequeños, debido probablemente a la reactivación de antiguas fracturas mesozoicas y al hundimiento gradual de la parte meridional del zócalo ligado a la génesis de la depresión del Guadalquivir. Ello provocó ligeros basculamientos en las formaciones miocenas hasta adquirir los buzamientos que se observan hoy en día (entre 4° y 10° con sentido S-SE) (Figura 3.2, corte 3-3'). Esta estructura geológica regional hace que, en cartografía, los sedimentos detríticos más antiguos se sitúen siempre hacia el N, superponiéndose de manera discordante al sustrato paleozoico y a los sedimentos mesozoicos (hacia el S), al mismo tiempo que son cubiertos, hacia el SE, por las margas azules y el resto de la secuencia sedimentaria neógena. Los cauces y arroyos de la región tienen su cabecera en las rocas metamórficas del Hercínico y discurren de N a S erosionando y encajándose primero en la formación Mioceno de Base, antes de intersectar las margas gris-azuladas y posteriormente las "Arenas de Huelva" y las "Arenas de Bonares".

Por lo tanto, la mayor parte de los límites de los afloramientos permeables son contactos estratigráficos, alterados por cambios laterales de facies, a favor de los cuales los sedimentos detríticos descansan directamente sobre los materiales metamórficos y mesozoicos (formación Mioceno de base), o sobre las margas gris-azuladas (Arenas de Huelva y Arenas de Bonares). La erosión posterior ha individualizado los diferentes enclaves permeables que se pueden reconocer.

### 3.3. Geomorfología. Formas de infiltración preferencial

En general, la topografía de la región es relativamente llana, con pendientes inferiores a 3 grados y suave buzamiento hacia el S, atravesada por valles fluviales de escasa profundidad. Las cotas más altas ( $\approx 300$  m s.n.m.) y la mayor pendiente se localizan al N. La cota mínima se sitúa a nivel de mar, en todo el borde sur, coincidiendo con el litoral onubense.

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de estudio puede dividirse claramente en dos sectores: el septentrional, caracterizado por la presencia de un suave relieve, de bajas pendientes, cuya altitud aumenta hacia el N, y el meridional, constituido por las zonas bajas de los valles de los ríos Piedras y Odiel (Cáceres, 1995). En todo el borde septentrional se pueden reconocer superficies degradadas por la erosión, con densidad de drenaje elevada, así como algún que otro glacis. Hacia el S las superficies planas adquieren mayor extensión, al mismo tiempo que las formas de depósito fluvial ganan protagonismo. Dentro de esta categoría destacan las llanuras de

inundación y los sistemas de terrazas con varios niveles a ambos lados de los ríos Odiel y Piedras. Al S de Gibrleón aparecen estructuras sedimentarias de tipo “point-bar” actuales y asociadas a meandros abandonados del río Odiel (Figura 3.1).

La geomorfología de todo el sector costero destaca por su gran variedad de formas (marismas, zonas endorreicas, flechas y barras de arena, campos de dunas, etc.), típicas de ambientes costeros arenosos con influencia fluvial, eólica y mareal, donde la escasa pendiente y la marea del océano Atlántico provocan la invasión de la línea de marea hacia el interior del continente, dada la gran extensión de las playas y la existencia de cordones o barras litorales, como la de El Rompido o la de Punta Umbría (Figura 3.1).

### 3.4. Formaciones hidrogeológicas

La litología de los diferentes materiales sedimentarios presentes en el ámbito de estudio y su disposición geométrica permite diferenciar dos niveles acuíferos principales, separados por la intercalación de las margas gris-azuladas: uno profundo, de carácter general confinado, y otro superficial, de naturaleza libre (IGME, 1983; González, 1984; ITGE-Junta de Andalucía, 1998). No obstante, las margas de baja permeabilidad se acuñan hacia el NO, hasta prácticamente desaparecer, con las correspondientes consecuencias en la geometría y en el funcionamiento hidrogeológico general de ambos acuíferos.

El acuífero detrítico profundo está constituido por areniscas, arenas, gravas y conglomerados del Mioceno de base, que afloran en 9,9 km<sup>2</sup> en el borde septentrional de la MASb “Lepe-Cartaya”. La potencia varía entre 2 y 20 metros y su disposición geométrica es la de una secuencia monoclin al buzante hacia el SE (Figura 3.2, corte 3–3’). Siempre se encuentra asociado al contacto discordante sobre los materiales paleozoicos y mesozoicos, hacia muro. En el tercio septentrional del ámbito de estudio, el basamento corresponde con las pizarras y grauvacas paleozoicas. Más al SE de la diagonal definida por las localidades Aljaraque–Cartaya–Lepe, en una banda de unos 8 – 10 km de ancho, el basamento está constituido por arcillas rojas y rocas volcánicas de edad Triásico (Figura 3.2, cortes 1 – 1’ y 2 – 2’) (Junta de Andalucía, 2015). Al S de la línea que une las localidades de El Rincón y Huelva, la formación Mioceno de base estaría apoyada sobre las calizas y dolomías jurásicas. Ambas formaciones, jurásica y detrítico basal, estarían conectadas hidráulicamente (Junta de Andalucía, 2015). En este sector, el basamento impermeable, correspondería a las arcillas rojas triásicas, situadas a mayor profundidad. Por lo tanto, el acuífero detrítico basal tiene continuidad por debajo de los materiales de cobertera más allá de los límites de la mencionada MASb.

Por otra parte, el acuífero superficial se compone fundamentalmente de arenas finas y gravas gruesas y medias, con intercalaciones arcillosas, con edades comprendidas entre el Mioceno superior y el Plioceno. Puede presentar una potencia media permeable en torno a 70 metros. Sobre estos sedimentos se encontrarían, conectados hidráulicamente, los depósitos cuaternarios de origen fluvial, eólico y costero (Figura 3.3). El conjunto de materiales que forman el acuífero superficial (Plioceno-Cuaternario) se asentaría sobre las margas y arcillas gris-azuladas de naturaleza impermeable, cuya potencia aumenta hacia el SE (entre 0 y 250 metros en el ámbito de estudio). Según diversos autores (González, 1984; DGOH, 1989), el acuífero superficial se puede considerar de tipo multicapa, debido a las variaciones de permeabilidad consecuencia de los cambios espaciales de facies, tanto en la vertical como horizontal. El espesor de la secuencia permeable aumenta hacia el S, desde potencias de 35 metros a la altura de las localidades de Lepe–Cartaya–Gibrleón, hasta espesores superiores a 80 metros en las inmediaciones de El Rompido,

e incluso potencias próximas a 120 metros en el entorno de La Redondela (Junta de Andalucía, 2015). El acuífero estaría conectado hidráulicamente con la costa onubense (Figura 3.3).

El hecho de que las margas gris-azuladas no presenten continuidad espacial en todo el ámbito de estudio llevó a Junta de Andalucía (2015) a identificar dos zonas según la eventual conexión hidráulica entre los dos acuíferos identificados (Figuras 3.1 y 3.3):

**-Zona con carácter libre.** Incluiría la mitad NO del ámbito de estudio. En este sector, el acuífero detrítico basal y el acuífero pliocuaternario estarían en conexión hidráulica directa, con un comportamiento general libre. Aquí el acuífero tiene espesores máximos del orden de 50 - 70 metros y se asienta sobre las pizarras y grauvacas del zócalo paleozoico. La geometría del acuífero en esta zona sería monoclinal, orientación NE-SO y basculado hacia el S.

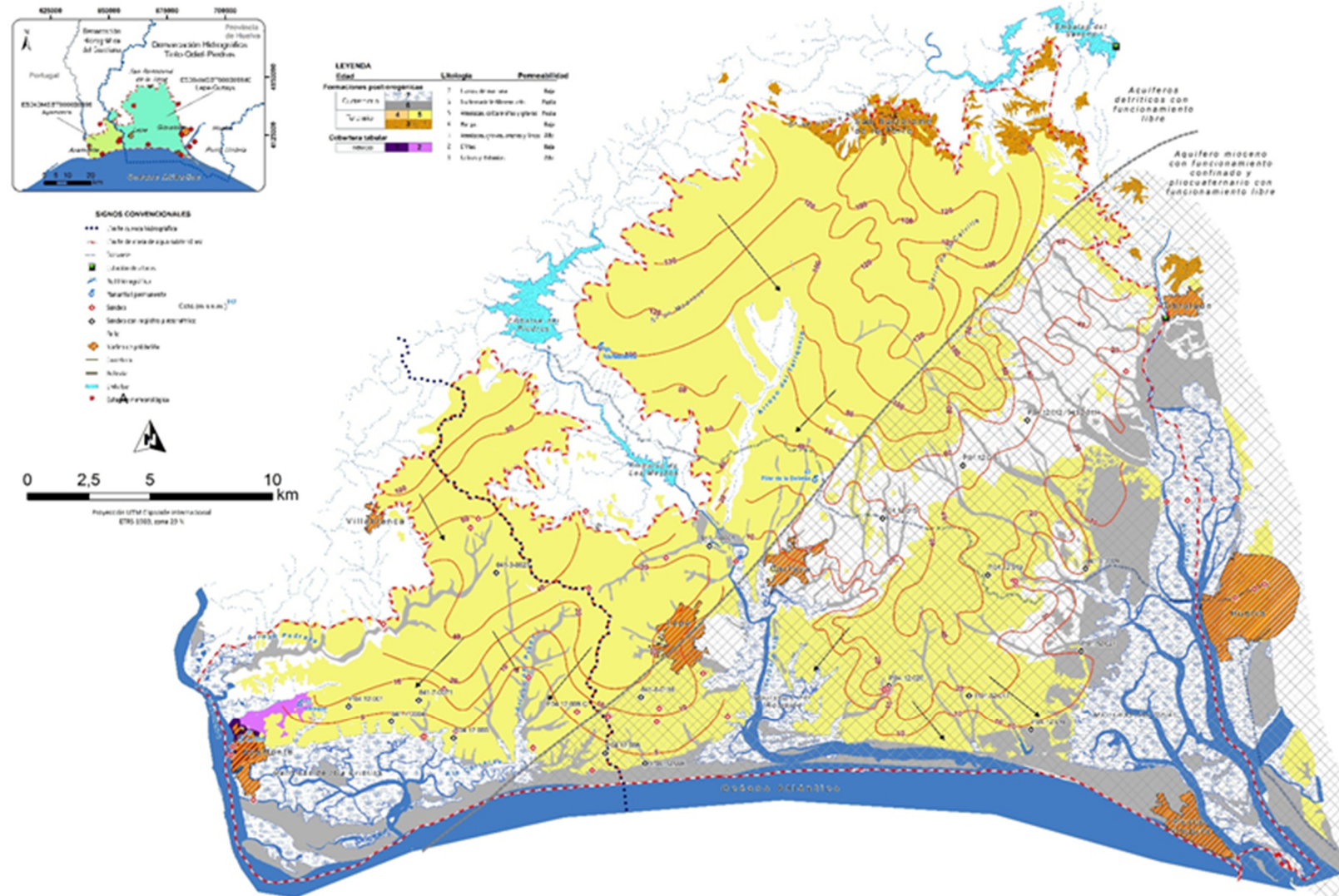
**-Zona con carácter mixto.** Abarcaría la mitad SE del ámbito de estudio, según el trazado de la diagonal Gibraleón (al N) – Lepe – Cartaya – Isla Cristina. En esta zona, las margas y arcillas gris-azuladas separan al acuífero superior pliocuaternario (comportamiento libre) del acuífero detrítico basal o profundo (comportamiento confinado).

En la zona libre, los dos acuíferos funcionarían como uno solo y su recarga se realizaría a partir de la infiltración del agua de lluvia y de la escorrentía superficial que discurre desde los materiales paleozoicos. La infiltración directa por retorno de agua de riego es otra componente de recarga a considerar. La descarga natural se produce hacia la red fluvial (arroyos del Prado y de Tariquejo, río Piedras y sus afluentes) y las transferencias laterales que se produzcan hacia el S, hacia la zona mixta. Las salidas por bombeos constituyen otra fuente de descargas, evaluadas en torno a 0,5 hm<sup>3</sup>/año para la zona libre (Junta de Andalucía, 2015).

La recarga por agua de lluvia supone la entrada más significativa al acuífero superficial en la zona mixta, a la que habría de sumarle aquella asociada a los retornos del regadío. Asimismo, el acuífero superficial pliocuaternario puede verse recargado, en ocasiones, por agua procedente del inferior, ya que el carácter confinado de este provoca que los niveles piezométricos puedan situarse por encima de los del acuífero suprayacente. Las salidas del acuífero superficial se realizan principalmente hacia los ríos y marismas, así como hacia el océano Atlántico, mientras que las salidas por bombeo son más reducidas en la actualidad, debido a la entrada en funcionamiento de los canales de regadío procedentes del embalse del Piedras. Además, pueden existir transferencias subterráneas de agua del acuífero superficial al profundo, en las zonas donde se encuentren conectados hidráulicamente.

La recarga del acuífero profundo se produce exclusivamente por transferencia lateral desde la zona libre. Las descargas ocurrirían por bombeos y, en menor medida, mediante transferencias laterales subterráneas a la vecina MASb Niebla. La continuidad espacial de los sedimentos y su prolongación hacia el S y E, junto con la presencia de carbonatos jurásicos en contacto directo con la serie neógena, apuntan a esta posibilidad.





**Figura 3.3. Esquema hidrogeológico de la región de Ayamonte-Lepe-Cartaya y áreas próximas. Isopiezas tomadas de IGME-CGS (1984).**

### 3.5. Hidrología superficial. Relación río-acuífero

La descarga natural del acuífero superficial se produce de manera preferente hacia la red fluvial que atraviesa el ámbito de estudio, especialmente en sus tramos bajos y marismas existentes en zonas de desembocadura. A continuación, se describen los cauces superficiales más relevantes existentes en el ámbito de las masas de agua subterránea objeto de este informe (Figuras 3.1 y 3.3).

- El **río Guadiana** define el límite occidental del ámbito de estudio, después de recorrer buena parte de la geografía española, con sus 742 km de longitud y su cuenca hidrográfica de 67.733 km<sup>2</sup>. En su tramo final tiene un caudal medio de 78 m<sup>3</sup>/s.
- El **arroyo del Prado**, de unos 10 km de longitud, atraviesa en sentido NNE-SSO la MASb Ayamonte, dentro de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana, y acaba vertiendo sus aguas al río Carreras y posteriormente a las marismas de Isla Cristina. Este arroyo supone un eje de drenaje de los flujos subterráneos de este sector de la MASCH.
- El **arroyo Pedraza**, afluente por la izquierda del Guadiana y perpendicular a este, discurre en su mayor parte sobre materiales paleozoicos impermeables, con lo que su relación con el acuífero debe ser nula durante este recorrido (IGME-DGA, 2010). En su tramo más elevado podría tener alguna relación con las formaciones permeables, pero no existe información sobre su régimen hídrico, es decir, se desconoce si suele tener caudal o si se seca en verano o si únicamente lleva caudal en momentos de intensas precipitaciones.
- El **río Piedras** y sus tributarios, como el arroyo Tariquejo (Figuras 3.1 y 3.3), constituyen los ejes de drenaje principales del acuífero superior pliocuaternario al que se asocia la MASb Lepe-Cartaya, en su sector central. Tiene, por tanto, un marcado carácter ganador. En su tramo final, desde La Antilla hasta El Portil, el río está separado del océano Atlántico por la barra litoral de El Rompido, de 10 km de longitud.
- El **río Odiel** presenta 105 km de longitud y una cuenca hidrográfica de 2.111 km<sup>2</sup>, cuyo nacimiento se encuentra en la sierra de Aracena. En su desembocadura, junto a la ciudad de Huelva, forma el Paraje Natural de las Marismas del Odiel, un entorno natural de gran valor ecológico. Estas y las marismas situadas en la zona de desembocadura del río Piedras y las de Isla Cristina están consideradas como aguas de transición. En la mayor parte de su recorrido, el río Odiel discurre sobre materiales paleozoicos de baja permeabilidad. A la altura de Gibraleón, antes de que el cauce comience a discurrir sobre las formaciones acuíferas pliocuaternarias, el caudal medio del río es del orden de 15 m<sup>3</sup>/s (Galván-González, 2011). A partir de este punto, el cauce se muestra ganador con respecto a los materiales acuíferos del sector oriental del área de estudio.

### 3.6. Inventario de puntos de agua. Hidrodinámica

#### 3.6.1. Manantiales

La descarga natural de los acuíferos de Ayamonte–Lepe–Cartaya se produce de manera preferente hacia los cauces que intersectan las formaciones detríticas permeables. No obstante, hay pequeñas fuentes y surgencias (Tabla 3.1) asociadas a algunos niveles detríticos, así como a los materiales carbonáticos triásicos que afloran en Ayamonte (Pilar de la Villa) y que poseen un gran valor cultural y etnográfico. Estos manantiales no suelen presentar caudales superiores a 5 l/s y probablemente estén ligados a periodos con precipitaciones, por lo que su importancia para el abastecimiento urbano o agrícola es limitada. La ubicación de los puntos de descarga aparece en la figura 3.3 y sus



características principales están recogidas en la tabla 3.1. Dicha información ha sido extraída de la base de datos del IGME (<http://info.igme.es/BDAguas/>) y completada a partir de los puntos de agua del “Proyecto Conoce tus Fuentes”, del Instituto del Agua de Granada. Se han reflejado las surgencias más significativas en cuanto al caudal que drenan o su situación (cota).

**Tabla 3.1. Características de los principales manantiales de las MASb de Ayamonte y Lepe-Cartaya.**

MASb	Denominación	Ref. IGME	nº de medidas	Caudal (l/s)			Periodo de control	Cota m s.n.m.	Coordenadas UTM	
				Máx	Mín	Medio			X	Y
"Ayamonte"	Pilar Jaraque							33	643871	4122260
	Pilar de la Villa							27	641460	4120781
"Lepe-Cartaya"	Fuente de la Madama	840-8-0007	1	1,12	1,12	1,12	1967	91	656143	4136851
	Pilar de la Dehesa	941-1-0031						44	664889	4131421

Los manantiales identificados están situados entre las cotas 27 y 91 m s.n.m. (Tabla 3.1). Solo se dispone de información foronómica del punto denominado Fuente de la Madama (91 m s.n.m.), con un dato de caudal disponible (1,12 l/s), tomado en la década de 1960.

### 3.6.2. Sondeos. Evoluciones piezométricas

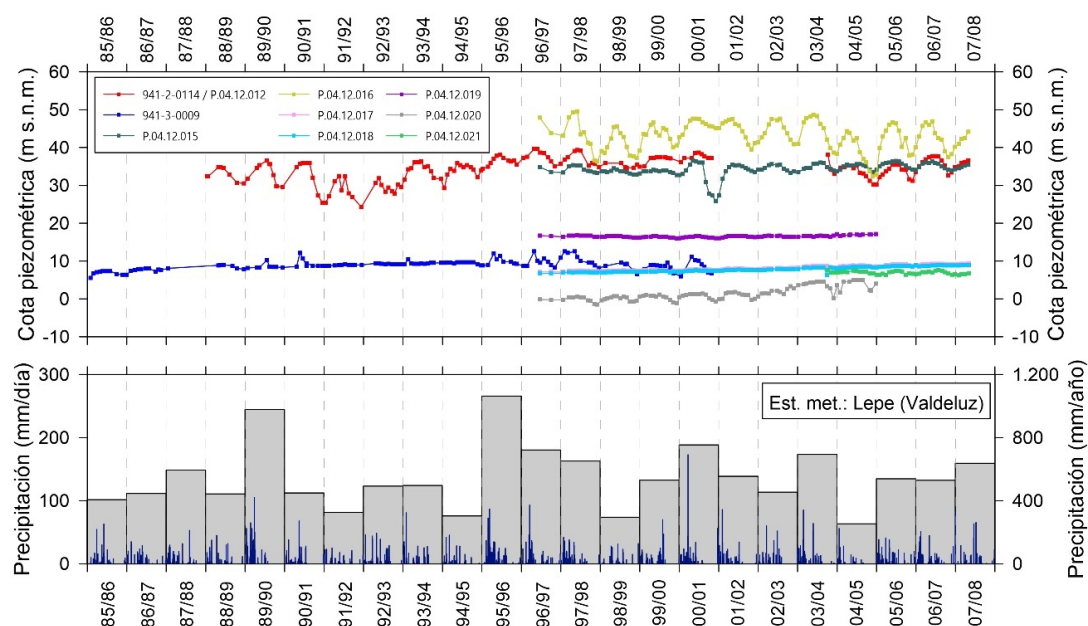
En la superficie de la MASCH existen más de 800 puntos de agua incluidos en los inventarios de la Base de Datos del Agua del IGME (<http://info.igme.es/BDAguas/>) y de la Red de Control Piezométrico de las demarcaciones hidrográficas involucradas en este informe. La tabla 3.2 muestra los sondeos más relevantes, ya sea por el uso del agua o por disponer de información piezométrica, de cuantos están recogidos en los inventarios previos.

Las características hidrogeológicas y la distribución espacial de los materiales acuíferos en la zona de estudio favorecen la diferenciación en dos sectores según el comportamiento hidrodinámico de los puntos de control: uno al O y otro al E del río Piedras. Así, el nivel piezométrico en el sector oriental (Figura 3.4) presenta variaciones anuales superiores a 5 metros, con descensos en época estival y ascensos durante los meses con precipitaciones, más marcadas cuanto más alejado de costa esté el sondeo, mientras que aquellos más cercanos a la costa y marismas muestran variaciones menores. Es posible, además, diferenciar los sondeos que captan agua del acuífero profundo (P.04.12.018, P.04.12.019 y P.04.12.021) dada su escasa variabilidad.

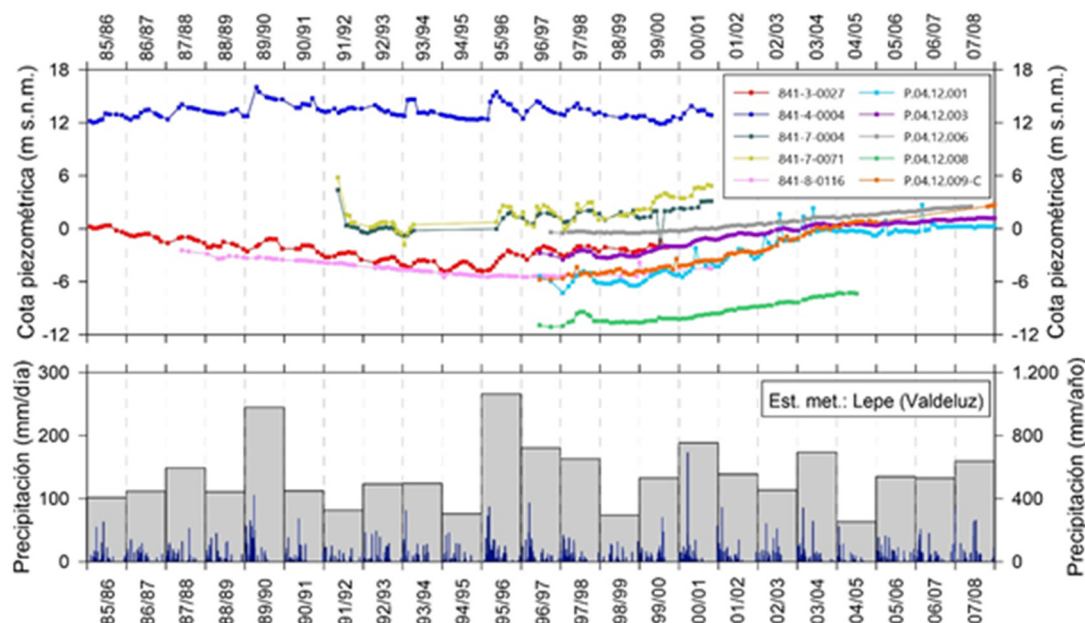
La evolución piezométrica de las medidas de nivel piezométrico en los sondeos situados en la margen occidental del río Piedras (Figura 3.5) permite constatar unas variaciones anuales menores de 5 metros en todos los puntos representados. Asimismo, se observan algunos sondeos (841-8-0116, P.04.12.006, P.04.12.008) cuya variabilidad es prácticamente nula. Es preciso destacar que, tanto en el sector oriental como en el occidental, con más relevancia en este último, se detectan cotas piezométricas por debajo del nivel del mar, lo que pone de manifiesto que, al menos hasta mediados de la década de 2000, existía una situación de explotación intensiva por el alto número de extracciones que tenían lugar cerca del litoral costero. A partir de 1995 los niveles comienzan a mostrar una tendencia ascendente debido, por una parte, a la entrada en funcionamiento del trasvase desde la Rivera del Chanza (DHGu) para riego de las parcelas agrícolas con aguas superficiales, lo que redujo considerablemente las extracciones de aguas subterráneas. Por otro, a los retornos de riego, cuyo valor en la MASb Lepe-Cartaya ha sido estimado entre 2,2 - 3 hm<sup>3</sup>/a (5 % del volumen consumido) según Junta de Andalucía (2015). La combinación de ambas circunstancias está provocando que el nivel piezométrico comience a encontrarse muy cerca de la superficie, en algunos casos (Figura 3.5).

**Tabla 3.2. Características de los principales sondeos de las MASb de Ayamonte y Lepe-Cartaya.**

MASb	Nº inventario IGME	Denominación	Uso del agua	Cota m s.n.m.	Profundidad del sondeo metros	Cota piezométrica m s.n.m.	Fecha cota piezométrica	Coordenadas UTM X Y	
"Lepe-Cartaya"	841-4-0004	841-4-0004	Investigación	19	187	13	1968-2001	661064	4127750
	841-4-0096	841-4-0096	Investigación	50	21	41	1984-1999	656271	4125715
	841-4-0124	841-4-0124	Investigación	25	26	19	1988-2001	659327	4127163
	841-8-0114	841-8-0114	Investigación	10	24	2	1988-2001	661140	4122555
	841-8-0116	841-8-0116	Investigación	35	161	-4	1988-2001	658671	4121418
	940-7-0065	940-7-0065		8	30	3	1984-2001	677553	4135928
	941-3-0009	941-3-0009	Investigación	13	268	8	1982-2001	676416	4127800
	841-8-0187	P.04.12.006	Investigación	8	125	1	1997-2008	657951	4119776
	941-5-0034	P.04.12.007	Investigación	14	150	3	1997-2008	661317	4121704
	941-2-0114	P.04.12.012	Investigación	55	73	34	1988-2008	673550	4133811
	941-2-0097	P.04.12.015	Investigación	44	84	34	1997-2008	667633	4129804
	941-2-0121	P.04.12.016	Investigación	56	74	43	1997-2008	670916	4131964
	941-6-0001	P.04.12.017	Investigación	29	160	8	1997-2008	671162	4122564
	941-6-0015	P.04.12.018	Investigación	15	468	8	1997-2008	673692	4121149
		P.04.12.019	Investigación	39		17	1997-2008	671934	4127489
		P.04.12.020	Investigación	24		1	1997-2005	667894	4122970
	941-6-0009	P.04.12.021	Investigación	13	392	7	2004-2008	675744	4124381
"Ayamonte"	841-3-0027	841-3-0027		54	65	-2	1983-2000	652462	4126113
	841-3-0031	841-3-0031	Investigación	66	22	60	1984-2001	651595	4128265
	841-7-0004	841-7-0004		5	99	1	1992-2001	648585	4119778
	841-7-0036	841-7-0036		41	46	0	1975-1996	650639	4121241
	841-7-0071	841-7-0071	Agricultura	40	80	1	1992-2001	649643	4120726
	841-7-0076	841-7-0076	Investigación	11	34	-1	1984-2001	651222	4119526
		P.04.12.001	Investigación	48	70	-2	1997-2008	645854	4122121
		P.04.12.002	Investigación	63	22	59	2004-2007	650828	4129420
		P.04.12.003	Investigación	10	31	-1	1997-2008	650133	4120814
		P.04.12.005	Investigación	17	30	0	1997-2008	655790	4119500
		P.04.12.008	Investigación	30	175	-9	1997-2005	656324	4120191
		P.04.12.009-C. Somero	Investigación	49	50	-3	1997-2008	655174	4121907
		P.04.12.009-P. Profundo	Investigación	49	66	-1	1997-2008	655174	4121907
		P.04.12.011	Investigación	9	78	2	2004-2008	653195	4123300
		P.04.12.022	Investigación	8	132	1	2004-2008	653379	4120417
		P.04.12.023	Investigación	8	40	1	2004-2008	653379	4120417



**Figura 3.4. Evolución temporal del nivel piezométrico en algunos puntos del sector oriental de los acuíferos de Ayamonte-Lepe-Cartaya.**



**Figura 3.5. Evolución temporal del nivel piezométrico en algunos puntos del sector occidental de los acuíferos de Ayamonte-Lepe-Cartaya.**

### 3.7. Piezometría en régimen natural e influenciado

En general, los contornos piezométricos del acuífero superior pliocuaternario representados en la figura 3.3, procedentes de datos tomados en 1981 (IGME-CGS, 1984), están condicionados por la topografía del terreno. Los niveles freáticos más elevados, en torno a 120 m.s.n.m., se encuentran en el tercio septentrional del ámbito de estudio y van descendiendo progresivamente hacia el S. En este contexto, los flujos subterráneos se dirigen hacia la red hidrográfica superficial, hacia las zonas de marismas y hacia el océano Atlántico, con las consecuentes descargas de agua subterránea cuando los niveles piezométricos se sitúan por encima de la cota topográfica, algo que ocurre de manera preferente en el arroyo del Prado, el río Piedras y el río Odiel. Los gradientes hidráulicos calculados en el acuífero superficial son del orden de 0,7 - 1 %, aunque llegan a ser del 0,04 % en la zona de Lepe - La Antilla (Junta de Andalucía, 2015). No obstante, en el Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Huelva se mencionan gradientes del 8 por mil en la parte alta y de 2 por mil en la zona costera (Diputación Provincial de Huelva - ITGE, 1993).

En el sector comprendido entre el río Gadiana y el río Piedras es posible observar cómo parte de los flujos subterráneos que circulan por el acuífero superficial ubicado en la DHTOP pueden llegar a dirigirse hacia la DHGu (Figura 3.3). Esto implicaría la posibilidad de transferencias subterráneas de recursos entre las dos demarcaciones hidrográficas involucradas. No obstante, a falta de información piezométrica más precisa, la magnitud de dichas transferencias debe ser poco relevante en términos de planificación hidrológica.

En el caso de la superficie piezométrica del acuífero detrítico basal, tan solo se dispone de información hidrogeológica representativa al SO de Gibrleón, donde llega incluso a estar por encima de la superficie topográfica. En esta zona, el gradiente hidráulico es del orden de 3 ‰ (Junta de Andalucía, 2015). La dirección de flujo deducida es NO-SE, con componente hacia el SE, por lo que, en principio, se podrían producir transferencias laterales subterráneas hacia el acuífero detrítico basal integrado en la MASb Niebla (ES064MSBT000305930), situada inmediatamente al E (en la margen izquierda del río Odiel).

### 3.8. Parámetros hidráulicos e hidrogeológicos

Los datos recopilados sobre ensayos hidráulicos llevados a cabo en los acuíferos existentes en el entorno de Ayamonte-Lepe-Cartaya han sido obtenidos de varios trabajos previos. González (1984) cifra valores de transmisividad comprendidos entre 30 y 1.200 m<sup>2</sup>/d, de E a O -desde Huelva a Ayamonte-, así como un coeficiente de almacenamiento de 10<sup>-3</sup> a 10<sup>-4</sup>. El IGME-CGS (1984) también lleva a cabo la interpretación de 30 ensayos de bombeo, tras la que asigna valores de transmisividad comprendidos entre 100 y 1.000 m<sup>2</sup>/d, en la zona donde los acuíferos superior y profundo se encuentran conectados (“zona libre” de Junta de Andalucía, 2015), de 100 m<sup>2</sup>/d al acuífero pliocuaternario, y de entre 10 y 800 m<sup>2</sup>/d al acuífero profundo; los últimos valores referidos a la zona donde ambos acuíferos están separados por las margas gris-azuladas (“zona mixta”). Para el Mioceno de base, además, calculó un coeficiente de almacenamiento de 10<sup>-4</sup>, mientras que para el acuífero superficial se estimó un valor de porosidad eficaz del 8 %. En otro estudio posterior (ITGE-Junta de Andalucía, 1998), se establecieron valores de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento de 5 - 300 m<sup>2</sup>/d y 10<sup>-3</sup>, para el acuífero superficial, y de 260 m<sup>2</sup>/d y 10<sup>-3</sup> para el profundo, respectivamente.

Finalmente, Junta de Andalucía (2015) describe mayor heterogeneidad en los valores de porosidad y transmisividad del acuífero pliocuaternario (entre 0,4 y 5 % y entre 120 - 4.000 m<sup>2</sup>/d) y lo relaciona con cambios espaciales de facies. Según este estudio, los sectores más transmisivos se encontrarían al S de la antigua carretera nacional N-431, en la zona mixta (Figura 3.3), debido a la presencia de mayores espesores de sedimentos. Los parámetros hidráulicos del acuífero detrítico basal son más homogéneos, entre 3 - 270 m<sup>2</sup>/d para la transmisividad y del orden de 3,5 x 10<sup>-5</sup> para el coeficiente de almacenamiento.

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

A partir de la superficie piezométrica establecida por Junta de Andalucía (2015) se podría deducir transferencias laterales subterráneas desde el acuífero detrítico basal de la MASb Lepe - Cartaya hacia su continuación por el E, dentro de los límites de MASb Niebla. Sin embargo, la ausencia de información piezométrica representativa no permite establecer en detalle la magnitud de dicha transferencia. El valor cuantitativo de esta componente deberá de estar condicionado por las salidas que se produzcan en la zona más occidental de la MASb Niebla. Ante la incertidumbre y que previsiblemente su valor no debe ser significativo, se va a considerar inexistente a efectos de balance en el presente trabajo (apartados 7 y 8 de la memoria).

Por otro lado, la distribución espacial de las isopiezas del acuífero superior, reflejada en el mapa de la figura 3.3, permite observar una superficie de la zona saturada marcada por la topografía del terreno. En este contexto, la divisoria hidrográfica entre las dos demarcaciones implicadas en este informe se puede considerar paralela a las líneas de flujo y, por tanto, sin apenas transferencia lateral de agua subterránea entre la MASb Ayamonte (040.020), perteneciente a la DHGu, y la MASb Lepe-Cartaya (030.594), que forma parte de la DHTOP. No obstante, estas isopiezas también constatan que puede tener lugar, de forma muy localizada, cierto intercambio de flujos entre esta última MASb y la primera, aunque su magnitud podría considerarse despreciable a efectos de planificación hidrológica.

### 3.10. Infraestructuras hidráulicas

La infraestructura hidráulica más relevante que existe en la región es el canal del río Piedras, con casi 40 km de longitud, que abastece de agua superficial procedente del embalse del Piedras al sector oriental del ámbito de estudio. Este canal suministraba un volumen anual de 80 hm<sup>3</sup> a finales de la década de 1990, mientras que en la actualidad se acerca a 200 hm<sup>3</sup>/a, ya que cada vez es mayor la superficie de cultivos de regadío (fresas, frutas del bosque y cítricos, principalmente). A su vez, el embalse del río Piedras recibe agua de la cuenca hidrográfica del río Guadiana, mediante un canal procedente del embalse del Chanza, ubicado más al N, en la Rivera del Chanza. Recientemente ha entrado en funcionamiento un canal de trasvase a la comarca de El Condado, infraestructura encargada de transferir recursos desde la DHTOP a la Demarcación hidrográfica del Guadalquivir, y cuyo fin es atender el déficit de recursos hídricos superficiales del entorno de Doñana.

Además de los embalses mencionados, en el ámbito de estudio se encuentra otro de importancia para el suministro de recursos hídricos superficiales a la región, como es el embalse de Los Machos (Figura 3.3). Asimismo, el embalse del Chanza se encuentra apoyado en su cabecera por el embalse del Andévalo, de mayor capacidad de agua embalsada (600 hm<sup>3</sup>).

### 3.11. Usos del agua

Los recursos hídricos subterráneos de los acuíferos presentes en el ámbito geográfico de Ayamonte-Lepe-Cartaya eran usados hasta la década de 1990 básicamente para dotar de agua a la actividad agrícola, industrial y urbana de la zona. No obstante, desde 1970 se comenzó a construir el sistema de abastecimiento de agua en alta, actualmente gestionado por la DHTOP, que ha permitido sustituir casi completamente el uso de agua subterránea por aguas superficiales procedentes de los múltiples embalses y canales del sector suroccidental de la provincia de Huelva. Así, en la actualidad, el polo industrial de Huelva se abastece exclusivamente de estas aguas superficiales, así como el 85 % de la población de la provincia, que se concentra tanto en la capital como en los municipios más poblados (Isla Cristina, La Antilla, Punta Umbría, etc.). La agricultura de regadío, como se ha comentado anteriormente, es el sector económico que mayor cantidad de agua utiliza, ya que en la actualidad supera los 60 hm<sup>3</sup>/a para el riego de casi 20.000 hectáreas de cultivos.

Respecto al uso actual del agua subterránea, el informe de Junta de Andalucía (2015) apunta para la MASb Lepe-Cartaya un aprovechamiento en torno a 3,32 hm<sup>3</sup>/año: 0,53 hm<sup>3</sup>/año en el tercio NO (zona libre) y entre 2,78 - 3,86 en el litoral costero (zona mixta), de los que entre 1,71 - 2,79 hm<sup>3</sup>/año serían las extracciones del acuífero profundo y 1,07 hm<sup>3</sup>/año las del superficial pliocuaternario. El riego de las parcelas agrícolas es el uso principal del agua subterránea en esta MASb, con aproximadamente un 93 % del total del agua subterránea empleada (3,1 de 3,32 hm<sup>3</sup>/año). Otros usos de menor importancia son el industrial y el doméstico. Estos porcentajes deben ser parecidos en la MASb Ayamonte.

Otro de los usos prioritarios del agua subterránea es el de sustentar el significativo y diverso activo ambiental ligado principalmente a las aguas de transición (marismas), que atesora el ámbito de estudio. Fruto de ello son los espacios naturales protegidos que existen: Paraje Natural Marismas de Isla Cristina, Paraje Natural Marismas del Río Piedras y Flecha del Rompido, Paraje Natural Marismas del Odiel, Reserva Natural Isla de Enmedio y Reserva Natural Laguna de El Portil. Todos ellos son sistemas asociados a las descargas de las masas de aguas subterráneas y sus ecosistemas dependientes de la cantidad y calidad de las aguas que llegan a sus espacios.



## 4. CLIMATOLOGÍA

El régimen termopluviométrico del entorno de las MASb Ayamonte (040.020) y Lepe-Cartaya (030.594) está fuertemente condicionado por su cercanía al océano Atlántico y por la suave orografía de la región (la altitud máxima es 229 m s.n.m.). Ambos factores determinan una precipitación media anual moderada, del orden de 520 mm para el periodo 1985/86 - 2014/15, concentrada durante los meses de otoño, invierno y primavera. Los veranos se caracterizan por ser cálidos y prácticamente sin precipitaciones (Martín-Vide, 1991).

### 4.1. Información meteorológica

La caracterización de la pluviometría de la zona se ha llevado a cabo a partir de la información suministrada por 12 estaciones pluviométricas, de las que 9 también cuentan con registro de temperatura (Tabla 4.1). Todas las estaciones consideradas pertenecen a la red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y cuentan con frecuencia de registro diario. La información referente a cada estación está sintetizada en la tabla 4.1, mientras que la posición de las estaciones queda reflejada en la figura 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					
Villablanca	4546	114339	4137360	93	P	4554E	549	—
Lepe (Valdeluz)	4546I	122466	4130345	35	P	4546M	518	—
Isla Cristina (Corcho)	4546M	121826	4129292	54	P, T	---	530	17,7
El Moral	4548C	114499	4124526	2	P, T	---	538	17,5
Cartaya	4550	129388	4144374	82	P	4544E	592	—
Pemares	4554E	148299	4122024	20	P, T	---	575	17,7
Pta. Umbría	4555	148299	4122024	5	P, T	---	462	18,0
Gibraleón	4603	148273	4143741	26	P, T	---	569	18,9
Huelva (C. T.)	4605B	149155	4130668	26	P, T	---	456	18,3
Huelva (Ronda Este)	4642E	153213	4132606	19	P, T	---	512	18,3
Palos de la Ftra	4645	154496	4127265	24	P, T	---	534	18,0
Las Pitasas	4645C	152164	4125230	25	P, T	---	469	18,0

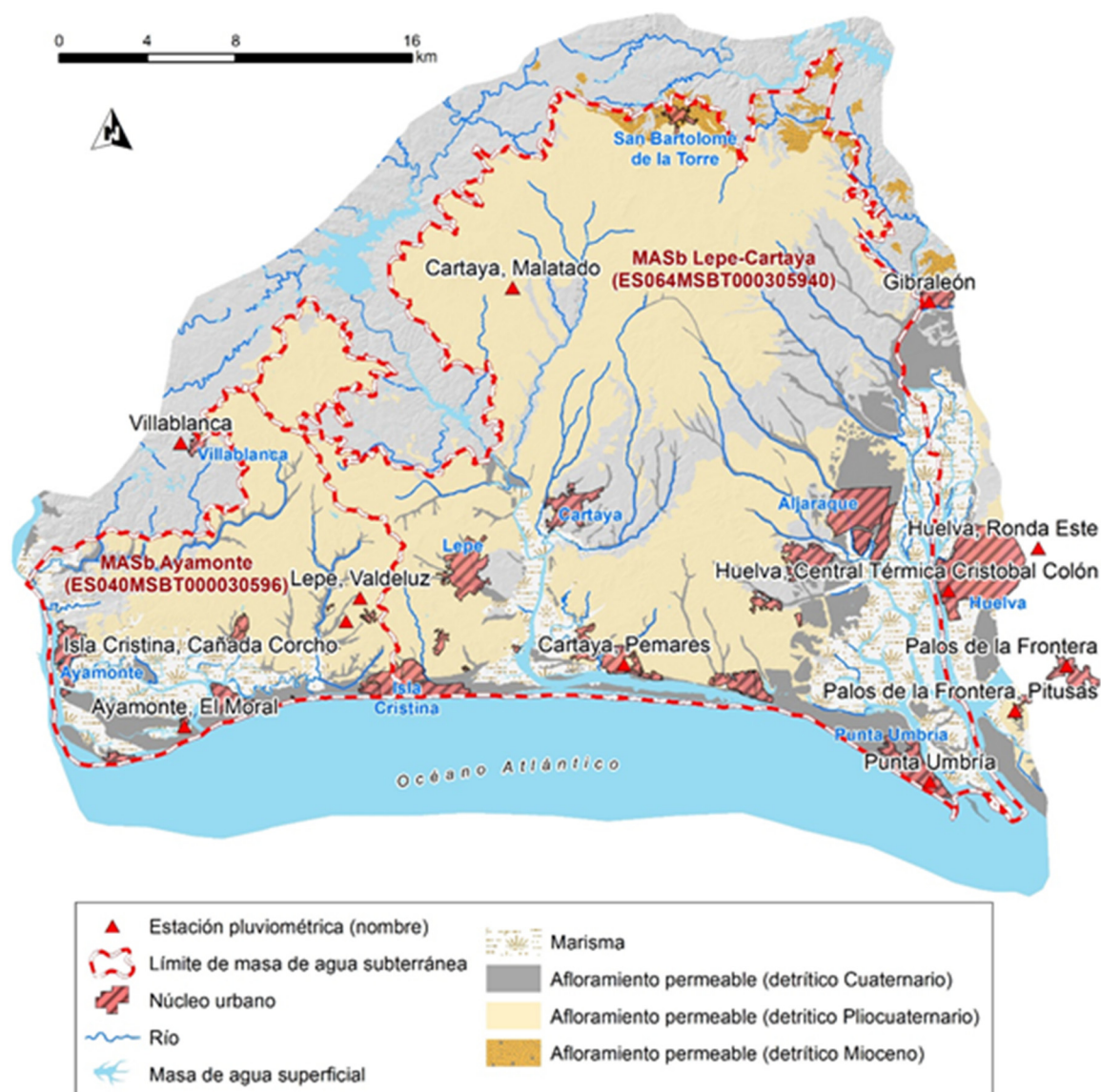
Los datos originales de precipitación y temperatura se han completado para disponer de series homogéneas del periodo 1985/86 – 2014/15. El completado se ha efectuado mediante regresión lineal entre pares de estaciones con el mayor coeficiente de correlación ( $R^2$ ). La identificación y corrección de errores puntuales y sistemáticos se ha realizado mediante el método de dobles masas. En este caso se han detectado errores en las estaciones de Gibraleón (4603) y Palos de la Frontera (4645), los cuales han sido convenientemente subsanados.

### 4.2. Análisis espacio-temporal

#### *Análisis temporal*

La precipitación media anual (aritmética) se ha calculado partiendo de la información suministrada por las 12 estaciones seleccionadas. Se han escogido dichas estaciones por la extensión temporal y continuidad del registro, así como por su distribución espacial (Figura 4.1). El conjunto de estaciones cubre un rango de altitudes comprendido entre 93 (Villablanca, 4546) y 2 m s.n.m. (El Moral, 4548C). La precipitación media aritmética calculada para los 30 años hidrológicos del periodo contemplado en este estudio ha sido 525 mm (Tabla 4.2). Este valor se ha tenido en cuenta para la caracterización de los años tipo (húmedos, medios y secos), pero no para la evaluación de la

recarga por el método del balance de agua en el suelo, que se ha estimado a partir de la distribución espacial de las precipitaciones (isoyetas). Estudios previos realizados en la zona (IGME-CGS, 1984; Junta de Andalucía, 2015) para los periodos 1977/78 - 1982/83 y 1970/71 - 2000/01, respectivamente, arrojan valores de precipitación media ligeramente inferiores y superiores (498 y 557 mm, respectivamente), aunque la segunda cita está referida a un área mayor.



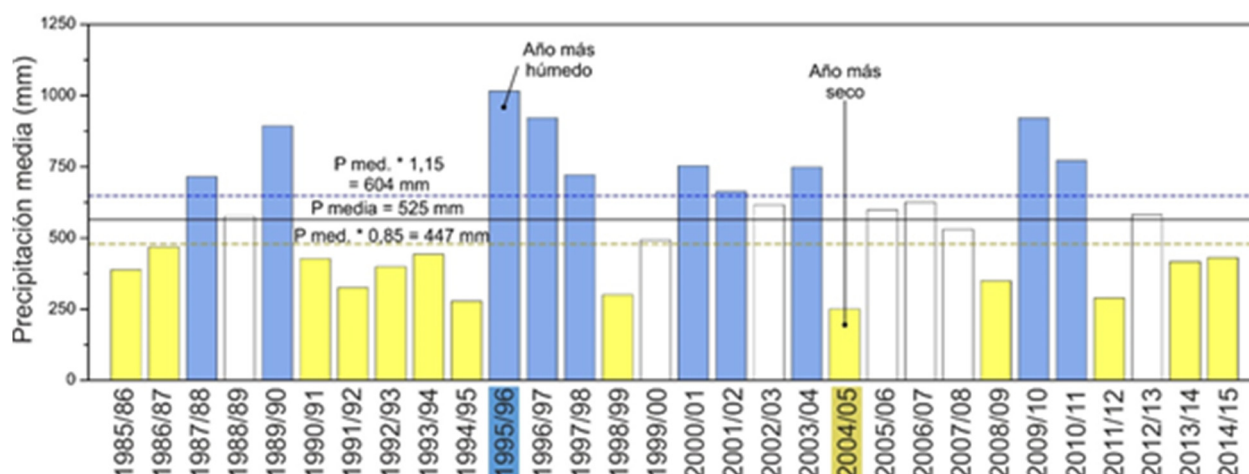
**Figura 4.1. Esquema cartográfico con los afloramientos de los materiales permeables asociados a cada MASb y las estaciones meteorológicas utilizadas.**

**Tabla 4.2. Precipitación anual (mm) durante el periodo 1985/86 - 2014/15 en el entorno de la MASCH Ayamonte Lepe-Cartaya. Años tipo: azul (húmedo), amarillo (seco) y blanco (año de tipo medio).**

Año hidrol.	4546 Villablanca	4546I Lepe (Valdeluz)	4546M Isla Cristina (Corcho)	4548C El Moral	4550 Cartaya	4554E Pemares	4555 Pta. Umbría	4603 Gibraleón	4605B Huelva (C. T.)	4642E Huelva (Ronda Este)	4645 Palos de la Ftra	4645C Las Pitasas	Media anual
1985/86	334	407	373	382	420	332	265	367	302	346	350	263	345
1986/87	407	447	410	474	538	389	345	492	368	445	458	315	424
1987/88	719	595	531	662	850	662	545	726	553	599	676	485	634
1988/89	555	443	430	450	686	453	603	535	541	578	597	451	527
1989/90	1095	979	868	1246	1031	923	694	990	695	747	900	662	902
1990/91	428	450	427	577	532	419	339	422	316	370	425	289	416
1991/92	368	327	405	453	403	276	244	265	259	273	343	203	318
1992/93	536	493	444	461	527	454	414	413	413	421	410	403	449
1993/94	356	497	450	448	638	440	358	518	342	393	388	370	433
1994/95	364	303	280	327	328	272	226	220	224	267	269	236	276
1995/96	1074	1064	1013	1030	1137	1256	922	1115	915	960	915	856	1021
1996/97	622	722	663	670	855	877	686	916	835	873	853	751	777
1997/98	652	653	621	565	880	769	569	740	550	586	648	567	650
1998/99	344	295	335	292	332	280	255	298	253	309	296	224	293
1999/00	458	530	454	445	651	514	412	506	365	408	402	373	460
2000/01	776	755	714	699	1199	860	619	766	552	667	754	579	745
2001/02	855	554	610	489	610	804	554	636	577	601	609	527	619
2002/03	675	454	602	416	397	716	603	630	488	583	629	540	561
2003/04	706	693	686	634	600	783	586	788	586	674	660	599	666
2004/05	194	254	275	245	233	226	197	305	193	231	217	192	230
2005/06	576	540	582	541	526	710	409	690	634	520	516	510	563
2006/07	616	530	589	571	613	712	530	696	588	591	623	612	606
2007/08	477	638	713	689	456	536	467	508	413	462	553	516	536
2008/09	336	326	356	349	264	389	237	283	214	304	310	321	307
2009/10	810	817	914	884	782	959	692	889	617	802	874	799	820
2010/11	668	581	624	625	671	858	639	753	579	754	752	750	688
2011/12	273	242	265	260	245	252	261	257	238	224	301	302	260
2012/13	540	515	582	555	552	516	453	519	413	521	545	545	521
2013/14	311	214	320	342	382	294	319	388	284	389	362	396	333
2014/15	352	235	359	373	424	333	413	443	372	452	384	441	382
Máx	1095	1064	1013	1246	1199	1256	922	1115	915	960	915	856	1021
Med	549	518	530	538	592	575	462	569	456	512	534	469	525
Min	194	214	265	245	233	226	197	220	193	224	217	192	230
Med * 1,15	632	596	609	619	681	662	531	655	524	588	614	540	604
Med * 0,85	467	441	450	458	503	489	393	484	388	435	454	399	447
Años húmedos	10	8	10	9	8	13	12	11	13	10	11	10	11
Años medios	7	13	6	8	11	3	7	8	4	8	6	8	7
Años Secos	13	9	14	13	11	14	11	11	13	12	13	12	12



Se han considerado como años de tipo húmedo aquellos cuya precipitación anual es superior a la precipitación media del periodo de control, más el 15 % de la misma. En este caso, el umbral para la definición del año húmedo se ha situado en 604 mm (Tabla 4.2). Para la definición de los años secos, se han contabilizado aquellos años cuya precipitación anual fue inferior a la precipitación media, menos el 15% de la misma (umbral de año seco: 447 mm). Los años de tipo medio corresponden a aquellos en los que la lluvia se ha situado entre ambos umbrales. Durante el periodo 1985/86 - 2014/15 han tenido lugar 11 años de tipo húmedo, 12 de tipo seco y 7 con características intermedias (Tabla 4.2). El año más húmedo del registro fue 1995/96, durante el que se contabilizó una precipitación media anual de 1.021 mm (Figura 4.2). El año más seco registrado fue 2004/05, con una precipitación de 230 mm.

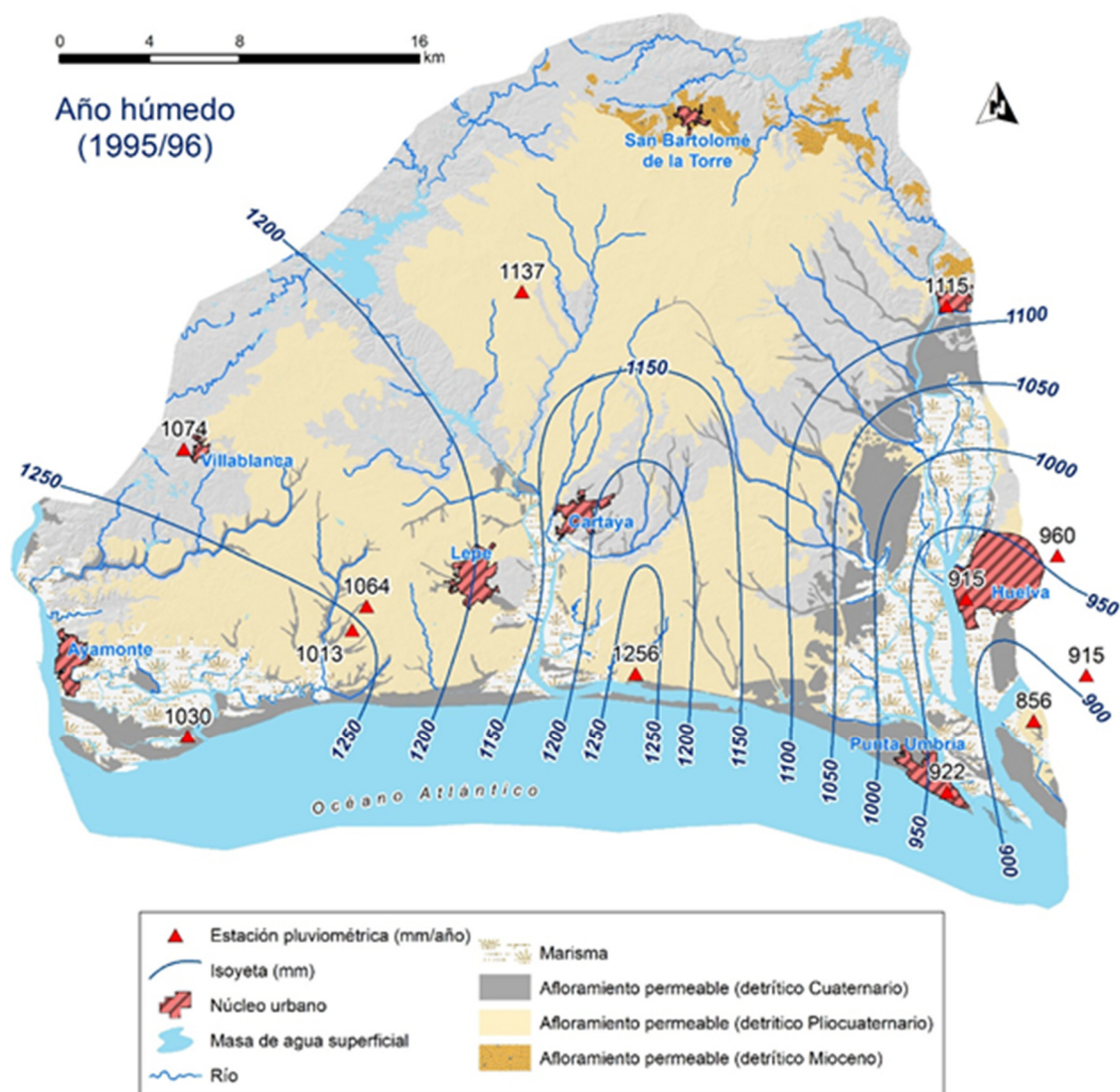


**Figura 4.2. Distribución temporal de la precipitación media anual durante el periodo 1985/86 – 2014/15. En azul, años de tipo húmedo; en blanco, años de tipo medio; y en amarillo, años de tipo seco.**

### **Análisis espacial**

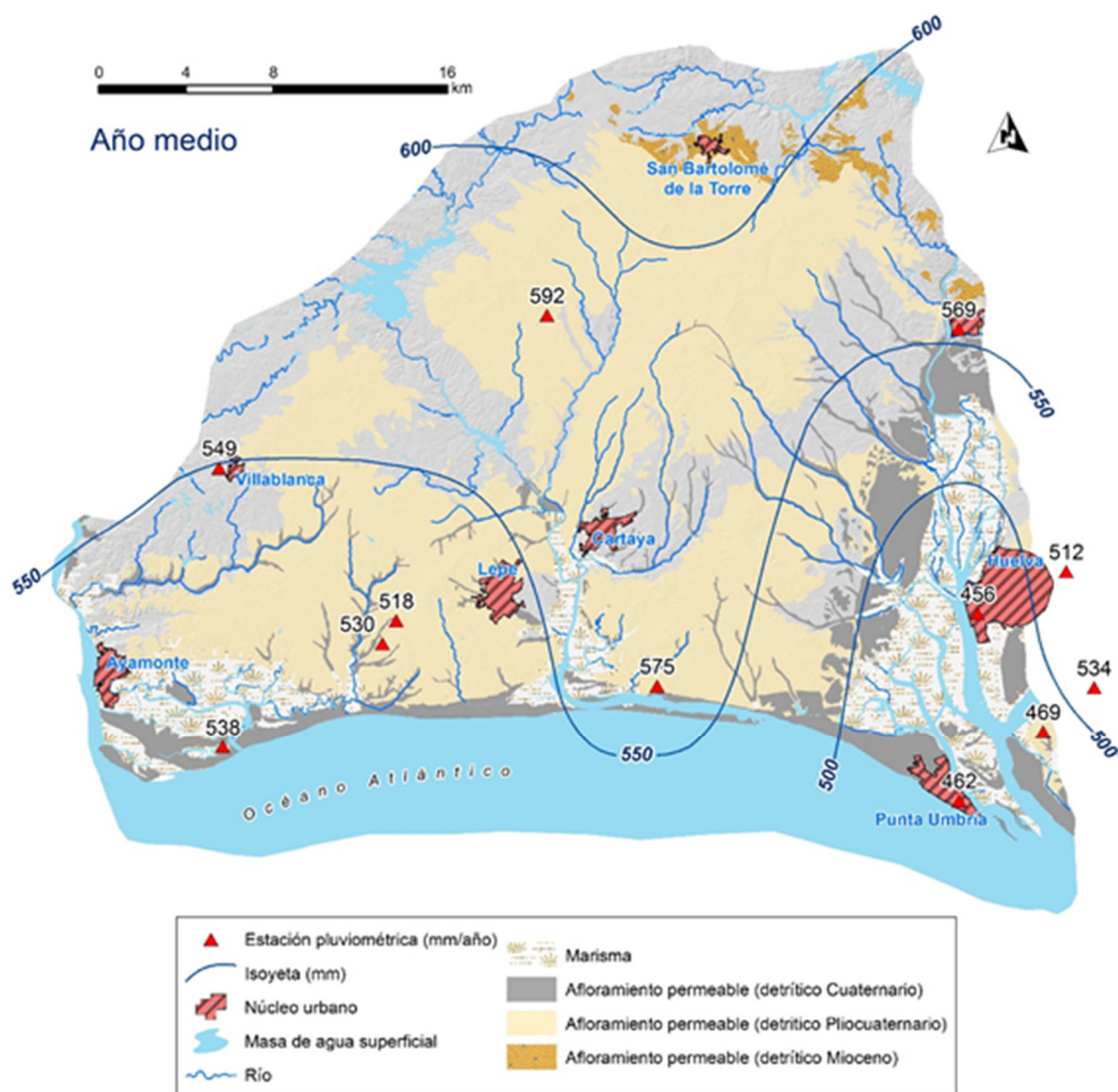
Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 representan la distribución espacial de las precipitaciones en el ámbito de las masas de agua subterránea objeto de estudio, mediante los mapas de isoyetas característicos de las condiciones hidroclimáticas húmedas, medias y secas, respectivamente. Se ha considerado el año hidrológico 1995/96 (el más húmedo del periodo 1985/86 - 2014/15; 1.021 mm) como representativo de las condiciones húmedas (Figura 4.3), y el 2004/05 (el más seco del periodo de control; 230 mm) como característico de los años con escasas precipitaciones (Figura 4.4). Las condiciones hidrometeorológicas medias (Figura 4.5) se han representado a partir de los valores medios aritméticos obtenidos para las distintas estaciones, los cuales están calculados en la tabla 4.2.

La precipitación muestra una escasa variación espacial en la zona, debido en parte a la orografía de la región (bastante llana, sin elevaciones topográficas significativas). Los valores más elevados de lluvia se registran en las zonas adyacentes a los núcleos urbanos de Lepe y Cartaya (zona de desembocadura del río Piedras) y disminuye en dirección a las zonas perimetrales del área de estudio. La ausencia de estaciones de medida con datos disponibles durante el periodo 1985/86 – 2014/15 en el borde septentrional del área de estudio (alrededores del núcleo urbano de San Bartolomé de la Torre), impide conocer con exactitud la variación de la precipitación en este sector. En cualquier caso, la distribución de la precipitación plasmada en los mapas de isoyetas (Figuras 4.3, 4.4 y 4.5) se considera representativa, debido a la escasa variabilidad de los valores de precipitación en las distintas estaciones consideradas.



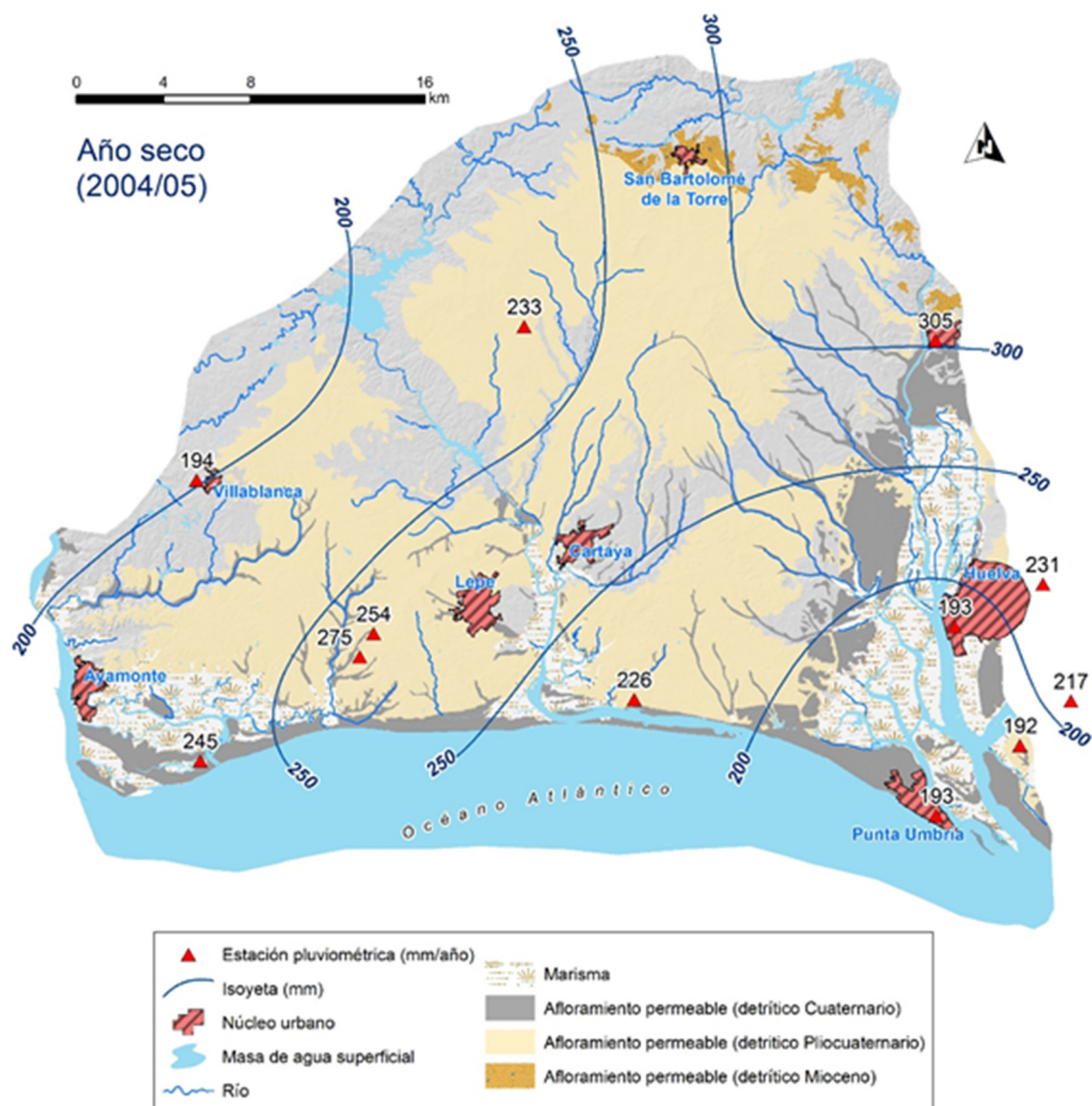
**Figura 4.3. Mapa de isoyetas correspondiente al año más húmedo (1995/96) del periodo histórico, con una precipitación media de 1.117 mm obtenida por planimetría de isoyetas. La precipitación media aritmética es 1.021 mm. La equidistancia entre las isoyetas es de 50 mm.**

La precipitación media anual registrada sobre los afloramientos permeables durante el periodo histórico, determinada mediante planimetría de isoyetas, es 558 mm. Este dato se considera más representativo (de cara a evaluar el volumen de agua implicado en los procesos de recarga) que el de la media aritmética porque tiene en cuenta la distribución espacial de las precipitaciones.



**Figura 4.4.** Mapa de isoyetas correspondiente al año medio del periodo histórico, con una precipitación media de 558 mm obtenida por planimetría de isoyetas. La precipitación media aritmética es 525 mm. La equidistancia entre las isoyetas es de 50 mm.





**Figura 4.5.** Mapa de isoyetas correspondiente al año más seco (2004/05) del periodo histórico, con una precipitación media de 249 mm obtenida por planimetría de isoyetas. La precipitación media aritmética es 230 mm. La equidistancia entre las isoyetas es de 50 mm.

## 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 código BALAN (Samper *et al.*, 1992) y el software RENATA (DPA-IGME, 2012; Padilla y Delgado, 2012; Padilla *et al.*, 2019), 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 2.1 (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 (*Po*). 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 código BALAN calcula la recarga a partir de balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero utilizando un entorno interactivo de entrada de datos y postproceso de resultados.

El software RENATA es una herramienta matemática desarrollada específicamente para estimar la recarga natural a los acuíferos de forma distribuida en el espacio y 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 han considerado la suma de las superficies de afloramientos permeables existentes dentro de los límites de cada una de las masas de agua subterránea (criterio de divisoria hidrográfica). Aunque en el ámbito de estudio se han diferenciado dos acuíferos principales, inferior de base y superior pliocuaternario, no se contempla el criterio de divisoria hidrogeológica, puesto que el área de recarga puede considerarse, a grandes rasgos, común para ambos. Los límites de las masas de agua subterránea considerados en este estudio están representados en la figura 4.1.

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

Para la estimación de la recarga autóctona 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 obtenido las series de datos de evapotranspiración real (*ETR*) mediante un balance de agua en el suelo en dichas estaciones meteorológicas. Se han aplicado valores de reserva útil (*RU*) a los materiales permeables desde 20 hasta 160 mm, con intervalos de 10 mm. En la tabla 5.1 y en la figura 5.1 se recogen los resultados obtenidos para cada una de las estaciones. La descomposición de las series de lluvia útil en la fracción generadora de recarga o infiltración (*INF*) y la componente de escorrentía superficial, se ha realizado asignando un umbral de escorrentía (*Po*) de 24 mm, valor más adecuado a las características físicas de los afloramientos implicados.

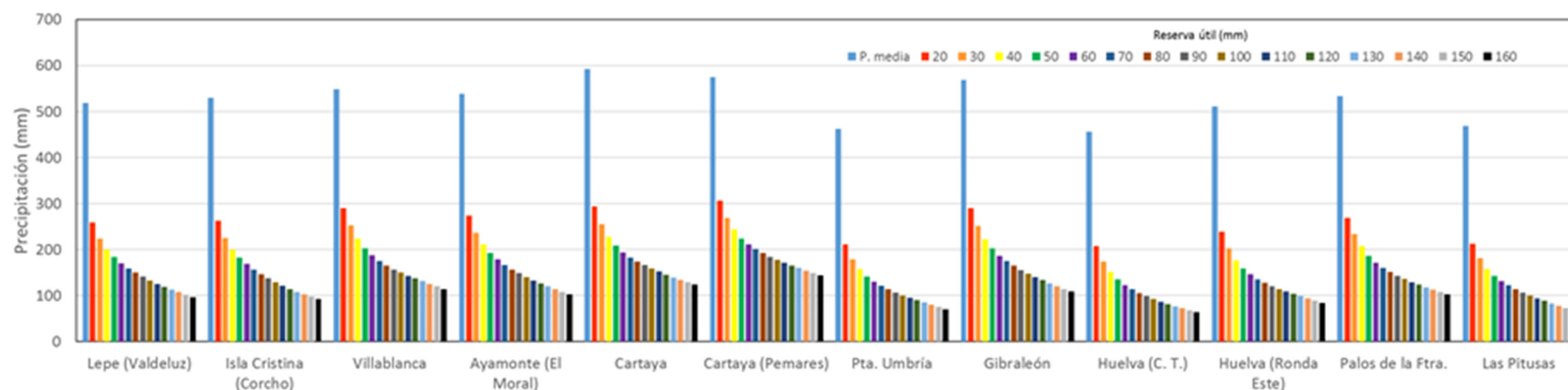
Los valores medios de recarga obtenidos están comprendidos entre 260 (*RU* = 20 mm) y 98 mm/año (*RU* = 160 mm), equivalentes a 49,2 y 18,4 % del agua de lluvia, respectivamente (Tabla 6). La extrapolación de estos resultados al conjunto de afloramientos detríticos del ámbito de estudio (559,9 km<sup>2</sup>) permitiría establecer un volumen de recarga variable entre 145,6 y 54,9 hm<sup>3</sup>/año (*RU* = 20 y 160 mm), respectivamente.

El valor de *RU* = 100 mm ha sido considerado como verosímil para los afloramientos permeables de la zona, constituidos en su mayoría por materiales detríticos, sobre los que se desarrolla una intensa actividad agrícola y la frecuente roturación a la que son sometidos. Todos estos factores aumentan la capacidad de retención del agua por parte de la franja edáfica y motivan la utilización de valores de *RU* más elevados que en el caso de los afloramientos de rocas carbonáticas. No obstante, los parámetros de cálculo utilizados para la estimación de la recarga deben validarse mediante análisis de sensibilidad y modelización numérica. Por tanto, los resultados obtenidos deben considerarse como una aproximación, a falta de un análisis más exhaustivo sobre su cuantificación.

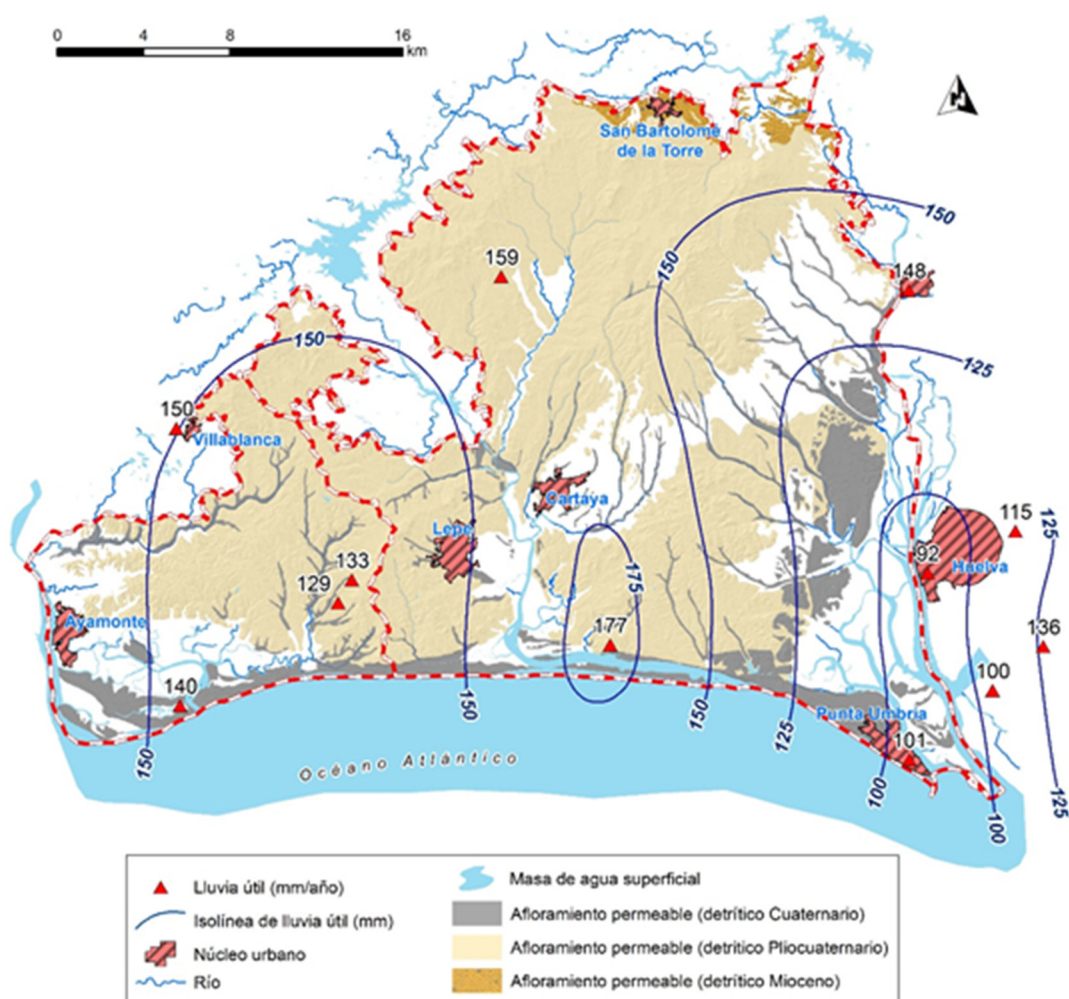
De la misma forma que en el caso de la distribución espacial de las precipitaciones (mapas de isoyetas de las figuras 4.3, 4.4 y 4.5), una vez obtenidos los valores de infiltración para cada una de las estaciones disponibles, se ha procedido a representar la distribución espacial de esta con valores de *RU* de 100 mm, para el año más seco, húmedo y medio del periodo temporal considerado (isolíneas de infiltración). En la figura 5.2 se muestra, a modo de ejemplo, la distribución espacial de la infiltración para el valor de *RU* mencionado y en condiciones hidroclimáticas medias. Este método permite realizar una distribución espacial de la recarga, a partir de los valores puntuales aportados por las estaciones.

**Tabla 5.1. Infiltración (mm) y tasa de recarga (%) calculadas mediante el balance de agua en el suelo y la ecuación de Hargreaves y Samani (1985) para el cálculo de la ETP, en la MASCH Ayamonte Lepe-Cartaya y, para los distintos valores de reserva útil del suelo considerados en los afloramientos detríticos.**

Estación	P. media	RU = 20 mm		RU = 30 mm		RU = 40 mm		RU = 50 mm		RU = 60 mm		RU = 70 mm		RU = 80 mm		RU = 90 mm		RU = 100 mm		RU = 110 mm		RU = 120 mm		RU = 130 mm		RU = 140 mm		RU = 150 mm		RU = 160 mm	
		mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%
		Lluvia útil (ETP Hargreaves, 1985)																													
Lepe (Valdeluz)	518	259	50,0	224	43,2	200	38,7	184	35,5	170	32,8	159	30,7	150	28,9	141	27,2	133	25,6	126	24,3	119	23,0	113	21,8	107	20,7	102	19,6	97	18,7
Isla Cristina (Corcho)	530	262	49,5	226	42,6	201	37,9	183	34,5	169	31,8	157	29,6	147	27,7	137	25,9	129	24,3	121	22,9	114	21,6	108	20,4	103	19,4	98	18,4	93	17,5
Villablanca	549	291	52,9	252	45,9	224	40,7	203	37,0	187	34,1	175	31,9	165	30,1	157	28,6	150	27,3	143	26,1	137	25,0	131	23,9	126	22,9	120	21,8	115	20,9
Ayamonte (El Moral)	538	274	50,8	236	43,9	212	39,3	193	35,9	179	33,2	167	31,0	157	29,1	148	27,6	141	26,1	133	24,7	126	23,4	120	22,2	114	21,1	108	20,0	102	19,0
Cartaya	592	294	49,6	255	43,0	228	38,5	209	35,3	194	32,8	183	30,9	174	29,3	166	28,0	159	26,9	152	25,7	146	24,6	139	23,5	134	22,6	129	21,8	124	20,9
Cartaya (Pemares)	575	306	53,1	269	46,8	243	42,3	224	39,0	212	36,8	201	35,0	192	33,4	184	32,0	177	30,8	171	29,8	165	28,7	160	27,8	154	26,8	149	25,9	144	25,0
Pta. Umbria	462	212	45,9	179	38,8	157	34,1	141	30,6	130	28,2	121	26,3	113	24,6	107	23,1	101	21,8	95	20,6	90	19,5	85	18,4	80	17,3	75	16,3	71	15,3
Gibraleón	569	290	50,9	251	44,1	223	39,2	202	35,5	187	32,8	175	30,7	165	28,9	156	27,4	148	26,0	141	24,7	134	23,5	127	22,3	121	21,2	115	20,1	109	19,2
Huelva (C. T.)	456	208	45,6	174	38,2	151	33,2	135	29,7	123	27,0	114	24,9	106	23,2	99	21,7	92	20,3	87	19,0	82	17,9	77	16,9	73	15,9	68	15,0	64	14,1
Huelva (Ronda Este)	512	239	46,7	203	39,6	177	34,5	159	31,1	146	28,6	136	26,5	127	24,9	121	23,6	115	22,4	109	21,3	104	20,4	99	19,4	94	18,4	89	17,4	84	16,5
Palos de la Ftra.	534	269	50,3	233	43,7	207	38,8	187	35,0	171	32,0	160	30,0	151	28,3	143	26,8	136	25,5	130	24,3	124	23,1	118	22,1	113	21,1	108	20,2	103	19,3
Las Pitusas	469	213	45,3	181	38,6	158	33,7	142	30,3	131	27,9	122	26,0	114	24,3	107	22,8	101	21,4	94	20,1	88	18,9	83	17,7	78	16,7	73	15,6	69	14,6
<b>Media</b>	<b>525</b>	<b>260</b>	<b>49,2</b>	<b>224</b>	<b>42,4</b>	<b>198</b>	<b>37,6</b>	<b>180</b>	<b>34,1</b>	<b>167</b>	<b>31,5</b>	<b>156</b>	<b>29,5</b>	<b>147</b>	<b>27,7</b>	<b>139</b>	<b>26,2</b>	<b>132</b>	<b>24,9</b>	<b>125</b>	<b>23,6</b>	<b>119</b>	<b>22,5</b>	<b>113</b>	<b>21,4</b>	<b>108</b>	<b>20,3</b>	<b>103</b>	<b>19,3</b>	<b>98</b>	<b>18,4</b>



**Figura 5.1. Relación entre la precipitación y los diferentes valores de infiltración calculados para cada una de las estaciones meteorológicas de la MASCH Ayamonte Lepe-Cartaya, a partir de la ecuación de Hargreaves y Samani (1985), con los distintos valores de reserva útil (RU) del suelo considerados.**



**Figura 5.2. Mapa de isolíneas de valores de lluvia útil ( $RU = 100 \text{ mm}$ ) sobre los afloramientos detríticos del área de estudio, para el cálculo de la recarga media del periodo 1985/86 – 2014/15 y por el método del balance de agua en el suelo y la ecuación de Hargreaves y Samani (1985).**

La evaluación de la recarga que tiene lugar sobre los materiales detríticos se muestra en este informe según el criterio hidrográfico, es decir, según la superficie de afloramientos permeables existentes dentro de los límites administrativos de cada una de las masas de agua subterránea. Los resultados obtenidos tras la aplicación de este criterio en la evaluación de la recarga, mediante el balance de agua en el suelo con la utilización de la *ETP* según Hargreaves y Samani, se muestra en la tabla 5.2.

Tanto las tasas de recarga como los volúmenes totales de recarga varían en función de la masa de agua subterránea considerada y la naturaleza de los materiales detríticos (Tabla 5.2). Sobre los afloramientos permeables pliocuaternarios ( $87,7 \text{ km}^2$ ) incluidos dentro de los límites de la MASb Ayamonte, se ha calculado un caudal medio de recarga de  $12,63 \text{ hm}^3/\text{año}$ , que equivale a una tasa de recarga del 26,3% respecto a la precipitación total ( $48,06 \text{ hm}^3/\text{año}$ ). Durante los periodos húmedos, tanto los volúmenes como el porcentaje de recarga han sido superiores ( $55,43 \text{ hm}^3/\text{año}$  y 60,1 % de la precipitación).



**Tabla 5.2. Valores de recarga calculada mediante la ecuación de Hargreaves y Samani (1985), con RU de 100 mm en las distintas masas de agua subterránea presentes en el ámbito de estudio (criterio de divisoria hidrográfica) y para cada una de las condiciones hidrometeorológicas consideradas.**

CRITERIO ADMINISTRATIVO (Masas de agua subterránea)

Masa de agua	Sup. (km <sup>2</sup> )	Sup. de recarga (km <sup>2</sup> )			Año tipo	Precipitación		Recarga (Mioceno) Tasa rec.			Año tipo	Precipitación		Recarga (Pliocuaternalio) Tasa rec.			Año tipo	Precipitación		Recarga (Cuaternario) Tasa rec.			Total (hm <sup>3</sup> )
		Mioceno	Pliocuaternalio	Cuaternario		hm <sup>3</sup> /año	mm/año	hm <sup>3</sup> /año	mm/año	(%)		hm <sup>3</sup> /año	mm/año	hm <sup>3</sup> /año	mm/año	(%)		hm <sup>3</sup> /año	mm/año	hm <sup>3</sup> /año	mm/año	(%)	
Ayamonte	163,0	---	87,7	24,0	Húmedo	---	---	---	---	---	Húmedo	92,17	1051	55,43	632	60,1	Húmedo	24,86	1036	14,83	618	59,7	70,26
					Medio	---	---	---	---	---	Medio	48,06	548	12,63	144	26,3	Medio	13,15	548	3,48	145	26,5	16,11
					Seco	---	---	---	---	---	Seco	20,61	235	---	---	---	Seco	5,71	238	---	---	---	0,00
Lepe-Cartaya	632,4	9,9	366,3	72,0	Húmedo	11,36	1147	6,06	612	53,4	Húmedo	415,75	1135	243,59	665	58,6	Húmedo	76,97	1069	45,14	627	58,7	294,79
					Medio	5,94	600	1,52	154	25,7	Medio	207,69	567	54,95	150	26,5	Medio	37,58	522	9,29	129	24,7	65,76
					Seco	2,95	298	0,17	17	5,7	Seco	91,94	251	2,20	6	2,4	Seco	16,34	227	0,65	9	4,0	3,01
Total área de Estudio	795,4	9,9	454,0	96,0	Húmedo	11,36	1147	6,06	612	53,4	Húmedo	507,92	1119	299,02	659	58,9	Húmedo	101,83	1061	59,98	625	58,9	365,05
					Medio	5,94	600	1,52	154	25,7	Medio	255,75	563	67,57	149	26,4	Medio	50,74	529	12,77	133	25,2	81,87
					Seco	2,95	298	0,17	17	5,7	Seco	112,55	248	2,20	5	2,0	Seco	22,06	230	0,65	7	2,9	3,01

En los afloramientos constituidos por materiales detríticos cuaternarios (24 km<sup>2</sup>) se ha determinado una recarga media de 3,48 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa un 26,5 % respecto a la precipitación media anual (13,15 hm<sup>3</sup>). Estos valores ascienden hasta 14,83 hm<sup>3</sup> y 59,7 %, respectivamente durante los periodos húmedos (ejemplificados por el año hidrológico 1995/96, el más húmedo del periodo 1985/86 - 2014/15). Para ambas superficies de recarga (afloramientos de materiales detríticos pliocuaternarios y cuaternarios), la recarga es inexistente durante el año 2004/05 (el más seco del periodo de control) con los parámetros de cálculo utilizados.

Para el conjunto de afloramientos permeables existentes dentro de los límites de la MASb Lepe-Cartaya, con una extensión de 448,2 km<sup>2</sup>, se han estimado unas entradas medias de 65,76 hm<sup>3</sup>/año, repartidos entre los afloramientos detríticos miocenos (1,52 hm<sup>3</sup>/año), pliocuaternarios (54,95 hm<sup>3</sup>/año) y cuaternarios (12,77 hm<sup>3</sup>/año). Las tasas de recarga obtenidas son similares en todos los casos (25,7, 26,4 y 25,2 %, respectivamente). Al igual que en el caso de las MASb Ayamonte, estos valores se ven notablemente incrementados en años húmedos, durante los cuales se ha evaluado una recarga media de 294,79 hm<sup>3</sup>, lo que supone una tasa de recarga del 58,5 %, respecto a la lluvia total (504,07 hm<sup>3</sup>/año). En los años secos el volumen infiltrado es notablemente inferior (3,01 hm<sup>3</sup>/año), el cual representa el 2,7 % de la precipitación total. Las superficies, tasas de recarga y recursos calculados para los afloramientos permeables ubicados dentro de los límites de cada una de las MASb, están resumidos en la tabla 5.2.

## 5.2. Estimación de la recarga mediante BALAN

Se ha aplicado el código numérico BALAN con el objeto de disponer de una evaluación de la recarga en la MASCH Ayamonte-Lepe-Cartaya. Se trata de un modelo agregado de base física que realiza un balance diario de agua en el suelo, la zona no saturada y el acuífero. Las entradas de agua al balance incluyen precipitación y las dotaciones de riego. Las salidas incluyen escorrentía superficial, evapotranspiración y flujo subterráneo (no se considera la presencia de flujos hipodérmicos relevantes en este sistema). El método de cálculo consiste en evaluar secuencialmente cada uno de estos términos: empieza por la precipitación y los riegos, continúa con la escorrentía superficial, la evapotranspiración y termina con la recarga por infiltración. La simulación abarca el periodo 1985/86- 2014/15 y se realiza para la totalidad de la MASCH Ayamonte-Lepe-Cartaya, independientemente de las cuencas hidrográficas a las que afecte.

Los riegos intensivos del litoral atlántico onubense son riegos de alta eficiencia. No obstante, incluso asumiendo una tasa de retorno al acuífero muy baja, modifican sustancialmente las condiciones de humedad en el suelo, fundamentalmente porque imponen unas condiciones de regularidad en la humedad que no existirían en condiciones naturales. Ello hace necesario tenerlos en cuenta para elaborar el balance hidrometeorológico.

A tal efecto, y a falta de datos reales sobre las dotaciones aplicadas, estas se han evaluado a partir de las estimaciones de necesidades hídricas brutas de los cultivos. Ello supone que el riego se realiza en las condiciones de referencia (óptimas para los cultivos). No obstante, el manejo real puede alejarse de estos supuestos, especialmente en periodos secos en los que la escasa disponibilidad de agua en los sistemas de regulación superficial puede inducir a riegos deficitarios o incluso a una potencial mayor extracción de agua subterránea. Como en el informe se detalla, esta circunstancia es uno de los mayores elementos de incertidumbre en la modelización realizada.

Otro condicionante metodológico es el estado transitorio en el que se encuentra buena parte de esta masa de agua subterránea. Los bombeos realizados hasta finales de los 80 del siglo pasado generaron un vaciado en el acuífero que llegó a emplazar la superficie piezométrica más de 20 m

por debajo del nivel del mar, especialmente visible en la zona entre Cartaya y Aljaraque. La sustitución del agua subterránea por la superficial entre 1984 y 1989 modificó sustancialmente el balance del acuífero permitiendo una lenta recuperación de los niveles. Esta lenta recuperación impone un régimen transitorio que es patente en toda la serie piezométrica disponible.

Por último, hay que tener en cuenta las limitaciones del proceso de calibración de un código agregado como BALAN cuando se realiza con datos piezométricos. Tanto las variables agroclimáticas de entrada como los parámetros del modelo se definen para todo el ámbito de simulación. El modelo no es sensible a la previsible heterogeneidad espacial en estos factores en el dominio modelado. En este sentido, los resultados serán plausibles en la medida en que los datos del/los piezómetros sean representativos y puedan extrapolarse al resto del dominio. Cuanto menos difusivo sea el acuífero (T/S), más afectado estará cada piezómetro por las condiciones próximas y más incertidumbre añade a la extrapolación de los resultados.

### 5.2.1.- Evapotranspiración de los cultivos y necesidades hídricas brutas

Las dotaciones de riego se calculan como las necesidades hídricas brutas (NH<sub>b</sub>) de los cultivos. Esto es, las necesidades netas (NH<sub>n</sub>) más un porcentaje de incremento de agua a aplicar debido a las pérdidas en el riego, y que dependen del sistema empleado (eficiencia del riego en parcela, ER).

$$NH_b = NH_n / ER$$

Así, un riego por goteo debería incrementar menos las necesidades brutas del cultivo que un riego por aspersión o inundación. Los supuestos empleados de ER son del 85% en aspersión y 92,5 % en goteo. Estos datos se basan en los referidos en el Inventario de Regadíos 2008 de la Junta de Andalucía (2011) y son compatibles con los valores de eficiencia global previstos en el Plan Hidrológico de la Demarcación del Tinto, Odiel y Piedras (Ciclo de PH 2015/2021).

Las necesidades hídricas netas (NH<sub>n</sub>) representan la fracción que el cultivo va a evaporar del volumen de agua aplicado en el riego. Se calcula como la evapotranspiración de cultivo (ET<sub>c</sub>), menos lo que la planta es capaz de absorber de las precipitaciones (precipitación efectiva). Se han tenido en cuenta valores normales, no de riegos deficitarios, entendiendo que, salvo años concretos, no hay problemas ni restricciones en el agua servida.

$$NH_n = ET_c - P_{ef}$$

La ET<sub>c</sub> representa las necesidades evapotranspirativas del cultivo en condiciones óptimas. Depende del tipo de cultivo y su estado fenológico (dato ajustado por la K<sub>c</sub>) y por otros parámetros como temperatura del aire, horas de sol, radiación viento, etc., que determinan la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

$$ET_c = ET_o * K_c$$

La ET<sub>c</sub> también es denominada evapotranspiración potencial (ETP) esperada en ausencia de estrés ambiental o hídrico.

La ET<sub>c</sub> también es denominada evapotranspiración potencial (ETP) esperada en ausencia de estrés ambiental o hídrico.

Las variables, la ET<sub>c</sub>, P<sub>ef</sub> y las NH<sub>n</sub> se han obtenido de las estimaciones que realiza el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación a partir de las mediciones registradas en la red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el regadío).

Para la masa de agua subterránea del Ayamonte-Lepe-Cartaya se han seleccionado 2 estaciones agroclimáticas aplicando como criterios de selección su ubicación en las principales áreas de regadío dentro de estas masas de agua y con disponibilidad de series de datos con los registros más completos y extensos (Tabla 5.3).

Los métodos empleados por el Ministerio para el cálculo de estas variables son:

$ET_0$ : Penman-Monteith

$P_{ef}$ : método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del Ministerio de Agricultura de Estados Unidos

**Tabla 5.3. Estaciones de la red SIAR seleccionadas, cultivos empleados y datos recogidos.**

Estación	Serie	Comarca	Cultivos	Dato (mm)
H02 LEPE	21/12/1999- 30/09/2017	- Costa (Huelva)	Trigo	$ET_c$
			Girasol	$P_{ef}$
			Fresa y fresón	$NH_n$
			Naranja	
			Mandarino	
			Melocotón	
			Olivo	
H03 GIBRALEÓN	22/12/1999- 30/09/2017	Costa (Huelva)	Fresa y Fresón	$ET_c$
			Naranja	$P_{ef}$
			Mandarino	$NH_n$
			Melocotón	
			Olivo	

De la red SIAR se han obtenido las  $NH_n$  y la  $ET_c$  en mm/día, específico para cada tipo de cultivo. Se ha tenido en cuenta que en el patrón de cultivo de esta zona de riego destaca fundamentalmente la fresa y el fresón, así como los cítricos naranja y mandarina y en menor medida los frutales de hueso, como el melocotón.

Tanto el dato de  $ET_c$  como el de  $NH_n$  que se han aplicado al balance se han calculado a partir del promedio diario de  $ET_c$  y  $NH_n$  de cada cultivo ponderado por su extensión.

### Superficies de cultivo

Los datos de superficies de cultivos se han obtenido del Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía (SIMA) para los años disponibles desde el 2010 al 2017 y del Censo Agrario para el año 2009. Ambas fuentes son a nivel municipal.

Se seleccionaron los 10 municipios que albergan la totalidad de los riegos de la masa de agua subterránea (Tabla 5.4) y los cultivos de mayor extensión con dato de  $ET_c$  y  $NH_n$  en las estaciones de la Red SIAR. Para el resto, se agruparon y asignaron los valores de todos aquellos cultivos con similares características fenológicas y de necesidades hídricas.

**Tabla 5.4. Municipios que integran la masa de agua compartida y estación SIAR.**

<b>Municipio</b>	<b>Estación SIAR</b>	<b>Masa de agua</b>
Aljaraque	H02	Lepe - Cartaya
Ayamonte	H02	Ayamonte
Cartaya	H02	Lepe - Cartaya
Gibraleón	H03	Lepe - Cartaya
Isla Cristina	H02	Ayamonte
Lepe	H02	Lepe - Cartaya
Punta Umbría	H04	Lepe - Cartaya
San Bartolomé de la Torre	H03	Lepe - Cartaya
Villablanca	H02	Ayamonte
Villanueva de los Castillejos	H03	Lepe - Cartaya

Para completar la serie de superficie de riego anterior, hasta el año 1998, se ha aplicado un porcentaje de disminución anual obtenido de los trabajos llevados a cabo por la Junta de Andalucía en el “Inventario de Regadíos 2008 y su evolución en la última década” (Junta de Andalucía, 2011).

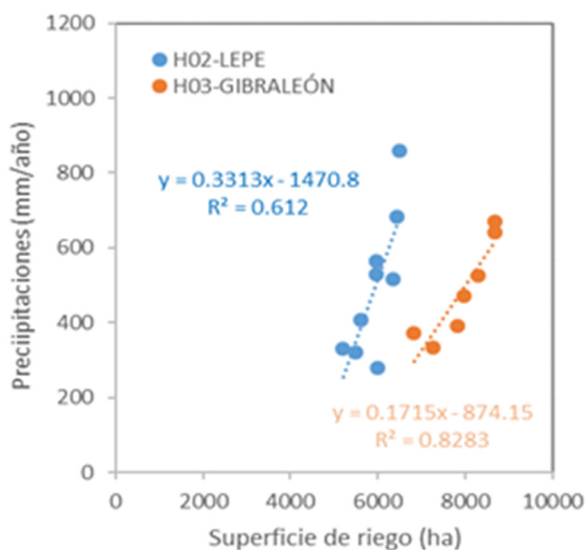
Los datos recogidos en este trabajo reflejan para los regadíos intensivos del litoral Atlántico un incremento de la superficie de riego del 29 % entre el año 1997 y 2008 (Tabla 5.5)

**Tabla 5.5. Superficie y tipo de riego de los Regadíos Intensivos del Litoral Atlántico para el año 1997 y 2008 (Junta de Andalucía, 2011).**

<b>Año</b>	<b>Inundación (ha)</b>	<b>Aspersión (ha)</b>	<b>Localizado (ha)</b>	<b>Total (ha)</b>
1997	297	7.874	28.161	36.332
2008	11	7.917	43.604	51.532

A esta superficie se le ha aplicado un factor de corrección por tipología de año. Se observa que existe una relación entre la superficie de riego y las precipitaciones anuales, en especial en la superficie asociada a la estación agroclimática de Lepe (Figura 5.3). Se entiende que en años con una menor reserva de agua a inicio de temporada, la superficie de riego es menor que en años con elevada pluviometría. Esta relación es aplicable a los riegos con agua superficial y afecta a los hortícolas, en especial a la fresa. El factor de corrección se aplicó tan solo a la superficie del fresón y fresas y a todos los cultivos de similares características.

Se calcularon para cada cultivo las  $ET_c$  y las  $NH_n$  diarias ( $m^3/ha$ ), así como para las  $NH_b$  para lo que se aplicaron eficiencias de riego diferentes en función de si se trata de un riego por goteo (hortícolas y leñosos) o por aspersión (cereal y otros cultivos extensivos). El valor promediado corresponderá a la suma de todos ellos dividido entre la superficie total de riego.



**Figura 5.3. Relación entre las precipitaciones anuales de las estaciones agroclimáticas de la Red SIAR y la superficie de riego asignada a cada una de ellas.**

La Tabla 5.6 incluye la superficie de riego de las masas de agua de Lepe-Cartaya y Ayamonte. La serie 2009 -2017 se ha obtenido del Censo Agrario y del Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía e incluye la superficie de los principales cultivos (96%). El resto de años son datos reconstruidos.

**Tabla 5.6. Clasificación de año en seco, medio y húmedo en función de las precipitaciones anuales (mm) y los percentiles P25 y P75 de cada serie.**

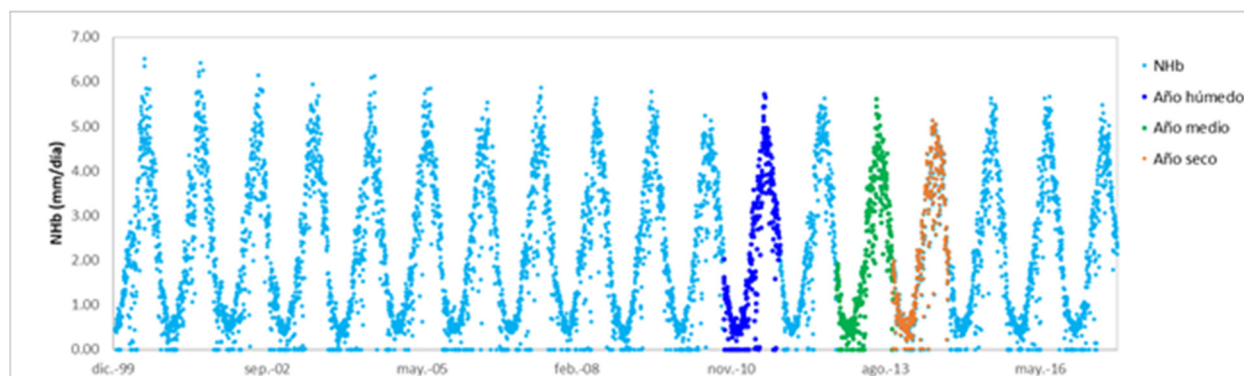
Año hidrológico	Tipo	P (Red SIAR-mm/año)		P (AEMET-mm/año)		Superficie de riego (ha)	
		H02 Lepe	H03Gibraleón	4546I Lepe	4603 Gibraleón	Lepe-Cartaya	Ayamonte
1985/86	SECO	-	-	407	367	-	-
1986/87	MEDIO	-	-	447	492	-	-
1987/88	MEDIO	-	-	595	726	-	-
1988/89	MEDIO	-	-	443	535	-	-
1989/90	HÚMEDO	-	-	979	990	-	-
1990/91	MEDIO	-	-	450	422	-	-
1991/92	SECO	-	-	327	265	-	-
1992/93	MEDIO	-	-	493	413	-	-
1993/94	MEDIO	-	-	497	518	-	-
1994/95	SECO	-	-	303	220	-	-
1995/96	HÚMEDO	-	-	1064	1115	-	-
1996/97	HÚMEDO	-	-	722	916	-	-
1997/98	HÚMEDO	-	-	653	740	9.532	2.193
1998/99	SECO	-	-	295	298	8.336	1.949
1999/00	MEDIO	-	-	530	506	10.082	2.465
2000/01	HÚMEDO	403	799	755	766	10.915	2.687
2001/02	MEDIO	428	704	554	636	10.658	2.625
2002/03	MEDIO	703	698	454	630	11.077	2.733
2003/04	HÚMEDO	771	798	693	788	12.388	3.100
2004/05	SECO	248	330	254	305	11.098	2.807
2005/06	MEDIO	559	684	540	690	12.060	3.074
2006/07	MEDIO	572	735	530	696	12.459	3.179
2007/08	MEDIO	593	602	638	508	12.784	3.264
2008/09	SECO	408	334	326	283	12.591	3.216
2009/10	HÚMEDO	859	974	817	889	12.685	3.904
2010/11	HÚMEDO	684	827	581	753	12.566	3.896
2011/12	SECO	279	372	242	257	12.226	4.311

Año hidrológico	Tipo	P (Red SIAR-mm/año)		P (AEMET-mm/año)		Superficie de riego (ha)	
		H02 Lepe	H03Gibraleón	4546I Lepe	4603 Gibraleón	Lepe-Cartaya	Ayamonte
2012/13	MEDIO	517	527	515	519	14.206	4.396
2013/14	SECO	322	393	214	388	12.958	4.207
2014/15	SECO	329	473	235	443	12.770	4.109
2015/16	MEDIO	529	642	-	-	14.165	4.411
2016/17	MEDIO	565	669	-	-	14.165	4.411

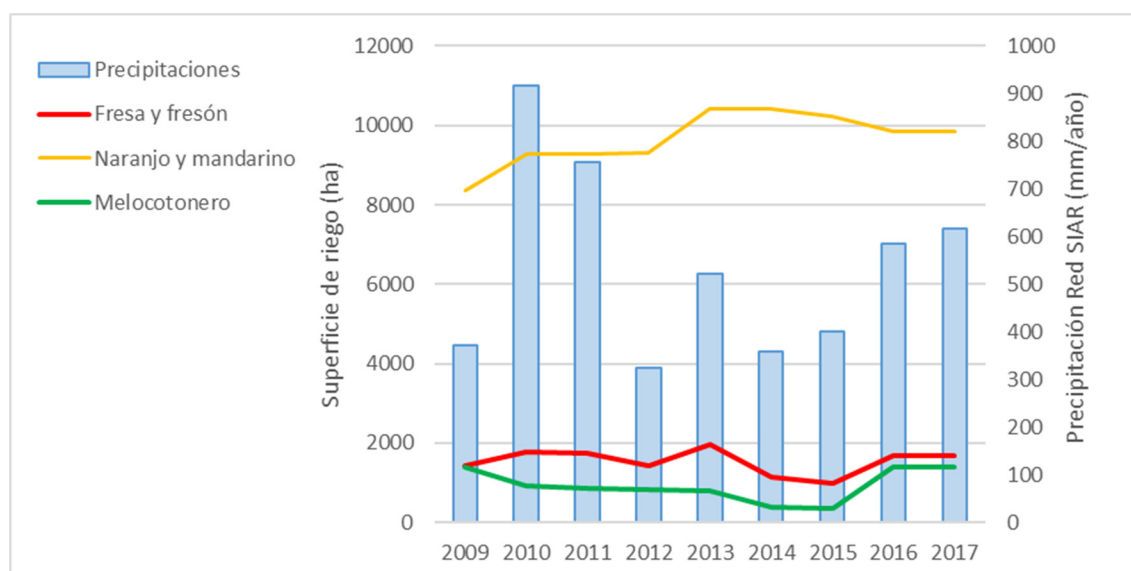
Finalmente, para los años iniciales sin lecturas en la Red SIAR, (10/1985 - 12/1999) se aplicó el dato medio diario de  $ET_c$  y  $NH_b$  (mm/día) de un año en concreto representativo de años secos (2013/14), medios (2012/13) y húmedos (2010/11). Para la clasificación de los años se definieron los percentiles 75 y 25 de las precipitaciones anuales de las estaciones 4546I-Lepe y 4603-Gibraleón (Tabla 5.6). Se observa que a pesar de que se han empleado años reales en función de las precipitaciones no hay diferencias significativas entre los distintos años para cada tipo de cultivo (Figura 5.6). Las  $NH_n$  dependen en gran medida de los distintos patrones de cultivo, dado que las precipitaciones efectivas son muy escasas durante los meses de mayor demanda. Si bien existe una relación entre las precipitaciones y la superficie de la fresa, lo que en cierto modo varía la  $ET_c$  media de los regadíos, esto no es aplicable a otros cultivos como es el caso de los leñosos. En años especialmente secos éstos reciben una menor dotación o se riegan bajo déficit hídrico, pero no son sustituidos por otros cultivos de menor demanda como ocurre con los cultivos hortícolas y extensivos. Hay que tener en cuenta que para los cálculos de las  $NH_b$  se están aplicando los valores teóricos que no tienen por qué coincidir con lo que realmente se está regando. Se entiende que al tratarse de regadío muy eficiente, la dotación real del agua aplicada debería ajustarse bien a las necesidades hídricas teóricas de los cultivos, salvo las variaciones que podrían suponer los cultivos bajo plástico que no se están teniendo en cuenta.

**Tabla 5.7. Necesidades hídricas netas y necesidades hídricas brutas anuales ( $hm^3/a$ -  $m^3/ha$  y año) de las MASb de Lepe-Cartaya y Ayamonte.**

	Lepe-Cartaya		Ayamonte		$NH_n$ ( $m^3/ha$ y año)	$NH_b$ ( $m^3/ha$ y año)
	$NH_n$ ( $hm^3/a$ )	$NH_b$ ( $hm^3/a$ )	$NH_n$ ( $hm^3/año$ )	$NH_b$ ( $hm^3/año$ )		
1999/00	67	74	16	18	6610	7347
2000/01	80	89	20	22	7350	8170
2001/02	76	84	19	21	7087	7877
2002/03	80	89	20	22	7194	7996
2003/04	84	93	21	23	6750	7503
2004/05	83	93	21	23	7505	8341
2005/06	82	91	21	23	6804	7562
2006/07	85	94	22	24	6808	7567
2007/08	88	98	23	25	6908	7678
2008/09	87	97	22	25	6914	7689
2009/10	84	94	26	29	6660	7403
2010/11	83	92	26	29	6596	7332
2011/12	90	100	32	35	7348	8167
2012/13	92	102	29	32	6486	7208
2013/14	88	98	29	32	6825	7585
2014/15	91	101	29	32	7088	7880
2015/16	96	106	30	33	6751	7506
2016/17	97	108	30	34	6858	7626
<b>Promedio</b>	<b>85</b>	<b>95</b>	<b>24</b>	<b>27</b>	<b>6827</b>	<b>7588</b>



**Figura 5.4. Necesidades hídricas brutas medias diarias (mm/día) de los regadíos de la masa de agua de Lepe-Cartaya y Ayamonte. Se indican los años seleccionados como secos, medios y húmedos para el relleno de los primeros años de la serie.**



**Figura 5.5. Evolución de la superficie de riego del melocotón, fresa y fresón y naranja-mandarina en la masa de agua del Lepe-Cartaya y precipitaciones anuales registradas en las estaciones del Lepe y Gibrleón de la Red SIAR.**

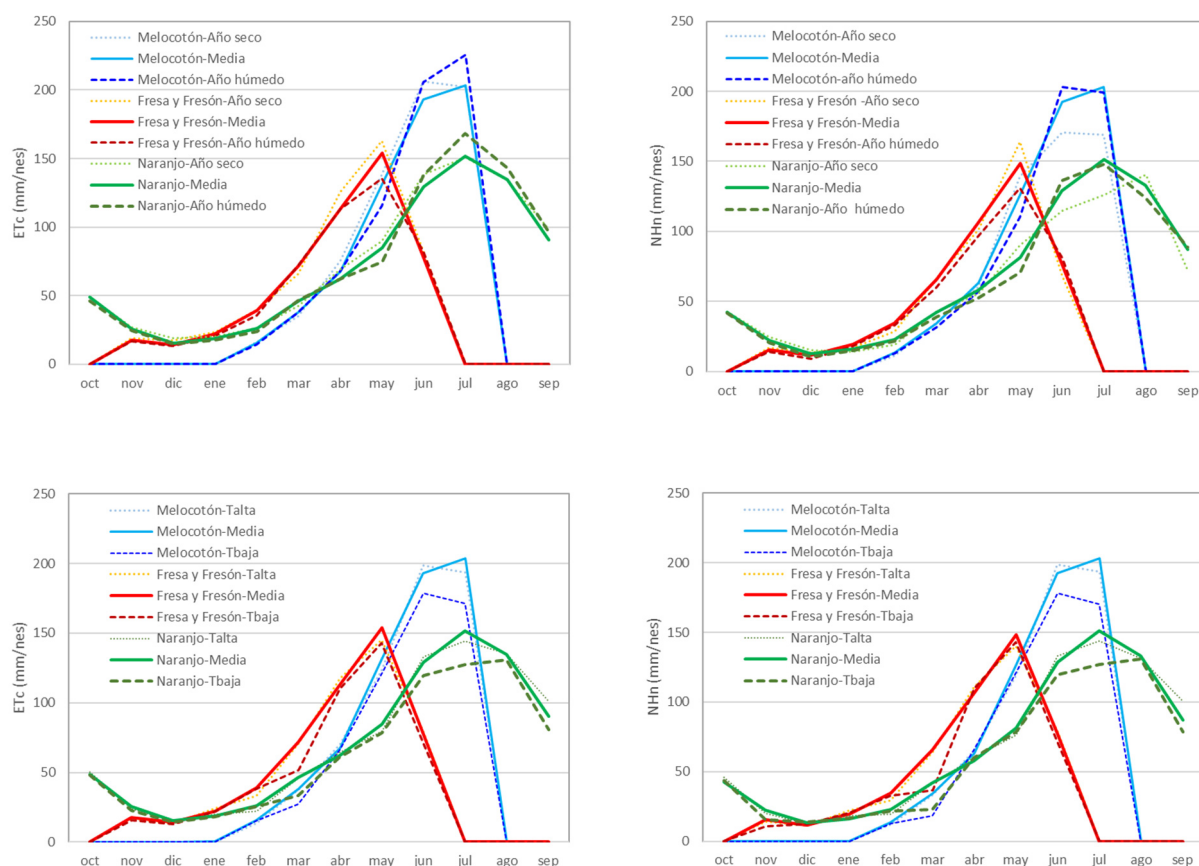
### Distribución mensual de la ET<sub>c</sub> y NH

El código de simulación empleado para el balance hidrometeorológico (BALAN) implementa una discretización mensual de las dotaciones de riego. En este sentido, es conveniente disponer de una caracterización de los valores mensuales de las necesidades hídricas para entender y justificar mejor la estructura de las series implementadas como dotaciones de riego.

La figura 5.6 muestra las diferencias entre los años secos y años húmedos para la ET<sub>c</sub> y las NHn (mm/mes) de los principales cultivos de la masa de agua del Lepe-Cartaya. La principal diferencia entre ambos parámetros está en la precipitación efectiva. Las NHn son menores que las ET<sub>c</sub> con una mayor diferencia en los años húmedo y en especial en aquellos en los que se registran precipitaciones en los meses de mayor demanda de agua (junio, julio y agosto). Sin embargo, al comparar años concretos y en una zona donde apenas llueve en los meses de estiaje, esta diferencia no siempre se ve clara. Si la media anual de la serie (2000-2017) para la ET<sub>c</sub> del melocotón es de 649 mm, para la fresa es 509 mm y para el naranjo 834 mm, los valores de NHn



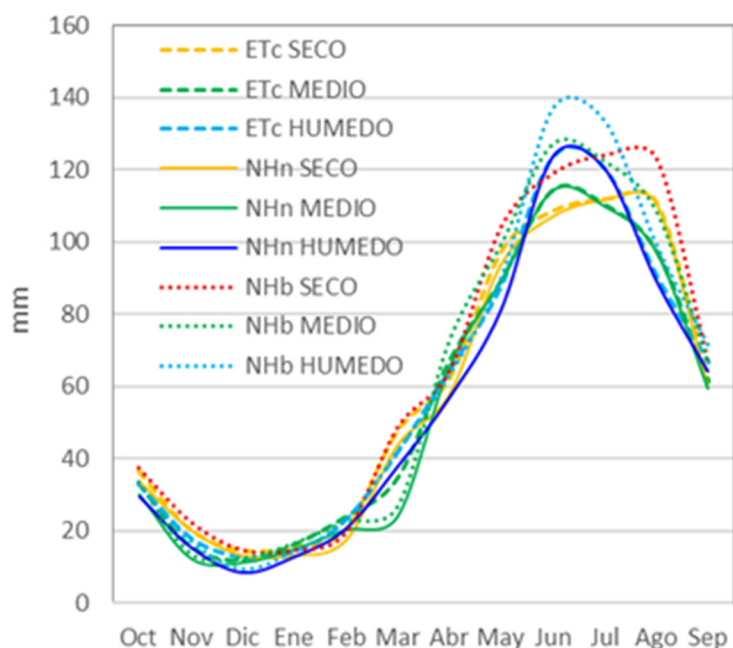
son algo más bajos, de 633 mm, 478 mm y 798 mm respectivamente, diferencias que se concentran sobre todo en los meses de primavera.



**Figura 5.6. ETc y NHn media mensual de los principales cultivos de la masa de agua del Lepe-Cartaya. Se incluye la media junto con años secos, medios, húmedos, de temperatura media anual alta y baja.**

Por otro lado, la diferencia entre años de temperaturas medias altas y bajas, repercute sobre la ETc en la medida que las altas temperaturas suponen un incremento de la ET0. Si comparamos por cultivos se ve una clara diferencia entre los años de temperatura alta y baja para el melocotón y el naranjo y en menor medida para la fresa cuyos meses de mayor demanda corresponde a mayo.

La figura 5.7 muestra la diferencia entre la ETc, las NHn y las NHb medias para año seco, medio y húmedo. Estos años se han seleccionado para el relleno de la serie 1985-1999. La principal diferencia entre estos años viene marcada por el patrón de cultivos. En los años húmedos hay más hectáreas de fresa, lo que incrementa la demanda en el mes de abril y mayo con un marcado pico en el mes de junio y julio, coincidiendo con los meses de máxima demanda del melocotón. Sin embargo, los meses secos disminuyen las hectáreas de fresa y la máxima demanda se desplaza hacia los meses de julio y agosto marcado por la ETc del naranjo. Si bien el melocotón es el cultivo de mayor demanda mensual que se concentra en los meses de junio y julio, la naranja requiere de riego todo el año (Figura 5.6), de modo que sus NHb anuales son las más altas de todos los cultivos analizados en esta masa de agua.



**Figura 5.7. ETC, NHn y NHb medios mensuales en la masa de agua del Lepe-Cartaya para un año seco, medio y húmedo.**

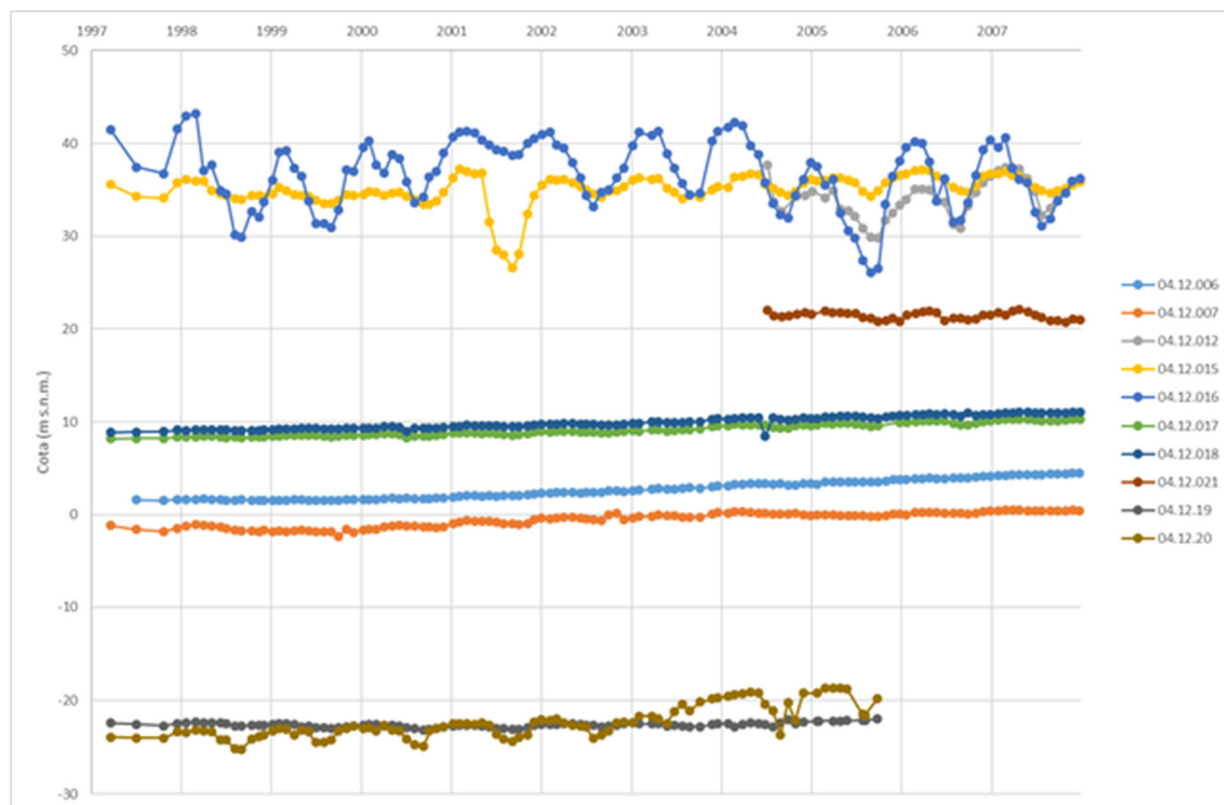
Si bien no se observa una clara tendencia en los últimos años de incremento o disminución de las NHb medias anuales, el aumento de la superficie de riego del naranjo y mandarina ha incrementado el volumen de agua anual necesario para atender la demanda de todos estos cultivos (Figura 5.7).

## 5.2.2.- Aplicación del código BALAN

### Datos disponibles

Para la calibración del modelo se dispone de datos de 10 piezómetros, todos ellos en la masa de agua subterránea de Lepe-Cartaya. Las series disponibles abarcan el periodo 1997-2005 (Figura 5.8). Sus hidrogramas revelan unos patrones muy diferenciados. Los ubicados más al norte, están a cotas entre 30 y 40 m s.n.m., con unas variaciones estacionales claras. Los piezómetros más al sur, cerca de la costa, a cotas entre 0 y 10 m s.n.m. muestran hidrogramas muy uniformes y con una tendencia ligeramente ascendente y muy constante para todo el periodo de observaciones. En dos de los piezómetros (04.12.19-20) se registran valores por debajo del nivel del mar, a cotas próximas a 20-25 m b.n.m.

A efectos de visualizar y relacionar de forma más clara sus patrones estacionales y tendenciales, se ha realizado una normalización de los datos (valores Z). Mediante este análisis se han identificado 3 grupos de piezómetros en función de los caracteres de su estacionalidad y comportamiento tendencial (Figura 5.9).



**Figura 5.8. Hidrogramas de los piezómetros disponibles en Lepe-Cartaya.**

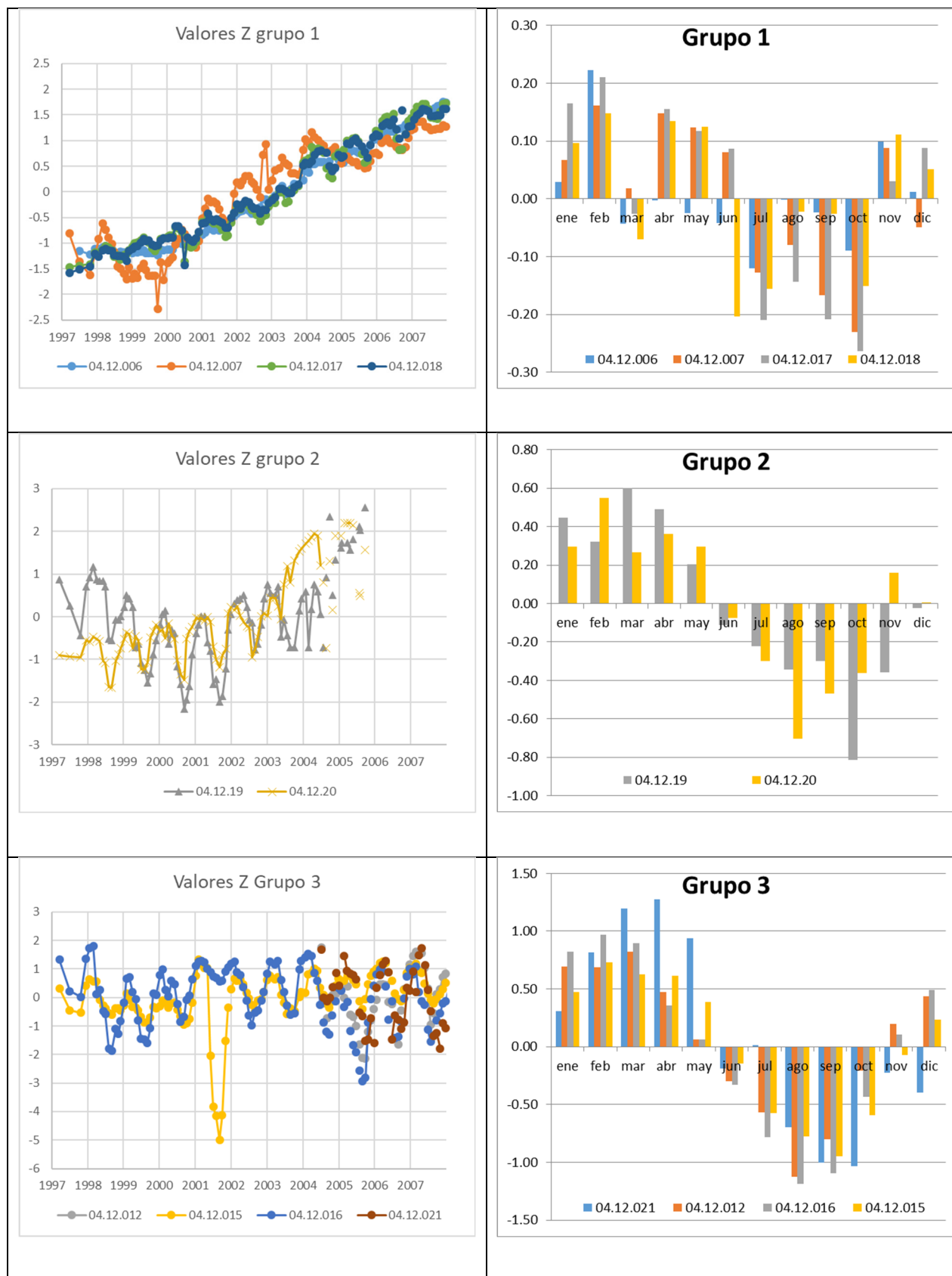
El Grupo 1 (04.12.006, 04.12.007, 04.12.017 y 04.12.018) incluye los piezómetros más próximos a la línea de costa. Revelan una tendencia ascendente muy constante (20 cm/año de promedio) y una estacionalidad de muy baja amplitud.

El Grupo 2 (04.12.19 y 04.12.20), en una posición geográfica algo más interior que el anterior, muestra una tendencia ascendente a partir del año 2000, desde niveles próximos a 24 m b.n.m. a 19 m n.b.m. En este caso se aprecia una estacionalidad anual algo más acusada que en el anterior.

EL Grupo 3 (04.12.12, 04.12.15, 04.12.16 y 04.12.21) están localizados en la zona más interior. No hay tendencias claras en este grupo. Sus variaciones piezométricas se deben exclusivamente a las variaciones estacionales donde se muestran con mayor amplitud.

Si bien los estados tendenciales y cotas son diferentes entre ambos grupos, todos ellos comparten la misma estacionalidad anual (Figura 5.9, columna derecha), si bien con amplitudes distintas. Los máximos niveles se registran en el periodo invierno-primavera y mínimos en verano-otoño.

Los piezómetros de los grupos 1 y 2 representan estados piezométricos transitorios que aún no han recuperado el desequilibrio producido por los intensos bombeos hasta mediados de los años 90, con valores de extracción del orden de 33-44 hm<sup>3</sup>/año en las décadas de los años 80 y 90 (IGME, 1989).



**Figura 5.9. Hidrogramas (izquierda) y promedios mensuales (derecha) en valores normalizados.**

Estas agrupaciones son reflejo de unos escenarios hidrodinámicos distintos, con una posición distinta en el esquema de flujos regionales:

- Grupo 3 – Representan la zona de recarga del acuífero. Acuífero libre.
- Grupo 2 – Zonas de tránsito. Ubicados sobre un cono de descensos en recuperación transitoria. Condiciones de semiconfinamiento.
- Grupo 1 – Zona de descarga de regional al mar (barrera positiva). Condiciones de confinamiento. En recuperación transitoria.



**Figura 5.10. Localización de los piezómetros en la masa de agua compartida de Ayamonte-Lepe-Cartaya.**

Los Grupos 2 y 3 revelan unas condiciones de afección al acuífero que se manifiesta como un estadio transitorio de recuperación que aún no ha alcanzado el equilibrio (durante el periodo de observación disponible). Por otra parte, la pequeña amplitud de las oscilaciones piezométricas estacionales en el Grupo 1 (del orden de 30 cm o inferiores) se deben a su proximidad al mar, que actual como barrera positiva de este acuífero.

A efectos de calibración con el código BALAN, se emplearán los piezómetros del Grupo 3, que representan el área de recarga del acuífero. Las condiciones hidrogeológicas de los grupos 1 y 2 no se pueden implementar con este código.

En el grupo 3 sólo hay dos piezómetros con series con una longitud 10 años (04.12.016 y 04.12.015), el resto dispone de series de sólo 4 años. De los dos piezómetros con series más largas, el 04.12.015 registra una serie con una oscilación estacional muy amortiguada (Figura 5.9), salvo un evento de piezometría anormalmente bajo en el 2001. Este bajo rango de amplitud estacional se debe probablemente a que se emplaza en las inmediaciones (ámbito de afección) del Canal del Piedras. Por lo tanto, para la calibración del código BALAN se va a emplear el registro del piezómetro 04.12.016.

## Análisis de sensibilidad

Se ha realizado un análisis de sensibilidad a los parámetros que más afectan a la recarga: la reserva útil del suelo y los coeficientes de infiltración del suelo

Los valores de recarga y ETR son los más afectados por el parámetro de reserva útil del suelo, en tanto que la escorrentía superficial parece relativamente poco sensible. Este componente depende sobre todo de los coeficientes de infiltración CIM0 y CIM1, que se analizan en el epígrafe siguiente.

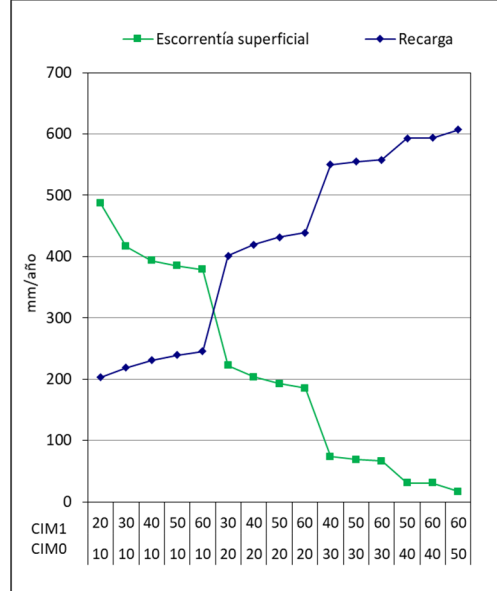
Los valores de recarga son especialmente sensibles a los tramos inferiores de reserva útil. A partir de una reserva útil de 50 mm, los valores de recarga tienen a estabilizarse con valores próximos a 380 mm.

Balan emplea un método para evaluar la escorrentía similar a la ley de Horton, de forma que la capacidad de infiltración desciende al aumentar el grado de humedad en el suelo. Los parámetros que considera Balan para calcular la escorrentía son la capacidad de infiltración del suelo (mm/d) en capacidad de campo (CIM<sub>0</sub>) y en punto de marchitez (CIM<sub>1</sub>)

El análisis a los coeficientes de infiltración CIM0 y CIM1 se ha realizado considerando una reserva útil de 100 mm. Los resultados se muestran en la tabla 5.8. Para valores de los coeficientes entre 10 y 60 mm, se obtienen valores de recarga entre 200 y 600 mm/año. El coeficiente de infiltración en capacidad de campo (CIM0) tiene un efecto más relevante en la recarga que el coeficiente en punto de marchitez (CIM1).

**Tabla 5.8. Análisis de sensibilidad de la recarga a los coeficientes de infiltración del suelo (CIM0 y CIM1).**

CIM0 mm	CIM1 mm	Escorrentía superficial mm/año	Lluvia útil total mm/año	ETR mm/año	ETP mm/año	Recarga mm/año
10	20	487.3	203.90	641.10	709.08	203.24
10	30	416.4	219.84	696.01	709.08	218.97
10	40	393.6	231.90	706.74	709.08	230.91
10	50	384.8	240.56	706.88	709.08	239.47
10	60	378.7	246.67	706.88	709.08	245.52
20	30	222.6	403.64	706.03	709.08	401.64
20	40	203.7	421.74	706.88	709.08	419.58
20	50	192.9	432.54	706.88	709.08	431.94
20	60	185.5	439.86	706.88	709.08	439.22
30	40	74.2	551.24	706.88	709.08	549.99
30	50	69.2	556.19	706.88	709.08	554.90
30	60	66.6	558.85	706.88	709.08	557.55
40	50	30.7	594.72	706.88	709.08	593.28
40	60	30.6	594.80	706.88	709.08	593.36
50	60	16.8	608.55	706.88	709.08	606.96



## Calibración y análisis de incertidumbre



La calibración se ha realizado mediante el código PEST (Doherty, 2015), lo que permite dotar de una base estadística exhaustiva al análisis de la incertidumbre, basado en la matriz de covarianza de los parámetros objeto de calibración.

Se ha realizado una calibración de los parámetros que más afectan a la recarga: la reserva útil, los coeficientes de infiltración en el suelo y el coeficiente de agotamiento del acuífero. En un primer ensayo se introdujeron otros parámetros del suelo y la zona no saturada, si bien resultaron en general poco sensibles, por lo que se eliminaron del ejercicio de la calibración.

Los valores centrales y los intervalos de calibración de los parámetros de reserva útil y coeficientes de infiltración se han seleccionado a partir del análisis de sensibilidad expuesto en el epígrafe anterior.

Como valores observados se ha tomado el registro del piezómetro 04.12.016 por las razones expuestas.

Los resultados de la calibración se resumen en la figura 5.11. El ajuste entre valores medidos y simulados consigue un valor medio ajustado y el sesgo (PIBAS= -0.02) si bien indica una cierta sobrevaloración, está dentro de lo aceptable.

El valor de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) es muy bajo (0,035), así como el  $R^2$  (0,15). El modelo no simula satisfactoriamente la variabilidad estacional de los datos. Un examen detallado muestra que las mayores diferencias se dan en años secos, en los que la simulación no es capaz de reproducir los agotamientos registrados en el piezómetro. Así ocurre en los años 1998-1999, en el 2002 y de forma más acusada en el 2005 (el más seco de la serie). Los años 2000 y 2001, con precipitaciones superiores a la media, el modelo simula satisfactoriamente la evolución piezométrica registrada.

El modelo incluye un manejo agrícola en condiciones óptimas. La serie introducida como dotaciones de riego se ha evaluado a partir de las necesidades hídricas brutas de los riegos de la zona. No obstante, el manejo del agua en periodos secos puede diferir notablemente del implementado. Hay dos razones fundamentales que se pueden invocar para justificar este efecto. En primer lugar, la menor disponibilidad de agua en los sistemas de regulación superficial puede obligar a un riego deficitario con dotaciones bastante más bajas. Por otra parte, los periodos secos pueden inducir a una mayor explotación del acuífero, provocando una reducción rápida en los niveles piezométricos.

La figura 5.12 ilustra este efecto de la precipitación sobre la bondad de ajuste, en la figura indicada mediante el error absoluto. La precipitación media es de 693 mm. Se observa como los mayores residuales tienden a producirse en los años de menor precipitación.

Este hecho justifica el ligero sesgo del modelo (PBIAS=-0.02). Si bien está dentro del rango aceptado en la literatura como aceptable (Moriassi et al., 2007), revela cierta tendencia a la sobrestimación en los valores simulados. Este sesgo se debe al mayor error (por exceso) de la simulación durante los años secos.

En relación con la incertidumbre en la capacidad predictiva del modelo, la mayor atención en el proceso de calibración debe orientarse hacia la sensibilidad de los parámetros. Las mayores incertidumbres del modelo se van a dar en relación con los parámetros más insensibles (no resueltos con el conjunto de observaciones disponibles).

## Piezómetro P 04.12.016

## Ayamonte-Lepe-Cartaya

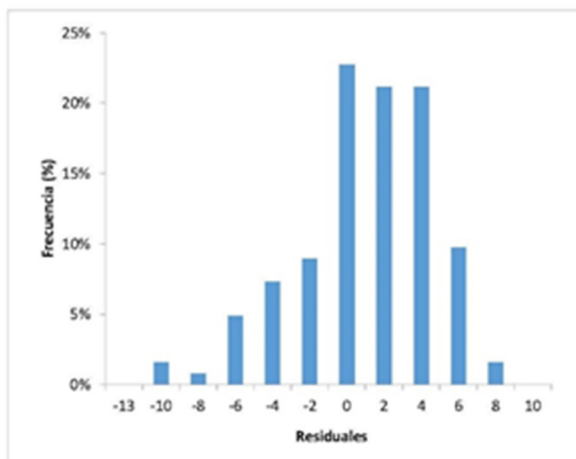
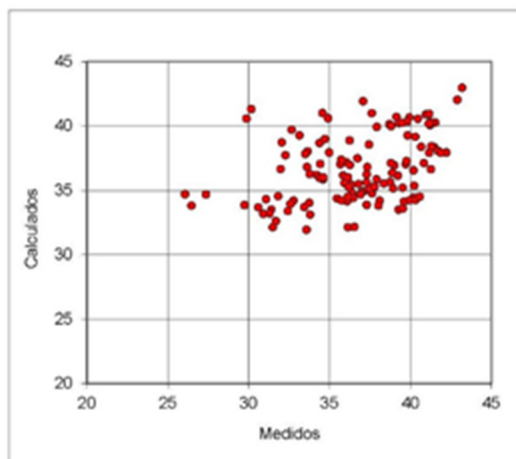
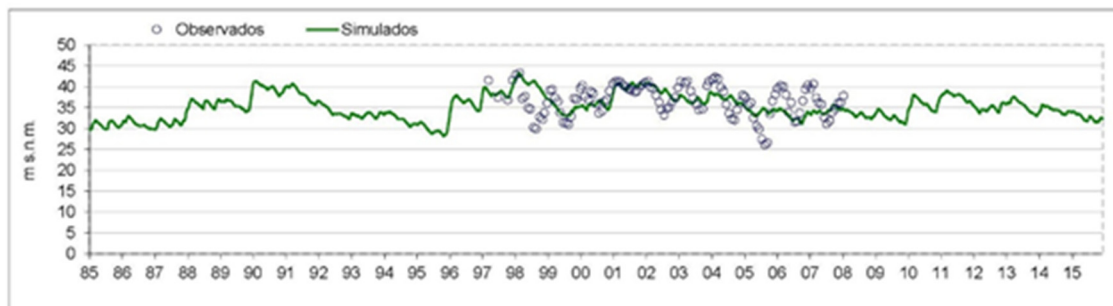
(Pestöreg)

## Parámetros optimizados

Variable	Límites intervalo 95% confianza		
	Valor	Límite inferior	Límite superior
Reserva útil R.U. (mm)	36.00	31.50	42.00
Coefficiente de infiltración CIM0 (mm/d)	2.96	2	4
Coefficiente de infiltración CIM1 (mm/d)	72.3	41	129
Coefficiente de agotamiento del acuífero (días <sup>-1</sup> )	1.00E-03	7.10E-04	1.40E-03

## Resultados del Balance (mm)

Precipitación	593
Regadío	745
Evapotranspiración	626
Escurrimiento	585
Recarga	126



## Bondad de ajuste

Promedio Calculados	36.64	MAE=	2.821
Promedio Observados	36.66	ErrMax=	11.108
R2=	0.148	NSE=	0.035
RMSE=	3.568		
PBIAS=	-0.020		

## Análisis de incertidumbre

## Matriz de coeficientes de correlación

	R.U.	cim0	cim1	alacu
Reserva útil	1	-0.1622	0.2975	-0.689
CIM0	-0.1622	1	-0.2471	0.5268
CIM1	0.2975	-0.2471	1	0.2588
Coefficiente de agotamiento del acuífero	-0.689	0.5268	0.2588	1

## Matriz de autovectores

	Vector_1	Vector_2	Vector_3	Vector_4
Reserva útil	0.7979	0.5248	-0.2921	5.07E-02
CIM0	-0.4223	0.8377	0.341	-6.02E-02
CIM1	-0.1501	5.34E-02	-0.1447	0.9766
Coefficiente de agotamiento del acuífero	0.403	-0.1414	0.8817	0.2003

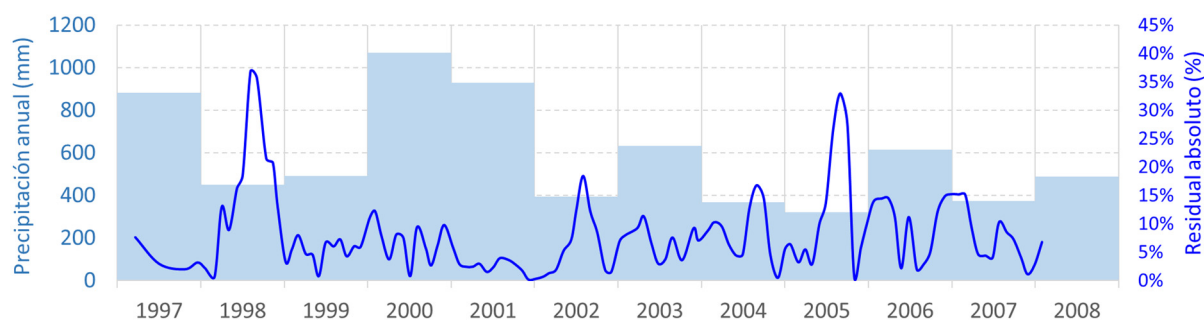
## Autovalores

2.63E-06	1.10E-03	6.25E-03	1.65E-02
----------	----------	----------	----------

## Análisis de sensibilidad

Parámetro	Valor	Sensibilidad	Sensibilidad relativa
Reserva útil	0.24	14.45	8.88
CIM0	2.97	7.68	3.63
CIM1	72.31	2.73	5.07
Coefficiente de agotamiento del acuífero	1.00E-03	7.30	21.91

Figura 5.11. Calibración y análisis de incertidumbre.



**Figura 5.12. Precipitación anual vs residuales absolutos.**

El parámetro de mayor sensibilidad es la reserva útil. De entre los coeficientes de infiltración, el inferior (CIM0) es más sensible que el superior (CIM1), circunstancia que ya se puso en evidencia en el análisis de sensibilidad previo.

La matriz de autovectores igualmente muestra la mayor insensibilidad del modelo (y por tanto incertidumbre) al coeficiente CIM1, que constituye el componente de más peso con diferencia en el vector 4 que asocia el mayor autovalor. Este parámetro y el coeficiente de agotamiento son los que mayor incertidumbre albergan.

### 5.2.3.- Resultados del Balance

Con los parámetros de ajuste obtenidos en el ejercicio de calibración se ha realizado un balance diario para la serie 1985-2015. La tabla 5.9 relaciona los parámetros del BALAN empleados.

**Tabla 5.9. Parámetros del balance hidrometeorológico.**

Componentes	Parámetros	Valores
Suelo edáfico	Porosidad	0.3
	PM (mm)	34
	CC (mm)	60
	Reserva útil (CC-PM)	36
	Espesor del suelo (m)	0.24
	k suelo mm/día	500
Escorrentía superficial	Inf máxima en CC (CIM <sub>0</sub> )	3
	Inf máxima en PM (CIM <sub>1</sub> )	72
Acuífero	alfa agotamiento acuífero	0.001
	nivel inicial (m)	30.0
	nivel referencia (m)	1.0
	porosidad acuífero	0.3

La ETP se ha implementado a partir de la serie de evapotranspiración de los cultivos (ETc) promediados para la zona. Las dotaciones de riego mensuales se han implementado a partir de las necesidades hídricas brutas (NHb) tal como se indica en el apartado 5.2.1 (Evapotranspiración de los cultivos y necesidades hídricas brutas).

Los resultados del balance promedio anual se muestran en la figura 5.13. La precipitación media anual para toda la serie analizada (1985-2015) es de 593 mm. La ETP media anual calculada es de 709 mm, y la ETR media resultante en el balance es de 626 mm. La recarga media anual para toda la serie es de 126 mm, con valores extremos en la serie simulada de 184 y 89 mm.

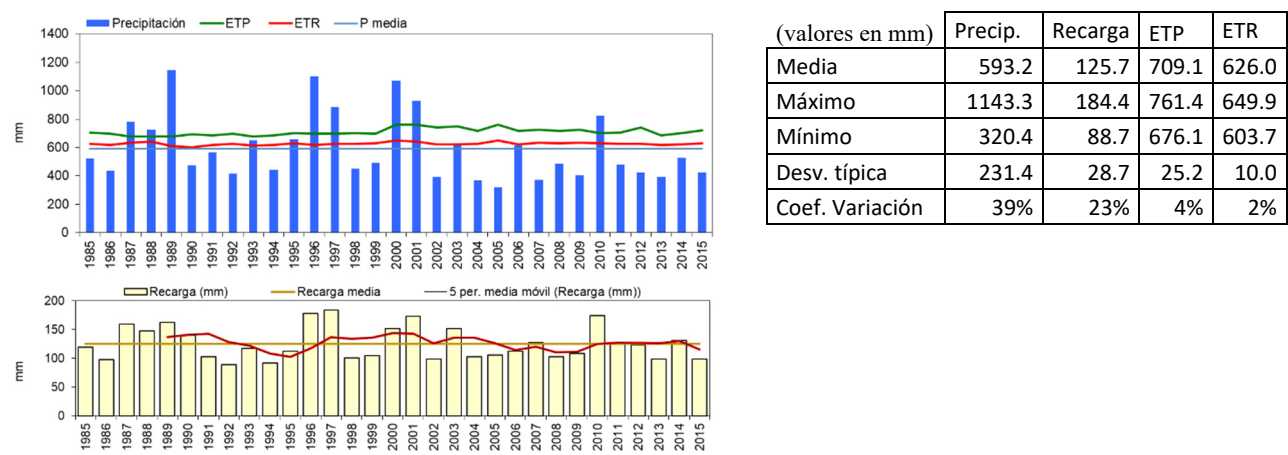
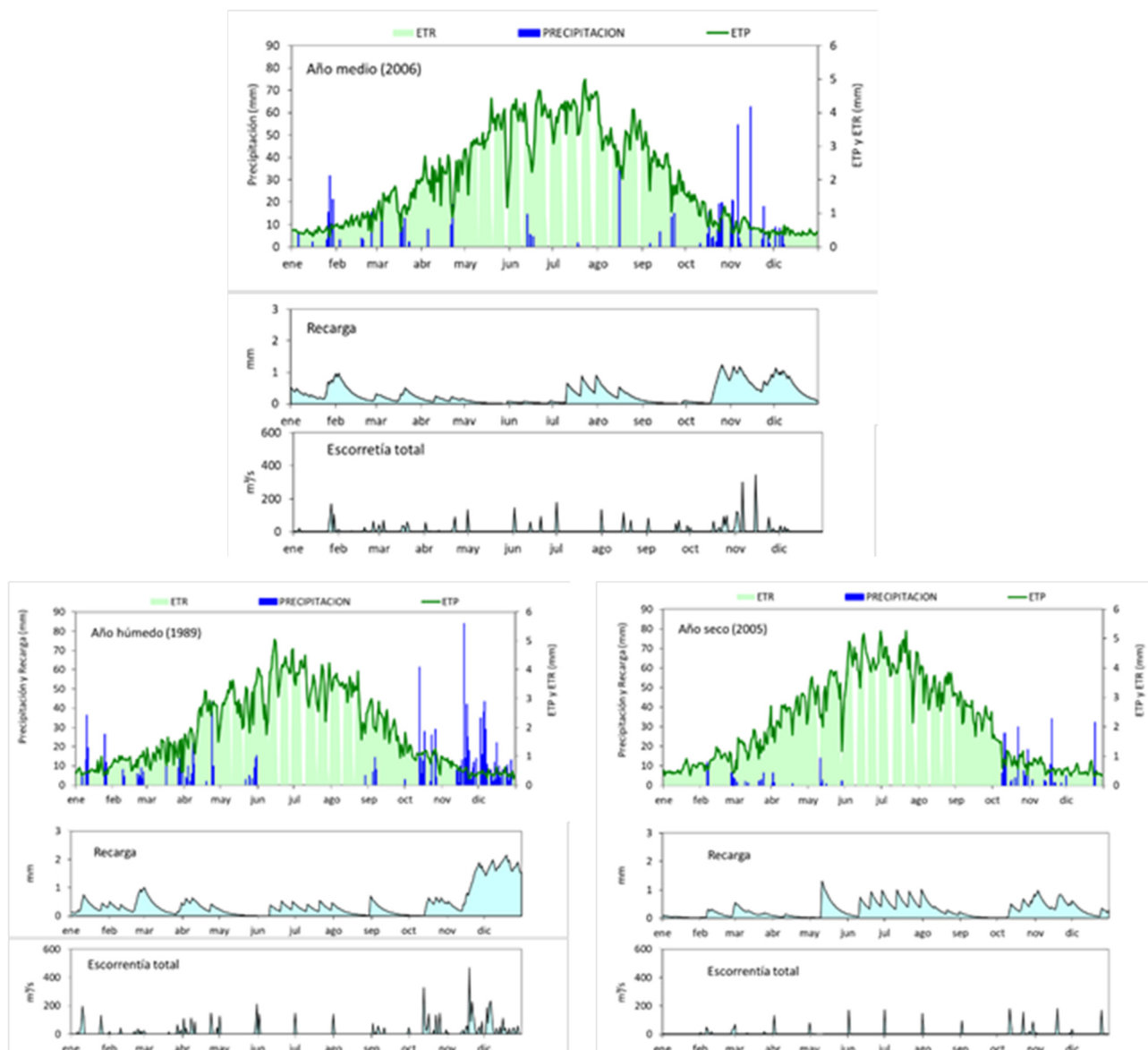


Figura 5.13. Resumen anual de los componentes del balance.

La figura 5.14 muestra con más detalle la estructura del balance diario para uno año medio (2006), húmedo (1989) y seco (2005).

En la tabla 5.10 se detalla las series mensuales de recarga simuladas para el periodo 1985/86-2014/15. Se indican en la tabla con un código de colores los años húmedos (superan el percentil 75) en azul, los secos (por debajo del percentil 25) en rojo y los años medios en verde.

En la tabla 5.11 se han transformado estos valores de recarga en hm³. Los años hidrológicos se codifican en colores con el mismo criterio que en la tabla anterior. La superficie de recarga considerada es de 501,3 km² que incluye toda la superficie de afloramiento permeable de las masas de agua subterránea de Ayamonte y Lepe-Cartaya. No obstante, hay que tener en cuenta que la recarga se ha calibrado para la zona septentrional de la masa, al N de Cartaya. La tasa de recarga efectiva en las zonas costeras meridionales podría ser significativamente inferior a la simulada.



**Figura 5.14. Balance diario para año medio (2006), año húmedo (1989) y año seco (2005).**

**Tabla 5.10. Recarga mensual en mm para la serie 1985/89 - 2014/15.**

Año	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
1985/86	0.29	7.12	15.93	16.12	18.19	10.01	1.95	0.97	6.26	7.26	11.01	4.93	<b>100.06</b>
1986/87	5.11	8.59	7.01	19.44	22.45	7.44	2.79	3.36	7.89	20.37	11.73	2.03	<b>118.22</b>
1987/88	6.79	18.27	37.07	28.38	15.97	3.26	7.23	5.34	8.75	26.18	4.91	1.77	<b>163.91</b>
1988/89	4.88	29.74	11.15	10.23	11.39	10.52	11.69	2.17	6.71	9.49	4.77	6.10	<b>118.85</b>
1989/90	9.28	25.08	54.80	24.59	6.59	7.69	8.29	8.64	11.31	15.64	7.78	0.58	<b>180.25</b>
1990/91	7.20	16.64	25.52	11.21	15.13	14.27	4.85	1.03	7.32	9.58	4.28	1.75	<b>118.76</b>
1991/92	7.69	4.62	21.21	6.98	4.86	5.61	4.65	0.22	9.26	8.91	11.07	6.37	<b>91.44</b>
1992/93	7.27	4.13	19.32	9.19	6.96	9.07	4.50	15.96	16.36	10.26	4.30	2.04	<b>109.36</b>
1993/94	13.96	19.72	4.67	14.93	10.07	7.33	7.64	1.21	7.45	9.52	4.27	1.75	<b>102.53</b>
1994/95	4.01	13.87	9.97	11.01	11.24	3.38	0.29	0.98	4.73	12.16	11.20	4.79	<b>87.63</b>
1995/96	0.23	12.58	40.03	53.37	24.83	14.80	2.20	4.52	11.03	15.63	7.78	0.71	<b>187.70</b>
1996/97	0.58	6.53	36.67	43.16	5.31	0.81	11.71	7.38	16.15	15.89	7.83	3.01	<b>155.03</b>
1997/98	9.46	30.05	33.66	19.15	22.38	2.46	1.53	7.53	15.41	15.81	7.79	3.88	<b>169.13</b>
1998/99	2.05	1.09	2.04	9.38	1.53	5.49	1.64	1.21	5.46	7.23	11.01	20.37	<b>68.50</b>
1999/00	16.39	11.43	13.39	13.37	4.21	14.73	14.04	9.66	13.22	17.95	10.58	1.65	<b>140.62</b>
2000/01	1.70	13.62	36.95	36.15	14.52	14.16	0.74	10.36	18.58	19.52	9.04	7.14	<b>182.49</b>
2001/02	16.56	13.29	13.45	14.92	5.76	11.61	8.66	2.11	6.04	17.94	10.56	0.78	<b>121.67</b>
2002/03	2.82	7.30	10.47	24.41	6.68	4.73	4.36	8.48	12.23	19.86	9.90	0.87	<b>112.09</b>
2003/04	8.48	19.76	31.84	5.58	10.69	10.33	3.73	8.65	11.39	16.87	9.83	0.45	<b>137.59</b>
2004/05	5.41	10.53	9.56	1.21	4.03	7.17	1.76	11.81	13.17	19.04	10.74	1.82	<b>96.26</b>
2005/06	9.90	17.57	7.71	11.52	11.09	7.53	4.23	1.37	1.35	11.36	11.08	1.23	<b>95.94</b>
2006/07	11.40	23.24	17.64	4.46	18.97	3.77	16.70	4.93	8.01	15.83	12.19	22.78	<b>159.93</b>
2007/08	7.38	5.58	6.65	11.55	8.40	6.87	6.58	2.63	10.34	15.98	7.49	1.42	<b>90.87</b>
2008/09	10.66	5.53	15.76	20.26	15.70	3.68	0.69	5.37	5.99	16.44	9.61	0.37	<b>110.06</b>
2009/10	7.45	4.01	18.64	38.09	27.25	25.24	5.27	3.14	4.28	9.00	7.07	0.27	<b>149.71</b>
2010/11	6.50	12.04	36.33	22.60	15.32	17.15	5.24	8.58	9.88	13.03	8.66	5.80	<b>161.14</b>
2011/12	1.54	12.51	5.19	2.75	2.83	2.79	16.44	9.92	12.04	18.53	9.47	1.95	<b>95.97</b>
2012/13	6.27	31.06	9.59	12.57	8.74	24.84	10.63	2.93	6.17	7.11	3.17	1.57	<b>124.64</b>
2013/14	6.87	5.91	8.09	19.45	25.04	5.89	11.09	6.66	5.61	10.20	8.71	3.70	<b>117.22</b>
2014/15	8.15	13.61	12.68	10.74	5.51	8.05	6.12	0.56	5.09	16.39	11.02	0.48	<b>98.42</b>
<b>Media</b>	<b>6.88</b>	<b>13.50</b>	<b>19.10</b>	<b>17.56</b>	<b>12.05</b>	<b>9.02</b>	<b>6.24</b>	<b>5.26</b>	<b>9.25</b>	<b>14.30</b>	<b>8.63</b>	<b>3.75</b>	<b>125.53</b>



**Tabla 5.11. Recarga mensual en  $hm^3$ , para una superficie de recarga de  $501.3 km^2$ .**

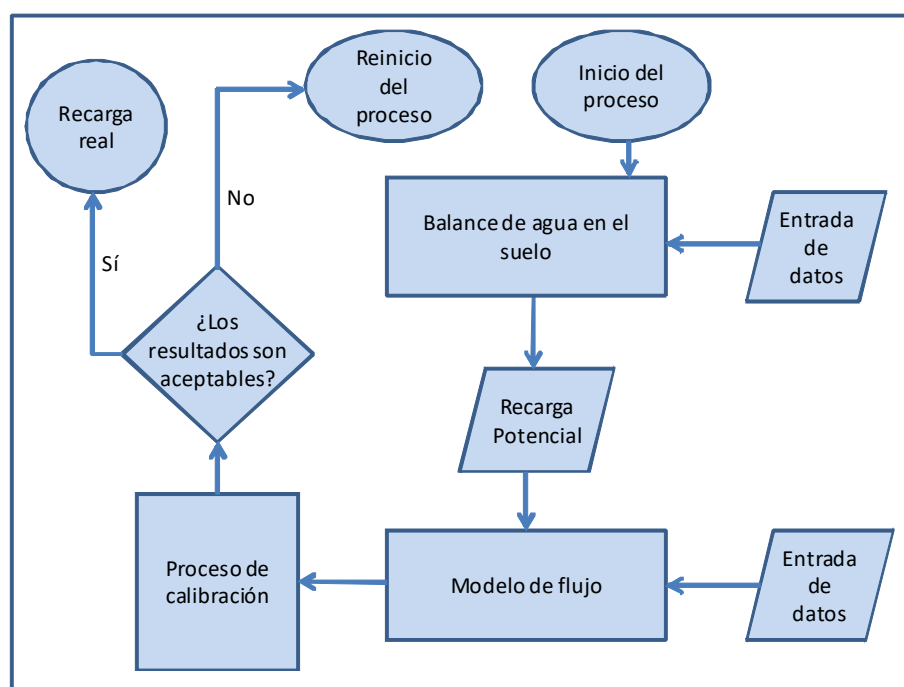
<b>Año</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Total</b>
1985/86	0.15	3.57	7.99	8.08	9.12	5.02	0.98	0.49	3.14	3.64	5.52	2.47	<b>50.16</b>
1986/87	2.56	4.31	3.51	9.75	11.25	3.73	1.40	1.68	3.96	10.21	5.88	1.02	<b>59.26</b>
1987/88	3.40	9.16	18.58	14.22	8.01	1.63	3.63	2.67	4.38	13.13	2.46	0.89	<b>82.17</b>
1988/89	2.45	14.91	5.59	5.13	5.71	5.27	5.86	1.09	3.36	4.76	2.39	3.06	<b>59.58</b>
1989/90	4.65	12.57	27.47	12.33	3.30	3.85	4.16	4.33	5.67	7.84	3.90	0.29	<b>90.36</b>
1990/91	3.61	8.34	12.79	5.62	7.58	7.15	2.43	0.52	3.67	4.80	2.14	0.88	<b>59.53</b>
1991/92	3.86	2.32	10.63	3.50	2.44	2.81	2.33	0.11	4.64	4.47	5.55	3.19	<b>45.84</b>
1992/93	3.65	2.07	9.68	4.61	3.49	4.55	2.26	8.00	8.20	5.14	2.16	1.02	<b>54.82</b>
1993/94	7.00	9.89	2.34	7.49	5.05	3.67	3.83	0.61	3.73	4.77	2.14	0.88	<b>51.40</b>
1994/95	2.01	6.95	5.00	5.52	5.63	1.69	0.15	0.49	2.37	6.09	5.61	2.40	<b>43.93</b>
1995/96	0.11	6.31	20.07	26.76	12.45	7.42	1.10	2.26	5.53	7.83	3.90	0.36	<b>94.09</b>
1996/97	0.29	3.27	18.38	21.63	2.66	0.41	5.87	3.70	8.10	7.97	3.93	1.51	<b>77.72</b>
1997/98	4.74	15.07	16.87	9.60	11.22	1.24	0.77	3.78	7.73	7.93	3.91	1.94	<b>84.78</b>
1998/99	1.03	0.55	1.02	4.70	0.77	2.75	0.82	0.60	2.74	3.62	5.52	10.21	<b>34.34</b>
1999/00	8.22	5.73	6.71	6.70	2.11	7.38	7.04	4.84	6.63	9.00	5.30	0.82	<b>70.49</b>
2000/01	0.85	6.83	18.53	18.12	7.28	7.10	0.37	5.19	9.31	9.79	4.53	3.58	<b>91.48</b>
2001/02	8.30	6.66	6.74	7.48	2.89	5.82	4.34	1.06	3.03	8.99	5.29	0.39	<b>60.99</b>
2002/03	1.41	3.66	5.25	12.24	3.35	2.37	2.18	4.25	6.13	9.96	4.96	0.44	<b>56.19</b>
2003/04	4.25	9.91	15.96	2.80	5.36	5.18	1.87	4.34	5.71	8.45	4.93	0.23	<b>68.98</b>
2004/05	2.71	5.28	4.79	0.61	2.02	3.59	0.88	5.92	6.60	9.55	5.39	0.91	<b>48.25</b>
2005/06	4.96	8.81	3.86	5.77	5.56	3.78	2.12	0.69	0.67	5.69	5.55	0.62	<b>48.09</b>
2006/07	5.72	11.65	8.84	2.24	9.51	1.89	8.37	2.47	4.02	7.93	6.11	11.42	<b>80.17</b>
2007/08	3.70	2.80	3.33	5.79	4.21	3.44	3.30	1.32	5.19	8.01	3.75	0.71	<b>45.56</b>
2008/09	5.35	2.77	7.90	10.16	7.87	1.84	0.34	2.69	3.00	8.24	4.82	0.18	<b>55.17</b>
2009/10	3.74	2.01	9.35	19.09	13.66	12.65	2.64	1.58	2.15	4.51	3.54	0.13	<b>75.05</b>
2010/11	3.26	6.03	18.21	11.33	7.68	8.60	2.62	4.30	4.95	6.53	4.34	2.91	<b>80.78</b>
2011/12	0.77	6.27	2.60	1.38	1.42	1.40	8.24	4.98	6.04	9.29	4.75	0.98	<b>48.11</b>
2012/13	3.14	15.57	4.81	6.30	4.38	12.45	5.33	1.47	3.09	3.57	1.59	0.79	<b>62.48</b>
2013/14	3.45	2.96	4.06	9.75	12.55	2.95	5.56	3.34	2.81	5.11	4.37	1.85	<b>58.76</b>
2014/15	4.09	6.82	6.36	5.38	2.76	4.04	3.07	0.28	2.55	8.22	5.53	0.24	<b>49.34</b>
<b>Media</b>	<b>3.45</b>	<b>6.77</b>	<b>9.57</b>	<b>8.80</b>	<b>6.04</b>	<b>4.52</b>	<b>3.13</b>	<b>2.63</b>	<b>4.64</b>	<b>7.17</b>	<b>4.33</b>	<b>1.88</b>	<b>62.93</b>

### 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 5.15). 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 5.15. Diagrama de flujo del código RENATA**

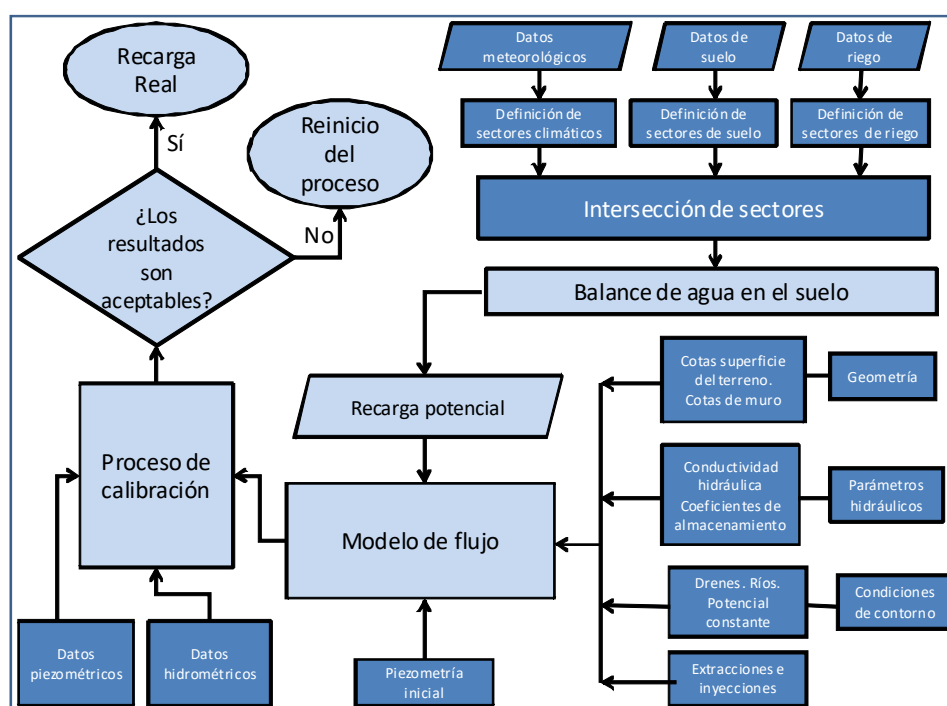
El código opera el balance de agua en el suelo de manera distribuida a partir de dividir la superficie permeable del terreno sobre la que se puede infiltrar agua en tres tipos de sectores: climáticos, suelo y riego. El proceso de cálculo permite definir y calibrar de forma distribuida un parámetro tan 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 5.16.

En el documento elaborado por DPA-IGME (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 escurrimiento superficial.



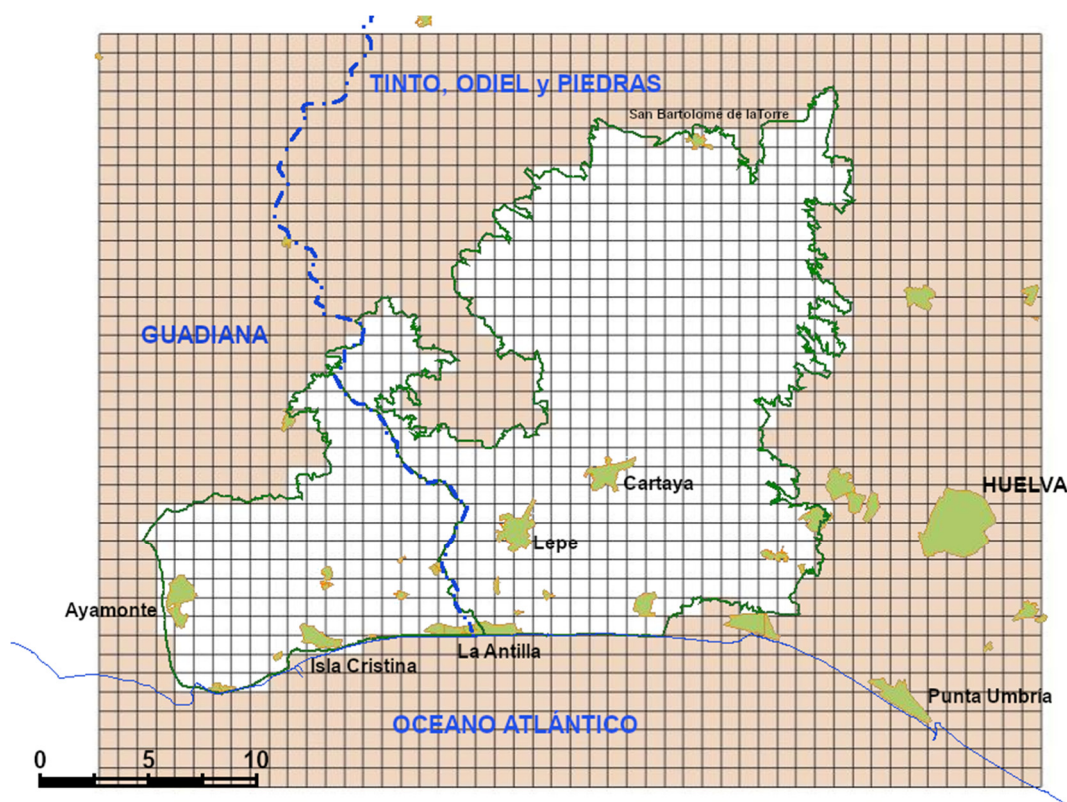
**Figura 5.16. Diagrama de flujo del código RENATA detallando los datos que se tienen que aportar al programa**

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: 105000-155000 e Y: 4118000-4158000 en la que queda enmarcada la superficie sujeta al proceso de cálculo y estimación de la recarga (Figura 5.17). La malla definida consta de 40 filas y 50 columnas con celdas de 1 km<sup>2</sup> de tamaño. Las de tipo activo (superficie permeable) ocupan una extensión de 653 km<sup>2</sup>.



**Figura 5.17. Mallado y límites del modelo para la determinación de la recarga y del funcionamiento hidráulico mediante el código RENATA (en blanco las celdas activas).**

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 permeable en superficie de la MASCH (los afloramientos detríticos de mioceno, pliocuaternario y cuaternario), la localización y cota de los puntos de agua (piezómetros) 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 5.12). En el ámbito de estudio se han generado 8 polígonos de Thiessen (Figura 5.18), a los que se han asignado series de datos de evapotranspiración potencial (*ETP*) procedentes de la estación termométrica más cercana. En la tabla 8 se muestran las características de cada uno de los sectores climáticos. Los datos de precipitación, temperatura y de *ETP* utilizados en el modelo 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.

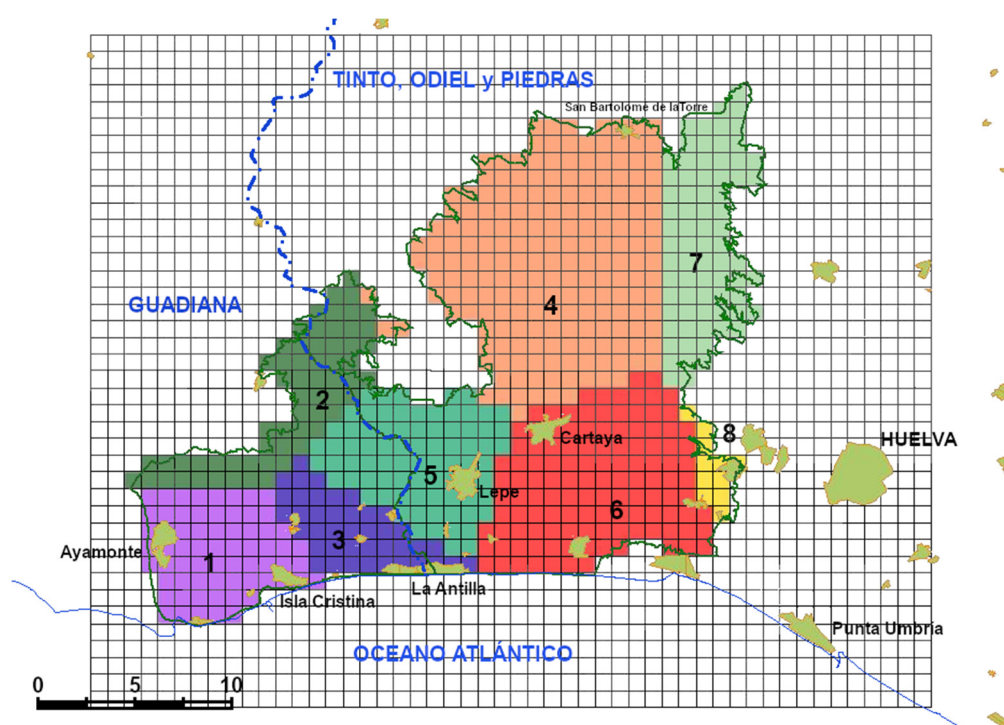


Figura 5.18. Sectores climáticos por polígonos de Thiessen ajustados al mallado

Tabla 5.12. Características de los sectores climáticos (1985/86-2014/15).

Sector climático	Estación pluviométrica	Estación termométrica	Superficie (km <sup>2</sup> )	Precipitación media (l/m <sup>2</sup> /a)	ETP media (l/m <sup>2</sup> /a)
1 Ayamonte	4548C	4548C	66	538,1	1341,5
2 Villablanca	4546	4546M	62	548,8	1371,3
3 Isla Cristina	4546M	4546M	41	529,5	1371,3
4 Cartaya	4550	4554E	199	591,6	1403,7
5 Lepe	4546I	4546M	79	518,0	1371,3
6 Pemaes	4554E	4554E	121	575,0	1403,7
7 Gibraleón	4603	4603	74	568,8	1503,8
8 Huelva	4605B	4554E	11	455,7	1403,7

### Sectores de suelo

A cada celda del modelo se le ha asignado la litología mayoritaria que aflora en el área que engloba (Figura 5.19). 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 5.13). No obstante, solo se han considerado los afloramientos permeables que intervienen en la recarga que, en este caso, son los afloramientos detríticos miocenos, pliocuaternarios y cuaternarios, que recubren la mayor parte de la MASCH. 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*).

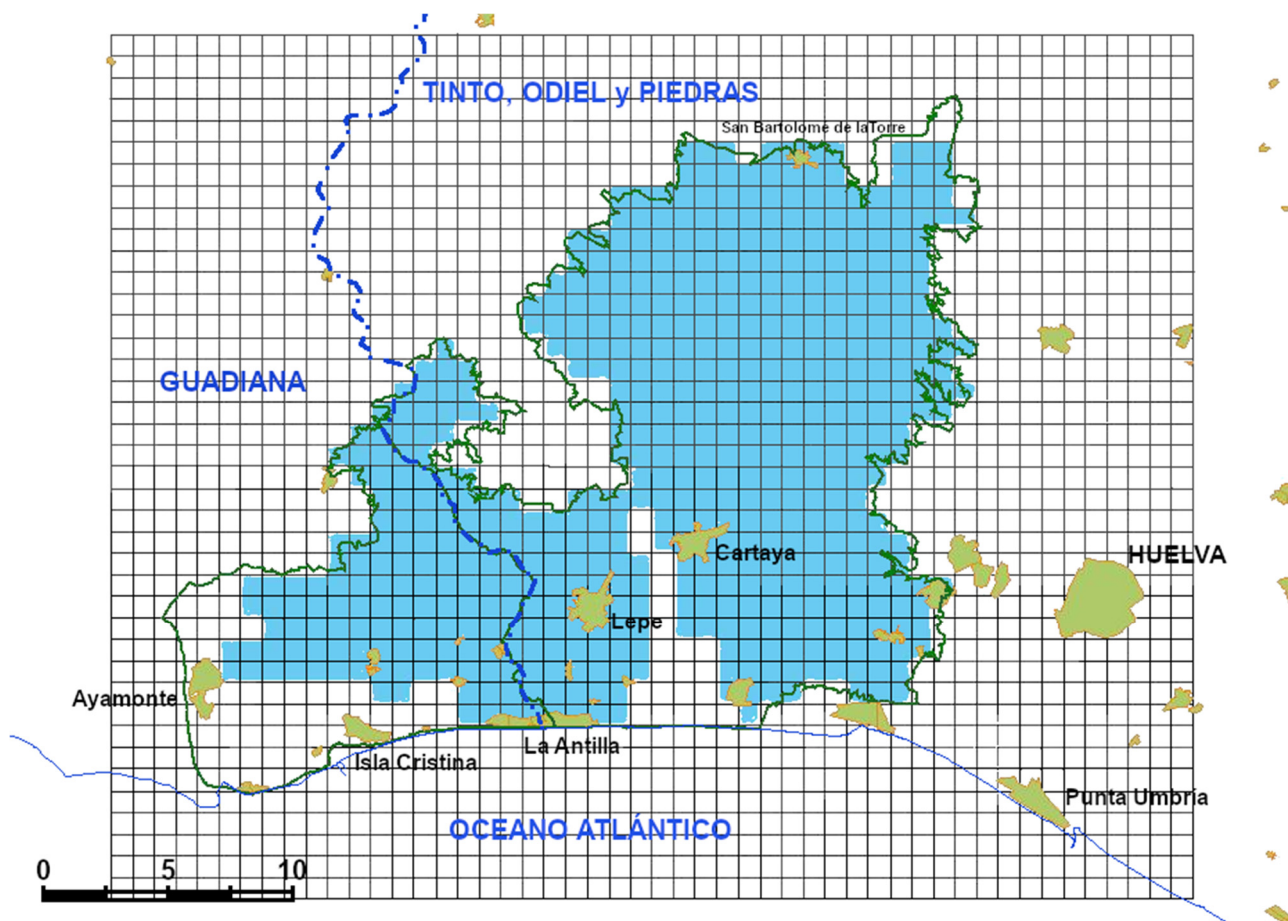


Figura 5.19.- Sectores de suelo aplicados en el código RENATA

Tabla 5.13. Sectores de suelo: parámetros utilizados

Sector de suelo	Superficie (km²)	Parámetros Calibrados
Detrítico	560	RU <sub>min</sub> =60 mm; RU <sub>max</sub> =60 mm P <sub>0</sub> =8 mm; NC=86

## Sectores de riego

La región de Ayamonte-Lepe-Cartaya se caracteriza por el uso del terreno para distintos cultivos de regadío: cítricos, fresas y similares, frutales y hortalizas. La sectorización para RENATA se ha hecho tomando como base el inventario de regadíos de 2008 de la Junta de Andalucía, se ha aplicado una dotación común basada en las previstas en los planes hidrológicos y se ha considerado un retorno



de riego del 1% de la dotación, aplicable a los materiales detríticos permeables definidos en la sectorización de suelo sobre los que hay regadíos. Las celdas que se ha tenido en cuenta para el cálculo del caudal de retorno se muestran en la figura 5.20. El retorno de riego medio calculado es de 5,01 hm<sup>3</sup>/año.

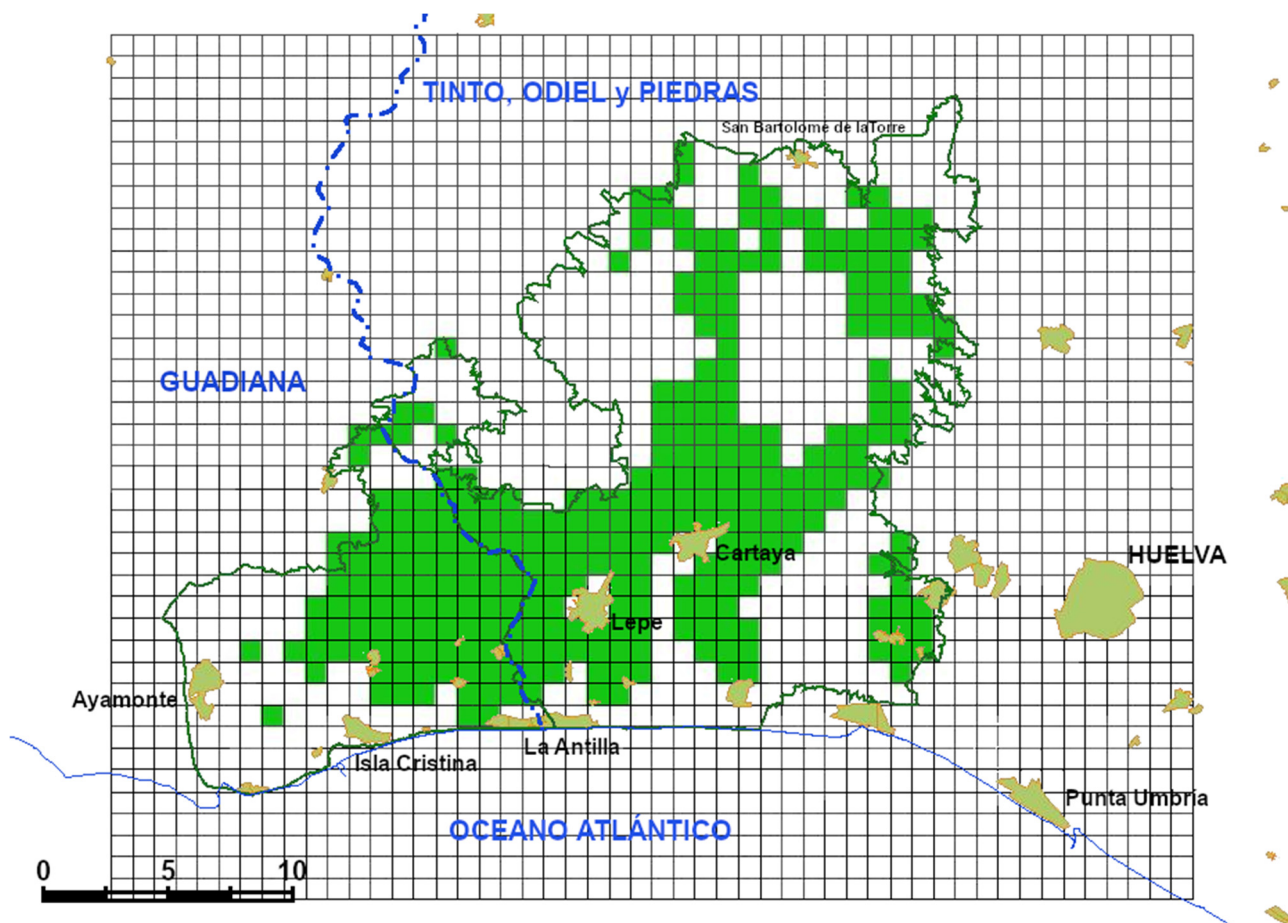


Figura 5.20.- Sector de retorno de riego definido en el código RENATA

### 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 16 áreas con distinta tasa de recarga y retorno de riego (Tabla 5.14), cuya distribución espacial se muestra en la figura 5.21. Estos sectores de recarga representan las entradas en el modelo de flujo.

Tabla 5.14. Áreas establecidas con diferente recarga.

Área	Superficie (km <sup>2</sup> )	Infiltración media (hm <sup>3</sup> /a)	Sector climático	Sector suelo	Retorno medio (hm <sup>3</sup> /a)	Sector riego
1	78	9,68	Cartaya	Detrítico	1,26	Regadío
2	117	14,51	Cartaya	Detrítico	0	---
3	32	3,78	Gibraleón	Detrítico	0	---

4	36	4,26	Gibraleón	Detrítico	0,58	Regadío
5	28	3,29	Villablanca	Detrítico	0,45	Regadío
6	25	2,94	Villablanca	Detrítico	0	---
7	51	6,76	Pemares	Detrítico	0,82	Regadío
8	72	7,60	Lepe	Detrítico	1,16	Regadío
9	51	6,76	Pemares	Detrítico	0	---
10	3	0,23	Huelva	Detrítico	0	---
11	8	0,61	Huelva	Detrítico	0,13	Regadío
12	30	3,08	I. Cristina	Detrítico	0,48	Regadío
13	5	0,53	Lepe	Detrítico	0	---
14	10	1,03	Ayamonte	Detrítico	0	---
15	8	0,82	Ayamonte	Detrítico	0,13	Regadío
16	6	0,62	I. Cristina	Detrítico	0	---
<b>Total</b>	<b>560</b>	<b>66,50</b>			<b>5,01</b>	

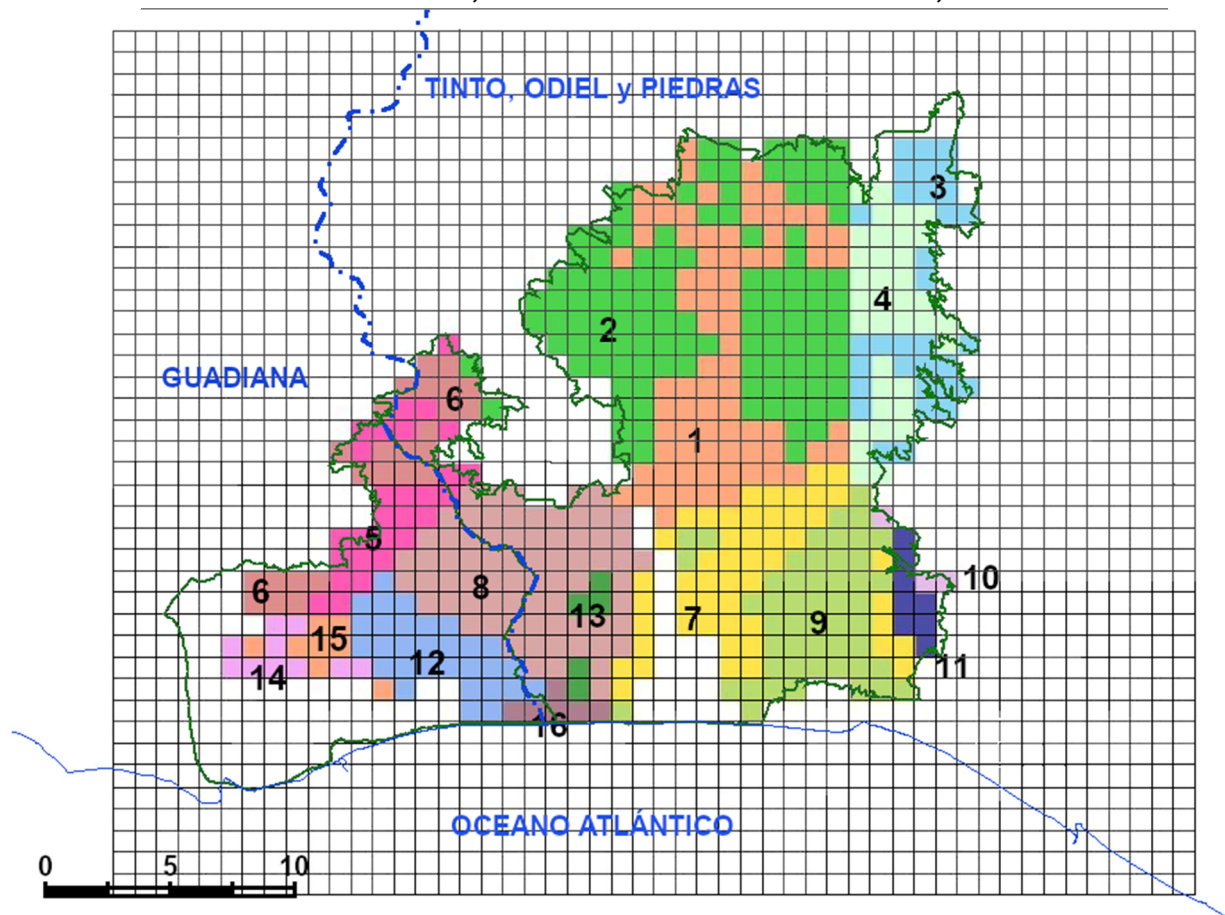


Figura 5.21. Distribución de la recarga una vez ejecutado el balance hídrico.

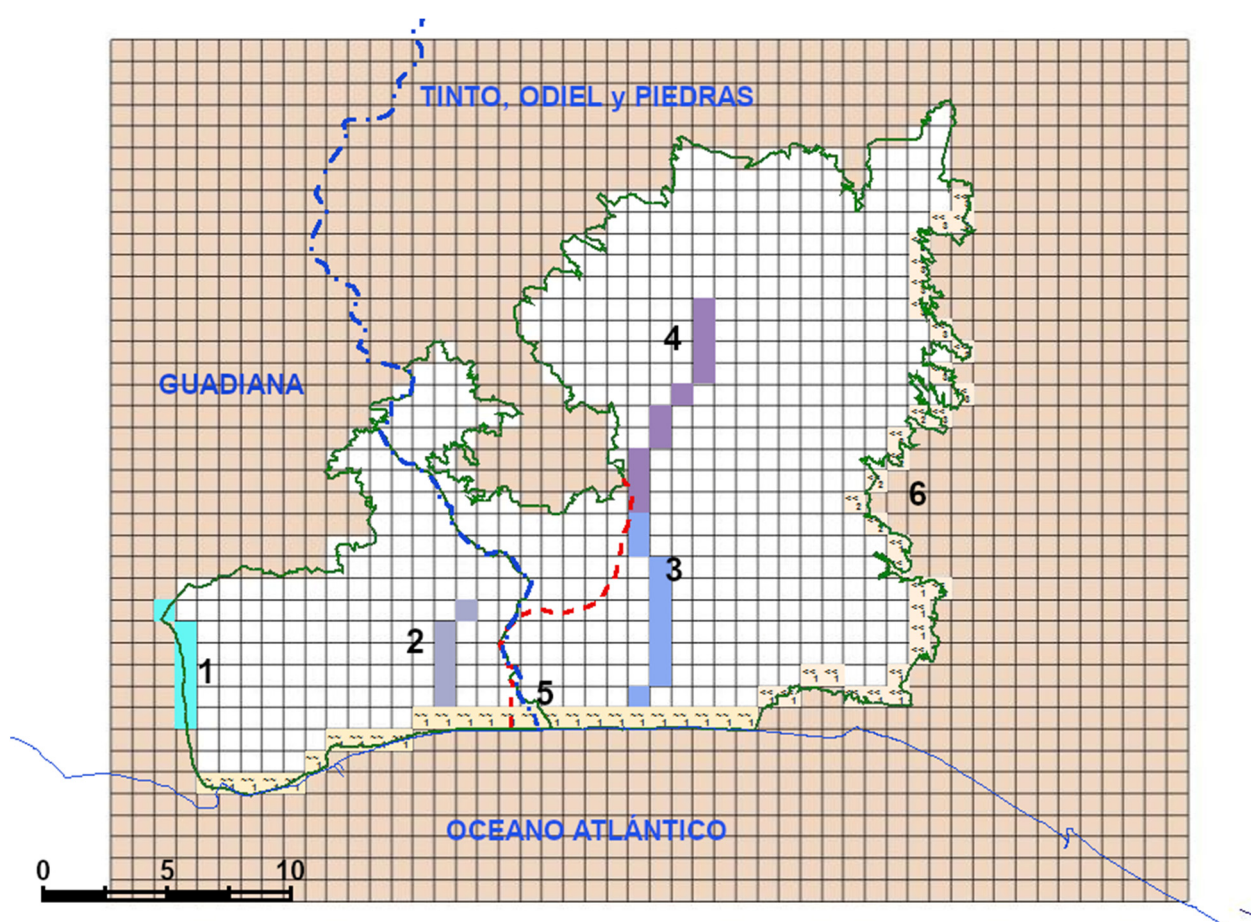
### 5.3.3. Módulo de calibración. Modelo de flujo

En este apartado se describe el diseño del modelo de simulación del flujo subterráneo (límites y geometría, parámetros hidrodinámicos, componentes y tipos de recarga, etc.), a partir del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico de las formaciones acuíferas detríticas descritas en apartados anteriores.

#### Condiciones de contorno

Todas las celdas exteriores a la superficie permeable de la formación acuífera en la que se produce la recarga, las que ocupan el sector del ámbito de estudio comprendido entre los ríos Guadiana y Piedras, se han definido como de flujo nulo.

Las salidas naturales se producen por los ríos y marismas y al océano Atlántico, estos límites se han definido como celdas de nivel constante a 0 ms.n.m, en el caso del océano Atlántico, y los ríos y arroyos principales se han simulado como celdas tipo río, mientras que las descargas hacia las marismas limítrofes del río Odiel lo han hecho como celdas de tipo dren (Figura 5.22). En tabla 5.15 se indican los valores de los parámetros de los que depende la modelización de los ríos en RENATA: las cotas máxima y mínima del río, así como un factor de recarga ( $\text{m}^2/\text{día}$ ), que se ha calculado por calibración. Por su parte, a los drenes se les han asignado cotas entre 5 y 25 m s.n.m. y una conductancia de 200  $\text{m}^2/\text{día}$ .



**Figura 5.22. Condiciones en los límites del modelo de flujo.**

En este esquema faltarían considerar, en el borde Este de la MASCH, las posibles transferencias laterales entre los depósitos detríticos a uno y otro lado del río Odiel con la vecina MASCH de Niebla-Campo de Tejada, pero para ello harían falta investigaciones adicionales adaptadas a la naturaleza de los acuíferos de la región que completen los trabajos previos realizados (Junta de Andalucía, 2015).

**Tabla 5.15. Parámetros usados en los ríos.**

Río	Cota máxima – Cota mínima (m s.n.m.)	Factor de recarga (m <sup>2</sup> /día)
1.- Río Guadiana	2 - 0	100
2.- Arroyo del Prado	10 - 0	100
3.- Río Piedras	2 - 0	3000
4.- Arroyo Tariquejo	80 - 10	100

## Geometría

La simulación con RENATA funciona considerando una sola capa. En el caso de la MASCH AyamonteLepe-Cartaya esta se ha limitado por la superficie topográfica y un muro del acuífero genérico a cota-100 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 calcular el flujo subterráneo son la conductividad hidráulica (m/día), el coeficiente de almacenamiento confinado (1/m) y el coeficiente de almacenamiento libre. Para el modelo numérico del acuífero se han establecido 5 sectores hidrogeológicos (Figura 5.23), por un lado, los materiales detríticos de mayor permeabilidad: calcarenitas y arenas del Mioceno superior (1 en la figura 5.23), arenas y margas del Plioceno (2) y conglomerados y arenas del Pliocuaternario (3) y, por otro lado, los materiales de baja permeabilidad: limos y arenas del Cuaternario (4) y afloramientos de diversa naturaleza del Paleozoico y Trías (5). En la tabla 5.16 se muestran los valores de los parámetros hidráulicos resultado de la calibración con RENATA.

**Tabla 5.16. Sectores de parámetros hidráulicos.**

Sector de parámetros hidráulicos	Superficie (km <sup>2</sup> )	Conductividad (m/día)	Coeficiente almacenamiento confinado (1/m)	Coeficiente almacenamiento libre
1 Calcarenitas	335	20	0,0005	0,05
2 Conglomerados	85	330	0,001	0,01
3 Arenas y margas	142	1	0,0009	0,0001
4 Limos y arcillas	71	0,15	1E-05	0,0001
5 Paleozoico y Trías	20	0,5	0,0001	0,0001
<b>Total</b>	<b>653</b>			



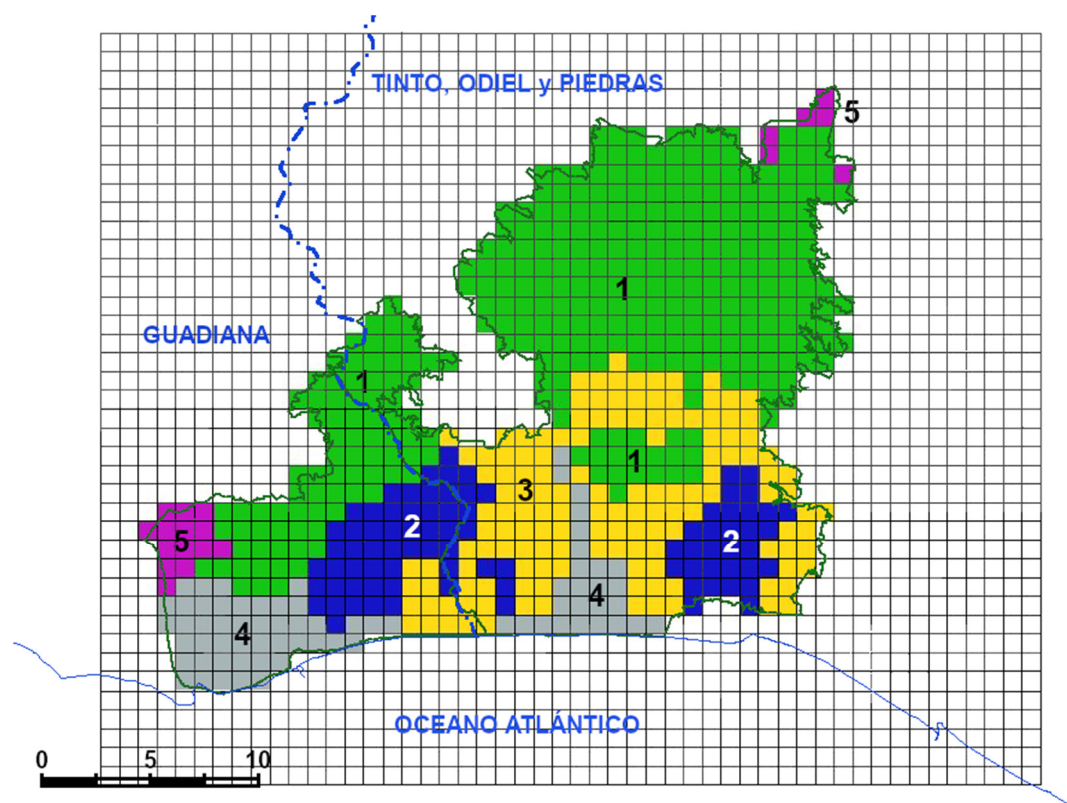


Figura 5.23. Sectores de parámetros hidráulicos.

### Extracciones

Los datos de bombeo utilizados en RENATA se han obtenido de la bibliografía descrita en el capítulo 3 (*Caracterización Hidrogeológica*). En los treinta años del periodo comprendido entre 1985/86 y 2014/15 se estima que se han extraído una media de 25,7 hm<sup>3</sup>/a (Figura 2.4), lo que supone el 35,9 % de la media de las entradas (infiltración de lluvia más retornos de regadío).

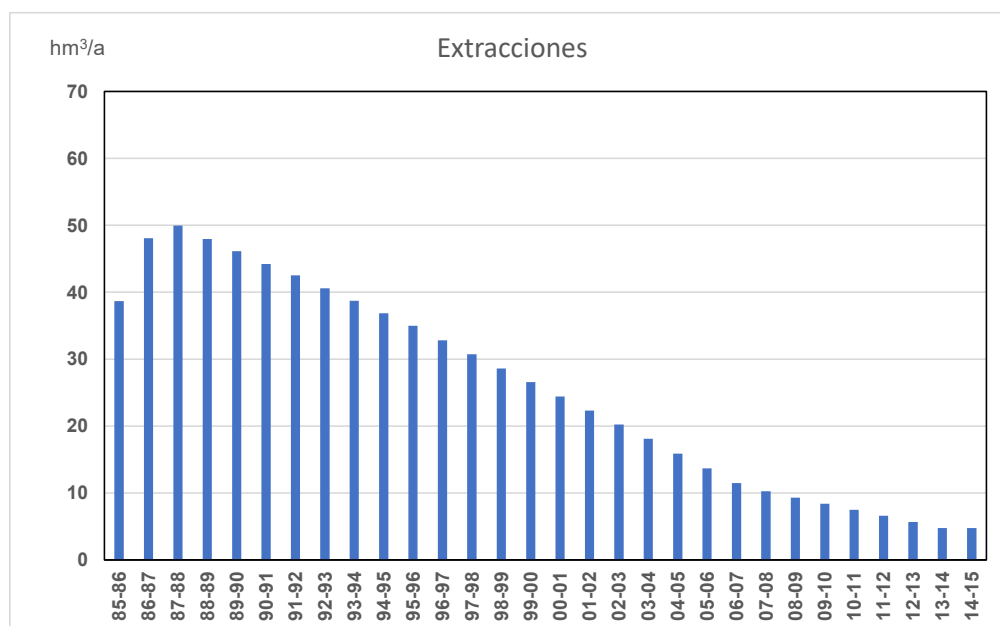


Figura 5.24. Evolución de las extracciones en la MASCH.

## 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 piezométrico con las medidas de nivel en siete piezómetros: P04.12.001, P04.12.003 y 841-3-0027, situados en la DHGu, y P04.12.007, P04.12.015, P04.12.013 y 841-4-0004, en la DHTOP.

Las celdas del modelo dónde se localizan estos puntos y el ajuste finalmente alcanzado se muestran en la figura 5.25.

Los resultados de la calibración de la piezometría son aceptables teniendo en cuenta las incertidumbres en los datos de partida. Se observan, por ejemplo, algunas discrepancias, entre los niveles piezométricos medidos y los calculados, en el periodo anterior al 2003 en los piezómetros P 04.12.001 y, especialmente, en P 04.12.003 y a partir del 1995 en el 841-3-0027, cuyo motivo debe ser la regionalización de los bombeos impuestos.

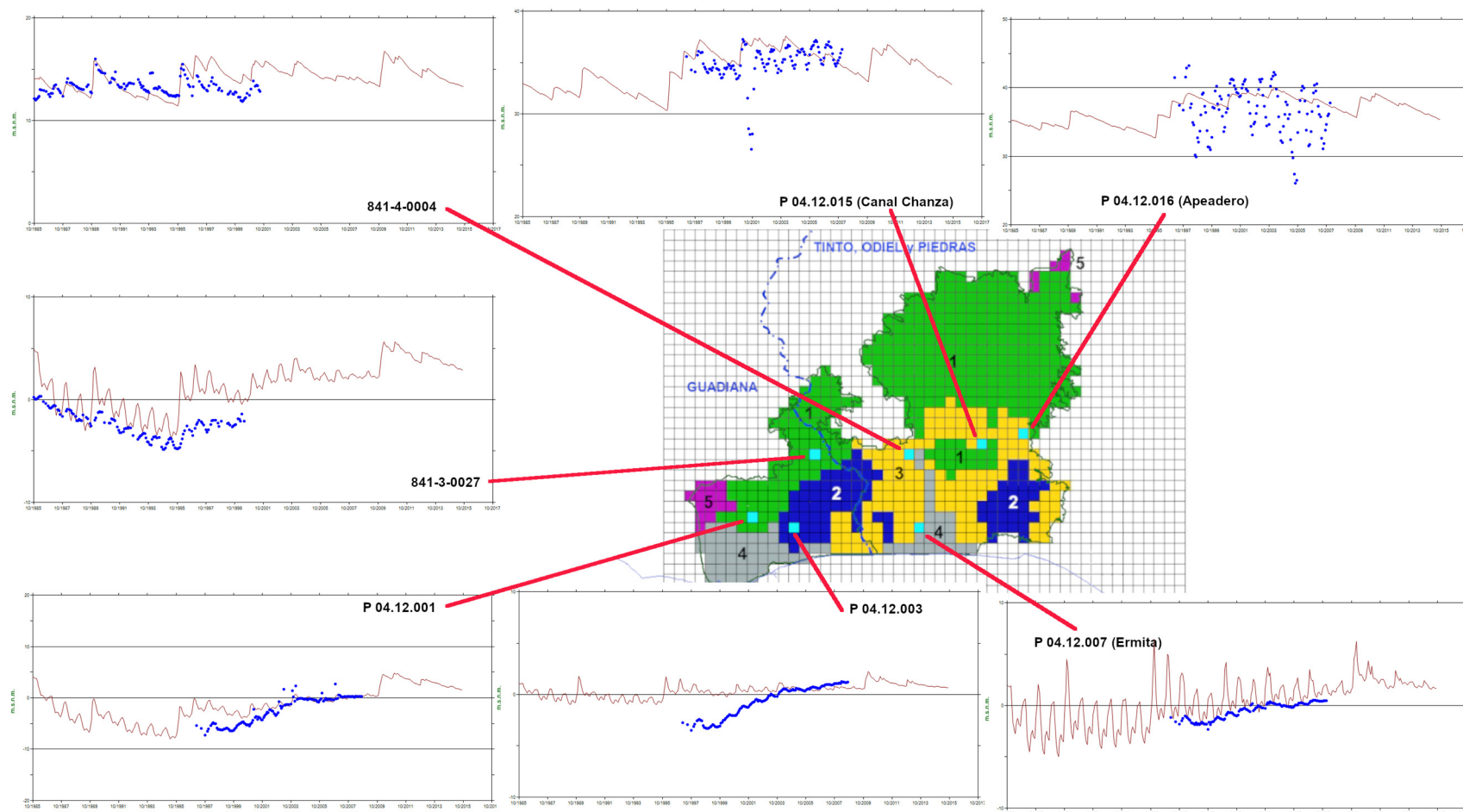
Aunque el objetivo del modelo de flujo es contrastar y validar los resultados suministrados por el módulo de balance hídrico, aquel, una vez calibrado, permite reproducir las tendencias piezométricas e hidrodinámicas en cada sector acuífero. Sin embargo, la ausencia de datos de explotación actualizados y de un esquema conceptual más preciso, recomiendan que los resultados obtenidos sean tomados con cautela.

Los resultados para el régimen transitorio se sintetizan en las tablas 5.17 y 5.18. 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 Almonte Lepe-Cartaya y distribuida por demarcaciones hidrográficas.

**Tabla 5.17. 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 <sup>2</sup> )	Parámetros	Precipitación (P) media (hm <sup>3</sup> /a)	Recarga media (R) (hm <sup>3</sup> /a)	Tasa de recarga
Detrítico	560,00	RU <sub>min</sub> =60 mm RU <sub>max</sub> =60 mm P <sub>0</sub> =8 mm NC=86	315,63	66,50	21,1%
<b>Total afloramientos permeables</b>	<b>560,00</b>		<b>315,63</b>	<b>66,50</b>	<b>21,1%</b>





**Figura 5.25. Evolución de piezometría medida y simulada en captaciones representativas.**

**Tabla 5.18. Recarga de la MASCH por demarcaciones hidrográficas (periodo 1985/86-2014/15)**

<b>Demarcación hidrográfica</b>	<b>Superficie permeable (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Precipitación (hm<sup>3</sup>/a)</b>	<b>Infiltración lluvia (hm<sup>3</sup>/a)</b>	<b>Retornos riego (hm<sup>3</sup>/a)</b>	<b>Recarga total (hm<sup>3</sup>/a)</b>
<b>Guadiana</b>	106,00	56,68	11,44	1,30	12,74
<b>Tinto, Odiel y Piedras</b>	454,00	258,95	55,06	3,71	58,77
<b>Total MASCH</b>	<b>560,00</b>	<b>315,63</b>	<b>66,50</b>	<b>5,01</b>	<b>71,51</b>

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, BALAN Y RENATA) empleados para evaluar la recarga (Tabla 6.1) oscilan entre los 81,87 hm<sup>3</sup>/a (Balance del agua) y los 62,93 hm<sup>3</sup>/a (BALAN). El código RENATA da una cifra intermedia, 71,51 hm<sup>3</sup>/a teniendo en cuenta los retornos de riego (5,01 hm<sup>3</sup>/a).

**Tabla 6.1. Valor de la recarga de la MASCH Ayamonte-Lepe-Cartaya (1985/86-2014/15)**

Método	Recarga (hm <sup>3</sup> /a)			Tasa de recarga por precipitación
	DHGu	DHTOP	Total	
<b>Balance agua</b>	16,11	65,76	<b>81,87</b>	26,2 %
<b>BALAN<sup>(1)</sup></b>			<b>62,93</b>	21,2 %
<b>RENATA<sup>(2)</sup></b>	12,74 (11,44)	58,77 (55,06)	<b>71,51</b> <b>(66,50)</b>	21,1 %

(1) *La simulación se ha realizado para la totalidad de la MASCH*

(2) *Incluye retornos de riego. Entre paréntesis, infiltración de agua de lluvia.*

Cada método está aplicado a una superficie más o menos equivalente de materiales permeables, algo inferior en BALAN, 501 km<sup>2</sup>, frente a los 560 km<sup>2</sup> de los otros dos.

Los resultados que se han obtenido en el cálculo de la recarga a la MASCH mediante el balance de agua en el suelo difieren significativamente de BALAN y RENATA; da un valor de recarga (81,87 hm<sup>3</sup>/a) superior a los otros dos métodos y una tasa de recarga también superior (26,2 %). BALAN y RENATA aportan valores de recarga muy similares entre sí en cuanto a tasa de recarga (21,2 y 21,1 % respectivamente), sin embargo, en BALAN la tasa de infiltración se ha calculado para la totalidad de la MASCH y se aplica de forma uniforme sobre la misma sin tener en cuenta la distribución espacial de las precipitaciones. 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.

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 proporcionada por RENATA para la MASCH Ayamonte-Lepe-Cartaya (periodo 1985/86-2014/15) es de 66,50 hm<sup>3</sup>/a (Tabla 1). De este volumen, 11,44 hm<sup>3</sup>/a (17,2 %) se generan en territorio adscrito a la DHGu y 55,06 hm<sup>3</sup>/a (82,8 %) en el administrado por la DHTOP.

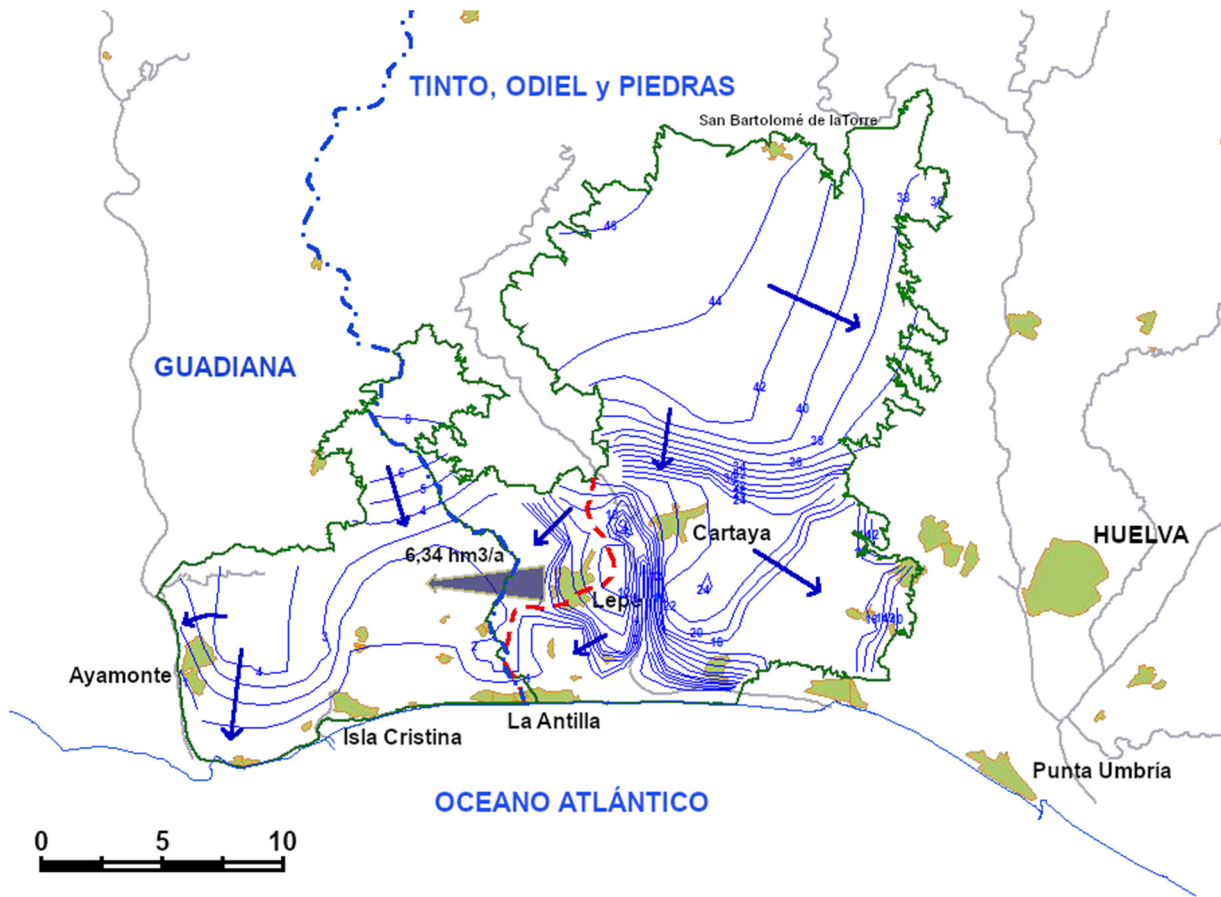
**Tabla 7.1. Balance hídrico en régimen natural estacionario de la MASCH por demarcaciones hidrográficas**

Demarcación hidrográfica	Recarga total (hm <sup>3</sup> /a)	%	Salidas ríos y marismas (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas mar (hm <sup>3</sup> /a)	Total salidas (hm <sup>3</sup> /a)	%	Transfer. (hm <sup>3</sup> /a) <sup>(1)</sup>
Guadiana	11,44	17,2	0,08	17,71	17,78	26,7	6,34
Tinto, Odiel y Piedras	55,06	82,8	45,42	3,29	48,72	73,3	-6,34
<b>Total MASCH</b>	<b>66,50</b>	<b>100</b>	<b>45,50</b>	<b>21,00</b>	<b>66,50</b>	<b>100</b>	<b>0</b>

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

Por lo que respecta a las salidas, la mayor parte del flujo subterráneo (casi el 97 %) se dirige hacia ríos y marismas y el resto hacia el Océano Atlántico (Tabla 7.1), aunque también, como es el caso de las MASb Ayamonte, pasando antes por zona de marismas. Una parte importante de las descargas de la MASb Lepe-Cartaya (cerca de un 65%) se dirigen hacia los aluviales y marismas asociados al río Odiel. En la DHGu se produce el 26,7% de las salidas, porcentaje superior al de su recarga. Esta diferencia se compensa con una transferencia anual media de 6,34 hm<sup>3</sup>/a que procede de la DHTOP.

En la figura 7.1 se puede observar como la trayectoria de las direcciones de flujo está condicionada por las descargas a cursos fluviales y zonas de marisma, también como la posición de las divisorias hidrográfica e hidrogeológica son claramente distinta: la hidrogeológica está desplazada respecto a la hidrológica hacia el Este. Debido a la posición que ocupa la divisoria hidrogeológica, los balance hídrico de los sectores correspondientes a las demarcaciones hidrográficas del Guadiana y Tinto-Odiel-Piedras se encuentran equilibrados.



**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 MASb.**

## 8. BALANCE HÍDRICO EN RÉGIMEN ALTERADO

El funcionamiento hidrogeológico en régimen alterado de la MASCH Ayamonte-Lepe-Cartaya (periodo 1985/86-2014/15), así como la evolución histórica de sus variables de estado, se ha simulado con la inclusión de la serie de recargas antrópicas generadas por los retornos de riego y 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 notablemente diferente al del régimen natural debido en parte a los retornos de riego (5,01 hm<sup>3</sup>/a) y, fundamentalmente, a las explotaciones (24,64 hm<sup>3</sup>/a), lo que ha provocado que las descargas disminuyan de 66,5 hm<sup>3</sup>/a a 48,7 hm<sup>3</sup>/a, produciéndose a lo largo de los 30 años analizados una variación absoluta del almacenamiento de índole decreciente de 54,5 hm<sup>3</sup>.

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

Demarcación hidrográfica	Recarga precipit.. (hm <sup>3</sup> /a)	Retorno riego (hm <sup>3</sup> /a)	Variación del almacenam. miento (hm <sup>3</sup> /a)	Aportes totales (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas ríos y marismas (hm <sup>3</sup> /a)	Salidas mar (hm <sup>3</sup> /a)	Explotac. (hm <sup>3</sup> /a)	Total salidas (hm <sup>3</sup> /a)	Transf. Subt. <sup>(1)</sup> (hm <sup>3</sup> /a)
Guadiana	11,44	1,30	0,66	13,40	-0,05	1,5	18,67	20,12	6,72
Tinto, Odiel y Piedras	55,06	3,71	1,15	59,92	47,02	0,21	5,97	53,20	-6,72
<b>Total MASCH</b>	<b>66,50</b>	<b>5,01</b>	<b>1,81</b>	<b>73,32</b>	<b>46,97</b>	<b>1,71</b>	<b>24,64</b>	<b>73,32</b>	<b>0</b>

(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 decreciente del almacenamiento por demarcaciones hidrográficas en régimen influenciado (1985/86-2014/15) para la MASCH**

Demarcación hidrográfica	Total recarga	Tasa de explotación <sup>(1)</sup>	Variación del almacenamiento <sup>(2)</sup>
Guadiana	18 %	147 %	36 %
Tinto, Odiel y Piedras	82 %	10 %	64 %
<b>Total MASCH</b>	<b>100 %</b>	<b>34 %</b>	<b>100 %</b>

(1) Extracciones respecto de la recarga

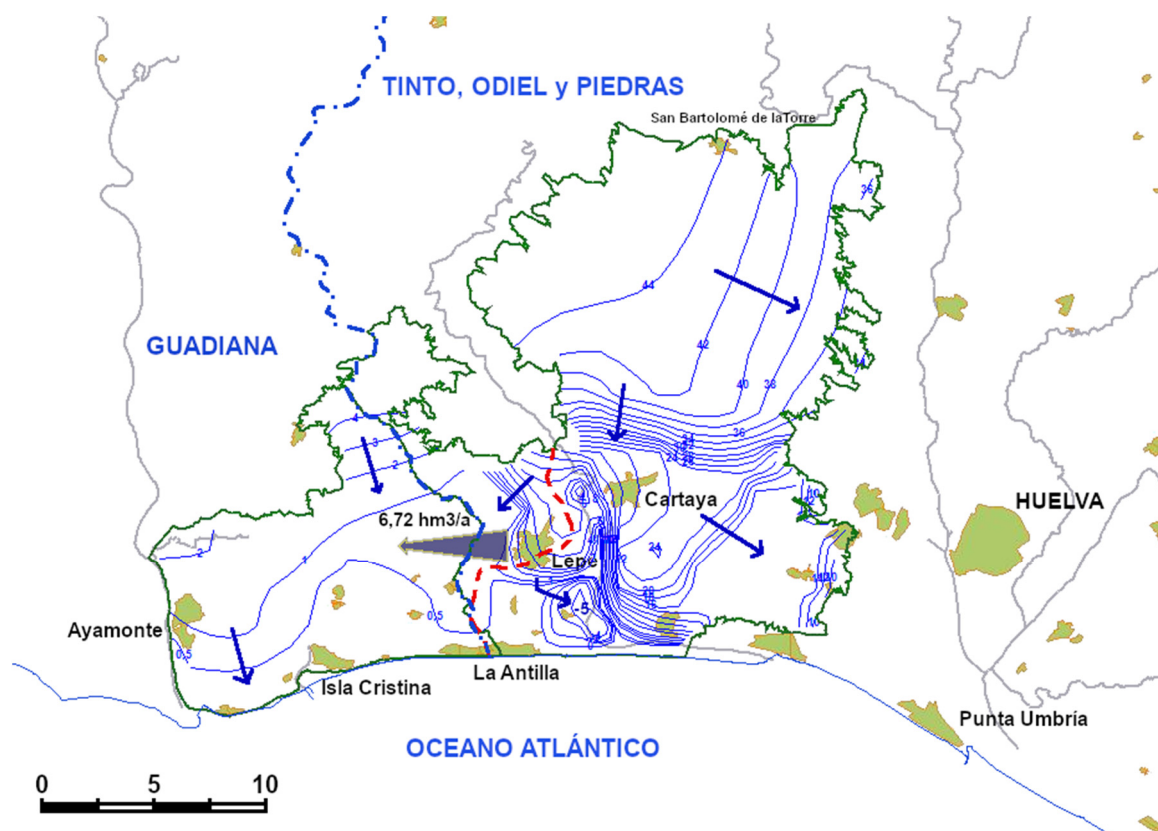
(2) Porcentaje de variación decreciente del almacenamiento en cada demarcación hidrográfica respecto de la variación total que tiene lugar en la MASCH.

La situación promedio de los 30 años simulados no es reflejo de la actual, ya que el uso de las aguas subterráneas se ha ido sustituyendo paulatinamente por aguas superficiales según ha ido entrando en funcionamiento la red de embalses del sistema Chanza-Piedras.

Como se puede ver en la figura 8.1, la disposición de las isopiezas en régimen influenciado al final del periodo (septiembre del 2015) es bastante parecida a la del régimen natural, aunque aparecen pequeños conos de depresión ligados a bombeos situados cerca de la línea de costa que pueden instruir agua de mar. En el área Sur y Oeste, en el sector adscrito a la DHGu, se aprecia un descenso

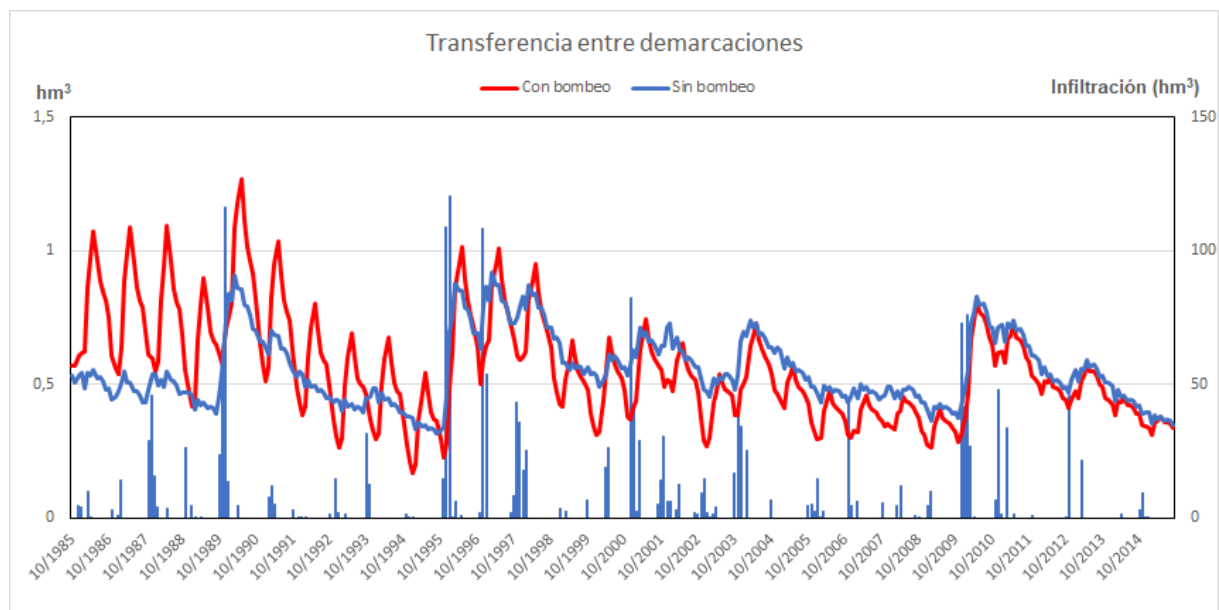


de los niveles de unos 2 metros respecto al régimen natural, aunque 6 a 7 m superior al que existía antes de que entrara en funcionamiento el sistema Chanza-Piedras, momento en el que se detectaban cotas piezométricas muy por debajo del nivel del mar.



**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 MASb. Final del periodo de simulación (septiembre del 2015).**

En la figura 8.2 se representa la simulación de la transferencia de agua, desde la DHTOP a la DHGu, que proporciona RENATA en régimen transitorio con y sin bombeos. Como puede apreciarse en dicha figura, la transferencia entre demarcaciones se encuentra directamente relacionada con el desfase temporal que tiene lugar respecto a la infiltración (eje vertical secundario) y, a partir del año 2000, también se puede observar que la influencia del bombeo es cada vez menor, hasta ser prácticamente inapreciable.



**Figura 8.2. Transferencia entre demarcaciones (1985/86 a 2014/15) en régimen transitorio con y sin bombeos.**

## 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.*

En la tabla 9.1 se muestra una comparativa de la distribución de la recarga en régimen natural (solo precipitación) y en régimen alterado (precipitación y retorno de riego) para la MASCH de Ayamonte-Lepe-Cartaya, según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a las demarcaciones del Tinto, Odiel y Piedras y del Guadiana. De la observación de la tabla se desprende que la recarga, tanto en régimen natural como influenciado, se distribuye de diferente manera según se considere la cuenca hidrográfica o la hidrogeológica.

Atendiendo a la divisoria hidrográfica, el 82,8 % de la recarga en régimen natural y el 82,2 % en influenciado se generan en el ámbito de la DHTOP y el 17,2 % y 17,8 %, respectivamente, en la DHGu. Si se atiende a la divisoria hidrogeológica, las cifras cambian, ya que aquella se desplaza respecto a la hidrológica hacia la DHTOP. Así, el 73,3 % o el 72,8 %, según que el régimen considerado sea el natural o el influenciado, se genera en la DHTOP, y el 26,7 % o el 27,2 %, respectivamente, en la DHGu. La diferencia entre considerar una divisoria u otra es lo que da lugar a que en las tablas 7.1, 7.2 y 7.3 sea necesario considerar la existencia de transferencias

subterráneas desde la DHTOP a la DHGu con cuantías de 6,34 hm<sup>3</sup>/a en régimen natural y 6,72 hm<sup>3</sup>/a en régimen influenciado

**Tabla 9.1. Comparativa de la distribución de los recursos hídricos subterráneos renovables en régimen natural y en régimen influenciado en la MASCH Ayamonte Lepe-Cartaya según las divisorias hidrográfica e hidrogeológica correspondientes a las cuencas del Guadiana y Tinto, Odiel y Piedras. Variaciones absolutas y porcentuales.**

Régimen de funcionamiento hídrico	Distribución de recursos renovables <sup>(a)</sup> según	(1) Cuenca Guadiana (hm <sup>3</sup> /a)	(2) Cuenca Tinto, Odiel y Piedras (hm <sup>3</sup> /a)	(3) MASCH (hm <sup>3</sup> /a)
<b>Natural</b>	Divisoria hidrográfica	11,44 (17,2%)	55,06 (82,8%)	<b>66,50</b>
	Divisoria hidrogeológica	17,78 (26,7%)	48,72 (73,3%)	
<b>Influenciado</b>	Divisoria hidrográfica	12,74 (17,8%)	58,77 (82,2%)	<b>71,51</b>
	Divisoria hidrogeológica	19,46 (27,2%)	52,05 (72,8%)	

(a) De acuerdo con la IPH (2008): recurso hídrico renovable y recarga son conceptos equiparables.

## 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 con continuidad hidrogeológica denominada como **Ayamonte Lepe-Cartaya** engloba las MASb Ayamonte 040.020 de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana (DHGu) y Lepe-Cartaya 030.594 de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras (DHTOP).
- Se reconocen dos acuíferos principales dispuestos geoméricamente uno sobre el otro en secuencia sedimentaria: uno inferior de naturaleza confinada y otro superior libre. Están formados por materiales detríticos del Mioceno superior, Pliocuaternalio y Cuaternario.
- La precipitación media estimada para la MASCH en el periodo 1985/86-2014/15 es de 525 mm y varía entre 200 y 1250 mm.
- La recarga a los acuíferos se produce por infiltración directa del agua de lluvia sobre los materiales permeables y, en menor medida, por retornos de agua de riego. Las salidas se producen hacia el Océano Atlántico, de forma difusa hacia marismas y cauces y una posible transferencia lateral desde el acuífero inferior hacia la MASb de Niebla (30593) colindante por el Este. Las extracciones por bombeo suponen en la actualidad, aproximadamente, un 11% de los recursos medios anuales.
- La recarga de la MASCH Ayamonte-Lepe-Cartaya (1985/86-2014/15) se ha determinado por tres métodos: Balance de agua en el suelo, BALAN y RENATA. Con dichos métodos se han obtenido valores de 81,87, 62,93 y 71,51 hm<sup>3</sup>/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 en las reservas 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.
- Los recursos renovables de la MASCH en régimen natural se estiman, atendiendo a la IPH (2008) que los considera asimilables a la recarga, en 66,50 hm<sup>3</sup>/a (periodo 1985/86 a 2014/15), de ellos 11,44 hm<sup>3</sup>/a (17,2 %) se generan en territorio adscrito a la DHGu y 55,06 hm<sup>3</sup>/a (82,8 %) en el administrado por la DHTOP

- La mayor parte del flujo subterráneo en régimen natural (casi el 97 %) se dirige hacia ríos y marismas y el resto hacia el Océano Atlántico. En la DHGu tienen lugar el 26,7% de las salidas, porcentaje superior al de la recarga que tiene lugar sobre la misma. Esta diferencia entre entradas y salidas se compensa por medio de una transferencia anual media de agua subterránea de 6,34 hm<sup>3</sup>/a que procede de la DHTOP.
- En régimen influenciado dado que los retornos de riego se evalúan en 5,01 hm<sup>3</sup>/a, los recursos renovables se elevan a 71,51 hm<sup>3</sup>/a. De esta cantidad 12,74 hm<sup>3</sup>/a (17,8 %) se originan en la DHGu y 58,77 hm<sup>3</sup>/a (82,2 %) en la DHTOP
- Las extracciones medias, aunque de difícil cuantificación por la escasez de datos, se han estimado a partir de fuentes bibliográficas en 25,70 hm<sup>3</sup>/a de media para el periodo 1985/86-2016/17, de las que, 18,67 hm<sup>3</sup>/a (72,6 %), se extraen en el ámbito de la DHGu y, el resto, 7,03 hm<sup>3</sup>/a (27,4 %) en la DHTOP.
- La intensa explotación realizada en la MASCH durante años provocó que las descargas naturales se redujeran de 66,5 hm<sup>3</sup>/a a 48,7 hm<sup>3</sup>/a, dando lugar a lo largo de los 30 años analizados a una variación absoluta del almacenamiento de índole decreciente de 54,5 hm<sup>3</sup>. Esta se distribuyó en 34,5 hm<sup>3</sup> (63,5 %) en la DHTOP y 19,8 hm<sup>3</sup> (36,5 %) en la DHGu.
- Desde que el sistema Chanza-Piedras entró en servicio, las extracciones de aguas subterráneas han disminuido. La tendencia observada durante los últimos 7 años simulados (2008/09-2014/15) ha sido de aproximadamente de 1 hm<sup>3</sup>/a.
- La tasa de explotación global de la MASCH en los 30 años analizados es del 36 %, por lo que se puede considerar sostenible, aunque la DHGu presentaba una situación preocupante (147 %), que contrastaba con la existente en la DHTOP donde la tasa de explotación tan solo era del 10 %.
- La transferencia de agua subterránea entre demarcaciones hidrográficas es de 6,34 hm<sup>3</sup>/a en régimen natural y 6,72 hm<sup>3</sup>/a en influenciado (periodo 1985/86-2014/15). El sentido de dicha transferencia es desde la DHTOP hacia la DHGu. Respecto a la posición de la divisoria hidrogeológica se compensan dichas transferencias, no teniendo lugar transferencia de flujo, ya que parte del territorio, unos 55 km<sup>2</sup>, de la DHTOP pasa a formar parte de la DHGu



## REFERENCIAS

- Cáceres, L. M. (1995): Geomorfología del sector occidental de la depresión del Guadalquivir. Tesis doctoral. Universidad de Huelva. 245 pp.
- CHGA (2007): Mejora del conocimiento hidrogeológico de las unidades de la zona Sur de la cuenca del Guadiana. Confederación Hidrográfica del Guadiana. Documento de Síntesis. 60 pp. Informe inédito.
- Civis, J., Sierro, F. J., González-Delgado, J. A., Flores, J. A., Andres, I., Porta, J. y Valle, M. F. (1987): El Neógeno marino de la Provincia de Huelva: antecedentes y definición de sus unidades litoestratigráficas. En: Paleontología del Neógeno de Huelva (W Cuenca del Guadalquivir). Ediciones de la Universidad de Salamanca. Pag. 9-21.
- DGA (2005): Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias. Tomo II. Dirección General del Agua. Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente. 628 pp.
- DGOH (1989): Estudio de la viabilidad de la recarga artificial en el acuífero Ayamonte-Huelva. Informe 12/89. Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. 77 pp. y 12 planos.
- 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.
- Donaire, T., Alonso Chaves, F.M., García Navarro, E., González Barrionuevo, F., González Roldán, M.J., Mantero Romero, E.M., Moreno Garrido, M.C., Pascual Martínez, E., Ruiz de Almodóvar Sel, G., Sáez Ramos, R., Sierra del Pino, S., Toscano Macías, M., Valenzuela Aznar, A. (2008): En: Olías Álvarez, M., et al.: "Geología de Huelva : lugares de interés geológico". 2ª ed. Universidad de Huelva. págs. 14-19.
- FAO-IGME (1975): Estudio hidrogeológico de la Cuenca del Guadalquivir. España. Hidrogeología. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Roma.
- Galván-González (2011): Modelización hidrológica del río Odiel: aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas. Tesis doctoral. Universidad de Huelva. 447 pp.
- Gea, R. et al. (1965): Exploración de agua subterránea en la provincia de Huelva. Zona número 1. Plan General de Exploración de Aguas Subterráneas. INC. 186 pp. 7 anejos. Aero Service Ltd. Madrid (informe inédito).
- Girard, G., Ledoux, E. et Villeneuve, J. P. (1981). Le modèle couple: simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, XVIII.
- González, A. (1984): Hidrogeología de la región suroccidental de la provincia de Huelva. Tesis doctoral. Universidad de Granada. 507 pp.
- Hargreaves, G.H y Samani, Z.A. (1985): Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1, 96–99.

- IGME (1975): Investigación hidrogeológica de la cuenca del Guadalquivir. Plan Nacional de Abastecimientos Públicos. Informes y notas técnicas. Inventarios de puntos acuíferos (informe inédito).
- IGME (1976): Evolución de niveles piezométricos en los sistemas acuíferos. Cuenca del Guadalquivir (informe inédito).
- IGME (1983): Mapa hidrogeológico de España a escala 1:200.00. Hoja 80-81 (Ayamonte-Huelva). 11 pp. 1 plano. Servicio Público del Ministerio de Industria. Madrid.
- IGME-DGA (2010). 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 040.020 Ayamonte. 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. 26 pp.
- IGME-DPA (2012): RENATA: Recarga Natural a los acuíferos. Instituto Geológico y Minero de España, Diputación provincial de Alicante.
- IGME-CGS (1984): proyecto de investigación hidrogeológica de los sistemas acuíferos de la región suroccidental de Huelva, del Guadalete-Guadiaro y de Posadas-Bailen-Ubeda (Andalucía). Modelo matemático tridimensional de la región -suroccidental de Huelva. Sistema acuífero N°, 25. 95 pp. (Informe inédito).
- ITGE (1989): Las aguas subterráneas en España. Estudio de síntesis. 600 pp.
- ITGE-Junta de Andalucía (1998): Atlas Hidrogeológico de Andalucía. Instituto Tecnológico Geominero de España; Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía; Consejería de Trabajo e Industria de la Junta de Andalucía. ISBN: 84-7840-351-5. 215 pp.
- Junta de Andalucía (2011): Inventario y caracterización de los regadíos de Andalucía
- 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.
- Junta de Andalucía (2015): Caracterización y evaluación de la ampliación de las masas de agua subterránea Niebla y Lepe – Cartaya. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía. 200 pp. y 2 planos.
- Martín-Vide, J. (1991): Fundamentos de Climatología analítica, Madrid, Síntesis, 157 pp.
- Martín-Sosa, D. (1981): Problemática de las aguas subterráneas en la región suroccidental de la provincia de Huelva. SIAGA, 2: 717 – 730. Granada.
- MOPU-IGME (1988): Delimitación de las Unidades Hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características. Estudio 07/88, Memoria General. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Instituto Geológico y Minero de España. 122 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.
- Samper, J., García Vera, M. A. (1992). Manual de usuario del programa BALAN\_8. Dpto. Ingeniería del terreno. E. T. S. de Ingenieros de Caminos. UPC. Barcelona. España
- Samper, J., Huguet, L., García, M.A. and Ares, J. (1999). Manual del usuario del programa VISUAL-BALANCE V.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga, Technical Report for ENRESA. Universidad de A Coruña. 124 pp.
- SGOP (1988): Informe Hidrogeológico Acuífero Ayamonte-Huelva. Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas. Informe inédito.
- Témez, J. (1978): Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras, Madrid, España, 111 pp.
- Thornthwaite, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1): 55-94.
- Viguier, C (1977): Les grands traits de la tectonique du basin neogene du bas-Guadalquivir. *Boletín Geológico Minero*, 88 (1): 39 – 44.

## ANEXOS

**ANEXO I**  
**ANEXOS DEL CÓDIGO BALAN**

## CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

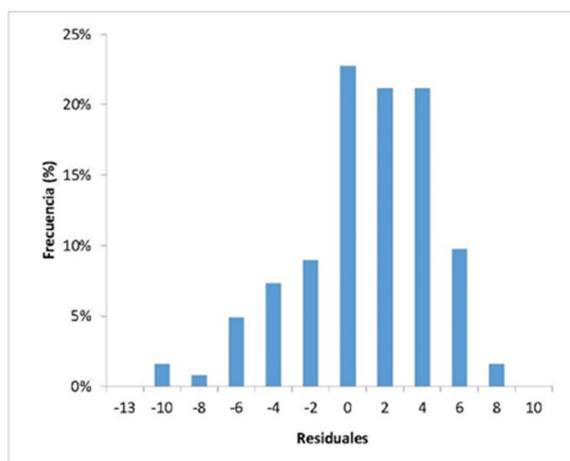
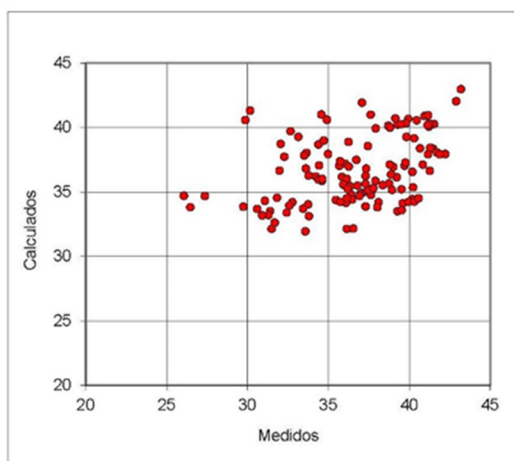
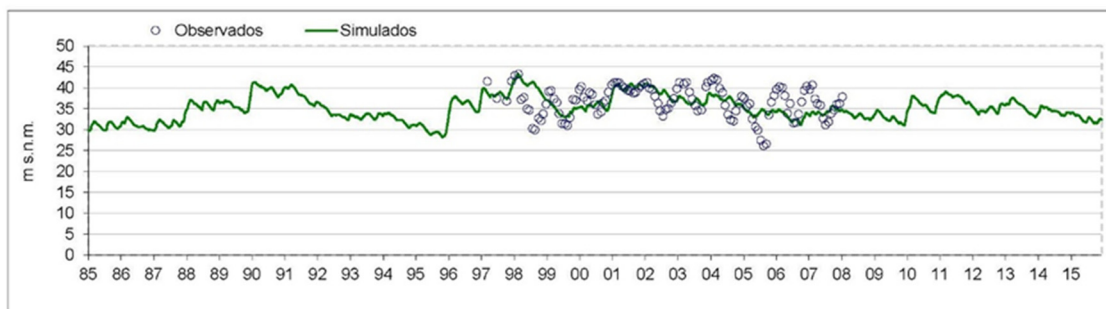
Piezómetro P 04.12.016

Ayamonte-Lepe-Cartaya

(Pest6reg)

Parámetros optimizados			
Variable	Valor	Límites intervalo 95% confianza	
Reserva útil R.U. (mm)	36.00	Límite inferior	Límite superior
Coefficiente de infiltración CIM0 (mm/d)	2.96	31.50	42.00
Coefficiente de infiltración CIM1 (mm/d)	72.3	2	4
Coefficiente de agotamiento del acuífero (días <sup>-1</sup> )	1.00E-03	7.10E-04	1.40E-03

Resultados del Balance (mm)	
Precipitación	593
Regadío	745
Evapotranspiración	626
Escurrimiento	585
Recarga	126



### Bondad de ajuste

Promedio Calculados	36.64	MAE=	2.821
Promedio Observados	36.66	ErrMax=	11.108
R2=	0.148	NSE=	0.035
RMSE=	3.568		
PBIAS=	-0.020		

### Análisis de incertidumbre

#### Matriz de coeficientes de correlación

	R.U.	cim0	cim1	alacu
Reserva útil	1	-0.1622	0.2975	-0.689
CIM0	-0.1622	1	-0.2471	0.5268
CIM1	0.2975	-0.2471	1	0.2588
Coefficiente de agotamiento del acuífero	-0.689	0.5268	0.2588	1

#### Matriz de autovectores

	Vector_1	Vector_2	Vector_3	Vector_4
Reserva útil	0.7979	0.5248	-0.2921	5.07E-02
CIM0	-0.4223	0.8377	0.341	-6.02E-02
CIM1	-0.1501	5.34E-02	-0.1447	0.9766
Coefficiente de agotamiento del acuífero	0.403	-0.1414	0.8817	0.2003

#### Autovalores

2.63E-06	1.10E-03	6.25E-03	1.65E-02
----------	----------	----------	----------

### Análisis de sensibilidad

Parámetro	Valor	Sensibilidad	Sensibilidad relativa
Reserva útil	0.24	14.45	8.88
CIM0	2.97	7.68	3.63
CIM1	72.31	2.73	5.07
Coefficiente de agotamiento del acuífero	1.00E-03	7.30	21.91



**SERIE MENSUAL DE RECARGA**Valores en hm<sup>3</sup> (superficie de recarga de 501,3 km<sup>2</sup>)

Año	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Total
1985/86	0.15	3.57	7.99	8.08	9.12	5.02	0.98	0.49	3.14	3.64	5.52	2.47	50.16
1986/87	2.56	4.31	3.51	9.75	11.25	3.73	1.40	1.68	3.96	10.21	5.88	1.02	59.26
1987/88	3.40	9.16	18.58	14.22	8.01	1.63	3.63	2.67	4.38	13.13	2.46	0.89	82.17
1988/89	2.45	14.91	5.59	5.13	5.71	5.27	5.86	1.09	3.36	4.76	2.39	3.06	59.58
1989/90	4.65	12.57	27.47	12.33	3.30	3.85	4.16	4.33	5.67	7.84	3.90	0.29	90.36
1990/91	3.61	8.34	12.79	5.62	7.58	7.15	2.43	0.52	3.67	4.80	2.14	0.88	59.53
1991/92	3.86	2.32	10.63	3.50	2.44	2.81	2.33	0.11	4.64	4.47	5.55	3.19	45.84
1992/93	3.65	2.07	9.68	4.61	3.49	4.55	2.26	8.00	8.20	5.14	2.16	1.02	54.82
1993/94	7.00	9.89	2.34	7.49	5.05	3.67	3.83	0.61	3.73	4.77	2.14	0.88	51.40
1994/95	2.01	6.95	5.00	5.52	5.63	1.69	0.15	0.49	2.37	6.09	5.61	2.40	43.93
1995/96	0.11	6.31	20.07	26.76	12.45	7.42	1.10	2.26	5.53	7.83	3.90	0.36	94.09
1996/97	0.29	3.27	18.38	21.63	2.66	0.41	5.87	3.70	8.10	7.97	3.93	1.51	77.72
1997/98	4.74	15.07	16.87	9.60	11.22	1.24	0.77	3.78	7.73	7.93	3.91	1.94	84.78
1998/99	1.03	0.55	1.02	4.70	0.77	2.75	0.82	0.60	2.74	3.62	5.52	10.21	34.34
1999/00	8.22	5.73	6.71	6.70	2.11	7.38	7.04	4.84	6.63	9.00	5.30	0.82	70.49
2000/01	0.85	6.83	18.53	18.12	7.28	7.10	0.37	5.19	9.31	9.79	4.53	3.58	91.48
2001/02	8.30	6.66	6.74	7.48	2.89	5.82	4.34	1.06	3.03	8.99	5.29	0.39	60.99
2002/03	1.41	3.66	5.25	12.24	3.35	2.37	2.18	4.25	6.13	9.96	4.96	0.44	56.19
2003/04	4.25	9.91	15.96	2.80	5.36	5.18	1.87	4.34	5.71	8.45	4.93	0.23	68.98
2004/05	2.71	5.28	4.79	0.61	2.02	3.59	0.88	5.92	6.60	9.55	5.39	0.91	48.25
2005/06	4.96	8.81	3.86	5.77	5.56	3.78	2.12	0.69	0.67	5.69	5.55	0.62	48.09
2006/07	5.72	11.65	8.84	2.24	9.51	1.89	8.37	2.47	4.02	7.93	6.11	11.42	80.17
2007/08	3.70	2.80	3.33	5.79	4.21	3.44	3.30	1.32	5.19	8.01	3.75	0.71	45.56
2008/09	5.35	2.77	7.90	10.16	7.87	1.84	0.34	2.69	3.00	8.24	4.82	0.18	55.17
2009/10	3.74	2.01	9.35	19.09	13.66	12.65	2.64	1.58	2.15	4.51	3.54	0.13	75.05
2010/11	3.26	6.03	18.21	11.33	7.68	8.60	2.62	4.30	4.95	6.53	4.34	2.91	80.78
2011/12	0.77	6.27	2.60	1.38	1.42	1.40	8.24	4.98	6.04	9.29	4.75	0.98	48.11
2012/13	3.14	15.57	4.81	6.30	4.38	12.45	5.33	1.47	3.09	3.57	1.59	0.79	62.48
2013/14	3.45	2.96	4.06	9.75	12.55	2.95	5.56	3.34	2.81	5.11	4.37	1.85	58.76
2014/15	4.09	6.82	6.36	5.38	2.76	4.04	3.07	0.28	2.55	8.22	5.53	0.24	49.34
Media	3.45	6.77	9.57	8.80	6.04	4.52	3.13	2.63	4.64	7.17	4.33	1.88	62.93

**ANEXO II**  
**BALANCES HÍDRICOS GENERADOS POR RENATA**

Total MASCH Ayamonte Lepe-Cartaya								
Fecha	Precipitación hm³	Dren hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Retorno Riego hm³	Reservas hm³
85-86	213,42	-28,81	-14,27	-9,59	-37,72	19,01	5,01	66,80
86-87	261,37	-27,52	-13,52	4,43	-45,58	18,36	5,01	59,13
87-88	403,68	-28,22	-14,21	8,41	-46,55	99,04	5,01	-22,55
88-89	309,35	-27,59	-13,69	15,90	-44,42	30,92	5,01	34,10
89-90	557,15	-31,08	-16,02	-2,41	-43,31	220,95	5,01	-130,07
90-91	261,78	-30,05	-14,95	9,45	-41,47	25,01	5,01	47,35
91-92	195,04	-28,36	-14,13	16,45	-39,79	3,70	5,01	57,26
92-93	272,23	-26,85	-13,50	18,94	-38,07	19,51	5,01	35,21
93-94	289,50	-26,54	-13,57	17,76	-36,57	44,39	5,01	10,08
94-95	167,66	-25,26	-12,71	21,53	-34,92	1,80	5,01	44,61
95-96	629,51	-29,71	-15,61	-2,26	-33,87	252,07	5,01	-171,91
96-97	452,02	-33,88	-16,99	-5,26	-31,87	166,04	5,01	-80,78
97-98	423,69	-35,64	-17,79	-3,52	-29,87	130,28	5,01	-46,86
98-99	174,57	-33,86	-16,37	5,74	-27,83	6,67	5,01	60,87
99-00	307,28	-32,35	-15,94	7,27	-25,88	52,25	5,01	10,10
00-01	517,03	-33,96	-17,63	-1,12	-23,83	159,64	5,01	-86,30
01-02	369,24	-34,76	-17,76	-1,67	-21,82	75,47	5,01	-3,39
02-03	298,52	-34,44	-16,84	0,43	-19,80	33,25	5,01	33,10
03-04	383,86	-36,39	-17,61	-8,38	-17,83	114,95	5,01	-37,87
04-05	135,49	-34,64	-16,37	-2,56	-15,70	6,60	5,01	57,84
05-06	331,60	-33,48	-15,97	-0,91	-13,61	30,56	5,01	28,98
06-07	350,84	-33,41	-16,05	-3,80	-11,47	54,18	5,01	6,49
07-08	295,11	-31,61	-15,26	-5,68	-10,28	23,18	5,01	35,48
08-09	174,76	-29,90	-14,67	-4,45	-9,34	14,83	5,01	39,01
09-10	472,28	-33,20	-16,97	-24,65	-8,43	217,32	5,01	-135,05
10-11	389,85	-34,89	-17,41	-22,71	-7,52	91,17	5,01	-12,09
11-12	140,87	-33,14	-16,33	-13,29	-6,63	0,84	5,01	63,56
12-13	299,34	-31,89	-16,34	-16,70	-5,69	68,62	5,01	-1,65
13-14	184,59	-30,19	-15,40	-10,64	-4,78	1,51	5,01	54,53
14-15	207,29	-28,87	-14,76	-7,72	-4,78	12,76	5,01	38,47
TOTAL	9468,90	-940,49	-468,64	-21,02	-739,23	1994,88	150,45	54,47
MEDIA	315,63	-31,35	-15,62	-0,70	-24,64	66,50	5,01	1,82

Total Demarcación Hidrográfica Guadiana (MASb Ayamonte)								
Fecha	Precipitación hm³	Dren hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Retorno Riego hm³	Reservas hm³
85-86	39,24	0,00	-0,06	-7,96	-28,30	4,77	1,31	21,11
86-87	45,38	0,00	-0,01	3,42	-35,37	4,93	1,31	16,42
87-88	66,41	0,00	0,04	6,68	-36,80	15,08	1,31	4,77
88-89	50,38	0,00	0,07	12,58	-35,29	4,25	1,31	9,46
89-90	108,97	0,00	0,07	-1,99	-33,90	41,46	1,31	-16,58
90-91	48,53	0,00	0,08	6,82	-32,51	5,56	1,31	9,75
91-92	40,71	0,00	0,08	12,75	-31,21	0,92	1,31	9,28
92-93	51,59	0,00	0,08	15,16	-29,72	4,71	1,31	2,96
93-94	45,67	0,00	0,08	14,37	-28,33	4,52	1,31	2,74
94-95	33,84	0,00	0,08	17,49	-26,93	0,17	1,31	3,69
95-96	110,88	0,00	0,07	-1,62	-25,48	45,22	1,31	-25,79
96-97	70,46	0,00	0,07	-5,10	-23,83	25,09	1,31	-5,74
97-98	66,61	0,00	0,07	-3,68	-22,26	15,68	1,31	0,69
98-99	34,08	0,00	0,08	3,67	-20,69	1,98	1,31	7,34
99-00	49,92	0,00	0,08	5,55	-19,17	5,56	1,31	1,10
00-01	78,42	0,00	0,08	-1,38	-17,54	20,15	1,31	-8,49
01-02	69,24	0,00	0,07	-1,98	-15,97	13,60	1,31	-3,25
02-03	59,31	0,00	0,08	-0,52	-14,40	8,23	1,31	0,51
03-04	72,60	0,00	0,07	-7,39	-12,87	20,27	1,31	-7,45
04-05	25,40	0,00	0,07	-2,99	-11,26	1,25	1,31	5,86
05-06	59,74	0,00	0,07	-1,31	-9,68	3,96	1,31	1,19
06-07	61,57	0,00	0,06	-3,46	-8,11	8,07	1,31	-2,03
07-08	65,56	0,00	0,06	-5,03	-7,26	8,32	1,31	-1,60
08-09	36,23	0,00	0,06	-4,07	-6,59	5,45	1,31	-0,03
09-10	90,59	0,00	0,02	-20,36	-5,95	42,80	1,31	-22,91
10-11	66,58	0,00	-0,03	-19,59	-5,31	15,41	1,31	1,15
11-12	27,71	0,00	-0,04	-11,66	-4,68	0,26	1,31	8,79
12-13	58,22	0,00	-0,04	-14,18	-4,02	14,74	1,31	-3,12
13-14	31,47	0,00	-0,02	-9,28	-3,38	0,00	1,31	6,24
14-15	35,12	0,00	0,00	-6,59	-3,38	0,85	1,31	3,62
TOTAL	1700,41	0,00	1,37	-31,63	-560,18	343,26	39,18	19,68
MEDIA	56,68	0,00	0,05	-1,05	-18,67	11,44	1,31	0,66

Total Demarcación Hidrográfica Tinto, Odiel y Piedras (MASb Lepe-Cartaya)								
Fecha	Precipitación hm³	Dren hm³	Ríos hm³	Nivel cte. hm³	Extracciones hm³	Infiltración hm³	Retorno Riego hm³	Reservas hm³
85-86	174,18	-28,81	-14,21	-1,63	-9,42	14,25	3,71	45,69
86-87	215,99	-27,52	-13,51	1,01	-10,21	13,43	3,71	42,71
87-88	337,27	-28,22	-14,25	1,73	-9,75	83,96	3,71	-27,32
88-89	258,98	-27,59	-13,76	3,31	-9,13	26,67	3,71	24,63
89-90	448,18	-31,08	-16,09	-0,43	-9,41	179,48	3,71	-113,49
90-91	213,24	-30,05	-15,02	2,62	-8,96	19,45	3,71	37,61
91-92	154,32	-28,36	-14,21	3,69	-8,58	2,78	3,71	47,98
92-93	220,64	-26,85	-13,58	3,78	-8,35	14,81	3,71	32,26
93-94	243,83	-26,54	-13,65	3,38	-8,24	39,87	3,71	7,34
94-95	133,82	-25,26	-12,79	4,04	-7,99	1,63	3,71	40,91
95-96	518,62	-29,71	-15,69	-0,64	-8,39	206,85	3,71	-146,13
96-97	381,57	-33,88	-17,06	-0,16	-8,04	140,95	3,71	-75,03
97-98	357,08	-35,64	-17,86	0,16	-7,61	114,59	3,71	-47,55
98-99	140,49	-33,86	-16,45	2,07	-7,14	4,69	3,71	53,53
99-00	257,36	-32,35	-16,02	1,72	-6,71	46,70	3,71	9,00
00-01	438,61	-33,96	-17,71	0,26	-6,28	139,49	3,71	-77,80
01-02	300,00	-34,76	-17,84	0,31	-5,85	61,87	3,71	-0,14
02-03	239,21	-34,44	-16,92	0,95	-5,40	25,02	3,71	32,59
03-04	311,26	-36,39	-17,68	-0,99	-4,96	94,68	3,71	-30,41
04-05	110,09	-34,64	-16,44	0,43	-4,44	5,36	3,71	51,98
05-06	271,86	-33,48	-16,04	0,39	-3,92	26,60	3,71	27,79
06-07	289,26	-33,41	-16,12	-0,33	-3,36	46,11	3,71	8,52
07-08	229,55	-31,61	-15,32	-0,65	-3,02	14,85	3,71	37,09
08-09	138,53	-29,90	-14,72	-0,38	-2,75	9,38	3,71	39,04
09-10	381,69	-33,20	-16,98	-4,29	-2,48	174,52	3,71	-112,14
10-11	323,28	-34,89	-17,37	-3,13	-2,21	75,76	3,71	-13,25
11-12	113,17	-33,14	-16,29	-1,63	-1,95	0,58	3,71	54,77
12-13	241,11	-31,89	-16,30	-2,52	-1,67	53,89	3,71	1,46
13-14	153,13	-30,19	-15,37	-1,36	-1,41	1,51	3,71	48,29
14-15	172,17	-28,87	-14,76	-1,13	-1,41	11,91	3,71	34,85
TOTAL	7768,48	-940,49	-470,01	10,61	-179,05	1651,62	111,26	34,79
MEDIA	258,95	-31,35	-15,67	0,35	-5,97	55,05	3,71	1,16